

**European Guidelines
for Soil and Water
bioengineering**

**Europäische Richtlinie
für Ingenieurbiologie**

**Directrices Europeas
de Bioingeniería
del Paisaje**

**Direttiva Europea
per l'Ingegneria
Naturalistica**

**Directrizes Europeias
de Engenharia Natural**

**Directives Européennes
pour le Génie Biologique**



**Europäische Richtlinie für
Ingenieurbiologie**

**European Guidelines for Soil and
Water bioengineering**

**Directrices Europeas de Bioingeniería
del Paisaje**

**Directrizes Europeias de Engenharia
Natural**

**Directives Européennes pour le Génie
Biologique**

**Direttiva Europea per l'Ingegneria
Naturalistica**



Edited by

Europäische Föderation für Ingenieurbiologie
Federazione Europea per l'Ingegneria Naturalistica
European Federation for Soil and Water Bioengineering
Fédération Européenne pour le Génie Biologique
Federacion Europea de Bioingenieria del Paisaje
Federação Europeia de Engenharia Natural

Vorbemerkung

Die Richtlinien für Ingenieurbioogie - zusammengestellt von allen Fachvereinigungen für Ingenieurbioogie in Europa - dienen der Verbreitung der Grundgedanken, Vorgehensweisen und positiven Effekte ingenieurbioogischer Arbeitsweisen.

Sie werden als Unterstützung der Umsetzungsziele verschiedener europäischer Richtlinien gesehen, vorrangig der EU-Wasserrahmenrichtlinie, der EU-Hochwasserschutzrichtlinie und der EU- Bodenschutzrichtlinie sowie als Instrument der Verbreitung und Standardisierung der Ingenieurbioogie.

Neben Lösungen im Erd- und Wasserbau gilt Ingenieurbioogie als eines der indirekten Instrumente der Vorsorge im Katastrophenschutz und ist mittlerweile weltweit als Softlösung bzw. nicht-traditionelle Alternative zu reinen Ingenieur-lösungen im Sturm- und Hochwasserschutz und -vorsorge anerkannt.

Preliminary remarks

The guidelines for Soil and Water Bioengineering - put together by all the european associations for Soil and Water Bioengineering - aim at disseminate the basic principles, technical and practical approaches as well as the positive effects of Soil and Water Bioengineering.

They aim at building a contribute to the upgrade and revision of different european Directives, in particular the EU Water Framework Directive, the Directive on the assessment and management of flood risks and the EU Soil Thematic Strategy. They are also aimed at being an instrument for the dissemination and standardization of Soil and Water Bioengineering.

Besides its application in the domains of Soil and Water Engineering, Bioengineering is a critical instrument for the prevention and protection of catastrophes and is already recognized worldwide as a soft or even an unconventional alternative, to the traditional Civil Engineering approaches to the prevention and solution storms and floods.

Preámbulo

Las Directrices de Bioingeniería del Paisaje - elaboradas por todas las asociaciones de Bioingeniería del Paisaje de la Unión Europea - tienen como objetivo la difusión de los principios, procedimientos y efectos positivos derivados de los trabajos con técnicas de Bioingeniería del Paisaje

Se consideran un apoyo a la implementación de las diferentes Directivas Europeas—principalmente la Directiva del Agua, la Directiva 2007/60/CE relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación y la Directiva de Protección del suelo, así como instrumento para la difusión y estandarización de la Bioingeniería del Paisaje.

Además de ofrecer soluciones para los trabajos propios de campos de la Ingeniería Hidráulica y la Ingeniería civil asociada a la geotécnica y a la mecánica de suelos, la Bioingeniería del Paisaje actúa como uno de los instrumentos indirectos para la prevención de catástrofes y es reconocida a nivel mundial como una disciplina que aporta soluciones “blandas”, es decir, como alternativa no tradicional a la ingeniería clásica para obras de protección y prevención en tempestades e inundaciones.

Notas prévias

As Directrizes de Engenharia Natural - compiladas por todas as associações técnicas de Engenharia Natural da Europa - pretendem contribuir para a divulgação dos princípios fundadores, das técnicas e práticas e dos efeitos positivos das metodologias e abordagens práticas da Engenharia Natural.

Eles pretendem constituir um apoio ao ajustamento e melhoria de diferentes Directivas europeias, particularmente da Directiva Quadro da Água, da Directiva relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações e da Directiva que estabelece um quadro para a protecção do solo, assim como constituir um instrumento de expansão e estandarização da Engenharia Natural.

Além de soluções no domínio da Engenharia Hidráulica e da Engenharia Civil associada à Geotecnia e Mecânica de Solos, a Engenharia Natural constitui um instrumento de prevenção em protecção contra catástrofes e é considerada globalmente como uma solução „leve“ ou como alternativa „não tradicional“ às soluções clássicas de Engenharia Civil nos domínios da prevenção e protecção contra tempestades e cheias.

Avant-Propos

Les Directives Européennes pour le génie biologique - rédigées par les différentes associations nationales spécialisées en génie biologique en Europe - servent à la diffusion des connaissances et des savoir-faire liés aux techniques de génie biologique.

Elles sont à considérer comme un soutien aux objectifs de transposition de diverses directives européennes, notamment la Directive-cadre sur l'eau de l'UE, la Directive sur la protection contre les inondations de l'UE et la Directive-cadre sur la protection des sols, ainsi qu'en tant qu'instrument de normalisation du génie biologique.

En plus d'offrir des solutions dans les domaines de l'aménagement hydraulique et du génie civil, le génie biologique est réputé comme l'un des instruments indirects de prévoyance contre les risques naturels. Il est en même temps reconnu dans le monde entier comme une solution souple et alternative dans les domaines de la protection et de la prévention contre les crues et les glissements de terrain.

Prefazione

Le linee guida per l'Ingegneria Naturalistica – raccolte da tutte le associazioni professionali per l'Ingegneria Naturalistica in Europa - servono la diffusione dei principi, pratiche e gli effetti positivi delle metodologie di Ingegneria Naturalistica.

Sono viste come supporto per l'attuazione degli obiettivi delle varie direttive europee, in primo luogo la direttiva europea quadro sulle acque, la direttiva sulla tutela delle acque UE e la direttiva UE sulla protezione del suolo, nonché come strumento di diffusione e standardizzazione dell'Ingegneria Naturalistica.

In aggiunta alle soluzioni sulle costruzioni in terra e l'ingegneria idraulica, l'Ingegneria Naturalistica è uno degli strumenti indiretti di prevenzione in materia di protezione delle catastrofi ed è ora riconosciuta a livello mondiale per fornire soluzioni non impattanti nonché alternative a soluzioni ingegneristiche tradizionali di protezione e prevenzione in eventi meteorici eccezionali e tutela dalle piene.

AEIP Asociación Española de Ingeniería del Paisaje

AGéBio Association Française Pour Le Génie Biologique Ou Génie Végétal

AIPIN Associazione Italiana per la Ingegneria naturalistica

APENA Associação Portuguesa de Engenharia Natural

Gesellschaft für Ingenieurbiologie in Deutschland e. V.

ÖWAV Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Arbeitsgruppe Ingenieurbiologie

Verein für Ingenieurbiologie

Januar 2015

Inhalt, Contents, Indice, Sommaire

Europäische Richtlinie für Ingenieurbiologie	5
European Guidelines for Soil and Water bioengineering	27
Directrices Europeas de Bioingeniería del Paisaje	49
Directrizes Europeias de Engenharia Natural	73
Directives Européennes pour le Génie Biologique	97
Direttiva Europea per l'Ingegneria Naturalistica	121
Literature, Bibliografia	143
Authors and collaborators of the Guidelines proposal	149

Appendix, Anhang, Appendice

Decision matrixes for Bioengineering interventions
Entscheidungsmatrix für ingenieurbiologische Maßnahmen
Matrices de decisión para intervenciones de Bioingeniería
Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural
Matrices de decision Mesures du génie biologique
Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica

Europäische Richtlinie für Ingenieurbiologie

- 1. Grundsätze ingenieurbioologischen Arbeitens**
 - 1.1 Der Begriff Ingenieurbioologie
 - 1.2 Möglichkeiten und Grenzen der Ingenieurbioologie
 - 1.3 Wirkung von Pflanzen und Pflanzenbeständen bei ingenieurbioologischen Maßnahmen
 - 1.4 Historische Entwicklung der Ingenieurbioologie und ihre Bedeutung für den europäischen Raum heute
 - 1.5 Anwendungsdisziplinen für ingenieurbioologische Lösungen
 - 1.6 Ingenieurbioologie, Naturschutz und Berufsverständnis (Deontologie)
 - 1.7 Voraussetzungen für erfolgreiche ingenieurbioologische Arbeiten
- 2. Bemessung von ingenieurbioologischen Sicherungen**
 - 2.1 Grundsätze der Bemessung von ingenieurbioologischen Sicherungen**
 - 2.1.1 Modellvorstellung ingenieurbioologischer Sicherung
 - 2.1.2 Einwirkungen auf ingenieurbioologische Sicherungen im Sinne einer Tragwerksplanung
 - 2.1.3 Vegetationseinflüsse, die die Einwirkungen reduzieren
 - 2.1.4 Widerstände der Vegetation gegen genannte Einwirkungen
 - 2.1.5 Einzelparameter zur Beschreibung von Widerständen von Pflanzenbeständen
 - 2.1.6 Vorbemerkungen zur standortgerechten Pflanzenverwendung und zur Bewertung von Standortfaktoren
 - 2.2 Einbindung der ingenieurbioologischen Bemessung in den Planungsprozess**
 - 2.3 Empfehlungen zu häufigen Anwendungsbereichen**
 - 2.3.1 Erosion auf Erdböschungen
 - 2.3.2 Oberflächennahe Rutschungen auf Böschungen
 - 2.3.3 Grabenerosion auf Hängen und Böschungen
 - 2.3.4 Ufer und Vorländer an Fließgewässern
 - 2.3.5 Ufer an stehenden Gewässern
 - 2.3.6 Deiche und Dämme
 - 2.3.7 Küstenschutz
 - 2.3.8 Wind- u. Emissionsschutzpflanzungen
 - 2.3.9 Wasserhaushaltsregelung
 - 2.3.10 Durch Feuer zerstörte Gebiete
 - 2.3.11 Pflanzen als Lawinenschutz
- 3. Ingenieurbioologische Bauweisen**
 - 3.1 Bautypenbuch der EFIB 2007
 - 3.2 Verwendung der Bautypen
 - 3.2.1 Entscheidungskriterien
 - 3.2.2 Entscheidungsmatrix
- 4. Pflege ingenieurbioologischer Bauweisen**
 - 4.1 Pflegegrundsätze
 - 4.2 Pflegeabfolge
 - 4.3 Pflegeplanung
 - 4.4 Pflegeausführung
- 5. Erfolgskontrolle ingenieurbioologischer Bauweisen**
 - 5.1 Grundsätze der Erfolgskontrolle
 - 5.2 Kontrolle des Zustandes und der Entwicklung
 - 5.3 Kontrolle der Wirksamkeit und Funktion
 - 5.4 Kontrolle der Nachhaltigkeit und Ökobilanz

1. Grundsätze ingenieurbioologischen Arbeitens

1.1 Der Begriff Ingenieurbioologie

Ingenieurbioologie ist eine technisch – biologische Disziplin, welche mithilfe von Pflanzen und Pflanzenbeständen zur Sicherung von Nutzungen und Bauwerken sowie zur Landschaftsentwicklung beiträgt.

Kennzeichen dabei ist, dass Pflanzen und Pflanzenteile als lebende Baustoffe so eingesetzt werden, dass sie im Laufe ihrer Entwicklung im Zusammenhang mit Boden und Gestein einen wesentlichen Beitrag zur dauerhaften Sicherung gegen alle Formen der Erosion leisten. In der Anfangsphase ist häufig eine Verbindung mit unbelebten Baustoffen notwendig, die in einzelnen Fällen den Hauptanteil an tragenden Funktionen übernehmen können.

Bevorzugt werden allerdings organische Materialien, da diese mit zunehmender Stabilisierung der Pflanzendecke verrotten und in den Stoffkreislauf eingehen, ebenso so wie gebietsheimische (autochthone) und standorttypische Pflanzen, da diese die landschaftsgerechte Biodiversität befördern. Planungs- und Bauziele sind Schutz und Sicherung von Nutzflächen und Infrastrukturen sowie Entwicklung von Landschaftselementen.

1.2 Möglichkeiten und Grenzen der Ingenieurbioologie

Die **Anwendungsgebiete der Ingenieurbioologie** liegen in der Sicherung von Böschungen, Hängen, Ufern, Vorländern, Deichen, Dämmen Deponien, Bergbaufolgelandschaften sowie Begleitflächen von Infrastrukturen:

- an Fließgewässern in der Sicherung von erosionsgefährdeten Ufern mit ingenieurbioologischen Techniken, Lenkung des Stromstrichs, Revitalisierung naturferner Gewässer sowie Vergrößerung der Retention in Auen und Verbesserung des Hochwasserschutzes in Bezug auf ihre ökologische Wirksamkeit, Nutzungssicherung und der Sicherung von Deichen, Dämmen und Vorländern.
- an Böschungen und Hängen in der Verhinderung von Oberflächen- und Tiefenerosion, Begrünung und Stabilisierung von Rutschungen und Abrüchen sowie der raschen als auch langfristigen Sicherung von rutschgefährdeten Hängen mittels Verankerung durch Wurzeln und Entwässerung des Bodens durch den Transpirationssog der Pflanzen.
- in der Verbesserung des lokalen und regionalen Wasserhaushalts durch geeignete ingenieurbioologische Maßnahmen, Aufforstungen und Wiederherstellung von Vegetationsbedeckungen an Hängen bis in die Hochlagen.
- an Meeres- und Seeküsten in der Befestigung von erosionsgefährdeten Ufern und der Stabilisierung von Deichen, Dünen und Vorländern.
- in Feuchtgebieten in der Schaffung geeigneter Lebensräume.
- in Bergbaufolgelandschaften und Industriebrachen in der Sicherung, Entwicklung und Begrünung von neuen Strukturen.

Der Einsatz von Pflanzen ist überall dort möglich, wo ein potenzieller Lebensraum für Vegetation besteht. **Eine schützende und stabilisierende Pflanzendecke zur Verhinderung der Erosion als Ersatz und sinnvolle Ergänzung von technischen Bauweisen ist möglich, sofern die biologisch-technischen Fähigkeiten der**

Pflanzen ausreichen. Bei der Lösungsfindung werden Fachwissen der bautechnischen Disziplinen sowie biologische und landschaftsökologische Erkenntnisse verwendet, um aus standortgerechten Pflanzen dauerhafte Vegetationsbestände zu entwickeln, die bautechnische Aufgaben erfüllen können. Neben Erosionsschutzmaßnahmen und Maßnahmen zum Ausgleich des Wasserhaushalts haben ingenieurbioologische Maßnahmen auch Auswirkungen auf das Kleinklima, die Biotopstruktur und das Landschaftsbild.

Vorteile von ingenieurbioologischen Maßnahmen gegenüber technischen Bauweisen:

- Längere und anhaltende Funktionsentwicklungskurven durch Entwicklungs- und Regenerationsfähigkeit der Pflanzen und von Pflanzengesellschaften
- Herbeiführen einer möglichst fortgeschrittenen Pflanzengesellschaft der dynamischen Vegetationsserie
- Zunahme an Stabilität mit der Entwicklung der Pflanzen
- Günstige Reaktion auf Störungen durch die natürliche Anpassungsfähigkeit von Pflanzen
- Anpassung der Pflanzen an die auf sie wirkenden Kräfte durch Elastizität, Auszugswiderstand und neue Sukzessionslinien
- Strukturierende Wirkung von Pflanzen
- Erhöhung der Biodiversität und Habitatfunktion (Ökologie)
- Verbesserung des Landschaftsbildes (Landschaftsästhetik)
- Begünstigung sozioökonomischer Faktoren (Tourismus, Naherholung)
- Maßnahmen, die kaum Eingriffe erzeugen, wenig Energie verbrauchen und die die Eigenentwicklung der Natur fördern (die man also nicht bereut - no regret).

Bei der vorrangigen Nutzung von Pflanzenmaterial regionaler Herkünfte und Wildformen statt züchterisch veränderter und gebietsfremder Herkünfte ergeben sich weitere positive Effekte:

- erfolgreiche und dauerhafte Sicherungswirkung bei optimaler Einnischung in das Ökosystem, bessere Anpassung an extreme Standortbedingungen und regionale klimatische und geologische Besonderheiten,
- höheres Potenzial zur Entwicklung naturraumtypischer Pflanzengesellschaften,
- bessere und nachhaltige Eingliederung in den Natur- und Landschaftshaushalt,
- besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis und höhere Wirtschaftlichkeit.

Im urbanen Raum zur Sicherung und zur Freiraumgestaltung können allerdings auch standortgemäße, nicht heimische Arten mit biotechnischen Eigenschaften sowie Ziergehölze und -stauden Verwendung finden.

Grenzen der Ingenieurbioologie sind dort erreicht, wo die beschriebenen Wirkungen, insbesondere die technischen Wirkungen von Pflanzen, nicht ausreichen, beispielsweise wo:

- die mechanische Beanspruchung den Widerstand von Pflanzen und Pflanzenbeständen übersteigt,

- Pflanzen nicht tief genug wurzeln, um Böschungsbrüche zu sanieren,
- die Keimungs- und Lebensbedingungen selbst mithilfe von Hilfsstoffen so schlecht sind, dass sich kaum Bewuchs entwickeln kann (bad lands).
- ungeeignete Pflege zu veränderten Standortbedingungen führt, die sich dann ungünstig auf die Sicherungen und das Abflussverhalten auswirken.

Um ingenieurbioologische Lösungen zu favorisieren, muss man sich der **Nachteile ingenieurbioologischer Lösungen gegenüber technischer Bauweisen** bewusst werden:

- Ingenieurbioologische Arbeiten sind an den Rhythmus des Pflanzenwachstums sowie die Störungsfaktoren der Pflanzenwelt gebunden.
- Häufig ist erhöhter Platzbedarf für die Entwicklung der Vegetation notwendig.
- Pflanzenwurzeln und -stämme können in Fugen von technischen Bauwerken durch ihr zunehmendes Dickenwachstum Spannungen hervorrufen.
- Das Dickenwachstum der Wurzeln kann zu Verformungen von Bauwerken führen.
- Bei großen Gehölzen kommt es zu Belastungen, die zu einem Drehmoment am Stammfuß und zu unterschiedlichen Spannungen im Bereich des Wurzel-tellers.
- In der Zugzone können Bodenauflockerungen oder Bauwerksanhebungen entstehen.
- Geotechnische Grenzen können erreicht sein.
- Eingeschränkte Berechnungsmöglichkeiten bergen noch immer Verunsicherungen.

Die ‚vermeintlichen‘ Nachteile sind häufig durch gezieltes zeitliches und räumliches Management zu kompensieren. Vielfach können weitergehende ingenieurtechnische Lösungen gefunden werden, welche die umgebende Natur mit einbeziehen.

1.3 Wirkung von Pflanzen und Pflanzenbeständen bei ingenieurbioologischen Maßnahmen

Beim Einsatz von Pflanzen im Bauwesen macht man sich die oft schon Jahrhunderte alten Beobachtungen ihrer Wirkungsweise zunutze.

Verschiedene **Eigenschaften** ermöglichen es Pflanzen, flexibel in ihrer Umwelt zu reagieren, so dass sie bei bautechnischen Aufgaben eingesetzt werden. Sie können:

- sich über unterschiedliche Wege - generativ und / oder vegetativ - fortpflanzen,
- sich nach Verletzungen und bestimmten Umweltveränderungen regenerieren,
- Wasser aus dem Boden pumpen und über ihre Oberflächen abgeben (Evapotranspiration),
- verschiedene Materialien verbinden, verzahnen und Strukturen vernetzen,
- Oberflächen abdecken,
- bewegliche Feststoffe, gelöste Stoffe und Wasser auffangen / aufhalten
- Übersättigungen durch die Bildung von Sproßwurzeln und Überstauungen ertragen,
- sich an verändernde Standortbedingungen bzw. die Strömung des Wassers anpassen.

Aus diesen Möglichkeiten ergeben sich komplexe Wirkungen von Pflanzen, die man grob in die vier

Kategorien: technische (1), ökologische (2), gestalterische (3) und ökonomische (4) Wirkungen einteilt.

Als Ergebnis ingenieurbioologischer Verbauungen sind lebende Systeme zu sehen, die sich auf dem Wege der natürlichen Sukzession, also tendenziell durch eine dynamische Selbstregelung ohne künstliche Energiezufuhr weiterentwickeln und im Gleichgewicht bleiben. Bei richtiger Wahl der lebenden und auch der nicht lebenden Baustoffe sowie der Bautypen ist eine ungewöhnlich hohe Nachhaltigkeit bei geringstem Pflegeaufwand gegeben (vgl. Kapitel 4). Es muss allerdings betont werden, dass in stark veränderten, urbanen Räumen, beispielsweise Städten, diese Ziele eine spezielle Pflege erfordern.

1.3.1 Technische Wirkungen

Von den technischen Wirkungen, die für die Ingenieurbioologie und die Sicherungsleistungen der Pflanzen im Vordergrund stehen, sind die folgenden von besonderer Bedeutung:

- Abdeckung des Bodens durch Pflanzenbestände zum Schutz gegen Starkniederschläge, Bodenerosion durch Wasser und Wind, Schneeschurf und Steinschlag.
- Mechanische Anker- und Dübelwirkung der Wurzeln.
- Bindung und Festigung des Bodens durch Umschließen von Bodenpartikeln mithilfe von Pflanzenwurzeln, Verkleben von Bodenpartikeln durch Huminstoffe, Mykorrhizen und die Mikrofauna, Verzahnen oder Verankern des Oberbodens mit dem Unterboden, Verhindern von Ausspülungen von Feinmaterial durch Filterwirkung.
- Aufrauen des Geländes durch Triebe, Zweige und Blätter sowie Rückhalt von Schutt, Geröll und Schneemassen.
- Abbremsen und Ablenken von Luft- und Wasserströmungen.
- Wirkungen im Wurzelraum, insbesondere Sprengwirkung durch das Dickenwachstum der Wurzeln, Bodenauflockerung bei Bewegung des Wurzel-tellers und Bodenverdichtung bei Neigung im Bereich des Wurzel-tellers.
- Erhöhung der Kohäsion und des inneren Zusammenhalts durch Wasserentzug aus den Boden
- Günstige Beeinflussung des Wasserhaushalts durch Verdunsten von Bodenwasser, Rückhalten von Niederschlagswasser, Rückhalten von Bodenwasser und ausgeglichene Wasserversickerung.

1.3.2 Ökologische Wirkungen

Verbesserungen der Umweltqualität sind durch ingenieurbioologische Maßnahmen wie folgt zu erwarten:

- Positive Wirkungen auf die Bodeneigenschaften wie Erhöhen des Porenvolumens sowie Verbessern der Lebensbedingungen für Mikroorganismen und Bilden von Humus und Pflanzennährstoffen.
- Entwicklung von Pflanzengesellschaften (Sukzession) und Verbesserung der Biotopstrukturen.
- Lebensraum für Fauna.
- Aufnahme und Festlegung eutrophierender und teilweise giftiger Substanzen.
- Günstige Veränderung des jeweiligen Kleinklimas
- Absorption von Lärm in geringem Ausmaß.

- Filtern von Stäuben aus der Luft, Abgasen und Ablagerungen auf Pflanzenteilen.

1.3.3 Ästhetische Wirkungen

Schäden im Landschaftsbild können mit ingenieurbiologischen Bauweisen naturnah saniert werden:

- Pflanzen und Pflanzengruppen lockern das Landschaftsbild auf.
- Ersatz technischer Bauwerke durch Vegetationsbestände, wenn ihre Wirkung vergleichbare Stabilität gewährleistet.
- Rasche Eingliederung von Erdbauwerken in benachbarte Vegetationsbestände und somit in das Landschaftsbild.
- Optische Einfügung rein technischer Bauwerke in die Umgebung durch Verwendung landschaftsangepasste Vegetation.
- Einrahmung und Betonung von Bauwerken.
- Sichtschutz auf sonst massiv wirkende Ingenieurbauwerke.

Der Einsatz der Ingenieurbiologie trägt somit zur Verminderung visueller Störungen des Landschaftsbildes bei. Ingenieurbauten lassen sich dadurch umweltverträglicher gestalten.

1.3.4 Ökonomische Wirkungen

Angewandte Ingenieurbiologie trägt durch die Kenntnis und den entsprechenden Einsatz lebendiger Kräfte der Natur dazu bei, vegetationslose Flächen mit geringem Material- und Energieaufwand zu rekultivieren.

Damit leistet die Ingenieurbiologie einen erheblichen Beitrag zur Umsetzung des Nachhaltigkeitsgebotes im Bauwesen:

- Mit Hilfe vieler bewährter, heute großteils maschinell durchgeführter Lebendbauweisen können häufig Kosten im Vergleich zur Realisierung rein tiefbautechnischer Maßnahmen eingespart werden, beispielsweise durch die Verwendung von vegetativ vermehrbaren Pflanzenteilen.
- Durch Verwendung von nachwachsenden Baustoffen und damit Reduktion des Materialaufwands, auch wenn höhere Lohnkosten dem gegenüberstehen.
- Durch sinnvolle Wiederverwendung von Pflanzenmaterial, Erden und Steinen durch örtlich angepasste Planung mit geringem Massentransport und niedrigen Fahrtkosten.
- Bedingt durch die besonderen Eigenschaften der lebenden Pflanzen können auch die Unterhaltungskosten ingenieurbiologischer Bauwerke niedrig gehalten werden.
- Beim Auftreten von Schadstellen an ingenieurbiologischen Bauwerken ergeben sich häufig durch die Regenerationsfähigkeit der eingesetzten Vegetation nur geringe Sanierungskosten.
- Sozioökonomische Faktoren (z. B. Tourismus im Hochgebirge, Naherholung)

1.4 Historische Entwicklung der Ingenieurbiologie und ihre Bedeutung für den europäischen Raum heute

Der ingenieurbiologische Grundgedanke erlaubt die Schaffung von Synergien zwischen menschlichen Nutzungen der Landschaft und den Belangen der Natur. Die Gedankenstruktur der Ingenieurbiologie wurde in Europa geboren, höchstwahrscheinlich, weil der

Nutzungsdruck in Europa durch die dichte Besiedlung und ihre alte Nutzungsgeschichte besonders hoch ist.

Seit Jahrhunderten sind Sicherungsbauweisen unter Verwendung lebender Pflanzen und Pflanzenteile im Wasser- und Erdbau bekannt. Aus diesen ursprünglich handwerklichen Sicherungsarbeiten hat sich die Ingenieurbiologie inzwischen zu einer komplexen anwendungsorientierten Wissenschaft entwickelt. Dazu haben beigetragen:

- Nutzung der Erkenntnisse der Landschaftsökologie zur vertieften regionalen Betrachtung der Naturräume
- die Auswertung der Zeigerwirkung bestimmter Pflanzen zur Beurteilung eines Standortes und ihres Einsatzpotentials
- der Einsatz der für die jeweiligen Standorte und Naturräume geeigneten Baustoffe,
- die Nutzung der maschinentechnischen Entwicklung für Lebendbauweisen,
- die Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen mit bestimmter Zielrichtung,
- die wissenschaftliche Auswertung der erreichten Ergebnisse,
- verstärkte Verwendung gebietsheimischer Pflanzenarten, Pflanzenherkünfte und Naturbaustoffe, zur Erfüllung des Naturschutzgedankens bei Baumaßnahmen sowie zur Verbesserung von Gewässer- und Biotopstrukturen,
- Verzicht auf Dünger und bestimmte Begrünungshilfsstoffe, wenn hierdurch Gewässer und Schutzgebiete beeinträchtigt werden können.
- Moderne naturverträgliche Bauhilfsstoffe.

Neben dem auch weiterhin bestehenden Bedarf an Böschungssicherungen im Verkehrswegebau, an der Küste und im Wasserbau ergeben sich für die Zukunft neue Herausforderungen:

- Klimawandel und Extremwetterereignisse führen zu zunehmenden Erosionsproblemen, beispielsweise bei der Hochwasser- und Permafrostproblematik. Hier bietet die Ingenieurbiologie Lösungen.
- Bei Störungen im aktuellen Wasserhaushalt und veränderten Abflussbedingungen durch extreme Niederschlagsereignisse und veränderte Regenperioden tragen ingenieurbiologische Maßnahmen zur Minderung bei.
- Der Einsatz ingenieurbiologischer Bauweisen mildert Desertifikations- und Degradierungsvorgänge.
- Eine schützende Vegetationsdecke, erreicht durch den Einsatz artenreicher Pflanzensamensetzungen mit standortgerechten und herkunftsgetreuen Arten, tragen zur Sicherung und Erhöhung der Biodiversität bei.
- Geringer Energie- und Materialverbrauch und die Verwendung nachwachsender Rohstoffe bei ingenieurbiologischen Bauweisen bedeutet positiven Ressourceneinsatz.
- Vermehrte Pflanzung von Gehölzen trägt zur Bindung von CO₂ bei.
- Erfüllung der Vorgaben des Protokolls von Kyoto, des Abkommens von Rio, der Europäischen Bodenschutzrichtlinien sowie die Erreichung der Ziele der EU WRRL durch Retentionswirkung und Vernetzung von Lebensräumen.

Ingenieurbioologische Denkansätze fördern insgesamt das Umweltbewusstsein und eine neue Baukultur.

1.5 Anwendungsdisziplinen für ingenieurbioologische Lösungen

Heute werden ingenieurbioologische Bauweisen bei allen wesentlichen Sicherungsarbeiten in vielen Disziplinen eingesetzt. Hierzu gehören:

- Landschaftsbau
- Kulturwasserbau
- Agrarordnung
- Flussbau, Wasserbau
- Küstenschutz
- Wildbach- und Lawinerverbauung
- Industrierwasserbau
- Bergbau
- Gewinnung von Steinen und Erden
- Siedlungswasserbau
- Abfallwirtschaft
- Sport- und Freizeitanlagenbau
- Straßen-, Eisenbahn- und Flugplatzbau
- Land- und forstwirtschaftlicher Wegebau
- Fuß-, Rad- und Reitwegebau
- sonstiger Tiefbau

Darüber hinaus wird ingenieurbioologisches Grundwissen in der Geotechnik, im Wasserbau und im Hochbau angewandt.

Folgende Berufssparten setzen ihr Wissen auf Grund der Ausbildung und ihre Fertigkeiten bei der Umsetzung ingenieurbioologischer Maßnahmen ein, siehe Tabelle S. 8

1.6 Ingenieurbioologie, Naturschutz und Berufsverständnis (Deontologie)

Die Ingenieurbioologie kann wesentlich an der Verbesserung der ökologischen Verhältnisse in Lebensräumen gemäß der EU Wasserrahmenrichtlinie, der Hochwasserschutzrichtlinie, der Bodenschutzrichtlinie sowie anderer Richtlinien (z.B. zum Arten- und Biotopschutz, zur Erhaltung der Umweltqualität) mitwirken und mit ihren Möglichkeiten zur Wiederherstellung eines naturnahen Zustandes von gestörten Flächen beitragen. Ingenieurbioologische Arbeiten bedeuten Nachhaltigkeit.

Der Schutz der Natur ist stets ein zu erstrebendes Ziel ingenieurbioologischer Maßnahmen, obwohl - zumindest bei Sicherungsarbeiten - die Gewährleistung einer Nutzung oder eines Nutzungsanspruches im Vordergrund steht.

Allerdings kann es zwischen Ingenieurbioologie und Naturschutz auch zu Konflikten kommen. Gehen die Belange des Naturschutzes dem Range nach vor, so kann der Einsatz ingenieurbioologischer Bauweisen abgelehnt werden, weil hierdurch naturnahe Entwicklungsvorgänge gestört und naturnahe Geländeformen verändert würden. Die Auswahl der Pflanzen unter Berücksichtigung ihrer Pioniereigenschaften und die Werbung bodenständiger Pflanzen in der offenen Landschaft können nicht ausschließlich nach den Kriterien des Naturschutzes vorgenommen werden.

Wie in allen Ingenieurdisziplinen gilt auch für die Ingenieurbioologie, dass Erfahrung, Wissen und beruflicher Sachverstand dazu genutzt werden, Ressourcen

optimal und sparsam einzusetzen sowie die Verhältnismäßigkeit der Mittel zu wahren.

Das Berufsverständnis in der Ingenieurbioologie ist so, dass das Gesetz des geringsten Energieaufwandes in der Planung von Maßnahmen angewendet wird: 'soviel wie nötig aber so wenig wie möglich'. Diesem Grundsatz fühlt sich die Ingenieurbioologie verpflichtet (Deontologische Richtlinie – Berufsethik).

1.7 Voraussetzungen für erfolgreiche ingenieurbioologische Arbeiten

Erfolgreiche ingenieurbioologische Arbeiten sind bisher dort entstanden, wo die zum Gelingen des Projektes notwendigen Fachdisziplinen beteiligt waren und diese interdisziplinär eng zusammen gearbeitet haben. Deshalb sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Abschätzung der Sicherungsleistung: kann überhaupt mit ingenieurbioologischen Mitteln gearbeitet werden?,
- Sorgfältige Prüfung der Naturraum- und Standortverhältnisse wie des kleinklimatischen Charakters der Eingriffsoberfläche, Analyse des Bodensubstrats mit Augenmerk auf die chemischen, physikalischen und hydrologischen Eigenschaften des Bodens,
- Beurteilung der Lichtverhältnisse,
- Nutzung des Basiswissens über die Flora und die Phytosoziologie,
- Darlegung der Bewertungsgrundlagen und Nachprüfung der hydrologischen, hydraulischen, geomechanischen und geotechnischen Daten im Hinblick auf die Fragestellung (vgl. EFIB-Richtlinie Kapitel 2),
- Bewertung der möglichen Wechselwirkungen mit der bestehenden Infrastruktur,
- Betrachtung der Möglichkeiten zur Standortverbesserung,
- Festlegung der angestrebten Zielvegetation, und mit welchen Pionierpflanzen sowie weiteren Sukzessionsphasen und Pflegemaßnahmen ist diese zu erreichen,
- Betrachtung von Referenzstrecken in gleichen oder ähnlichen Naturräumen
- Beachtung der Regeln der Technik (Normen, Richtlinien, Handbücher der entsprechenden Fachgebiete),
- Festlegung von Pflege und Erfolgskontrolle (vgl. Kapitel 4 und 5).

In Europa sollte bei der Planung und Ausführung ingenieurbioologischer Bauweisen das EFIB Bautypenbuch (ZEH 2007) verwendet werden. In diesem Buch sind die Berufserfahrungen zahlreicher Fachkollegen und -kolleginnen enthalten. Es kann wesentlich zur einheitlichen Bezeichnung der Bautypen in Europa beitragen (vgl. Kapitel 3).

Bei allen ingenieurbioologischen Arbeiten (das Aufteilen von Planungsaufgaben in Schwierigkeitskategorien I – III entspricht der EN DIN 1054 Geotechnik - EC 7), müssen die Gesetze und Regeln der Technik des jeweiligen Landes eingehalten werden (z. B. die Unfallverhütungsvorschriften). Außerdem fordert der jeweilige Projektträger die Einhaltung seiner spezifischen Vorschriften. Dadurch können sich auch bei gleicher Problemstellung und gleichen Standortbedingungen in den unterschiedlichen europäischen Ländern verschiedene Lösungen ergeben.

Berufsgruppe	Fachwissen im Hinblick auf Ingenieurbiologie	Fertigkeiten bei der Projektumsetzung
Botanik	Pflanzensoziologie Geobotanik	Vegetationsaufnahmen als Planungsgrundlagen, Pflanzenkontrolle, Qualitätssicherung und Erfolgskontrolle, Monitoring der Vegetationsentwicklung
Geowissenschaften	Bodenkunde, Melioration, Mechanismen der Erosion, Ufer- und Küstenschutz, Klima und Mikroklima	Geowissenschaftliche Gutachten, Bodenschutz
Gartenbauingenieurwesen	Boden, Düngung, Bodenverbesserung, Pflanzen Pflanzverfahren	Pflanzenansiedlung und Pflege Erfolgskontrolle Begrünung
Agraringenieurwesen	Boden, Düngung, Bodenverbesserung, Pflanzen Saatverfahren	Pflanzenansiedlung und Pflege Krautvegetation, Erfolgskontrolle Ansaat
Forstingenieurwesen	Boden, Düngung, Bodenverbesserung, Pflanzen Waldbau, Holzeinschlag, Holzlieferung	Aufforstung, Schutzwaldpflege, Wildbachverbauung, Böschungssicherung im Forstwegebau, Erfolgskontrolle Aufforstung
Garten- und Landschaftsbau, Begrünungsunternehmen	kleiner Erd- und Wasserbau, Standort- u. Bodenbearbeitung, Pflanzenansiedlung	Entwurf, Bau u. Pflege ingenieurbiologischer Maßnahmen
Landschaftsarchitektur/ Landschaftsplanung	Planungsprozess, Rahmenpläne, Objektplanung, Umweltverträglichkeitsprüfungen, Landschaftspflegerische Begleitpläne, Flora-Fauna-Habitat- Verträglichkeitsprüfungen, kleiner Erd- und Wasserbau, Standort- u. Bodenbearbeitung, Pflanzenansiedlung	Rahmenpläne, Objektplanung, Bauüberwachung, Entwurf ingenieurbiologischer Maßnahmen
Wasserbauingenieurwesen, Flussbau, Wildbachbauung, Küstenschutz	Schutzwasserbau, Hydrotechnik, Hydraulik, Standsicherheit, Bautechnik, Rahmenpläne, Objektplanung, Ausführung	Rahmenpläne, Fachgutachten, Hydrotechnik, Machbarkeit, Objektplanung, Bauüberwachung, Ausführung Erfolgskontrolle Wasserwirtschaft
Ingenieurwesen Verkehrswegebau	Verkehrswegebau, Bautechnik, Erdbau, Entwässerung, Standsicherheit, Rahmenpläne, Objektplanung, Ausführung	Rahmenpläne, Objektplanung, Bauüberwachung, Ausführung,
Bergbauingenieurwesen	Geotechnik, Bautechnik, Verfahrenstechnik, Rahmenplan, Betriebsplan, Objektplanung	Rahmenpläne, Objektplanung, Bauüberwachung, Ausführung
Geotechnik	Scherfestigkeit, Standsicherheit	Gutachten, Machbarkeit, Geländegestaltung, Böschungs- und Hangsicherung, Sanierungsplanung, geotechnische Erfolgskontrolle
Kulturbauingenieur / Vermessungsingenieurwesen	Kulturbauingenieur, Melioration, Wegebau, Bodenkunde, Landwirtschaft, Hydrotechnik	Rahmenpläne, Meliorationsmaßnahmen, Wegebau, Agrarstrukturen, Objektplanung, Bauüberwachung, Ausführung, meliorationstechnische Erfolgskontrolle

2. Bemessung von ingenieurb biologischen Sicherungen

2.1 Grundsätze der Bemessung von ingenieurb biologischen Sicherungen

Nach DIN 1055-100 und WETZELL 2006 muss ein Bauwerk so entworfen und ausgeführt werden, dass es alle während der Errichtung und planmäßigen Nutzung möglicherweise auftretenden Einwirkungen und Einflüsse mit angemessener Zuverlässigkeit und Sicherheit trägt, ohne zu versagen oder unzulässige Verformungen zu erleiden. Während der vorgesehenen Nutzungsdauer muss das Bauwerk seine Tragfähigkeit, Gebrauchsfähigkeit und Dauerhaftigkeit bei angemessenem Unterhaltungsaufwand behalten.

In der Tragwerksplanung wird das Bauwerk nach Erfahrungswerten entworfen und für die statische Untersuchung und Bemessung modellhaft abstrahiert, d.h. auf wesentliche Abmessungen und physikalische Eigenschaften reduziert. Dieses Modell wird durch ständige (g) oder veränderliche (q) Einwirkungen (S) belastet. Bei den Einwirkungen werden aus natur- und ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen charakteristische Werte (Index k) S_k ermittelt. Durch Multiplikation mit einem speziellem Teilsicherheitsbeiwert γ_x wird der Bemessungswert (Index d) für die Einwirkung gebildet.

$$S_{d,x} = S_{k,x} \times \gamma_x$$

Das Bauwerk oder Bauteil bietet einen Widerstand (R), der sich aus den naturwissenschaftlich bekannten Eigenschaften herleiten lässt, (Index k) also R_k . Durch Division mit einem zugehörigen Teilsicherheitsbeiwert γ_i entsteht der Bemessungswert für den Widerstand R_d .

$$R_{d,i} = R_{k,i} / \gamma_i$$

Zur Bemessung werden folgende Situationen untersucht:

Lastfall 1: Ständige oder häufig vorkommende Bemessungssituation – Regelfall.

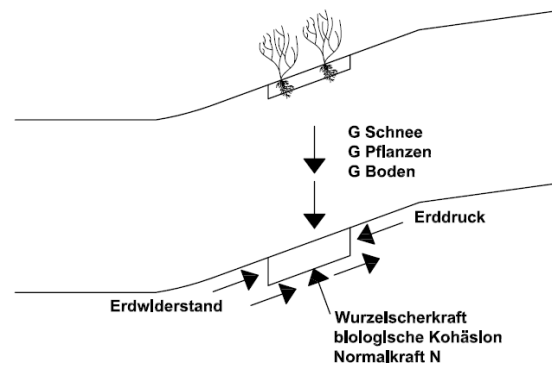
Lastfall 2: Seltene Kombination von Ereignissen, bzw. vorübergehende Situation, häufig der Bauzustand, in der Ingenieurbilogie kann auch die Anfangssituation mit Sicherungsbauweisen ohne oder mit reduzierter Wirkung der Vegetation so gewertet werden.

Lastfall 3: Außergewöhnliche Bemessungssituation

2.1.1 Modellvorstellung ingenieurb biologischer Sicherungen

Analog zur Tragwerksplanung wird das betrachtete Bauwerk oder Bauteil durch einen geschlossenen Schnitt definiert (GROSS u.a.2006). Dieser kann sowohl das gesamte ingenieurb biologische Deckwerk (Vegetation + durchwurzelter bzw. biologisch beeinflusster Boden) freischneiden. Oder es werden für die Untersuchung interessante Teilbereiche ausgeschnitten.

Das Sicherungselement wird ins Gleichgewicht gesetzt, indem sowohl alle Einwirkungen als auch alle Widerstände an den Schnittfugen konsequent als äußere Kräfte angesetzt werden.



Abstraktion einer ingenieurb biologischen Sicherung zu einem einfachen Tragwerksmodell

2.1.2 Einwirkungen auf ingenieurb biologische Sicherungen im Sinne einer Tragwerksplanung

Eigengewicht einer Deckschicht aus Vegetation und Vegetationstragschicht

Das Eigengewicht setzt sich aus dem Gewicht der oberirdischen Vegetationsmasse und dem Gewicht der Vegetationstragschicht zusammen. Hinweise zur Wichte des Bodens $\gamma' \left[\frac{kN}{m^3} \right]$ finden sich in bautechnischen Tabellenwerken z.B. DIN 1055. zum flächenbezogenes Gewicht von Vegetation z.B. in FLL 2008.

Schnee

Schnee wirkt als Einwirkung auf Erdböschungen. Er wirkt als Auflast und führt ggf. zu Erosionen oder Böschungsrutschungen. Bei der Ermittlung wird auf regionale Erfahrungen zurückgegriffen.

Wind

Windeinwirkungen sind abhängig vom Naturraum und Geländeform. Für Deutschland finden sich Bemessungsansätze in der DIN 1055 Teil 4. Hinweise zum Strömungsansatz der Vegetation finden sich in der Fachliteratur zur Baumstatik z.B. SINN 1988 oder WESSOLLY und ERB 1998.

Tropfen- und Hagelschlag

Tropfenschlag stellt eine wichtige Einwirkung für Erosionsschutzbetrachtungen auf vegetationsfreien oder teilweise bewachsenen Bodenflächen dar. Physikalische Erläuterungen und Kenngrößen finden sich bei MORGAN 1999. Die Einstufung des Niederschlagsereignisses sollte an Hand ihrer Wiederholungshäufigkeit nach Wetterstatistiken z.B. KOSTRA Atlas des DWD 1997 erfolgen.

Dezentrale Oberflächenabflüsse auf Böschungen

Bei Starkregen entstehen Erosionen sowohl durch Tropfenschlag, als auch durch dezentrale Oberflächenabflüsse. Diese sind abhängig von der Intensität des Niederschlages, der Durchlässigkeit des Bodens, Hangneigung und Hanglänge sowie Einflüsse der Vegetation. Hinweise finden sich bei MORGAN 1999, DVWK 1996 und KOSTRA ATLAS des DWD 1997.

Einwirkungen durch Weidevieh und Wild

Einwirkungen durch Weidevieh und Wild müssen vor Ort erfasst und durch geeignete Schutzmaßnahmen reduziert werden.

Einwirkungen durch menschliche Nutzung

Einwirkungen durch Skifahren, Rodeln, Motorcross, Mountainbiken auf Hängen sowie Schiffswellen und Badebetrieb an Ufern müssen vor Ort erfasst und bewertet werden.

Einwirkungen aus Wasserströmungen

Wasserströmungen sowohl in Rillen, Rinnen und Gräben auf Böschungen und Hängen als auch in Fließgewässern und Kanälen führen zu Erosion und Bodenverlagerungen. Für Erosionsschutzbetrachtungen ist der Bewegungsbeginn von Bedeutung. In der wasserbaulichen Fachliteratur wird die Einwirkung durch Wasserströmungen durch die Schleppspannung τ_0 [N/m^2] und durch die Fließgeschwindigkeit v [m/s] gekennzeichnet. In der Regel stehen aus eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnungen nur mittlere Werte für einen Fließquerschnitt zur Verfügung, denen nach SCHROEDER und ROEMISCH 2001 Verstärkungsbeiwerte zugeordnet werden. Für breite Gewässer oder Auenabflüsse sind Kennwerte sinnvoll, die aus zweidimensionalen Abflussberechnungen ermittelt werden.

Die charakteristischen Werte der Einwirkungen sind stark abhängig von der Wahl der Wiederholungshäufigkeit eines Bemessungshochwassers. Für untergeordnete Ufersicherungen z.B. in Ackerbaugebieten und Gartenland kann ein 5-jährliches Hochwasser ausreichen; Für wichtige Verkehrswege und Gebäude sollte z.B. ein 100-jährliches Ereignis zu Grunde gelegt werden (vgl. DIN 19661 Teil 1).

Wellenschlag

Wellenschlag entsteht durch das Auftreten von Wellen auf ein Ufer eines großen Stillgewässers, breiten Fließgewässers, einer Meeresbucht oder eines Schiffsfahrweges. Der Wellenschlag ist im Wesentlichen abhängig von der Wellenhöhe und der Uferform, sowie Rauigkeitseinflüssen z.B. durch Vegetation. Die Höhe natürlicher Wellen ist abhängig von der Windstärke, Dauer und Entwicklungslänge der Welle. Schiffswellen sind abhängig von der Schiffsgröße, Geschwindigkeit und Entfernung vom Ufer. Genauere Hinweise finden sich in der speziellen Literatur für Küstenschutz und Wasserstraßen.

Schurf durch Treibzeug und Treibeis

Sowohl Hochwasserströmungen in Fließgewässern als auch Wellenbelastungen treten häufig zusammen mit Treibzeug und ggf. Treibeis auf. Für ingenieurbio-logische Ufersicherungen ist die Betrachtung der Kombinationswirkung von erheblicher Bedeutung. Die Bewertung erfolgt an Hand örtlicher Erfahrungen.

Aktiver Erddruck

Bei steilen Böschungssicherungen kann aktiver Erddruck in geringem Umfang als Einwirkung auftreten. Er kann nach den geotechnischen Regeln ermittelt werden, z.B. SCHMIDT 2006, DIN 4085.

Wasserdruck und Auftrieb

Auf Böschungs- und Ufersicherungen können Wasserdruck und Auftrieb in unterschiedlicher Größe wirken. Maßgeblich für die Wasserdruckermittlung sind ungünstige Kombinationen von hohen Grundwasserständen mit niedrigen Wasserständen im Gewässer. Dieser Wasserstandsunterschied sollte eine angemessene Wiederholungshäufigkeit haben.

2.1.3 Vegetationseinflüsse, die die Einwirkungen reduzieren

Reduzierung der Einwirkungen aus Wasserströmungen durch ingenieurbio-logische Maßnahmen im Einzugsgebiet

In kleinen Einzugsgebieten hat die Vegetationsstruktur und Vegetationsdeckung einen deutlichen Einfluss auf den Spitzenabfluss einer Hochwasserwelle und auf deren Anlaufgeschwindigkeit. Eine geeignete Begrünung des problematischen Einzugsgebiets trägt bei Grabenerosion oder Tiefenerosion kleiner Bergbäche deutlich und nachweisbar zur Senkung der Spitzenabflüsse und der davon abhängigen Fließgeschwindigkeiten und Schleppspannungen bei.

Reduzierung der Einwirkungen aus Wasserdruck und Abtrieb durch ingenieurbio-logische Maßnahmen im Einzugsgebiet

Auf Böschungen und Hängen hat die Vegetation über die Evapotranspiration einen deutlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt der Böschung und beeinflusst darüber auch Häufigkeit und Stärke von Sickerwasser und Wasserdruck am Hangfuß. Eine projektbezogene Prognose der Wirkung ist z.Zt. sehr schwierig. Eher ist es umgekehrt so, dass Rutschungen nach Kahlschlägen das Problem deutlich machen.

Reduzierung der Einwirkungen aus Tropfenschlag, Hagelschlag und Starkwind durch abschirmende Gehölzbestände

Die Einwirkungen durch Tropfenschlag, Hagelschlag oder Starkwind auf vegetationsfreie Rohböden sind bei einer Überschildung oder Abschirmung durch Gehölze deutlich geringe als im Offenland.

2.1.4 Widerstände der Vegetation gegen genannte Einwirkungen

Im Sinne dieser Betrachtung werden[^], wie unter 2.1.1 erklärt, Pflanzenbestände und die durchwurzelten und anderweitig biologisch beeinflussten Bodenbereiche (Bodenpilze, Gele) als Einheit verstanden und für statische Betrachtungen insgesamt oder in definierten Teilen aus ihrer Umgebung herausgeschnitten.

Widerstand gegen Tropfenschlag und dezentralen Oberflächenabfluss mit der Folge von Flächen- und Rillenerosion

Die Erfahrungen in Mitteleuropa zeigen, dass eine vollständige Vegetationsbedeckung einen guten Erosionsschutz gegen Tropfenschlag und dezentralen Oberflächenabfluss bietet. Die Deckung ist nur für erosionsanfällige Böden erforderlich und gilt nicht für Felsbereiche oder Steine.

Zur Vegetationsbedeckung zählen die oberirdischen Pflanzenteile der Krautschicht, einschließlich oberflächlicher Wurzelwerke und abgestorbener Pflanzenteile, die

noch an Stängeln und Wurzeln hängen. Als Kriterium für die Abnahme einer Rasenansaat gibt die DIN 18917 eine Flächendeckung von 50 % an.

Widerstand gegen Rinnenerosion bei Oberflächenabflüssen

Die auf Hängen in Abhängigkeit von Hanglinie, Neigung, Bodenarten und Niederschlagshäufigkeit und -intensität auftretende, leichte Abflusskonzentration am Unterhang, führt zur Rinnenbildung von 0,10 – 0,40 m Tiefe. Eine derartige Rinnenbildung kann durch eine Kombination von standortheimischen Sträuchern und ggf. Bäumen mit einer flächendeckenden Bodenvegetation saniert werden. Wichtig ist eine flächendeckende robuste Krautschicht in der Rinnensohle und / oder eine ausreichend starke Durch- und Unterwurzelung der Rinnensohle mit einem hohen Gesamtdeckungsgrad.

Widerstand gegen Wasserströmungen

Für den Widerstand der Vegetation gegen Wasserströmungen in Gräben und Fließgewässern werden in der Literatur sowohl kritische Schleppspannungen τ_{crit} (N/m²) als auch kritische mittlere Fließgeschwindigkeiten v_{crit} (m/s) genannt. Die Werte gelten für gleichförmige Strömungsverhältnisse ohne Geschiebeführung unter der Voraussetzung, dass die Randbereiche der ingenieurb biologischen Sicherung, z. B. an Ufern der Böschungsfuß, ausreichend vor Erosion geschützt sind. Werte der kritischen Schleppspannungen und Fließgeschwindigkeiten finden sich bei DIN 19661 Teil 2, GERSTGASER 1998, RAUCH 2006 und JOHANNSEN 1997 und 2008.

In geschiebeführenden Erosionsgräben können dichte Strauchbestände im Graben die Strömung so stark abbremsen, dass es statt zur Erosion zur Ablagerung von Grobgeschiebe kommt. Hierzu ist dauerhaft in der Rinnensohle eine hohe Astdichte erforderlich.

Rasen- und Fließgewässerröhrichte erreichen die angegebenen Werte bei vollständiger Deckung durch lebende und abgestorbene Blätter, Halme und oberflächennahes Wurzelwerk.

Bei Ufergehölzen aus Bäumen wird die Wirkung durch eine Kombination von Abflussbremsung und Bodendurchwurzelung erreicht. Neben der Verwendung von zulässigen Parametern aus der Fachliteratur kann der Erosionswiderstand von Pflanzenbeständen auch aus Referenzstrecken im Naturraum abgeleitet werden.

Der Erosionswiderstand von Pflanzen an Gewässern ist stark von der Vegetationszone abhängig. Diese Zonen und die dort vorkommenden Pflanzen sind in den unterschiedlichen Naturräumen Europas sehr verschieden. Als grobe Anhaltswerte können dienen:

Vegetationsstrukturen	τ_{crit} (N/m²)	v_{crit} (m/s)
Weidenbüsch	200	2,5
Ufergaleriewald	100	2,0
Fließgewässerröhricht	50	1,5
Rasen, kurze Zeit überströmt	30	1,5
Rasen, lange Zeit überströmt	15	1,5

Mit dem Strömungswiderstand bei Ingenieurb biologischen Ufersicherungen durch Gehölze ist eine z.T. erhebliche Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit verbunden. Dies muss im wasserbaulichen Entwurf z.B. durch Profilaufweitungen berücksichtigt werden und/oder bei der späteren Gewässerunterhaltung muss die geforderte hydraulische Leistungsfähigkeit erhalten werden.

Widerstand gegen Wellenschlag

Der Widerstand gegen Wellenschlag ist zum einen davon abhängig, wie rau die Oberflächenstruktur ist um die Wellenenergie umzuwandeln. Zum anderen kann das Ufersubstrat direkt durch Abdeckung mit Blattmasse und oberflächennahem Wurzelwerk geschützt werden.

Zur Energieumwandlung haben sich breite, dichte Röhrichtbestände, dichte Strauchweidenbüsche sowie überhängende Starkäste und Stämme von Gehölzen bewährt. Bemessungsrelevante Parameter sind die Dichte der oberirdischen Sprosse sowie ihre Biegefestigkeit.

Zur Beurteilung der abdeckenden Wirkung wird die Deckung der Blattmasse und der oberflächlichen und oberflächennahen Wurzelschicht bewertet.

Um planungsrelevante Werte zu erhalten, sollten Referenzstellen des Naturraumes ausgewertet werden.

Wirkung der Vegetationsbestände bei Überlastungen

Die Beurteilung von Bauwerken und Bauelementen im Hinblick auf deren Überlastbarkeit spielt bei der Gesamtbewertung eine wichtige Rolle. Zur Wirkung ingenieurb biologischer Sicherungen ist diesbezüglich wenig bekannt. Z. Zt. wird empfohlen dies im konkreten Einzelfall zu bewerten. So wachsen kleinere Erosionsstellen häufig aus den angrenzenden Beständen wieder zu. Andererseits kann das Einbrechen von Ufergehölzen zu Folgeschäden durch Verklausung im Unterwasser führen.

2.1.5 Einzelparameter zur Beschreibung von Widerständen von Pflanzenbeständen

Die hier verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen sind im Anhang des Kapitels 2 zusammengestellt.

Vegetationsdeckung

Die Vegetationsdeckung beschreibt den prozentualen Anteil der Vegetationsdecke an der Bodenoberfläche. Üblich ist dieses Kriterium bei der Bewertung von Landschaftsrasen und Krautvegetation im Hinblick auf seinen Widerstand gegen Tropfenschlag, dezentralen Oberflächenabfluss und Wind z.B. auf Böschungen. Bei mehrschichtigem Vegetationsaufbau kann der Deckungsgrad über 100% betragen.

Dichte der vertikalen Vegetationsstrukturen - Horst-, Halm-, Ast- oder Stammdichte

Die Dichte von Stängeln und Horsten bei Gräsern und Kräutern, Halmen bei Röhrichten, Ästen bei Sträuchern und Stämmen bei Baumbeständen beschreibt die Dichte lotrechter Strukturen pro Flächeneinheit Stück/m² oder Stück/ha. Hieraus lassen sich zahlreiche Widerstände z.B. gegen Wind- und Wasserströmungen sowie Wellenschlag ableiten. Indirekt können auch Rückschlüsse auf die Durchwurzelung geschlossen werden.

Spezifische Vegetationsanströmdichte (m_v)

Bei der spezifischen Vegetationsanströmdichte nach INDLEKOFER 2000 werden die Flächen der in einer Wasserströmung eingetauchten Vegetationsstruktur quer zur Strömungsrichtung A_{pi} aufaddiert mit einem Strömungsbeiwert c_v multipliziert und auf die Mantelfläche der Gerinnwandung $L_u \times L_G$ bezogen.

$$m_v = \frac{\sum c_v \times A_{pi}}{L_u \times L_G} \quad []$$

Der Beiwert c_v dient zur Erfassung von Auswirkungen der Vegetation auf die Fließgeschwindigkeit. Zur Zeit wird auf der Grundlage von Laboruntersuchungen der Wert mit $c_v = 1,2$ bis $1,5$ angesetzt.

Windangriffsfläche

Die Windangriffsfläche bei Gehölzen wird als Horizontalprojektion der Umrissfläche, des Strauches bzw. des Baumes ermittelt [m²]. Bei Windschutzhecken wird dann eine Durchlässigkeit in % geschätzt. Bei baumstatischen Betrachtungen wird analog zum Windkraftansatz im Hochbau ein Strömungsbeiwert von $c_w = 0,2$ bis $0,4$ abgeschätzt.

Deckungsgrad Wurzelwerk

Für ein Wurzelwerk, das an einem Ufer, auf einer Böschung oder auf einer Schichtfläche flächig in Erscheinung tritt, bietet sich eine Quantifizierung über den Deckungsgrad in % und ggf. eine mittlere Schichtstärke an.

Scherfestigkeit τ_f

Die stabilisierende und erosionsmindernde Wirkung von Pflanzen und Bodenlebewesen ist sehr komplex und lässt sich nicht an einfach messbaren Parametern wie Wurzelichte oder ähnlichem festmachen.

Sinnvoll ist die Verwendung der aufnehmbaren Scherfestigkeit τ_f (KN/m²) als Summenparameter, der sowohl die bodenmechanischen Parameter Reibung und Kohäsion als auch die diese überlagernden biologischen Einflüsse durch Pflanzenwurzeln, Mykorrhiza, Gele und Saugspannungen der Vegetation beschreibt.

Kritische Schleppspannung τ_{crit}

Die kritische Schleppspannung τ_{crit} (N/m²) beschreibt den Widerstand eines Uferdeckwerks hier eines Vegetationsbestands gegen Überströmung durch Wasser bei Erosionsbeginn.

Strömungswiderstand einzelner Vegetationsstrukturen

Der Strömungswiderstand einzelner durch- und umströmter Vegetationsstrukturen kann berechnet werden.

Für starre Vegetationsstrukturen:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v^2}{2 * g} * A_P * c_P$$

Für elastische Vegetationsstrukturen:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v}{2 * g} * A_P * c_P$$

Wurzelichte D_{wz}

Die Wurzelichte gibt die Anzahl von Wurzeln (in einer bestimmten Durchmesserspanne z.B. 1-5 mm pro Flächeneinheit) an. Da die Wurzelichte mit der Tiefe

variiert, muss die Tiefe der betrachteten Untersuchungsstelle angegeben werden.

Spezifische Wurzelquerschnittsfläche SA_w

Die Gesamtfläche von Wurzelquerschnitten pro Flächeneinheit gibt einen Überblick über die Durchwurzelung. Die Tiefe der Untersuchungsfläche muss angegeben werden, da der Parameter stark mit der Tiefe variiert.

Mit diesem Parameter können übliche Gleitsicherheitsbetrachtungen für Oberbodendeckungen oder böschungsparelle Vegetationstragschichten unter Berücksichtigung einer Wurzelscherkraft durchgeführt werden.

2.1.6 Vorbemerkungen zur standortgerechten Pflanzenverwendung und zur Bewertung von Standortfaktoren

Standorte für ingenieurbioologische Maßnahmen sind häufig schon alleine aus der Sicht der Pflanzenverwendung und Ansiedlung sehr schwer zu begrünen. Die richtige Einschätzung des Baufeldes als Pflanzenstandort ist aber eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg bei einer geplanten Sicherungsmaßnahme.

Bei der Standortbeurteilung sollten u. a. folgende Aspekte beachtet werden:

- Naturraum
- Lage, Höhe ü. NN
- Relief, Böschungslänge und -neigung, Böschungshöhe, Exposition, Ufer- und Gewässerformen
- Gesteine, Boden, Substrate, Schichtenaufbau
- Makro- und Mikroklima, Temperatur, Niederschläge, Starkniederschläge, Schnee
- Wasserhaushalt, Grundwasser, Sickerwasser, Überflutungshäufigkeit, Dauer, Fließgeschwindigkeiten, Schleppspannung
- Natürliche Flora des Gebietes, potentielle natürliche Vegetation (PNV), zugehörige Pioniervegetation und frühe Sukzessionsphasen, Kontaktvegetation des Baufeldes, Konkurrenz und gegenseitige Unterstützung (Synergieeffekte)
- Planungsrelevante Information zur Fauna
- Nutzungen und deren Ansprüche
- Festsetzungen des Natur- und Umweltschutzes

Erst auf der Grundlage einer ausreichend genauen Standorterfassung kann beurteilt werden, ob eine ingenieurbioologische Maßnahme erfolgreich sein wird, welche Pflanzen geeignet sind und mit welchem Verfahren und Begrünungshilfsstoffen bzw. Sicherungen sie angesiedelt werden können.

2.2 Einbindung der ingenieurbioologischen Fachplanung und Bemessung in dem gesamten Prozess der Objektplanung, Ausführung, Entwicklung und Unterhaltung

Der gesamte Prozess der Planung, Ausführung und Entwicklung einer ingenieurbioologischen Maßnahme wird wie folgt gegliedert:

- Erfassung der Aufgabenstellung
- Vorentwurf
- Entwurf bis zur behördlichen Genehmigungsreife
- Ausführungsplanung und Vorbereitung einer Vergabe
- Ausführung und Objektüberwachung

- Anwuchs- und Entwicklungspflege in der Gewährleistungszeit
- Entwicklungspflege hin zum Erreichen der Zielvegetation
- Unterhaltung, Unterhalt und Pflege der Zielvegetation

Erfassung der Aufgabenstellung und Vorentwurf

Ein Objektplaner sollte sich ergebnisoffen mit einer Aufgabenstellung auseinandersetzen, um unter den gegebenen Rahmenbedingungen für den Bauherrn die bestmögliche Lösung zu finden.

Bei Problemen des Erosionsschutzes bedeutet das, dass im Rahmen des Vorentwurfes ein breites Spektrum von Möglichkeiten diskutiert wird, z. B. für das Problem einer Ufersicherung:

1. eigendynamische Entwicklung zulassen und die ufernahen Nutzungen aufgeben
2. Ufermauer als tiefbautechnische Lösung um die bestehende Nutzung in vollem Umfang zu erhalten
3. ingenieurbioologische Ufersicherung mit bewachsener Uferböschung und Herausnahme einer Fläche aus der Nutzung.

Wenn im Vorentwurf eine ingenieurbioologische Lösung vorgeschlagen wird, muss diese auch von den Standortverhältnissen her möglich sein. Die geplante Zielvegetation muss den Einwirkungen einen ausreichenden Widerstand entgegen setzen.

Entwurf bis zur behördlichen Genehmigung

Im genehmigungsreifen Entwurf wird die Zielvegetation als Vegetations- bzw. Biotoptyp unter Benennung einiger Hauptarten festgesetzt. Aufgezeigt wird die notwendige Unterhaltung.

Die notwendigen Schritte zur Initiierung der Vegetation über ingenieurbioologische Bauweisen sowie die Anwuchs- und Entwicklungspflege werden grob skizziert. Nachgewiesen werden die Widerstände der Zielvegetation gegenüber den zu erwartenden Einwirkungen und auch die der ingenieurbioologische Bauweise, ggf. mit herabgesetzten Sicherheitsanforderungen als vorübergehender Zustand (Bauzustand).

Bei Maßnahmen an Fließgewässern muss untersucht werden, welchen Einfluss die Vegetation auf die hydraulische Leistungsfähigkeit des Gewässerabschnittes hat und ob hieraus Schäden durch höhere Wasserstände oder Überflutungen entstehen können.

Im Rahmen der Prüfung des Vorhabens nach den Umweltgesetzen werden die zu verwendenden Pflanzenarten (in der Regel standortheimisch) und die Baustoffe festgelegt, so dass sie die Baumaßnahme in den örtlichen Naturhaushalt und das Landschaftsbild einbinden sowie eine naturgemäße Gewässerentwicklung und den Erholungswert der Landschaft fördern.

Die genehmigungsreife Planung berücksichtigt die zur Verfügung stehenden Flächen und passt die Lösung daran an.

Ausführungsplanung und Vorbereitung der Vergabe

In dieser Planungsphase entstehen auf der Grundlage der behördlichen Genehmigung und der Abstimmung mit

Nutzern und Anliegern Ausführungspläne, Mengenermittlungen und ein Leistungsverzeichnis. Hierzu gehört die detaillierte Ausarbeitung ingenieurbioologischer Bauweisen zur Sicherung und Begrünung gefährdeter Standorte, einschließlich zugehöriger Boden- und sonstigen Standortbewertungen.

Festgelegt werden die Größen und die Qualitäten der lebenden Baustoffe - Samen, bewurzelungsfähigen Pflanzenteile und Pflanzen - sowie die Art, Qualität und Dimension übriger Baustoffe, wie Erosionsschutzmatten, Faschinen, Pfähle, Steine. Schwerpunkte dieser Planungsphase sind klar definierbare und abrechenbare Leistungsbilder, die den Unfallverhütungsvorschriften und speziellen Vorschriften des Bauherrn und den allgemeinen Regeln der Technik entsprechen, so dass die Haftungsproblematik im Schadensfall geklärt ist.

Ausführung und Bauüberwachung

In der heute üblichen Aufteilung von Planungs- und Bauaufgaben wird die Ausführung einer qualifizierten Firma, auf der Grundlage eines im Wettbewerb entstandenen, günstigen Angebotes übertragen.

Die Bauüberwachung übernimmt ein qualifiziertes Ingenieurbüro. Dies überwacht im Auftrag des Bauherrn die Arbeiten im Hinblick auf die Übereinstimmung mit den Plänen und den Regeln der Technik. Bei unvorhergesehenem Baugrund oder Naturereignissen wird der Bauherr bei der Lösungsfindung unterstützt.

Anwuchs- und Entwicklungspflege

An die Baumaßnahme schließt sich in der mehrjährigen Gewährleistungszeit eine Anwuchs- und Entwicklungspflege an. Diese erfolgt in der Regel durch den Ausführungsbetrieb.

Entwicklungspflege, Erhaltungspflege, Unterhaltung bzw. Unterhalt

Nach Abschluss der Gewährleistungszeit erfolgt eine Endabnahme. Die Pflege übernimmt danach der Bauherr selbst oder vergibt sie auch an andere Firmen. Dabei sind bei Gehölzpflanzungen langjährige Entwicklungsprozesse zu unterstützen, bis die Zielvegetation erreicht wird. Diese wird dann fachgerecht unterhalten, um ihre ingenieurbioologische Funktion aufrecht zu erhalten (vgl. Kapitel 4).

Management des Prozesses bei Planung, Bau und Pflege ingenieurbioologischer Maßnahmen

Der Prozess bis zur Entwicklung einer ingenieurbioologischen Schutzvegetation sollte durchgehend begleitet bzw. organisiert werden, weil sonst bei Übergang von einer Phase in die nächste Phase wichtige Informationen verloren gehen. So muss bei der Ausführungsplanung häufig verdeutlicht werden, welche Aspekte des Umwelt- und Naturschutzes aus der Genehmigungsplanung besonders zu beachten sind. Die Zielvegetation muss bei der Ausführung, und der Entwicklungspflege besonders beachtet werden und darf nicht anderen Gesichtspunkten wie z.B. dem Artenschutz, dem Landschaftsbild oder der Verfahrenstechnik untergeordnet werden.

2.3 Empfehlungen für häufige Anwendungsbereiche

2.3.1 Erosion auf Erdböschungen

Problematik

Erosionen auf ungeschützten, vegetationsfreien Böschungen können zu erheblichen Schäden bei neu hergestellten Erdbauten des Verkehrswegebau, Wasserbaus, Bergbaus und Deponiebaus führen. Folgeschäden können auf den Verkehrswegen selbst oder an den Entwässerungseinrichtungen entstehen.

Einwirkungen

Häufige Einwirkungen auf Erdböschungen sind Tropfenschlag, Hagelschlag, dezentrale Oberflächenabflüsse, Schneeschurf, Starkwind sowie Einwirkungen durch Mensch und Tier.

Widerstände

Einwirkungen durch Mensch und Tier muss durch Schutzmaßnahmen und Nutzungseinschränkungen begegnet werden. Gegen Tropfenschlag und dezentrale Oberflächenabflüsse haben sich Bestände aus Gräsern und Kräutern mit hohen Deckungsgrad bewährt. Bei der Gesamtdeckung können sowohl oberirdische lebende Sprosse, Blätter, abgestorbene Blätter - soweit noch mit der Pflanze verbunden - oberflächennahe Wurzel-schichten sowie erosionsbeständige Substrate wie Steine, Fels oder Holz gerechnet werden. Vor Schneeschurf und Wind schützen Vegetationsbestände, die aus Sträuchern, ggf. Bäumen mit geeigneter Bestockungsdichte sowie Krautvegetation aufgebaut sind.

Begrenzende Faktoren

Begrenzende Faktoren sind extreme Standortverhältnisse: Hangneigung, Belichtung (= Einstrahlung), Geländeklima, Bodenarten, Lagerungsform, Nährstoffmangel und toxische Stoffe.

Hinweise zur Bemessung und Planung

Die Zielvegetation wird auf der Grundlage einer Standortbewertung und vegetationskundlichen Beurteilung festgelegt. Das Begrünungsverfahren wird z.Zt. nach Erfahrungen im selben oder ähnlichen Naturraum ausgewählt.

Eine nachvollziehbare Risiko- / Kostenabwägung in Anlehnung an die DIN 18918 wird empfohlen. Zur besseren Risikoabschätzung sollten den Bauverträgen Bemessungsereignisse wie Starkregen, Starkwind, Schneehöhen mit einer aufgabenspezifischen Wiederholungshäufigkeit ($1/(n \text{ Jahre})$) zu Grunde gelegt werden. Unterhalb dieser Schwellen übernimmt der Ausführungsbetrieb die Haftung für Schäden, bei selteneren Ereignissen der Auftraggeber.

2.3.2 Oberflächennahe Rutschungen

Problematik

Pflanzenbestände und ingenieurbiologische Maßnahmen wirken nachweisbar nur bei oberflächennahen hangparallelen Rutschungen sowie bei übersteilen Böschungen geringer Höhe bei nicht bindigen Böden. Ungünstig wirken hohe, schwere Bäume auf steilen Böschungen, vor allem auf bindigen Böden. Die Rutschungsproblematik wird auch in der Ingenieurbiologie mit den in der Bodenmechanik üblichen Fest-

körpermodellen behandelt. Hierauf werden Einwirkungen und Widerstände angesetzt.

Einwirkungen

Bei Böschungsbruchuntersuchungen wirken das Gewicht des feuchten Bodens, (ggf. Auflasten, wie Vegetation und Schnee), Wasserdruck und Auftrieb.

Widerstände durch Vegetation

Zwischen der abrutschenden Bodenschicht und dem Unterboden kann eine Scherfestigkeit τ_f (kN/m²) angesetzt werden. Diese Scherfestigkeit kann aus vergleichbaren Bodenschichten ermittelt werden. Die Scherfestigkeit setzt sich aus den bodenmechanischen Summanden Reibung und Kohäsion zusammen. Hinzu kommen die biologischen Einflüsse durch u. a. Wurzeln, Mykorrhiza und Gele, die häufig auch als biologische Kohäsion beschrieben werden. Problematisch ist, dass die biologische Scherparameter stark mit der Tiefe, Lagerungsdichte und Bodenfeuchte variieren und schwer prognostizierbar sind (vgl. Abschnitt 2.1).

Begrenzende Faktoren

Folgende Faktoren begrenzen die Wirkung von Wurzeln bei Rutschsicherungen oder schließen sie aus: dichtgelagerte Schluff-, Ton- oder Felsflächen, Oberflächen von Grundwasser oder Schichtwasser, toxische Substrate außerdem übliche Standortfaktoren, die einen vitalen Pflanzenwuchs ausschließen.

Empfehlungen für Bemessung und Planung rutschsicherer Vegetationstragschichten auf Erdböschungen

Voraussetzungen für die Anlagen rutschsicherer Vegetationstragschichten auf Böschungen sind:

- Der Unterboden ist standsicher.
- Der Unterboden ist deutlich wasserdurchlässiger als der Oberboden.
- Es entsteht kein Wasserdruck auf den Oberboden durch Grund- oder Sickerwasser.
- Der Unterboden ist im Hinblick auf Porenvolumen, Bodeninhaltsstoffe, pH-Wert u.ä. durchwurzelbar.
- Der Oberboden (Vegetationstragschicht) ist entweder sehr dünn oder ausgemagert, so dass Pflanzenwurzeln in absehbarer Zeit in den Unterboden einwurzeln werden.

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich die Rutschsicherheit auf der Grundlage von Untersuchungen auf Referenzstellen mit einem Blockmodell nachweisen. Dabei kann die Wirkung der Vegetation entweder über die zulässige Scherspannung oder über die spezifische Wurzelquerschnittsfläche in der Schichtgrenze berücksichtigt werden.

Übersteile Böschungen aus nicht bindigem Boden

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass sich niedrige und mittelhohe Böschungen mit einem Böschungswinkel, der knapp unter dem Winkel der inneren Reibung des Bodens liegt, herstellen lassen, wenn sie mit tiefwurzelnden Pflanzen bewachsen sind und in der Anfangsphase mit ingenieurbiologischen Bauweisen wie z. B. Buschlagen stabilisiert werden. Der Standsicherheitszuwachs kann in Anlehnung an SCHAARSCHMIDT 1971, SCHUPPENER 1994 und HÄHNE 1997 prognostiziert werden.

Niedrige Böschungen können mit einem maximalen Winkel von 45° ausgebildet werden, wenn sie sowohl durch tiefe Wurzeln gesichert als auch oberflächlich durch eine geschlossene Vegetation aus Gräsern und Kräutern abgedeckt werden. In der Anwuchs- und Entwicklungsphase werden hier Stützbauwerke aus Holz, z. B. Krainerwände verwendet, die auch einem geringen aktiven Erddruck standhalten. Die Bemessung erfolgt wie bei anderen Schwergewichtsmauern, z.T. auch in Anlehnung an das Verfahren Bewehrte Erde.

2.3.3 Grabenerosion auf Böschungen und Hängen

Problematik

Auf langen steilen Hängen kommt es in Mulden zur Konzentration von Oberflächenabflüssen, die zur Bildung von Erosionsgräben führen können. Weitere Ursachen von Grabenerosion können sein: Flächenversiegelungen, Entwaldungen im Niederschlagsgebiet sowie Abflusskonzentrationen durch Wegebauten.

Bei der Grabenerosion läuft der Erosionsprozess entgegen der Fließrichtung bergauf. Unberechenbare Verstärkungen ergeben sich durch Schlammlawinen, die durch aufgeweichte Böschungsbrüche entstehen.

Einwirkungen

Aus einer Niederschlags – Abfluss – Berechnung lassen sich auf der Grundlage eines Bemessungsregens mit angepasster Wiederholungshäufigkeit ($1/(n \text{ Jahre})$) Spitzenhochwasserabflüsse Q (m^3/s) ermitteln. Hieraus lassen sich mit üblichen hydraulischen Berechnungen mittlere Fließgeschwindigkeiten v (m/s) und Schleppspannungen auf der Sohle τ_0 (N/m^2) ermitteln.

Widerstände

Die Grabensohle und die unteren Uferböschungen sollten mit niedriger, dicht besteter Strauchvegetation oder kräftigen horstigen Stauden bewachsen sein. Der Vegetationsbestand muss Überströmung, Erosion und Auflandung vertragen. Für den Erosionsbeginn kritische Schleppspannungen τ_{crit} wurden vorne genannt.

Grenzen der Anwendung

Grenzen der Anwendung entstehen durch hohe Fließgeschwindigkeiten und Schleppspannungen sowie durch die Wirkung des mitgeführten Geschiebes.

Weiterhin ist die Belichtung häufig eine Anwendungsgrenze neben üblichen Standortfaktoren sowie Vieh- und Wildverbiss bei Weichhölzern.

Empfehlungen für die Bemessung und Planung

Starke Versiegelungen im Einzugsgebiet sollten durch Regenrückhaltmaßnahmen kompensiert werden. Nahegelegene Oberläufe von Bergbächen können ggf. als Referenzobjekte ausgewertet werden. Die Ergebnisse von Referenzstellen sollten mit denen der hydrotechnisch, theoretisch ermittelten Bemessungsparametern verglichen werden. Hieraus können örtlich begründete Zu- oder Abschläge abgeleitet werden.

Die aus naturnahen Referenzgewässern abgeleiteten Strukturen führen zu Leitbildern aus standortheimischen Pflanzenbeständen in Kombination mit Fels, Natursteinen und Totholz. Sperrenstaffeln kommen in der Natur nicht vor. Sie stören im Landschaftsbild, behindern oder unterbrechen den Biotopverbund und sind nicht mit

den Zielen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinien vereinbar. Daher sollten sie wo möglich durch naturnahe Sicherungen ersetzt werden. Im dicht besiedelten Hochgebirge stellen sie aber häufig die einzige Möglichkeit zur Sanierung von Grabenerosion und Wildbächen dar, so dass ihr Einsatz in derartigen Regionen unvermeidbar ist.

2.3.4 Ufer und Vorländer an Fließgewässern

Problematik

An Ufern und auf Vorländern bzw. in Auen entstehen durch natürliche gewässerdynamische Prozesse Ausspülungen, Kolke und andere Erosionsformen. Diese Entwicklung ist einerseits erwünscht, weil sie zu naturraumtypischen Gewässerstrukturen führt. Andererseits befinden sich in Ufernähe häufig hochwertige Nutzungen und Infrastruktureinrichtungen, die vor Schäden geschützt werden müssen. In beiden Fällen müssen in der Kulturlandschaft und vor allem im Bereich von Ortslagen die Abflusskapazitäten sowie die Wasserstände bei Hochwasser und Mittelwasser erhalten werden, um Schäden an Gebäuden und Nutzungen zu vermeiden.

Einwirkungen

Auf ingenieurbioökologische Ufersicherungen wirken von der Flussseite Strömungskräfte quantifiziert als Fließgeschwindigkeit v (m/s) und Schleppspannung τ_0 (N/m^2) sowie Impulskräfte aus Treibholz- oder Treibeisstoß. Zusätzlich sind Einwirkungen durch Mensch und Tier möglich. Darüber hinaus geraten einzelne Sicherungen oder Bauelemente unter Auftrieb. Bei fallenden Hochwasserständen ergeben sich durch die Spiegeldifferenz zwischen dem noch hohen Grundwasserstand und den niedrigen Flusswasserständen Wasserdruckkräfte, die Böschungsbrüche verursachen können.

Widerstände

Den Wasserströmungen können durch unterschiedliche Vegetationsstrukturen Widerstände entgegengesetzt werden. Rasen bietet einen flächenhaften Erosionsschutz und erzeugt dabei einen geringen Strömungswiderstand. Ähnlich wirken Fließgewässerröhrichte, die sich bei Überströmung umlegen. Gehölzvegetation führt in Abhängigkeit von der hydraulisch wirksamen Bestockungsdichte zu einer Abbremsung sowohl der mittleren als auch der bodennahen Strömung. Zusätzlich wird der Boden bei den meisten Weidenarten oberflächennah durchwurzelt. Dadurch können Ufer und Vorländer bis zum Erreichen der vorne genannten kritischen Fließgeschwindigkeiten v_{crit} und Schleppspannungen τ_{crit} vor Erosion geschützt werden.

Grenzen der Anwendung

Neben den allgemeinen Standortfaktoren und den zulässigen Höchstgrenzen für Fließgeschwindigkeiten und Schleppspannungen gibt es folgende fließgewässerspezifische Anwendungsgrenzen. Für jede Pflanzenart gibt es eine untere Grenze ihre Anwendung. Diese wird durch die maximal verträgliche Überstauungshöhe, -häufigkeit und -dauer festgelegt. Auch andere Faktoren, wie Eisschurf oder Geschiebe können Grenzen der Anwendung darstellen. Die Grenzen der Anwendung sollten an Referenzstellen im jeweiligen Naturraum erkundet werden.

Die Gesamtstabilität einer Uferböschung muss bei hohem Grundwasser- und zugehörigem niedrigem Flusswasserstand mit den daraus entstehenden Wasserdrücken gegeben sein. Durch die reduzierende Wirkung auf die hydraulische Leistungsfähigkeit kann die Verwendung von Gehölzen in beengten Ortsdurchflüssen problematisch werden.

Empfehlungen für die Bemessung und Planung

Bei der naturnahen Gestaltung und Sicherung von Gewässern sind die Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu beachten. U.a. bedeutet das: keine Verschlechterung des Istzustandes, Entwicklung hin zu guten ökologischen Verhältnissen. Durch die Ingenieurbiologie wird hier besonders die Gewässerstruktur beeinflusst. Hierfür werden eine naturraumtypische Gewässerform, gebiets-typische Naturbaustoffe und Pflanzen mit der gewässer-typischen Variation empfohlen. Aus Referenzstellen im Naturraum können geeignete Vegetationsstrukturen und ihre Anwendungsgrenzen abgeleitet werden. Bei Fließgewässern sollte immer die Alternative – Rückverlegung der Nutzung und eigendynamischer Gewässerentwicklung – untersucht werden, da sie zu einer naturnahen Gewässerentwicklung führt. Weitere Sicherungsarbeiten am Böschungsfuß oder stark angeströmten steilen Ufern werden ausschließlich mit Natursteinen, Holz oder Reisig des Naturraumes ausgeführt. Dabei werden abwechslungsreiche Strukturen im Verlauf, Längs- und Querprofil hergestellt, der Biotopverbund für aquatische Fauna beachtet und monotone Profilausbildungen vermieden.

Die naturnahe Gestaltung und die Gehölzansiedlung ist häufig mit der Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit eines Fließgewässers verbunden. Im Rahmen eines wasserbaulichen Entwurfes werden umfangreiche hydraulische Untersuchungen durchgeführt, um die Entwicklung der Wasserstände und deren Auswirkungen auf die Nutzungen zu prognostizieren. Die Gesamtstabilität einer Uferböschung gegen Böschungsbruch muss für die Bemessung zu Grunde liegenden Wasserspiegelunterschiede vorhanden sein.

Planungen am Gewässer sind mit umfangreichen Abstimmungsprozessen zwischen den beteiligten Fachbehörden, Anliegern, Politikern und Naturschutzorganisationen verbunden. Mit allen Planungsbeteiligten wird im Rahmen des Entwurfes eine genehmigungsreife Lösung entwickelt.

2.3.5 Ufer an stehenden Gewässern

Problematik

An Ufern stehender Gewässer entstehen Erosionsformen, die einer Kliffentwicklung an der Küste ähneln können. Natürliche Phänomene werden dabei durch Nutzungseinwirkungen verstärkt.

Einwirkungen

Auf die ingenieurbiologischen Ufersicherungen wirken Wellenschlag aus natürlichen Wellen und Schiffswellen ein, kombiniert mit Treibzeug und Treibeis. Attraktive Uferbereiche werden durch Betreten und Boote beschädigt. Eventuell gibt es Schäden durch Weidevieh.

Widerstände

Der Boden kann durch geschlossenen Rasen geschützt werden. Breite Röhrichtgürtel mindern den Wellenschlag und schützen den Boden durch oberflächennahes Wurzelwerk. Ähnlich wirken überstauungstolerante Gehölzbestände mit weit vorwachsenden Ästen und Stämmlingen.

Anwendungsgrenzen

Neben den allgemeinen Standortfaktoren gibt es für jede Pflanzenart eine Untergrenze ihrer Anwendung. Diese wird durch die jeweils maximal zulässige Überströmungshöhe, -häufigkeit und Dauer festgelegt. Außerdem spielt die Häufigkeit von Welleneinwirkungen eine Rolle, so dass ständige Schiffswellen einen Röhrichtbestand zerstören, der sich bei gelegentlichen Wellen gleicher Höhe aus Stürmen immer wieder erholen könnte.

Empfehlungen für Bemessung und Planung

Bei der Planung von Seeufersicherungen spielen landschafts- und freiraumplanerische Festsetzungen eine große Rolle, um den starken Nutzungsdruck von den Ufern fern zu halten. In der Regel sind sinnvolle attraktive Freizeitangebote in der Nähe hierzu erforderlich. Die Belastbarkeit und die Anwendungsgrenzen der Vegetation sollten an Hand von Referenzstellen im Naturraum festgelegt werden. Bei einer Initialbegrünung der Ufer sind längerfristig Schutzmaßnahmen vor Betreten, Anlegen, Treibzeugschurf, Weidevieh und Wasservogel erforderlich.

2.3.6 Deiche und Dämme

Problematik

Deiche dienen zum Schutz von Nutzungen und Gebäuden im Hinterland vor Überflutungen bei hohen Wasserständen im Fluss und auf dem Vorland. Dämme dienen zur Erhaltung eines dauerhaft hohen Wasserstandes in einem Fließgewässerkanal oder Standgewässer. In der Trockenphase entspricht die Erosionsproblematik der von Böschungen, auf der Wasserseite entstehen die Probleme von Ufern, stehender oder fließender Gewässer. Durch das erhebliche Schadenspotential beim Versagen von Deichen und Dämmen muss die Kontroll-, Sanierungs- und Verstärkungsmöglichkeit bei Hochwasser, Sturm, Regen und Dunkelheit gegeben sein. Insbesondere muss auf landseitige Sickerwasseraustritte und Erosionsgrundbrüche frühzeitig und schnell reagiert werden.

Einwirkungen

Einwirkungen entstehen durch Eigengewicht, Wind, Tropfenschlag, Oberflächenabflüsse - auf der Wasserseite zusätzliche Strömungseinwirkungen, Schleppspannung, Treibzeug- und Treibeisstoß sowie Wellenschlag. Auf der Wasserseite kann es nach einem Hochwasser zur Rutschungen als Folge von Wasserdruckunterschieden kommen. Auf der Landseite können bei einem Hochwasser durch Wasserdruck und Überströmung, Böschungsbruch, hydraulischer Grundbruch und Erosionsgrundbruch auftreten. Weidevieh (außer Schafe) sowie Reiter und Fahrzeuge können die Vegetation erheblich schädigen. Weitere Schäden entstehen durch Wühltiere.

Widerstände

Üblich sind dicke Rasen die dort eingesetzt werden, wo die Schleppspannung und Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasser vertragen werden (siehe vorne). Ausserdem dient der Rasen zum Schutz vor Wellenschlag und Winderosion. Schäden an flussseitigen Rasenböschungen entstehen hier durch Treibeis und Treibholz. Diese können durch Verstärkungen der Deckwerke vermieden werden (kombinierte Stein/ Rasendeckwerke) oder durch Anlage von hohen Strauchweidengalerien auf den Vorländern vor Prallufem. Auf der Luftseite werden Landschaftsrasen zum Schutz vor Wind und Tropfenschlag verwendet. Sie lassen Sickerwasserstritte erkennen. Durch die Ansaat autochthoner, artenreicher Bestände aus Gräsern und Kräutern, beispielsweise über (Heudrusch) wird ein besonders differenziertes Wurzelwerk und damit eine hohe Erosionsfestigkeit erzielt wird.

Grenzen der Anwendung

Grenzen der Anwendung entstehen auf der Wasserseite durch die maximal mögliche Überstauungsdauer, und -höhe der einzelnen Pflanzenarten sowie durch die Belastungsgrenzen der Rasengräser bei Überströmung und Wellenschlag in Kombination mit Treibholz- und Treibeisschurf.

Hinweise für die Bemessung und Planung

Deiche und Staudämme sind in erster Linie technische Bauwerke. Ingenieurbiologische Sicherungen mit Landschaftsrasen stellen hier in den meisten Fällen die kostengünstigste Möglichkeit des Erosionsschutzes dar. Bei Überschreitung der Anwendungsgrenzen sind kombinierte Lösungen mit Steinen erforderlich. Die Möglichkeiten der Unterhaltung, Verteidigung und ggf. Verstärkung müssen bei der Planung berücksichtigt werden. Bei der Pflanzenauswahl sind die unterschiedlichen Feuchtezonen der trockenen Böschungen und die unterschiedliche Überstauungshäufigkeit und Dauer der flussseitigen Böschung zu beachten.

2.3.7 Küstenschutz

Problematik

Ingenieurbiologische Massnahmen können auf vielfache Weise zur Sicherung und Gestaltung von Küsten beitragen. Es handelt sich einerseits um Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen an Dünen und andererseits um Verfahren zur Sicherung von Deichen durch Aufbau und Erhalt von Vorländern auf der Wattseite. Früher angewandete ingenieurbiologische Verfahren im Watt, man nannte sie „biogene Landgewinnung“ werden heute nur noch selten eingesetzt.

Einwirkungen

Wind und Wasser in Kombination.

Ingenieurbiologische Maßnahmen werden vorwiegend an retrogressiven Strandbereichen gebraucht, also an solchen, an denen die erodierenden Kräfte überwiegen und Strand sowie Weißdünen abgetragen oder im Binnendünenbereich Windkuhlen ausgeblasen werden und zur Auflösung ganzer Dünen führen können. An in progressiven Küstenabschnitten, also da, wo Dünen durch Sandzufuhr über Sandplaten, Pflanzenwachstum und Vordünen sich entwickeln, kann Ingenieurbiologie unterstützend beim Dünenaufbau eingreifen.

Im Bereich der Vorländer besteht die Aufgabenstellung in der Abminderung der Energie des Wasser, dass bei Flutereignissen bei auflaufender Welle ohne Vorland ungebremst auf Schutzdeiche auftreffen würde. Durch ein erhöhtes Vorland wird die Energie des Wassers gleichmäßiger abgebremst und verteilt. Die auftreffende Kraft auf den Deichfuß verringert sich.

Widerstände

Die Dynamik der Dünenentstehung und die Biologie der Pflanzenarten der Dünen zeigen die Möglichkeiten der Verwendung im Küstenschutz auf. Im Bereich retrogressiver Dünen besteht der Widerstand gegenüber Wind und damit die Sandfangfunktion in der Erhöhung der Rauigkeit durch Reisigbesteck oder von Pflanzhalmen mithilfe von Halmstecklingen und Pflanzungen. Die Durchwurzelung des angewehten Sandes mit Dünengräsern und Sträucher festigt die Dünen.

Im Bereich von Vorländer ist ingenieurbiologisch bedeutsam, dass das Vorland bei Sturmfluten Höhe und Periode der den Hauptdeich erreichenden Wellen reduziert und die Energie der schnell heranrollenden Wellen verringert. Durch die raue Beschaffenheit wird die Sohlreibung verstärkt und setzt so die Geschwindigkeit herab. Zusätzlich wirken die Pflanzenarten und -gesellschaften stabilisierend auf das Bodengefüge und vermindern die Erosion, indem sie die Strömungsenergie abbremsen. Besondere Bedeutung hat das Wurzelsystem, dass eine Verbindung mit den Bodenteilchen eingeht und aus festen und elastischen Elementen besteht. Die Bodenteilchen besitzen eine hohe Stabilität gegenüber Druckkräften und das Wurzelgeflecht nimmt dabei die strömungsinduzierten Zug- und Scherkräfte auf. Das Sedimentationsvermögen ist dabei von der Strukturdicke der Vegetation abhängig, sowohl horizontal als auch vertikal. Die Sedimentationsrate steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Überflutungsintensität, die abhängig von der Höhenlage der Biotoptypen zum MThw ist. Die Energietransmission ist von der Wuchshöhe, Bewuchselastizität und mechanischen Widerstandsfähigkeiten der Pflanzen abhängig. Mit zunehmender Pflanzenhöhe wächst die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten und führt somit zu einem verbesserten Schutz des Bodens.

Anwendungsgrenzen

Abrasionskräfte sind stärker, als Gräser und Sträucher, Halme und Pflanzen es leisten können.

Hinweise zur Bemessung und Planung

An Küstenstandorten gilt überall dasselbe Prinzip vom Sandfangen durch Rauigkeit und der Festigung von Sand und Schlick durch Durchwurzelung. Es eignen sich Arten, die mit stockwerksartigen Wurzelenaufbau angewehtes oder angeschwemmtes Material festigen können wie Strandgräser oder Küstengebüsche. Die Biologie der Arten ist ähnlich, die Wahl der Arten hängt vom Landschaftstyp ab.

2.3.8 Wind- und Emissionsschutzpflanzungen

Problematik

Baum- und Strauchhecken können zum Schutz von Nutzflächen und Verkehrswegen vor Wind- und Folgeschäden durch Austrocknung, Sand-, Schluff- oder Schneeerwehungen angelegt werden. Am Rande von Bodenentnahmestellen, Bergbau- und sonstigen

Industrieflächen können Hecken und Wälder auch zur Bindung von Staub eingesetzt werden, oder die abtraggefährdeten Flächen z.B. Halden werden direkt begrünt.

Einwirkungen

Als Haupteinwirkung muss der Faktor Wind mit Stärke, Dauer, Häufigkeit und Richtung näher beschrieben werden.

Widerstände

Die Grenzwerte bei denen die erosionsgefährdeten Stoffe verfrachtet werden, sollten bekannt sein: Korngröße, Gewicht, Feuchtigkeit.

Als flächiger Erosionsschutz auf winderosionsgefährdeten Flächen, z. B. Halden, haben sich Halbtrockenrasen, ggf. auch dichte Trockenrasen und Trockengebüsche bewährt. Hecken aus Bäumen und Sträuchern beruhigen Starkwindströmungen bis zu einer Distanz, die etwa der 10-fachen Heckenhöhe entspricht. Diese Hecken sollten durchlässig gestaltet werden, um Turbulenzen auf der Leeseite zu reduzieren. Emissionsschutzhecken werden mehrreihig oder breit und mehrschichtig ausgeführt.

Anwendungsgrenzen

Bei der Anlage von Feldstrecken sind die Trockenheitsgrenzen der Baumarten zu beachten. Bei Emissionsschutzhecken für Bergbau- oder Industrieanlagen muss neben den üblichen Standortfaktoren eine Verträglichkeit der Emissionen durch die verwendeten Pflanzenarten gegeben sein.

Hinweise zur Bemessung und Planung

Die aerodynamische Wirkung kann auf Grund der Fachliteratur u. a. KOVALEV 2003 prognostiziert werden. Die Entwicklung der Heckenhöhe verlangt eine konsequente Planung, Pflanzung und Pflege über Jahre und Jahrzehnte, um die gewünschten Effekte zu erzielen und zu erhalten. Insbesondere müssen hier Bewässerung, Schutz vor Konkurrenzvegetation und Tierfraß beachtet werden.

Die Begrünung von Industrie- oder Bergbaustandorten verlangt häufig eine Untersuchung der Substrate und Böden im Hinblick auf Umweltverträglichkeit. Bei Altlasten und schadstoffhaltigen Böden sind Grenzwerte und die verschiedenen Wirkungspfade der Schadstoffausbreitung zu beachten. Erst auf der Grundlage von Fachgutachten kann entschieden werden, ob eine direkte Begrünung des Substrates zulässig ist oder ob Abdeckungen in Form von Deckschichten, Wasserhaltungsschichten oder Oberflächenabdichtungen nötig sind. Erst nach diesen Festsetzungen lohnt eine vegetations-technisch ausgerichtete Bodenuntersuchung und Planung der Begrünung.

2.3.9 Wasserhaushaltsregelung

Problematik

Intensive Niederschlagsereignisse können auf vegetationsfreien oder -armen Flächen in Runsen und anderen Geländemulden in kurzer Zeit zu sehr starken Oberflächenabflüssen mit geringeren Konzentrationszeiten führen. Folgen der schnellen starken Wasserabflüsse sind Erosionen, große Sediment- und Schlammfrachten, Beeinträchtigungen der Gewässergüte

sowie eine stark verminderte Grundwasserneubildung. Angemessene Pflanzenbedeckungen wie Wald, Gebüsche oder Strauchhecken, die auf Problemstandorten durch ingenieurbioökologische Hang-, Runsen- oder Grabensicherungssysteme initiiert werden, können zur Regelung des Wasserhaushalts eingesetzt werden. Diese Wirkungen sind von besonderer Bedeutung in Einzugsgebieten oberhalb hochwassergefährdeter Gebiete sowie in Einzugsgebieten von Talsperren und andern Wasserversorgungsanlagen.

Einwirkungen

Als Haupteinwirkungen müssen die Faktoren Niederschlag mit Stärke, Dauer, Häufigkeit und Intensität sowie die Trockenheit z.B. als Dauer von niederschlagsfreien Zeiten näher beschrieben werden.

Widerstände

Die Hänge und andere Flächen sollten mit einer angepassten Vegetationsdecke, die die Versickerung fördert, bedeckt werden, sowie mit Strukturen versehen werden, die den Oberflächenabfluss bremsen. Eine dichte Vegetationsbedeckung ist dafür erforderlich sowie alle Massnahmen, die die Rauheit der Oberfläche erhöhen. Alle Runsen und Gräben sollten mit hydraulisch rauer Strauchvegetation sowie rauen Strukturen (z.B. Raubettrinne) so eingerichtet werden, dass die Fließgeschwindigkeit reduziert, die Konzentrationszeit erhöht, die Abflussspitze gedämpft und die Versickerungsmöglichkeiten z.B. durch Erhöhung der Durchlässigkeit und Verlängerung der Versickerungsdauer, verbessert werden.

Begrenzende Faktoren

Begrenzende Faktoren sind extreme Standortverhältnisse – Hangneigung, Belichtung, Geländeklima, Bodenarten, Lagerungsform, Nährstoffmangel und toxische Inhaltsstoffe. In Runsen und Gräben entstehen auch Grenzen durch hohe Fließgeschwindigkeiten, Schleppspannungen und die Wirkung des mitgeführten Geschiebes. Auf rutschgefährdeten Hängen mit tiefer liegenden Gleitflächen kann eine stärkere Wasser- versickerung die Böschungsbruchgefahr erhöhen. Dies sollte durch Geotechniker geklärt werden.

Hinweise zur Bemessung und Planung

Die Einfluss der Vegetation auf die Infiltration und die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses kann auf Grund der Fachliteratur prognostiziert werden, beispielsweise MARKART et al. 2004. Die Entwicklung der geplanten Vegetationsdichte und Vegetationsstruktur verlangt eine konsequente Planung, Pflanzung und Pflege über Jahre und Jahrzehnte, um die gewünschten Effekte zu erzielen und zu erhalten.

Die Notwendigkeit, gleichzeitig die Infiltration sowie den oberirdischen Abfluss zu steuern, fordert eine Pflege der Vegetation. Dabei sollte sich die Zielvegetation an der natürlichen Vegetation des Gebietes orientieren, um ökologisch stabile Verhältnisse mit z. B. geringe Anfälligkeit gegenüber Krankheiten anzustreben und dadurch mit geringem Pflegeaufwand auszukommen.

2.3.10 Durch Feuer zerstörte Gebiete

Problematik

Die Zerstörung der Pflanzendecke sowie eines Teils der Humusschicht durch Waldbrand und andere Wildfeuer führt in der Folge zu einem erhöhten Erosionsrisiko, das mit Sofortmassnahmen kontrolliert werden muss, um die Boden- und Nährstoffverluste zu mindern und eine schnelle Wiederansiedlung der Vegetation ermöglichen. Die außerordentlichen Nährstofffreisetzungen können in unterhalb liegenden Trinkwasserschutzgebieten und Gewässern zu erheblichen Beeinträchtigungen, beispielsweise Eutrophierungen führen.

Einwirkungen

Haupteinwirkungen sind die Masse an abgestorbenem Pflanzenmaterial bzw. der Vorrat an brennbaren Stoffen, klimatische Einwirkungen wie Trockenheit, Hitze und Wind mit Stärke, Dauer, Häufigkeit und Richtung.

Widerstände

Wildfeuer sind normalerweise an trockene Wetterlagen und trockene Standorte gebunden. Die Ausbreitung wird durch zusammenhängende Gehölzbestände gefördert. Widerstände gegen die Ausbreitung von Wildfeuer bieten breite Geländestreifen, die frei von brennbarer Biomasse sind und nur durch eine Gras-/ Krautvegetation als Erosionsschutz bewachsen sind. Diese offenen Geländestreifen fördern die Biodiversität und können zur Beweidung genutzt werden.

Nach einem Feuer ist die Entwicklung von Vegetation auf Grund der Zerstörung, der Trockenheit des Standortes und des verbrannten Bodens sehr eingeschränkt. Deswegen muss die erste Maßnahme hauptsächlich der Prävention von Erosion mit Behelfsbauten aus verfügbaren Baustoffen dienen. Dafür sind Raubäume und Rundholzverbauungen an Rinnen, Runsen und Steilhängen unter Verwendung der verkohlten Baumstämme sinnvoll. Unbedingt erforderlich ist die Ansaat von Gräsern und Kräutern, die schnell eine geschlossene Vegetationsdecke bilden. Die Saatgutmischung sollte artenreich sein und sowohl Arten für extreme Standortbedingungen, als auch schnell wachsende Arten und Arten einer späteren Sukzessionsstufe für den jeweiligen Standort aufweisen.

Anwendungsgrenzen

Die Einbringung von Vegetation wird vom Grad der Bodenzerstörung geprägt, was eine rasche Wiederbegrünung erfordert, bevor das feine und organische Bodenmaterial erodiert wird.

Hinweise zur Bemessung und Planung

Die Wirkung von linearen Erosionsschutzmassnahmen kann aufgrund von Erosionsmodellen prognostiziert werden. Die Vegetation der gehölzfreien Brandschutzstreifen sollte standortgerecht und heimisch sein, den Boden vor Erosion schützen sowie eine Weidenutzung ermöglichen. Die Zielvegetation sollte so entwickelt werden, dass die Gefahr für zukünftige Feuer reduziert wird und dass die Pflanzen nach einem Feuer wieder austreiben. Die Pflege sollte eine Beseitigung trockener Biomasse vorsehen, am besten eine Nutzung.

2.3.11 Pflanzen als Lawinenschutz

Problematik

Lawinen sind Naturgefahren, die sowohl Menschen als auch Infrastruktur in alpinen Regionen gefährden. Das Losbrechen von Lawinen kann ein geeignet aufgebauter und gepflegter Schutzwald verhindern, wenn durch ausreichend stabile kräftige Baumstämme der Schneedruck aus der hangparallelen Komponente der Schneeauflast abgefangen wird. Der Wald wirkt weiterhin günstig auf die gleichmäßige Schnee Verteilung und die mechanischen Parameter der Schneedecke. Eine angebrochene Lawine kann durch Vegetation kaum noch gebremst werden. Durch Schutzwaldpflege sollte dieser Fall möglichst vermieden werden.

Einwirkungen

Die mechanische Einwirkung vor dem Auslösen einer Lawine entsteht durch die hangoberflächenparallele Komponente des Eigengewichts der Schneedecke. Die Schneedecke hat sehr unterschiedliche Wichten im lockeren Zustand ca. 1 KN/m^3 und verdichtet zu Eis bis zu 10 KN/m^3 . Gegen Ende des Winters sind die Schneedecken mehrere Meter stark.

Die Schneedecke übt permanent durch ihre langsame Bewegung (ohne Lawinenabgang) hangabwärts (Schneekriechen, -gleiten) einen hangparallelen Schneedruck im Bereich von $1 - 3,5 \text{ kN/m}^2$ auf die Vegetation aus. Dies reicht aus um kleine Bäume zu entwurzeln. Ist eine Lawine einmal angebrochen und bewegt sich hangabwärts, so erreicht sie bereits nach ca. 50 m Impulskräfte um Baumstämme zu brechen. Spätestens nach einer Länge der Lawinensturzbahn von 150 m werden Baumstämme gebrochen oder Bäume entwurzelt. Die Drücke, die dabei auf die Bäume einwirken, sind abhängig von der Lawinenart: $3 - 5 \text{ kN/m}^2$ für Staublawinen und $10 - 50 \text{ kN/m}^2$ für Fließlawinen.

Wirkungen der Vegetation zur Reduzierung der Einwirkungen

Die Wirkung der Vegetation zur Reduzierung der Einwirkungen beruht auf verschiedenen Eigenarten des Waldes, die es auf waldfreien Standorten nicht gibt. Die wichtigsten sind:

- **Schneeinterzeption**
Während des Schneefalls wird ein Teil des Schnees in den Baumkronen aufgefangen. Der kleinere Teil dieses Schnees verdunstet. Dadurch wird die Schneedecke im Wald weniger mächtig und stärker strukturiert als im Freiland. Bei tiefen Temperaturen zeigen die wintergrünen Baumarten gegenüber winterkahlen Baumarten eine höhere Interzeption.
- **Strahlungshaushalt**
In einem dichten wintergrünen Wald ist das Mikroklima ausgeglichener als außerhalb des Waldes. Die Erwärmung der Schneedecke während des Tages und die Abkühlung in der Nacht sind kleiner. Die Wahrscheinlichkeit für die Bildung gefährlicher Schwachschichten innerhalb der Schneedecke ist reduziert.
- **Wind**
Die Windeinwirkung und damit mögliche Schneeverfrachtungen sind in einem geschlossenen Bestand weniger problematisch. In Waldlichtungen können jedoch größere Schneemengen abgelagert werden als in waldfreiem Gelände.

Widerstände der Vegetation gegenüber Schneelawinen

Die Schutzfunktion der Vegetation beruht darauf, dass sie das Anbrechen von Lawinen verhindert. Ist aber einmal eine Lawine angebrochen, so vermag auch intakter Wald die in Bewegung geratenen Schneemassen meist nicht mehr zu stoppen. Damit ein Anbrechen einer Lawine durch Vegetation verhindert werden kann, muss die Höhe (Oberflächenrauigkeit) der Vegetation ausreichend sein um die Schneedecke zu durchstoßen. Die Schutzwirkung geht verloren, wenn diese Oberflächenrauigkeiten von der Schneedecke überragt werden (SAEKI u. MATSUOKA 1969). Weiter ist zu beachten, dass niedrige, völlig überschneite Pflanzen - besonders Arten, die leicht zu Boden gedrückt werden, - die Lawinenbildung sogar fördern können, da sie die Bildung von Schwachschichten innerhalb der Schneedecke und das Abrutschen von Schneemassen fördern. So bietet etwa Krummholz nur Schutz, solange es nicht überschneit wird. Da in von Lawinenaktivität betroffenen alpinen Regionen meterhohe Schneedecken existieren, kann lediglich ein intakter Wald Schutzfunktion bieten. Wald ist dabei ein effektiver und kostengünstiger Lawinenschutz. Die Stämme stützen die Schneedecke ab und stabilisieren sie. Diese Stützwirkung darf nicht überschätzt werden, nur ein dichter Wald schützt vor Lawinenanbrüchen, da die Stützwirkung nur in unmittelbarer Nähe zum Stamm gegeben ist.

Begrenzende Faktoren

Die natürliche Waldgrenze, gegeben durch die Höhenlage und das Klima, bestimmt die Einsetzbarkeit des Waldes als Lawinenschutz. Lokale Unterschiede gibt es dabei durch die zeitliche Länge der Schneebedeckung, durch Windexposition, durch kalte Temperaturen, durch den Bodentyp und die Tiefe des Humus. Nimmt man auf die Auswirkung des Mikroklimas und der kleinräumigen Topographie Rücksicht, können Waldbestände auch in der subalpinen Zone aufgeforstet werden. Junge Bäume sterben oft durch Pilzkrankheiten/Schimmel aufgrund der langen Schneebedeckung. Der Schwarze Schneeschimmel (*Herpotrichia juniperi*) kommt zum Beispiel von den Voralpen bis in das Hochgebirge vor und befällt die Nadeln von Fichte, Bergföhre, Arve, Tanne und Wacholder. Sein Verbreitungsgebiet liegt zwischen 900 und 2000 Metern über Meer. Dieser Schneepilz verursacht vor allem in den Voralpen in schneereichen Lagen große Schäden an der Verjüngung. Er befällt Bäume sowohl in Naturverjüngungen als auch in Gebirgsaufforstungen, wo er auch auf sehr vitale Bäume übergeht.

Wildverbiss ist ein weiterer Grund für Schäden an Jungbäumen. Junge Bäume sind allerdings flexibler als ältere. Deshalb brechen Bäume erst ab einem Stammdurchmesser größer etwa 10 cm aufgrund des Schneedruckes und Aufforstungsvorhaben scheitern häufig nach 30 -50 Jahren aufgrund fehlender Pflege.

Hinweise zur Bemessung und Pflanzung

Das Anforderungsprofil an den Wald hängt stark vom erwarteten Schutzziel und dem bestehenden Schadenspotential ab. Kleine Schneerutsche, die zum Beispiel Personen auf einer Skipiste gefährden, können, wenn überhaupt, nur von sehr dichten (Kronendeckungsgrad >50%), wintergrünen Beständen verhindert werden. Für die Verhinderung von großflächigen Lawinenanbrüchen können an einen Bestand etwas weniger strenge

Anforderungen gestellt werden. Aufgelöste Bestände, wie sie oft an der oberen Waldgrenze vorkommen, müssen immer kritisch beurteilt werden. Der Kronendeckungsgrad und die Abmessungen vorhandener Lücken sind in Kombination mit der Hangneigung wichtige Kriterien, um die Schutzwirkung zu beschreiben (FREHNER 2005). Als Anhaltswert werden Stammzahlen von 500 Stämmen pro Hektar für Hänge mit einer Neigung um 35° und 1000 Stämme pro Hektar für steile Hänge als erforderlich angesehen, um Lawinenabgänge zu verhindern. Da diese Stammzahlen in subalpinen Wäldern oft nicht vorhanden sind, sollte unbedingt darauf Wert gelegt werden, Lücken im Wald zwischen den Bäumen nicht größer als 15 - 25 m werden zu lassen und einen Kronendeckungsgrad von 30 bis 50 % zu erreichen (Bei einem Kronendeckungsgrad von 50 % und einer Hangneigung von 35° wird bis zu einer Lückenbreite von 15 m die Lawinenauslösung als sehr unwahrscheinlich angesehen). Der Wald sollte dabei verschiedene Altersklassen und Gehölzarten enthalten. Umgestürzte Bäume bieten zusätzlichen Schutz und sollten wenn möglich nicht aus dem Wald entfernt werden. Zumeist müssen um Aufforstungsvorhaben des Lawinenschutzwaldes erfolgreich zu gestalten zusätzlich Verbauungen errichtet werden. Solche Aufforstungshilfen sind (neben den üblichen Lawinenanbruchverbauungen) Dreibeinböcke, Pfählungen, Erdterrassen oder Erdhügel.

Formelzeichen	Bezeichnung/ Erklärung	Einheit
A	Abflussprofil quer zur Fließrichtung	m ²
A _p	eingetauchte Fläche der Vegetationsstruktur quer zur Wasserströmung	m ²
c _p	Strömungswiderstand von Pflanzen	-
c _v	Strömungsbeiwert	-
c _w	Strömungsbeiwert im Hochbau (Wind)	-
F _{ST}	Strömungswiderstand einzelner Vegetationsstrukturen	kN
g	Erdbeschleunigung = 9,81	m/s ²
Index i	für Teilelement	-
l _u * l _G	Mantelfläche der Gerinnewandung	m ²
m _v	spezifische Vegetationsanströmdichte	-
m _v	spezifische Vegetationsanströmdichte	-
Q	Abflüsse	m ³ /s
R _{d,i}	Bemessungsbeiwert für den Widerstand	-
R _{k,i}	Widerstand eines Bauteils der sich aus den naturwissenschaftlichen Eigenschaften herleiten lässt	-
S _{d,x}	Einwirkungen, Bemessungswert	-
S _{k,x}	Einwirkungen (aus natur- und ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen charakteristische Werte)	-
v	Mittlere Fließgeschwindigkeit in einem Abflussprofil	m/s
v _{crit}	kritische Fließgeschwindigkeit	m/s
γ _i	Teilsicherheitsbeiwert gemäß Euronormen	-
γ _x	Teilsicherheitsbeiwert gemäß Euronormen	-
ε	Verstärkungsfaktor für Schleppspannungen nach SCHRÖDER u. ROMISCH 2001	-
τ	Scherspannung in der Bodenmechanik	kN/m ²
τ _r	Maximalwert der Scherfestigkeit bei Boden	kN/m ²
τ ₀	Vorhandene Schleppspannung bei einem Ereignis	N/m ²
τ _{crit}	kritische Schleppspannung für Substrat, Vegetation oder Bauweise	N/m ²

3. Ingenieurbioologische Bauweisen

3.1 Bautypenbuch EFIB 2007

Die ingenieurbioologischen Bauweisen wurden im EFIB Handbuch der Bautypen (ZEH 2007) gedruckt. Die Bauweisen selbst sind gegliedert in Vorarbeiten, Arbeiten mit Pflanzen und die Pflege. Jede Bauweise wird mit einem kurzen und treffenden Text angeführt und durch aussagekräftige Fotos und Zeichnungen ergänzt. Das Bautypenbuch war ein erster Schritt und damit eine umfangreiche Grundlage für die europäischen EFIB-Richtlinien.

3.2 Verwendung der Bautypen

3.2.1 Entscheidungskriterien

Die richtige Auswahl der ingenieurbioologischen Bauweisen und Pflanzenzusammensetzung ist entscheidend für die Zielerreichung.

Als Entscheidungskriterien gelten vorrangig folgende Ziele:

Schutzziel

Hydraulische, hydrologische, geo- und sicherheitstechnische Anforderungen der Bauweisen und die zukünftige Vegetation.

Ökologisches Ziel

Verbesserungsgebot des ökologischen Zustandes beispielsweise eines Gewässers bezogen auf die Entwicklung von Flora, Fauna und der Gewässergüte wie in der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Kommission definiert Biotopstrukturen als Habitate.

Landschaftsästhetisches Ziel

Bestmögliche Einbindung der Bauweisen in die Landschaft, Erkennbarkeit eines Gewässers.

Ökonomisches Ziel

Verwendung von vegetativ vermehrbarem Pflanzenmaterial, von Materialien an Ort und Stelle oder aus nahe gelegenen Gebieten, Verwendung von ausdauernden und pflegeextensiven Bauweisen und Materialien, Kostengünstiges Bauen und Unterhaltung.

Nachhaltigkeitsziel

Verwendung von nachwachsenden und natürlichen Baustoffen: lebende Pflanzen, Holz, Erde, Stein, Verwendung von energiesparenden Baustoffen.

Gesellschaftliches Ziel

Nutzungsmöglichkeiten durch die Bevölkerung, Erholung und Tourismus, Schaffung neuer Grünräume im Siedlungsgebiet.

3.2.2 Entscheidungsmatrizen

Die Entscheidungsmatrizen für ingenieurbioologische Maßnahmen an (Fließ)gewässern und für ingenieurbioologische Maßnahmen zur Hang- und Böschungssicherung finden sich im Anhang.

4. Pflege ingenieurbioologischer Bauweisen

4.1 Pflegegrundsätze

Gepflegt wird nur, wenn die Pflege auch erforderlich ist - „lassen statt machen“. Die Notwendigkeit wird durch regelmässige Begehungen bzw. die Erfolgskontrolle (vgl. Teil 5) ermittelt.

Folgende Grundsätze werden berücksichtigt:

- Auswahl und Anwendung der Bauweisen sollen möglichst wenige Pflegekosten verursachen.
- Mit möglichst wenig Mitteln und möglichst schnell zum Entwicklungsziel kommen.
- Mit dem Entwicklungsziel sind die technische, ökologische ökonomische und ästhetische Wirksamkeit definiert und harmonisiert.
- Größtmögliche Vielfalt bzw. Biodiversität.
- Verkehrssicherheit.
- Kontinuierliche Hinführung zum bestmöglichen (angepassten) Wirkungsgrad.
- Es muss klar sein, dass man mit der Pflege auch negative Entwicklungen verursachen kann.
- Abstimmung der Pflege auf Naturhaushalt zur Minimierung negativer Effekte, denn falsche Pflege kann schlimmer sein als gar keine.
- Die Ausführung der Pflegeschritte muss sich an der Entwicklung der Bauweisen bzw. der daraus hervorgehenden Pflanzenbestände orientieren (Bauweisspezifische Pflege – Zielvegetation).
- Voraussetzung für die Zielerreichung ist die Abfolge aufeinander abgestimmter aufbauender Pflegeschritte und deren fachliche Begleitung
- Für die Durchführung einer fachgerechten Pflege ingenieurbioologischer Bauweisen sind die entsprechende finanzielle Ausstattung und qualifiziertes Pflegepersonal unabdingbar.
- Die Organisation der Pflegearbeit muss die Verwendung und/oder Verwertung des Pflanzenmaterials gewährleisten (als lebenden Baustoff, Hilfsmaterial, Biomasse etc.).
- Pflegezeitpunkte und Ausführung müssen dokumentiert werden.

4.2 Pflegeabfolge

Fertigstellungspflege/Anwuchspflege

Massnahmen ab Baufertigstellung bis zum Erreichen des abnahmefähigen Zustandes bzw. bis zur Übernahme der Bauwerke durch den Auftraggeber.

Der abnahmefähige Zustand wird durch entsprechende Erfolgskriterien festgelegt. Diese müssen im Projekt standortspezifisch definiert und im Leistungsverzeichnis beschrieben sein.

Entwicklungspflege

Massnahmen zur bestmöglichen Entwicklung bis zum Ende der Gewährleistung bzw. bis zum Erreichen des funktionsfähigen Zustandes.

Erhaltungspflege / Unterhaltungspflege / Unterhalt

Massnahmen zur dauerhaften Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes

Zustandsfeststellung

Der abnahme- bzw. funktionsfähige Zustand ist mittels Erfolgskontrolle (siehe Kap. 5) festzustellen

4.3 Pflegeumfang

Regelmässige (Ordentliche) Pflegemaassnahmen

Pflegemaassnahmen, welche laufend in regelmässigen Abständen durchgeführt werden (siehe Erhaltungspflege).

Unregelmässige (Außerordentliche) Pflegemaassnahmen

Pflegemaassnahmen, welche nach außergewöhnlichen Ereignissen und unvorhergesehenen Entwicklungen notwendig sind (Hochwasser, Schädlinge, Neophyten, Vandalismus, Windwurf, Nassschnee etc.).

4.4 Pflegeplanung

Die Pflegeplanung stützt sich auf die Pflegegrundsätze. Sie beinhaltet die Pflegeabfolge, den Umfang, die Zustandsfeststellung mittels Erfolgskontrolle (siehe Kap. 5), eine Übersicht und Details zur Pflegeausführung. Als Kartenmaterial sind Zeichnungen, Bilder, Profiltypen, Tabellen und Lagepläne beizulegen.

4.5 Pflegeausführung

Bauweisspezifische Pflege- und Zielvegetation

Jede Bauweise benötigt abhängig von der Zielvegetation spezielle Pflegeanforderungen je nach Entwicklungsstand der Pflanze und Zustand des Materials.

Je nach verwendetem Lebendmaterial lassen sich folgende Bauweisen unterscheiden:

- Pionierbauweisen (bestehend ausschließlich aus Pionierarten, v.a. aus Weiden)
- Überleitungsbauweisen (enthalten Pionierarten, Arten der Sukzessionsfolgen und des Entwicklungsziels)
- Klimaxbauweisen (bestehen ausschließlich aus Arten des Entwicklungsziels)

Pflegearbeiten

Zeichnungen und Erläuterungen finden sich im EFIB-Bautypenbuch (Zeh 2007) im Kapitel 8.

Für Gräser, Röhrichte und Kräuter fallen folgende Massnahmen an:

- Mäharbeiten (abschnitts- oder streckenweise, Staffelmahd, nach Fruchtreife, dem Biototyp angepasste Werkzeuge und Geräte verwenden)
- Krauten (Unterwassermahd)
- Nachbesserungsarbeiten wie Nachsaat
Nachdüngung
Verpflanzung von Soden, Vegetationsstücken, Rasenziegeln
Bewässerung
- Abfall sammeln und entsorgen

Für Bäume und Sträucher fallen folgende Massnahmen an:

- Stockschnitt (abschnittsweise alternierende Verjüngung)
- Kopschnitt (an Bäumen oberhalb der Hochwasserlinie bzw. entlang von Pflegewegen aus landschaftskulturellen und ökologischen Überlegungen)
- Durchforstung/Einzelstammentnahme (Entfernen einzelner Gehölze aus hydraulischen, ökologischen und ästhetischen Gründen)
- Pflegeschnitt (Erhaltungsschnitt)
- Ringeln/Schälen von unerwünschten Baumarten wie Robinie (einen Ring umfassend von 50 cm Länge, in etwa an der Stammhöhe von 100 bis 150 cm):

- Nachbesserungsarbeiten wie Nachpflanzen
Nachdüngen
Pflege und Abdeckung der Baumscheibe
Bewässerung
Nachbinden oder Erneuerung der Baumstützung
- Abfall sammeln und entsorgen

Pflegeintervalle

Zeitliche Abfolge der Pflegeschritte ist zu setzen je nach:

- Entwicklungsziel
- vegetationskundlichen und baumbiologischen Gesichtspunkten (Baumpflege: bester Schnittzeitpunkt im Sommerlaubstadium durch besseren Wundverschluss!)
- Hydraulischen, hydrologische geo- und sicherheitstechnische Anforderungen
- ökologischen und naturschutzrechtlichen Aspekten (entsprechende Schonzeiten für Flora und Fauna, speziell für Fische und Vögel etc.)
- landschaftsästhetischen Aspekten
- Bedarf an Lebendmaterial für die Herstellung weiterer ingenieurbioologischer Bauweisen (muss ganzjährig möglich sein, ggf sind länderspezifische gesetzliche Regelungen entsprechend zu ergänzen)
- Entsorgungsmöglichkeit nicht verwend- oder verwertbarer Materialien
- Zugangsmöglichkeiten (z.B. erschwert in der Vegetationsperiode auf Wiesen...)

Pflegeziel	Pflegetyp	Pflegearbeit	Pflegeintervall	Pflegezeit

5. Erfolgskontrolle ingenieurbioologischer Bauweisen

5.1 Grundsätze der Erfolgskontrolle

Monitoring ist Voraussetzung für die dauerhafte Qualitätssicherung und fachliche Weiterentwicklung der Ingenieurbioologie

- Finanzielle und personelle Voraussetzung für Monitoring müssen gesichert sein.
- Monitoring ist durch qualifiziertes Personal durchzuführen.
- Die zu kontrollierenden Maßnahmen müssen entsprechend lokalisiert und dokumentiert sein. Datenbankbasierte Auswertung soll möglich sein. Voraussetzung dazu sind standardisierte Erhebungsbögen, zugänglich über Internet.

5.2 Kontrolle des Zustandes und der Entwicklung

Zustand lebender Baustoffe - Bäume und Sträucher

- Höhe
- Durchmesser (auf 20 cm und 100 cm Stammhöhe zu messen)
- Dichte (Anz. Sprosse/m²)
- Vitalität (Vitalitätsstufen nach BRAUN 1-5 oder ROLOFF 0-3)
- Artenzusammensetzung
- Etc.

Zustand lebender Baustoffe - Gräser und Kräuter / Röhricht

- Vitalität
- Deckungsgrad
- Artenzusammensetzung

- Anzahl Blühtriebe
- Mittlere Blatthöhe
- Gräser/Kräuter Verhältnis

Zustand unbelebter Baustoffe

- Zustand der Rundhölzer - Vermorschungsgrad (visuelle Kontrolle von Anschnitten, technische Kontrolle durch Resistographen etc.)
- Zustand der Nägel und Drähte
- Zustand anderer Materialien
- Verwitterungsgrad unbelebter regionaler Baustoffe
- Konstruktionsschäden durch Erosion und Deformation
- Konstruktionsmängel

Ökologischer Zustand

Differenzierte Erfassung des ökologischen Zustandes ingenieurbioologischer Bauweisen je nach Entwicklungsziel wie:

- Biotopverbund
Erfassen der Habitatsqualität für die Zielarten (Fauna und Flora)
- Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) „guter ökologischer Zustand“
Erfassen der biologischen Qualitätskomponenten.
- Allgemeine ökologische Wirkung
Erfassen des ökomorphologischen Zustandes, Einfluss ingenieurbioologischer Bauweisen auf Gewässerstrukturgüte und Gewässergüte
- Geklärt werden muss jeweils die Bezugsgröße zur Erfassung des ökologischen Zustandes (Querschnitt / einzelne Bauweise oder Abschnitt / Gesamtwirkung mehrerer Bauweisen)

5.3 Kontrolle der Wirksamkeit und Funktion

Hydraulische und hydrologische Funktion

- Abflussvermögen
- Hochwasserschutz, Retention
- Hochwasserstände
- Erosionserscheinungen
- Rückschlüsse auf Abfluss, Schleppspannung und Fließgeschwindigkeit

Geo- und sicherheitstechnische Funktion

- Stabilität
- Dauerhaftigkeit
- Sicherheitstechnische Funktion
- Biotechnische Zielerreichung / Sicherung
- Risse und Aufbauchungen
- Deformationen
- Senkungen und Setzungen
- Böschungsbrüche
- Auffällige Stammformen
- Sickerwasseraustritte
- Bioindikation

Ökologische Funktion

- Habitatsausbildung
- Habitatsdiversität
- Habitatsvernetzung
- Auswirkung auf Naturhaushalt
- Gewässerstrukturgüte
- Erreichung der Zielvegetation / Naturnähe

Ästhetisch-landschaftliche Funktion

- Landschaftsbild und Landschaftskulturelle Eigenart

Sozioökonomische Funktion

- Kosten-Nutzen-Analyse / Nutzwertanalyse
- Tourismus, Naherholung
- Nutz- und Erlebbarkeit
- Identitätsstiftung „Adressbildung“

Gesamtbewertung

5.4 Kontrolle der Nachhaltigkeit und Ökobilanz

Auswahl der Bauweise - bestmögliche Eignung für das Erreichen des Entwicklungsziels.

Auswahl des Materials - bestmögliche Eignung für die jeweilige Bauweise:

- bevorzugte Verwendung von gebietsheimischem, standortseigenen, arealtypischen lebenden und unbelebten Baustoffen, abgestimmt auf die konstruktiven Anforderungen.
- Herkunfts-Zertifikate (Jutenetze etc.)

Pflegemaßnahmen:

- Erfordernis
- Art der Ausführung (Maschinen inkl. Typen)

European Guidelines for Soil and Water bioengineering

- 1. Basic principles of soil and water bioengineering**
 - 1.1 Definition of soil and water bioengineering
 - 1.2 Possibilities and limits of soil and water bioengineering
 - 1.3 The functions of plants and plant populations in soil and water bioengineering
 - 1.4 Historical development of soil and water bioengineering and its current significance for the European region
 - 1.5 Disciplines of application for soil and water bioengineering
 - 1.6 Soil and water bioengineering, nature conservation and professional ethics
 - 1.7 Requirements for successful soil and water bioengineering work

- 2. Calculation of soil and water bioengineering stabilisation measures**
 - 2.1 Basic principles of the calculation of soil and water bioengineering stabilisation measures**
 - 2.1.1 Model of soil bioengineering stabilisation
 - 2.1.2 Impacts on soil bioengineering stabilisation measures in terms of structural design
 - 2.1.3 Vegetation factors that cause impact reduction
 - 2.2.4 Resistance of vegetation to the above mentioned impacts
 - 2.2.5 Individual parameters to describe the resistance of plant populations
 - 2.1.6 Basic consideration on the use of site-specific plants and the evaluation of site-specific factors Preliminary

 - 2.2 Integration of soil and water bioengineering calculations into the planning process**

 - 2.3 Recommendations for common areas of applications**
 - 2.3.1 Erosion of earth slopes
 - 2.3.2 Shallow landslides at slopes
 - 2.3.3 Gully erosion at slopes and hillsides
 - 2.3.4 Riverbanks and adjacent areas
 - 2.3.5 Banks at standing waters
 - 2.3.12 Dykes and dams
 - 2.3.13 Coastal protection
 - 2.3.14 Planting for wind and erosion protection
 - 2.3.15 Water regime regulation
 - 2.3.16 Areas destroyed by fire
 - 2.3.17 Bioengineering avalanche protection

- 3. Soil and water bioengineering methods**
 - 3.1 Construction Type Manual EFBE 2007
 - 3.2 Application of the construction types
 - 3.2.1 Decision criteria
 - 3.2.2 Decision matrixes

- 4. Maintenance of soil and water bioengineering structures**
 - 4.1 Basic maintenance principles
 - 4.2 Maintenance schedule
 - 4.3 Types of maintenance
 - 4.4 Maintenance planning
 - 4.5 Maintenance implementation

- 5. Efficiency review of soil and water bioengineering methods**
 - 5.1 Basic principles of efficiency review
 - 5.2 Review of current state and development
 - 5.3 Review of effectiveness and function
 - 5.4 Review of sustainability and ecobalance

1. Basic principles of soil and water bio-engineering work

1.1 Definition of soil and water bioengineering

Soil and water bioengineering is a discipline that combines technology and biology, making use of plants and plant communities to help protect land uses and infrastructures, and contribute to landscape development.

Typically, plants and parts of plants are used as living building materials, in such a way that, through their development in combination with soil and rock, they ensure a significant contribution to the long-term protection against all forms of erosion. In the initial phase, they often have to be combined with non-living building materials, which may, in some cases, ensure more or less temporarily, most of the supporting functions.

The use of organic materials is preferred, because parallel to the development of the vegetation and its increasing stabilisation ability, these materials will rot and be reincorporated in the natural biogeochemical cycles. Also preferred are indigenous (autochthonous) and site-specific plants, as they promote a biodiversity suited to the landscape. The planning and construction objectives are the protection and stabilisation of land uses and infrastructures as well as the development of landscape elements.

1.2 Possibilities and limits of soil and water bioengineering

The **areas of application of soil and water bioengineering** are the stabilisation of embankments, slopes, river banks, forelands, dykes, dams, landfill sites, post-mining landscapes as well as areas surrounding infrastructures.

- In watercourses: soil and water bioengineering techniques contribute to the protection of erosion-prone riverbanks, channel realignment, revitalisation of non-natural watercourses and channels as well as increasing flood-retention in floodplains and the improvement of flood control always in accordance with the promotion of the ecological efficiency of the watercourses, the protection of land uses and the stabilisation of dykes, dams and forelands.
- In slopes and embankments soil bioengineering techniques contribute to the prevention of the different types of erosion, the revegetation and stabilisation of areas affected by landslides as well to the immediate and long-term protection of slopes against slope failures and landslides through the anchoring and buttressing effects of plant roots as well as the contribution of plant transpiration to the soil drainage of soil and consequent increase of particle cohesion.
- in the improvement of the local and regional water regime through suitable soil and water bioengineering measures, forestation and restoration of the vegetation cover on slopes inclusively above the timberline.
- at sea and lakeshores: in the reinforcement of erosion endangered shores and the stabilisation of dykes, dunes and forelands.
- in wetland areas: in the creation of suitable habitats.
- in post-mining landscapes and brown field sites: in the protection and development of new vegetation communities and the revegetation of new landforms and structures.

The use of plants is possible wherever there is a potential habitat for vegetation. **A protective and stabilising vegetation cover to prevent erosion can be used as an alternative or useful addition to conventional engineering methods as long as the plants ensure adequate biotechnical properties.** The development of bioengineering solution involves the combination of the technical expertise of the engineering disciplines, combined with knowledge from the fields of biology and landscape ecology in order to develop a sustainable vegetation cover using site-specific plants able to perform the necessary technical and structural functions. Along with their ability to prevent erosion and contribute to the regulation of the water regime, soil and water bioengineering measures also have a positive effect on microclimate, biotope structure and landscape.

Advantages of soil and water bioengineering measures compared to conventional engineering methods include:

- Longer and sustained functional development due to the development and regeneration ability of plants and plant communities
- Establishment of a more developed plant community in the frame of the natural vegetation succession
- Increase in stability as the plants develop
- Favourable response to disturbance through the natural ability of plants to adapt
- Adaptation of plants to the forces to which they are subjected through their elasticity, resistance to pull-out and new succession lines
- Structuring function of plants
- Increase in biodiversity and habitat functionality (ecology)
- Enhancement of landscape (landscape aesthetics)
- Support of socio-economic factors (tourism, local recreation)
- Measures that are low-impact, use little energy and promote the self-development of nature (no regret measures)

The **preferential use of indigenous plant material** preferably from natural origins instead of cultivated and not site-specific plant species has a number of additional positive effects:

- successful and long-term stabilisation due to optimum integration in the local ecosystem, better adaptation to extreme local conditions and local and regional climate and geology,
- greater potential for the development of site-specific plant communities ,
- better and more sustainable integration into the ecosystem and landscape processes,
- better cost-benefit ratio and greater cost-efficiency.

In urban areas with particular demands on safety and in the frame of the landscaping and the design of green areas it is also possible to use non-native species as well as ornamental trees and shrubs as long as they are suited to local conditions and have the necessary biotechnical properties.

The limits of soil and water bioengineering are the limits of the abilities of plants and plant communities to fulfil the technical objectives of the intervention in domains such as when:

- mechanical forces exceed the resistance of plants and plant communities,
- plant roots are not deep and strong enough to prevent slope failures,
- environmental conditions for plant germination and development are too poor or extreme to enable adequate growth even with the aid of growth-promoting substances (bad lands),
- maintenance inappropriate to the particular local conditions, leads to an inadequate development of the vegetation and adverse effects on stabilisation and drainage.

When deciding in favour of soil and water bioengineering solutions, it is necessary to be aware of the **disadvantages of soil and water bioengineering solutions in comparison to conventional engineering methods**:

- The timing of soil and water bioengineering works is constrained by the rhythm of plant establishment and development as well as disturbance factors affecting the vegetation.
- In many cases, more space is required to allow the adequate development of the vegetation.
- Root and stem development, can affect the integrity of conventional engineering structures when growing in cracks or fissures.
- As a result of their increasing thickness, roots can lead to the deformation of structures.
- Large woody plants when subject to external forces, transmit those forces through the root system to the soil reducing its stability and increasing for example the risk of slope failure.
- The development of roots can cause changes in the soil structure affecting its stability and the stability of existing structures. Geotechnical limits may be reached (e.g. effective rooting depth).
- The limited calculation possibilities of bioengineering interventions cause considerable degrees of uncertainty.

These 'apparent' disadvantages can often be compensated by systematic management along space and time. In many cases, it is possible to identify more advanced bioengineering solutions better adapted to the particular local conditions and stress factors.

1.3 The functions of plants and plant communities in soil and water bioengineering

The use of plants in structural and civil engineering is based on knowledge and observations of their properties, which often date back centuries.

Thanks to their different **properties**, plants can respond flexibly to their environment and are therefore employed to perform engineering functions. They can:

- Reproduce and develop in different ways – through seeds and/or through vegetative forms,
- regenerate following damage and adverse environmental changes,
- extract water from the soil and release it to the atmosphere (evapotranspiration),
- connect and interlink different materials and structures,
- cover surfaces,
- intercept /retain / moving solid materials, dissolved substances and water,

- tolerate burying or submersion by developing sprouting roots, ,
- ability to adapt to changes in local conditions like the variation on the speed of the water flow in a channel.

These properties enable plants to perform complex functions, which can be roughly divided into four categories: technical (1), ecological (2), aesthetic (3) and economic (4).

The result of soil and water bioengineering interventions are living systems, which develop and maintain their balance by means of natural succession, i.e. by undergoing a process of dynamic self-regulation without artificial energy input. The correct choice of living as well as non-living building materials and types of construction ensures an exceptionally high level of sustainability whilst requiring minimum maintenance (cf. chapter 4). It is important to note, however, that in urban spaces such as towns or cities, which have been subject to major changes, these goals require specialised maintenance.

1.3.1 Technical functions

Technical functions of primary importance in terms of the stabilisation properties of plants in the frame of soil and water bioengineering interventions are:

- Covering of the ground using plant communities as protection against heavy precipitation, soil erosion by water and wind, snow abrasion and rock fall.
- Mechanical anchoring and buttressing of the soil by the roots.
- Cohesion and stabilisation of the soil through the aggregation of soil particles by plant roots, humus, mycorrhizae and microfauna as well as interlocking or anchoring of topsoil and subsoil and prevention of the washout of fine material through their retention and filtering by the network of fine roots.
- Roughening of the ground by shoots, twigs and leaves promoting the interception and retention of debris, boulders and snow.
- Slowing down and diverting air and water flow.
- Effects in the area of the root, in particular compression through the increase in root thickness, soil loosening due to movement of the root system induced by the movement of the stem and branches and soil compaction due to the weight of the vegetation.
- Increase in overall soil cohesion through the extraction of water by evapotranspiration
- Positive management of the local and regional water balance through the evaporation of soil water, retention of precipitation water, retention of soil water and balanced water infiltration.

1.3.2 Ecological functions

Soil and water bioengineering measures can lead to the following improvements in environmental quality:

- Positive effects on soil properties such as increase in pore volume as well as improvement of living conditions for microorganisms and formation of humus and plant nutrients.
- Development of plant communities (succession) and improvement of biotope structures.
- Habitat for fauna.
- Absorption and retention of eventually toxic or eutrophication inducing substances.
- Beneficial change of microclimate.

- Absorption of noise to a low extent.
- Filtering of dust or exhaust gas from the air, and their deposition on parts of plants.

1.3.3 Aesthetic functions

Damaged landscapes can be recovered and aesthetically rehabilitated in a natural way using soil and water bioengineering methods.

- Plants and groups of plants diversify the landscape perspectives.
- Replacement of conventional engineering structures with vegetation ones provide that they are able to ensure similar stability and safety levels.
- Fast integration of earth structures into the surrounding vegetation and therefore into the landscape.
- Visual integration of engineering structures through the use of vegetation formations adapted to the landscape nature and structure.
- Integration and emphasising of constructed structures.
- Screening of engineering structures which would otherwise seem massive.

The application of soil and water bioengineering therefore helps to reduce any visual disturbance of the landscape, whilst allowing engineering structures to naturally blend into the environment.

1.3.4 Economic functions

Based on its knowledge and use of natural elements and processes, soil and water bioengineering helps to recover disturbed areas with a reduced use of materials and energy.

Soil and water bioengineering ensure, therefore, a significant contribution to the sustainability of structural and civil engineering interventions:

- By using proven living construction methods based on the ability of plants to install, reproduce and develop vegetatively more cost-efficient solutions than traditional civil engineering ones can be implemented. Additionally the fact that nowadays bioengineering works can largely be performed by machines increase its comparative cost efficiency.
- Through the use of building materials able to regenerate, thereby reducing the amount of material required, even if this results in higher wage costs.
- Through sensible reutilisation of site-specific and site obtained plant material, soil and stones transportation costs and construction material costs can be strongly reduced.
- Thanks to the special properties of living plants, it is also possible to keep the maintenance costs of bioengineering structures to a minimum.
- In the event of damage of bioengineering structures, renovation costs are often lower due to the ability of the vegetation to self-regenerate.
- Socio-economic factors (e.g. tourism in high mountain regions, local recreation)

1.5 Historical development of soil and water bioengineering and its current significance for the European region

Soil and water bioengineering is based on the fundamental idea of creating synergies between human use of the landscape and the natural factors and processes. The

conceptual structure behind soil and water bioengineering has its origins in Europe, probably because demand for land use in Europe is particularly high, due to its dense population and long land use history.

Stabilisation methods based on the use of living plants and parts of plants in hydraulic and earthworks engineering have been known for centuries. What used to be manual work has since developed into the complex, application-oriented science that is soil and water bioengineering. This was the result of:

- the application of knowledge of landscape ecology for the in-depth regional observation of the natural landscape,
- the evaluation of the indication value of plants to assess a site and their bioengineering use potential,
- the use of building materials suited to the each particular site and habitat,
- the application of mechanical engineering machines and tools in creating living structures,
- maintenance and development measures based on predefined technical and ecological objectives,
- the scientific evaluation of the end results,
- increased use of indigenous plant species, certified plant origins and natural building materials in order to ensure that engineering measures are in line with the principles of nature conservation, and ensure the improvement of water courses and biotopes.
- eliminating the use of fertilisers and certain growth-promoting substances if these may have an adverse effect on waters and conservation areas.
- modern building materials that are environmentally sound.

Aside from a continuing demand for slope stabilisation in road construction, the stabilisation of coastal areas and diversified requirements in hydraulic engineering, new challenges are developing for bioengineering:

- Climate change and extreme weather conditions will lead to increasing erosion problems, e.g. in connection with flooding and permafrost. Here, bioengineering can offer solutions.
- Soil and water bioengineering measures will help to reduce the consequences of any disturbances of the water balances and changes in drainage conditions.
- The use of soil and water bioengineering methods will reduce desertification and soil and ecosystem degradation.
- A protective vegetation cover, based on the use of diversified plant communities built of site-specific or adapted plant species, will help to safeguard and enhance biodiversity.
- A low consumption of energy and materials and the use of renewable raw materials in soil and water bioengineering will promote a positive use of resources.
- Increased planting of trees and shrubs will have a positive effect on CO₂ emissions.
- Compliance with the guidelines of the Kyoto Protocol, the Rio Convention and the European Soil Protection Directives, and meeting the objectives of the Water Framework Directive through retention and the interconnection of habitats.

Overall, soil and water bioengineering approaches promote ecological awareness and a new building culture.

1.5 Disciplines of application for soil and water bioengineering

Today, soil and water bioengineering methods are applied in many disciplines when it comes to essential stabilisation work. They include:

- Landscape management
- Agro-hydraulic engineering, dikes and irrigation
- Agriculture and landscape planning
- River engineering, hydraulic engineering
- Coastal protection
- Torrent and avalanche control
- Industrial hydraulic engineering
- Mining and reclamation
- Quarrying
- Sanitary engineering

- Waste management
- Construction of sport and leisure facilities
- Road, railway and airport construction
- Construction of country and forest roads
- Construction of footpaths, cycle paths and bridle paths
- Other areas of civil engineering

In addition, basic soil and water bioengineering knowledge is applied in geotechnics, hydraulic engineering and structural engineering.

The following areas of expertise contribute to Bioengineering planning and praxis:

Occupational group	Expertise related to soil and water bioengineering	Skills applied in project implementation
Botany	Phytosociology Geobotany	Vegetation surveys as a basis for planning, plant control, quality assessment and target assessment, monitoring of vegetation development
Geosciences	Soil science, land improvement, erosion mechanisms, bank and coastal protection, climate and microclimate	Geoscientific reports, soil protection
Horticultural engineering	Soil, fertilisation, soil improvement, plants Planting methods	Plant establishment and maintenance revegetation efficiency review
Agricultural engineering	Soil, fertilisation, soil improvement, plants Sowing methods	Plant establishment and maintenance Herbaceous vegetation, sowing efficiency review
Forestry engineering	Soil, fertilisation, soil improvement, plants Forestry, logging, timber supply	Forestation, protective forest maintenance, torrent control, slope stabilisation in the construction of forest roads forestation efficiency review
Horticulture and landscape gardening, Landscaping	Small-scale earthworks and hydraulic engineering, site and soil management, plant establishment	Design, construction and maintenance Soil and water bioengineering measures
Landscape architecture/ landscape planning	Planning process, framework plans, project planning, environmental impact assessments, landscape management plans, flora-fauna-habitat compatibility studies, small-scale earthworks and hydraulic engineering, site and soil management, plant establishment	Framework plans, project planning, construction supervision, drafting of soil and water bioengineering measures
Hydraulic engineering, river engineering, torrent control, coastal protection	Protective hydraulic engineering, hydraulic engineering, hydraulics, stability, structural and civil engineering, framework plans, project planning, implementation	Framework plans, expert reports, hydraulic engineering, feasibility, project planning, construction supervision, implementation water management efficiency review
Road construction engineering	Road construction, structural and civil engineering, earthworks engineering, drainage, stability, framework plans, project planning, implementation	Framework plans, project planning, construction supervision, implementation
Mining engineering	Geotechnics, structural and civil engineering, process engineering, framework plan, operating plan, project planning	Framework plans, project planning, construction supervision, implementation
Geotechnics	Shear resistance, stability	Reports, feasibility, ground design, embankment and slope stabilisation, redevelopment planning, geotechnical efficiency review
Land development engineering / surveying engineering	Land development engineering, land improvement, road construction, soil science, agriculture, hydraulic engineering	Framework plans, land improvement measures, road construction, agricultural structures, project planning, construction supervision, implementation, land improvement efficiency review

1.6 Soil and water bioengineering, nature conservation and professional ethics

Soil and water bioengineering can play a key role in the improvement of the ecological conditions of habitats according to the EU Water Framework Directive, the Flood Protection Directive, the Soil Protection Directive and other directives (e.g. relating to the protection of species and biotopes or the preservation of the environment) and, by making use of its possibilities, can help to restore disturbed sites to a near-natural state. Soil and water bioengineering interventions stands for sustainability.

Nature conservation is a primary goal of soil and water bioengineering. However, at least in the case of stabilisation measures, the priority is to ensure the safety of infrastructures and of the land use of a given site.

It is possible for conflicts to occur between soil and water bioengineering and nature conservation. If the requirements of nature conservation take priority, the use of soil and water bioengineering methods may be rejected, if these may lead to changes in natural and landscapes development processes. The choice of plants, taking into account their pioneer properties, and the promotion of native plants in the open landscape may not always be based exclusively on nature conservation criteria.

What applies to other engineering disciplines also goes for soil and water bioengineering: experience, knowledge and professional expertise are used to employ resources in an optimum and economical way whilst ensuring the proportionality of means.

The perception of the soil and water bioengineering profession is governed by the law of minimum energy input when planning measures: 'as much as necessary but as little as possible'. This is a principle to which soil and water bioengineering is committed (code of ethics).

1.7 Requirements for successful soil and water bioengineering work

Successful soil and water bioengineering work has always relied on the involvement of other disciplines necessary for the achievement of a project and their close interdisciplinary cooperation. Therefore, the following points must be taken into account:

- Assessment of required stabilisation work: is it feasible to use soil and water bioengineering methods?
- Careful examination of the conditions of the site and natural landscape such as the microclimate of the working area, analysis of the soil conditions taking into account its chemical, physical and hydrological properties,
- Assessment of light conditions,
- Application of basic knowledge on flora and phytosociology,
- Presentation of the basis for evaluation and review of the hydrological, hydraulic, geomechanical and geotechnical data in view of the project target (cf. European Federation of Soil and water bioengineering (EFBE) guideline chapter 2),
- Evaluation of potential interaction with existing infrastructure,
- Consideration of possibilities for site improvement,

- Determination of target vegetation as well as pioneer plants, further succession phases and maintenance measures with which this can be achieved,
- Consideration of similar reference lines in comparable natural environments,
- Compliance with codes of practice (standards, guidelines, manuals of the relevant disciplines),
- Determination of maintenance and efficiency review (cf. EFBE guideline chapters 4 and 5).

In Europe, the planning and implementation of soil and water bioengineering structures should be governed by the EFBE Construction Type Manual (ZEH 2006). This manual is based on the professional experience of numerous colleagues. It plays a key role in standardising terminology to describe construction types throughout Europe (cf. EFBE guideline chapter 3).

When performing soil and water bioengineering work (the categorisation of planning tasks into levels of difficulty I – III corresponds to EN DIN 1054 Geotechnics – EC 7), the legal requirements and codes of practice of the respective country must be complied with (e.g. accident prevention regulations). In addition, the respective project promoter requires compliance with its specific regulations. This may lead to different solutions in different European countries even if the issues and site conditions are the same.

2. Calculation of soil and water bioengineering stabilisation measures

2.1 Basic principles of the calculation of soil and water bioengineering stabilisation measures

According to DIN 1055-100 and WENZEL 2006 a construction must be designed and elaborated in order that all impacts and consequences occurring during construction and foreseen operation must be assessed and calculated in order to ensure their technical reliability and degree of safety, without risk of failure or unacceptable deformation. During its expected useful life span the construction has to maintain its carrying capacity, serviceability limit state and durability given it is subjected to the required maintenance.

In the frame of the structural design, the structure to be built will be planned and designed according to the experience and models developed on the basis of static research, meaning its reduction to the concerned critical characteristics, dimensions and physical proprieties. The model will integrate permanent (g) and temporary (q) loads (S). These loads are determined by technical and scientific research in order to determine characteristic values (index k) S_k . Multiplication with a partial safety factor γ_x gives the rated value (index d) for each load.

$$S_{d,x} = S_{k,x} \times \gamma_x$$

The construction or construction components act as a resisting force (R), which can be derived from its known characteristics (index k), i.e. R_k . Division by the corresponding partial safety factor γ_i gives the rated value (index d) for each resistance (R_d).

$$R_{d,i} = R_{k,i} / \gamma_i$$

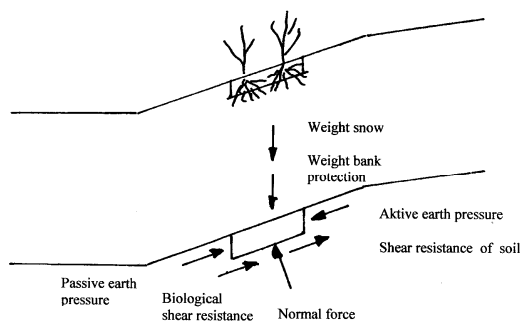
In the design process, the following combinations of scenarios must be analyzed:

1. Standard combination – permanent and common combination of actions
2. Rare combination of actions or rather temporary situations, common under construction. Often the initial phase of bioengineering measures, when a stabilization construction is necessary and no or reduced force from vegetation can be evaluated.
3. Exceptional combination of actions.

2.1.1 Model of soil bioengineering stabilisation

Analogue to the process of structural design each construction or construction component will be defined by a single uniform slice (GROSS et al. 2006). It may include the entire bioengineering bank protection (vegetation + root zone or biological influenced soil) or subsections defined according to internal or external variation of the determining characteristics or acting forces.

The element of stabilization will be considered as being in a state of equilibrium by integrating all acting and resisting forces along the surface of discontinuity (potential slip surface). In this integration process one must consider not only internal forces but also all external acting forces.



Stability design scheme of a soil bioengineering stabilization structure

2.1.2 Impacts on soil bioengineering stabilisation measures in terms of structural design

Dead load of bank protection, including vegetation and vegetation base layer

The dead load is comprehends the weight of the mass of vegetation above ground and the weight of the vegetation base layer. Information about specific weight of soil $\gamma' \left[\frac{kN}{m^3} \right]$ can be found in structural engineer tables, e.g. DIN 1055. Information about the weight per unit of area of vegetation can be, for example found in FLL 2008.

Snow

Snow has an impact on embankments. It acts as a load and may initiate erosion and slope failure. To determine the impact regional experienced data should be accessed.

Wind

The impact on wind depends from the natural landscape and orography. Basic approaches for Germany can be found in DIN 1055-4. Information about the influence of the vegetation on wind can be found in specialized literature on tree statics, e.g. SINN 1988 or WESSOLLY and ERB 1998.

Rain- and hailstorm

Rainstorm is a determinant factor on surface erosion namely in terms of its interaction with the presence or absence of protecting vegetation. Physical explanations and characteristic can be found in MORGAN 1999. Categorization of precipitation events should be done considering the recurrence statistics according to KOSTRA Atlas, DWD 1997.

Local surface run off on embankments

Intense rainstorms cause erosion due to the impact of rain drops and surface run off. Its intensity depends on the intensity of the rain, hydraulic conductivity of the soil, gradient and length of the slope as well as protective effect of the vegetation. Information can be found in MORGAN 1999, DVWK 1996 and KOSTRA Atlas, DWD 1997.

Impact of grazing livestock and game

Impact of grazing livestock and game must be inspected on site and reduced by suitable safety measures.

Impact of human land use

Impact due to skiing, luge, motocross, mountain bike on hillsides as well as ship's wave and bathing activity must be inspected on site.

Impact of water flow

Water flow in rills, gullies and ravines on embankments and slopes as well as in flowing waters and channels, leads to erosion and sedimentation.

Concerning the erosion protection, the beginning of the movement is of importance. In hydro-engineering specialized literature the action of the water flow is characterized by the shear stress $\tau_0 \left[\frac{N}{m^2} \right]$ and flow velocity $v \left[\frac{m}{s} \right]$. Generally one-dimensional computation of the free surface level in open channel flow produce only mean values of water flow for each cross-section to which consolidation coefficients can be attributed according to SCHROEDER and ROEMISCH 2001. It is preferable to use data referred to two-dimensional calculation of discharge when working with large rivers or floodplains.

The design parameters of a water bioengineering action depend on the number of data on flood events. Minor stabilization measure of an embankment, for example in agriculture and horticultural areas, may consider a recurrence period of the 5 year flood is normally sufficient. Regarding important transport infrastructures and buildings a 100 annual flood should be taken as a basis (cf. DIN19661-1).

Wave effect

The effect of waves results from the clash of waves on banks of a lake, a river, a bay or a waterway. The clash depends on the height of the waves and the shape of the bank as well as its roughness in different forms and causes like, for example due to vegetation. The height of the natural wave depends on the wind force, duration and length of development of the wave. Ship's waves depend on the size of the ship, velocity and distance from the bank. Further information is given in specific literature of coastal protection and waterways.

Pressure and erosion caused by driftwood, drift waste and drift ice

The flow of a flood in watercourses as well as the impact of waves, go often together with the impact of driftwood, drift waste and also drift ice. Designing bioengineering measures of embankments viewing these combined effects is of great importance. Appraisalment of technical needs is made recurring to regional experienced data.

Active earth pressure

In case of steep embankment stabilization active earth pressure may act as an impact on a small scale. It can be determined according to geotechnical engineering rules, e.g. SCHMIDT 2006 and DIN 4085.

Hydrostatic pressure and ascending force

Hydrostatic pressure and ascending forces can have an impact on stabilization of embankments and riverbanks. Relevant for the determination of this hydrostatic pressure is a combination of a high level of groundwater with a low water level in the body of water. This difference of water levels should if repeated regularly will cause instability on the slope.

2.1.3 Vegetation factors that cause impact reduction

Reducing the impact of surface water flow with soil and water bioengineering measures within the catchment

In small watersheds structure and vegetation cover have a great impact on the peak flow of a flood wave and its flow speed. A suitable vegetation cover reduces the peak flow and its velocity as well as the shear stress. An adequate introduction and management of the vegetation is advisable in catchments with problems of strong gully erosion or deep erosion of small creeks.

Reducing the impact of water pressure and movement force with soil and water bioengineering measures within the catchment

Vegetation has an impact on the water balance on an embankment or slope. It influences furthermore the frequency and intensity of seepage water and hydrostatic pressure at the base of the slope. A project based prediction of the effect is difficult at the time. It is rather the case, that landslides after clear cutting reveal the problem.

Reducing the impact of rainstorm, hailstorm and strong wind with shielding groves

The impact of rainstorm, hailstorm and strong wind on the soils clearly reduce through the development of an adequate vegetation cover able to intercept and reduce the impact of these factors.

2.1.4 Resistance of vegetation to the above mentioned impacts

As stated in 2.1.1, vegetation and its root zone as well as other biological soil characteristics influenced and dependent from its presence and development (soil fungi, soil micro fauna and micro flora, mycorrhizae, ...) will be considered as a single entity in strict correlation with its direct environment. In terms of static analysis it will be considered as a single object or subdivided according to the needs of the different models.

Resistance to rainstorm and local surface runoff resulting in surface- and rill erosion

Experience in central Europe showed, that a complete, dense vegetation cover is a good erosion protection against rainstorm and local surface runoff. The cover is only required for soils, which erode easily. It is not necessary on barren ground and rocks.

Cover by vegetation includes all above ground parts of plants. It includes also parts of the root system developed above ground and plant litter still connected to stems or root. The criterion for acceptance of grass sowings is, according to DIN 18917, a minimal area coverage of 50%.

Resistance to rill erosion caused by surface runoff

Concentration of runoff over a slope with quantities, velocities and direction dependent of the form of the slope its slope angle, soil texture, rainfall frequency and intensity determines the formation of erosion 0.1-0.4 m in depth. This erosion process can be corrected through the use of a site-specific combination of bushes, grasses, herbs and eventually some trees building a dense vegetation cover of the soil surface. It is critical that the installed vegetation ensures a dense cover promoting deceleration of the runoff and determining sedimentation of soil in rills. Also of critical importance is the root system that must ensure a dense and good structuring of the soil and provide enough resistance to the erosion potential of the runoff.

Resistance to water flow

There are two parameters given in literature to estimate the resistance of vegetation to water flow, critical shear stress τ_{crit} (N/m²) and critical velocity v_{crit} (m/s). These values are valid for situations of uniform flow without sediment transport. Considering bioengineering stabilization interventions, it must be ensured that the areas adjacent to the intervention are sufficiently protected against erosion and there are no discontinuities in terms of the resistance to erosion. Characteristic values for the critical shear stress τ_{crit} (N/m²) and critical velocity v_{crit} (m/s) can be found in DIN 9661-2, GERSTGASER 1998, RAUCH 2006 and JOHANNSEN 1997 and 2008.

In gullies with intense flow of sediments, the presence of dense bushes can lead to a strong deceleration of the flow leading to accumulation instead of erosion. To ensure these results it is necessary to have a high concentration of branches at all times.

These critical values for grass, herbs and reeds are only attained when an adequate dense degree of cover by living and dead leaves, stems and near to the surface roots is ensured.

The critical value for bushes and trees combine the flow deceleration effect and the nature structure and density of the superficial and sub superficial rooting.

Along with the accepted parameters from the literature, the resistance to erosion can be estimated from a natural segment of reference in the vicinity of the area of intervention.

The resistance of river vegetation depends strongly on the vegetation layers. These layers and the occurring plants

vary throughout Europe. The following table presents average values:

Structure of vegetation	τ_{crit} (N/m ²)	v_{crit} (m/s)
Willow bushes	200	2,5
Riparian wood vegetation	100	2,0
Reeds	50	1,5
Grass, short time flooded	30	1,5
Grass, long time flooded	15	1,5

The resistance of water bioengineering interventions to the river flow may lead to a strong reduction of the hydraulic capacity of the channel section. This should be taken into account in hydro-engineering projects, determining the need, for example, of the widening of the constructed section. It is also important to ensure that the maintenance of the vegetation and the elements of the bioengineering intervention ensure the pre-defined hydraulic capacity, of each river section.

Resistance to waves

The resistance to the effect of waves depends, on one hand on the roughness of the surface and its ability to reduce the wave energy. Simultaneously the cover of the surface through the mass of stems, leaves and roots is also of primary importance for the protection of the bank.

Wide zones of dense reeds, willow bushes as well as overhanging thick branches of willow trees have proven of value when it comes to the reduction of wave energy. Relevant parameters for the design are the density of the stems as well as their bending strength.

Evaluating this covering effect involves the consideration of the combined covering mass of leaves and superficial and sub superficial roots. Analysing well characterised natural sites provide relevant planning and design data.

Impact of bioengineering methods in case of overload

The evaluation of the ability of constructions and construction elements to support eventual overloads is very important. The knowledge of the ability of bio-engineering stabilisation measures and structures to resist these overloads is still very limited and it is recommended to evaluate each precise individual case. Examples of critical situations is the formation of small areas of erosion that can affect neighbouring vegetation formations or the case where the collapse of large trees on slopes or river banks can lead to the opening of unprotected unstable gaps or, in the particular case of rivers, the transport of the fallen tree can originate serious damages downstream.

2.1.5 Individual parameters to describe the resistance of plant populations

Acronyms and symbols used in this section can be found in the appendix of chapter 2.

Coverage of vegetation

Coverage of vegetation describes the percentage of ground cover by vegetation. It is a common criterion when evaluating grass and herb vegetation concerning the resistance to rainfall, local surface runoff and strong winds. In case of multilayered vegetation the cover can exceed 100%.

Density of the vertical vegetation structures – density of, straw, branches and stems,

The density of vertical vegetation structures corresponds to the density of all vegetative vertical structures per unit area (piece/m² or piece/ha). From these values depends the resistance to wind action to water flow as well as to wave effect. It can also provide an indirect estimation of root density.

Specific density of vegetation in relation to the flow of water in a watercourse

This value can be calculated according to INDLEKOFER 2000 considering the summing of the surface of a given cross section of the water course occupied by each type of vegetation structures (trunks, stems, bushes of grasses) A_{pi} , multiplied by the respective flow coefficient c_v and divided by the product of the perimeter of the river section and the floodplain section $L_u \times L_G$:

$$m_v = \frac{\sum c_v \times A_{pi}}{L_u \times L_G} \quad [-]$$

The coefficient c_v is used to characterise the impact of vegetation on the flow velocity. Data from laboratory investigations point to values of c_v ranging between 1,2 and 1,5.

Wind contact surface

The wind contact surface of trees and bushes is the horizontal projection of the area of the vegetation profile [m²] relative to the wind direction. In the case of a wind protection hedges a permeability in % is estimated. When performing a static analysis of a tree a coefficient of flow $c_w = 0.2$ to 0.4 is normally considered. This is an analogy to the way wind is affected by a building construction.

Cover ratio of roots

The consideration of the influence of the root system along a bank, embankment or on the failing surface in a slope is normally made taking into account the cover ratio in % and average tensile resistance of the roots penetrating the failing surface.

Shear resistance τ_f

The soil stabilisation effect of plants and soil biota as well as its erosion protection ability is a very complex system and cannot be characterised by simple and easy to measure parameters, like root density.

Normally one recurs to the average shear resistance τ_f (KN/m²) as a practical integrating parameter, together with other soil-mechanical parameters as friction and cohesion superposed with other biological influences associated with roots, mycorrhiza, natural aggregating agents and reduction of soil moisture through evapotranspiration.

Critical shear stress τ_{crit}

This term τ_{crit} (N/m²) describes the resistance of a bank protection system and its associated vegetation cover against the action of water flow and related erosive forces.

Resistance to water flow of individual plant structures

The resistance to water flow of individual vegetation structures when submerged or flown around can be calculated.

Inelastic vegetation structure:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v^2}{2 * g} * A_P * C_P$$

Elastic vegetation structure:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v}{2 * g} * A_P * C_P$$

Root density D_{wz}

The root density indicates the number of roots of a certain range of diameter per unit area. The root density varies with the depth, so that the depth of the site of investigation has to be indicated.

Specific cross section area of the roots SA_w

The sum of cross section areas of the roots per unit area is a good characterization of the rooting. The depth of the characterisation section has to be indicated, because the parameter varies strongly with depth.

This parameter is used in slide stability calculations allowing the evaluation of the effect of root shear resistance in the consolidation of a slope failure surface.

2.1.6 Basic considerations on the use of site-specific plants and the evaluation of site-specific factors

Sites which need bioengineering soil protection are very often very difficult sites namely because of the difficulties to the establishment of vegetation. The successful design and construction of stabilising measure implies a careful characterisation of the construction site and adjacent region in order to accurately assess its conditions for the establishment of a successful plant community. Following aspects must be taken into consideration during the site assessment process:

- Natural landscape unit
- Location, height above sea level
- Morphology, slope length and angle, slope height, exposition, form of the bank and the water body
- Geology, soil, substrate, soil horizon sequence
- Macro- and microclimate, temperature, precipitation, heavy rainfall events, snow
- Natural flora of the area, potential natural vegetation (PNV), corresponding pioneer vegetation and early phase of succession, neighbouring vegetation of the construction field, competition and support (effect of synergy)
- Information about the fauna relevant for the design
- Land use and its requirements
- Nature and environmental protection conditions

Only on the basis of a sufficiently analysed location is a judgement possible, whether a soil and water bioengineering stabilising measure can be successful, which plants, which methods and which auxiliary material for plantation or stabilisations can be used.

2.2 Integration of soil and water bioengineering calculations into the planning process

The whole process of planning, conducting and development of a bioengineering measure is organised in the following way:

- Characterisation of the problem
- Preliminary design
- Design according to existing regulations and conditions of construction permit

- Detailed design and preparation for contracting
- Construction and site supervision
- Control of growth- and development during the maintenance period
- Development maintenance up to the intended vegetation
- Maintenance and care of the intended vegetation

Characterisation of the problem and preliminary design

The designer should look into the problem in such a way, that no solution is excluded or pre-defined. He has to find the best suitable solution for the client under the local conditions and other constraints.

This means in case of problems with erosion protection, that a wide range of possibilities should be considered and discussed at the stage of preliminary design. The following example concerns the problem of bank stabilisation:

1. Natural development should be allowed and incompatible land uses close to the bank should be excluded.
2. Steal, masonry or concrete walls, as a an adequate solution in technical solution able to preserve existing land uses without further disruption.
3. Water bioengineering stabilising measures like planted river bank slopes and exclusion of some land uses or used areas in the direct vicinity of the watercourse.

If the preliminary design suggests bioengineering stabilising measures, it has to be checked whether it is viable in that concrete location. The intended target vegetation has to have sufficient resistance against foreseeable acting forces.

Design according to existing regulations and conditions of construction permit The project design, able to be submitted to obtain the necessary licensing includes the types of vegetation and biotope to be installed as well as the identification of the main species to be used. The necessary maintenance will also be described and characterised.

The steps necessary to initiate the development of target vegetation community in the frame of the selected bioengineering building technique must be described together with the complementary growth- and development maintenance activities. The resistance of the target vegetation and eventual complementary structures to the foreseeable acting forces must be evaluated and proven suited. The entire soil and water bioengineering technique solution has to ensure the security demands including in the more exposed situation (e.g. during the construction).

In the case of intervention on watercourses, the influence of the vegetation on the hydraulic conditions must be evaluated and characterised along the entire development process. . Damage that might occur from higher water levels or flooding must be assessed and preventive measures taken.

In the frame of the processes of licensing and administrative approval all environmental regulations as well as nature conservation demands must be taken into

account with particular attention to the selection of plant species (preferably if not exclusively site specific) as well as the other construction materials. The project must ensure that the final system integrates in the natural environment and natural processes help the development of the water body and improves the recreation value of the landscape.

The design, suitable for approval takes into consideration the available areas and expresses adequately the selected solution.

Detailed design and preparation for contracting

In this project phase detailed designs, quantity determinations and table of quantities are developed. Cooperation with the different stakeholders is necessary. The detailed design must include technical preparation concerning all details of the bioengineering building method and stabilising measures as well as the planting procedures with particular attention to the areas more susceptible to any type of risk or disturbance. This design phase must include the detailed evaluation of all relevant soil and other site factors.

Quantities and quality of the living building material such as seeds, seedlings and plants have to be precisely defined as well as type, quality and dimension of the other building material such as mats, fascines, pickets and stones. The focus of this project phase must be set on the development of clear reproducible scopes of work. The design have to match accident prevention regulation, regulations by the client and generally accepted codes of practice in order to clear the liability a case of damage, accident of design failure.

Construction and site supervision

Normally the construction is performed by qualified enterprises selected according to open competition and well defined selection criteria.

The site supervision is performed by qualified consulting engineers. They supervise the construction work in terms of its accordance with the plans as well as generally accepted codes of practise and acts on the behalf of the client. The consulting engineers assist the client in finding solutions for unexpected situation or natural disasters.

Control of growth- and development

The project must include and clearly describe a period of maintenance which lasts a given number of years according to the specificity of each problem site and technical solution, in which growth- and development maintenance has to be performed. It is commonly done by the construction company.

Development, preservation and long term maintenance

When the period of development maintenance is finished, the whole work will be accepted formally by the client. The care is now up to the client or he transfers the task to another company. Tree and bush formations have to be maintained for a long time period (several years) up until the target vegetation is perfectly installed. The maintenance work must be performed by a competent professional in order to ensure the success of bioengineering intervention (chapter 4).

Management of the process of design, construction and maintenance of bioengineering interventions

The process planning and construction of bioengineering interventions must be throughout conducted as an integrated single process and supervised by a single entity. Otherwise it is possible that important information is lost when changing from one phase to another. It is often necessary to clarify at each state of detailed design which aspects of environment and nature protection have to be looked at closely. The focus has to be set on the target vegetation. It must not be subordinated by other aspects such as species conservation, aesthetic aspects or economy of maintenance.

2.3 Recommendations for common areas of applications

2.3.1 Erosion of earth slopes

Problem

Erosion on unprotected, free of vegetation slopes can lead to significant damage on new built earth works in the field of road transport infrastructure, hydraulic construction, mining and disposal site construction. Secondary damage can occur at the road transport infrastructure itself or at its drainage structure.

Action

The most common impact on earth slopes is originated by rainstorm, hailstorm, local surface run off, snow, strong wind as well as the impacts of humans and animals.

Resistance

The impact of humans and animals can be reduced by safety measures and use restrictions. Grass and herbs with a high cover ratio have been proven adequate in case of rainstorm and local surface run off. The overall coverage includes buds and other above ground vegetative organs, leaves, dead leaves – as long as they are still attached to the plant, superficial and sub superficial root systems as well as erosion resistant substrates like stones, rock and wood. Bushes and tree formation with a sufficient density complemented by adequate herb vegetation provides good protection against snow and wind action.

Limiting factors

Extreme site conditions are limiting factors: slope gradient, light exposure (solarisation), local climate, type of soil, type of compaction, lack of nutrients and presence of toxic elements or compounds.

Directions for dimensioning and design

The target vegetation is defined according to the evaluation of the location and the existing natural vegetation. The method of erosion control and planting is chosen according to experience gathered in similar situations.

It is recommended to run a comprehensible risk and cost assessment as stated in DIN 18918. A more effective risks assessment must be performed in situations where extreme events such as heavy rain, heavy wind, depth of snow occur (1/ n years). The liability in the case of events with a frequency under the defined value lies with the constructing company and, in case of rare events with the client.

2.3.2 Shallow landslides at slopes

Problem

Vegetation and soil bioengineering stabilisation measures only have an impact on shallow landslides which are parallel to the slope as well as small slopes of non cohesive soil with a high gradient. High and heavy trees act disadvantageously on steep slopes, especially on cohesive soil. The problem of sliding is handled by soil bioengineering in the same way as is the field of soil mechanics, with the model of solid state bodies. Loads and resistance act on the solid state body.

Action

A slope failure is originated by factors such as the weight of the moist soil (including loads such as vegetation, snow), hydrostatic pressure and ascending force.

Resistance given by vegetation

A shear stress τ_f (kN/m²) exists between the sliding layer of soil and the underground. The shear stress can be estimated from data referred to similar soil layers. It is the combination of parameters like friction and cohesion, both known from soil mechanics as well as from biological influences from roots, mikorrhiza, and natural alginates and other gluing gels. These influences are often described as biological cohesion. The biological shear parameters vary strongly with the depth, compaction and soil moisture, which makes it hard to predict (article 2.1).

Limiting factors

Following factors limit or eliminate the impact of roots in case of slope stabilization measure:

- Highly compacted silt or clay and rock
- Influence of groundwater or water layers at root depth
- Toxic substrates and
- Wide number of other site factors, which prevent vital growth of plants

Advices for dimensioning and design of a non slipping base layer of vegetation on earth slopes

Conditions to build a stable non slipping vegetated layer on earth slopes are:

- the underground is stable.
- the underground is more permeable for water than the top soil.
- there is no hydrostatic pressure on the top soil due to ground- or seepage water.
- rooting is possible in the underground in terms of factors like void volume, soil substances, pH ...
- the top soil (vegetated layer) is either thin or poor, so the plants will develop roots in the under layers in a foreseeable future.

These are conditions under which the evaluation of slope failure can be performed through analysis at a reference site or compared with a block model. The action of the vegetation can be determined as corresponding to the shear resistance necessary to stabilise both layers as provided by the specific area of root crossing the discontinuity between the layers.

Very steep slopes of non cohesive soil

Several experiments showed that it is possible to consolidate slopes of low or medium high with angles just underneath the angle of inner friction of the soil by using

deep rooted plants combined, during the plant development period with complementary bioengineering stabilisation methods such as bush layers. The resulting stability improvement can be estimated according to SCHAARSCHMIDT 1971, SCHUPPENER 1994 and HÄHNE 1997.

Lower slopes can be stabilised to a maximum angle of 45° if they are secured by deep rooting vegetation systems and the surface is covered completely with grass and herb vegetation. Complementary stabilising structures made of wood are used during growth- and development period like, for example, a log cribwall which can also resist small active earth pressures. The dimensioning of such a cribwall is similar to those of a gravity wall, it is also partly based on the method reinforced earth.

2.3.3 Gully erosion at slopes and hillsides

Problem

As a result of the concentration of runoff on long and steep slopes along prevalent lines, the creation of erosion gullies can occur. Further sources of gully erosion are: sealed ground, forest clearance in the catchment area and a higher concentration of runoff because of road building and other morphological interventions.

The process of erosion works his way up against the direction of the flow. Mudslides, resulting from slope failures have an unpredictable increasing effect.

Action

Design drainage and rainfall-discharge systems for a peak flow Q (m³/s) defined accordingly to an adequate and predefined frequency of repetition (1/n years) and the calculation must include the definition of average flow velocity v (m/s) and shear stress of the river bed τ_0 (N/m²).

Resistance

Low and dense formations of bush, herbaceous or grass vegetation should be planted in the gully slopes and flow bed. The vegetation must be able to resist overflow, erosion and silting. The critical shear resistance τ_{crit} determining the beginning of the erosion process has already been mentioned before.

Limits of application

High flow velocity and shear stress together with the load of carried sediments limit the applicability of bioengineering methods. Furthermore the exposure to light and the usual site factors as well as damages caused by livestock and game are also limiting factors.

Directions for dimensioning and design

The impact of sealed grounds within the catchment should be compensated by rainwater retention measures. Head waters of neighboring creeks can be analyzed as objects of reference. Results from reference sites should be compared with results from hydro technical, theoretical design parameters. In this way a sounder characterization can be achieved.

Structures whose conception took into consideration comparable near to natural reference watercourses and its corresponding vegetation as well as natural stone and wood are well integrated in the surrounding environment.. Weirs and steps of weirs do not exist in nature. They

disturb the natural landscape, constrain and interrupt biotopes and are incompatible with the aims of the European Water Framework Directive. Therefore, near to natural stabilization measures should be applied whenever possible. Nevertheless in some regions weirs are the only way to restore gully erosion and wild creeks, e.g. in densely populated high mountains.

2.3.4 Riverbanks and adjacent areas

Problem

Wash-outs, potholes and other forms of erosion occur due to the natural dynamic of the on riverbanks and adjacent areas including floodplains. These processes are welcomed on one hand, because they lead to a natural structure and dynamical of the water body. However when infrastructures, other constructions or sensitive land uses are located near the water course it is necessary to ensure their safety and protection against damages. In both cases in more or less intensively used landscapes, and particularly in the vicinity or within human settlements the discharge capacity as well as maximal water level by flood and average water flow must be controlled in order to ensure the safety of buildings, infrastructures and other land uses.

Action

Flow forces, quantified as flow velocity v (m/s) and shear stress τ_0 (N/m²) as well as impelling forces from drift wood and drift ice must be taken into consideration in bioengineering stream bank stabilization measures. Additional impacts from human and animals are also possible and must be controlled by special measures or constructive interventions. In the aftermath of a flood event when the water levels decrease rapidly the difference between the ground water level and a river water level determine hydrostatic pressure on the river banks that determine additional risks of slope failure.

Resistance

The different vegetation structures offer different resistances to the flow of water. Low grass provides a very effective protection against erosion and creates little resistance to water flow. Reeds have a similar effect because they bend over in case of over flow. Wood structures (bushes or trees) decelerate the average water flow as well as the flow near the river bed and margins. According to their hydraulic effective density, most willow species build a dense root system that protects the surface of the soil of the riverbanks. Therefore riverbanks and floodplains can be protected against erosion within the limits of the critical flow velocity v_{crit} and shear stress τ_{crit} values.

Limits of application

Along with the natural site limitations and the highest acceptable flow velocity and shear stress other limiting factors must be taken into consideration. Every plant species as a given limit of application according to their capacity of resistance to overflow, flow velocity, flooding, shear strength in terms of intensity duration and frequency of occurrence. Other factors set also limits such as the ones associated with ice drift or nature of carried materials. It is recommended to investigate the limits of appliance in comparable reference sites.

The overall stability of a bank slope has to be determined for the extreme situation of a high groundwater level and a low water level determining a maximum of the hydrostatic pressure acting on the bank. Due to their influence on the reduction of the flow velocity and consequently of the flow volume, wooden formation must be used with the utmost care in urban areas in order to avoid problems in narrow channels.

Directions for dimensioning and design

Design and construction of near to natural stabilization measures have to be done according to the European Water Framework Directive. This includes: no degradation of the present situation and a development towards good ecological balance. Bioengineering presents a particular positive contribution in this domain because its interventions favor the natural structure and processes of the water body, the use of natural building material from the area and site-specific plant species in suitable variations according to the nature of the problems and the intervention goals. Information about vegetation structures and limits of appliance can be taken from reference sites. When intervening in watercourses one has always to consider the hypothesis of restoring the natural structure and dynamics of the water body and the entire river structure, by removing the disturbing or conflicting land uses. Such an alternative will lead to a near to natural development of the water body.

Stabilization measures on the base of the river bank as well as on very steep banks must be complemented with natural rocks, wood structures or trunks and branches obtained on location. In this way, a diverse structure will be created along the river, the cross section and the longitudinal profile. It should be paid particular attention to connectivity and complementarity between biotopes and to avoid monotone cross sections.

Near to natural stabilization measures and the restoration of a sustainable functional riparian vegetation determines normally a reduction of the hydraulic efficiency of the watercourse. Therefore, an extensive hydraulic analysis must be performed in all hydraulic engineering projects in order to determine the way in which the water levels, flow velocity and other dynamic processes associated with the watercourse will affect the surrounding land uses and existing infrastructures. The stability of the bank slope in all hydrodynamic and hydrostatic conditions must also be taken in consideration and evaluated in all detail.

This process of planning and design of water courses involve important and complex processes of coordination between technical authorities, residents, politicians and environment protection groups. All involved parties must cooperate in order to develop a concept and a project that fulfill every condition for approval and respond to the needs of the different stakeholders.

2.3.5 Banks at standing waters

Problem

Along the banks of standing waters occur different types of erosion similar to the ones originating cliffs on the seashore. These natural phenomena can be increase due to the action of land uses.

Action

Natural waves and waves originated by ships, together with driftwood, drift waste and drift ice are the main problems faced by bioengineering interventions on standing waters. Appealing shores and banks are often damaged by trespassing, boats and other recreation activities. Animals can also have a negative impact on shore stability.

Resistance

The soil can be protected by a dense grass cover. Wide zones of reeds reduce the effect of waves and protect the soil through rooting. Flood tolerating bush and tree formations with well developed stems and branches have also a similar effect.

Limits of application

Along with the general site constraints there are, for each plant species a given limit of application. It is determined by height, frequency and duration of flooding. The frequency of wave impact is also of importance determining that regular waves originated by ship traffic can destroy a reed formation that otherwise would resist similar waves originated during a storm event.

Directions for dimensioning and design

Agricultural, touristic and landscape planning work must be taken into particular consideration in the process of design bioengineering stabilisation measures for banks and shores of standing waters. Conflicting land uses must be kept away from the bank. It is generally useful to offer appealing recreation facilities at nearby adequate locations. Carrying capacity and limits of application of the vegetation must be determined by analysing comparable natural sites. To ensure a successful establishment of the initial vegetation long term protection measures are necessary against trespassing, driftwood, grazing livestock and water birds.

2.3.6 Dykes and dams**Problem**

Dykes protect from flooding land uses, building and infrastructures in the hinterland when high water levels occur in river and forelands. Dams are built to conserve a permanent high water level in a channel of flowing or standing water. The problem of erosion is the same as those of earth slopes and embankments. At water side of the dam the same problems occur as on banks of flowing or standing waters. Due to high damage potential of associated to dyke or dam failure, caused for example by floods, heavy storms, rain etc., measures of controlling, restoration and reinforcement have to be ensured at any time. It is especially important to react fast and at an early stage when it comes to an outlet of seepage water and erosion ground break.

Action

The main actions are caused by self weight, wind, rainstorm and surface run off. Additional actions occur on the waterside due to water flow, shear stress, crush of driftwood and waves. The differences in water levels may lead to slope sliding after a flood on the water side of the dyke. After flood events, because of hydrostatic pressure or overflow of the dyke crone, slope failure, hydraulic ground break and erosion ground break can occur on the landside. Grazing livestock (except sheep), as well as

riders and cars can damage the vegetation. Further damage is often caused by digging animals.

Resistance

It is common to use a dense grass cover in places where shear stress and flow velocity will cause no damage on the vegetation. It is furthermore a protection for wave effects and wind erosion. There is, nevertheless the possibility it can be damaged by drift ice and driftwood. The damage risk can be reduced by reinforcing the top soil (combination of stones and grassed top soil) or by creating a zone of willow shrubs on the forelands of erosion-prone banks.

On the landside species of grass and herbs are used to protect the slope against wind and rainstorm. This vegetation cover allows a better detection off seepage water. The use of a diversified choice of autochthon species of grass and herbs eventually combined with the application of threshed hay ensures the development of a dense, diversified and very effective root system ensuring, therefore a high level of protection against erosion.

Limits of application

Limits of application are associated, in the water side with the level and duration of flood submersion. Another limiting factor is the is the height of the individual plants and their carrying capacity against overflow, the action of waves and the effect of driftwood and drift ice on the waterside.

Directions for dimensioning and design

Dykes and dams are primarily technical constructions. In most cases bioengineering stabilisation measures with grass is the cheapest way to protect dykes against erosion. If the limit of application is surpassed, a combination with stones is necessary. The possibilities of maintenance, defence and reinforcement have to be taken into account during the process of planning. Different wet zones of the slope and different frequencies and duration of flooding have to be considered when choosing the plants to be applied.

2.3.7 Coastal protection**Problem**

There are several ways bioengineering measures can be used to stabilise and shaping the coast. They include measures of protection and development of dunes as well as dyke stabilisation. This is done by building and maintaining forelands on tidelands. Bioengineering methods in tidelands such as "biogenic land reclamation" were common in the past and are rarely applied today.

Action

Wind and water in combination.

Bioengineering measures are most commonly used in retrogressive areas along beaches. These are areas where the erosion force is stronger and beach and white dunes are eroded. The action of wind can cause the breach of interior dunes eventually causing the destruction of the entire dune. In progressive areas along the coast, meaning areas where beeches, sandy tidelands and dunes are growing due to a positive sand supply, plant growth and fore dunes can also be supported by bioengineering measures.

In the forelands the main problem are the ways of reducing the energy of the water, which, in the absence of stable forelands acts on the dyke during storm flood events endangering their safety. A heightened foreland will reduce and disperse the energy of the water diminishing therefore the disruptive forces acting on the bottom of the dyke.

Resistance

Morphodynamic of dune development and the corresponding biology of the site adapted species are the best indicators on the possibilities of their application in coastal protection. In retrogressive areas the resistance against the action of the wind and the associated sand deposition can be effectively ensured by vegetation with a high roughness coefficient, such as it is created by brushwood combs or planted culms grass species. The rooting system from dune grass and bushes stabilises the dunes.

In forelands Bioengineering measures are of particular significance in the prevention and control of wave impact through its influence on the period and height of a storm surge wave, reduce therefore the energy of the wave. Rough texture of the foreland increases bed friction and reduces velocity of the water flow. The site specific plant species and communities stabilise the soil structure and reduce erosion through decreased flow energy. The root system is of importance because it bonds with soil particles and consists of flexible and inflexible elements creating a very effective stabilising structure. The soil particles are highly stable against external forces and the root structure supports drag and shear forces created by the flow. This stabilisation capacity depends from the vegetation density, horizontal as well as vertical. The rate of sedimentation depends from the intensity of flooding, which is determined by the average water height of the tide. The transmission of energy depends on height, flexibility and mechanical resistivity of the plants. The reduction of flow velocity increases with increasing height of the plant and leads to an improved soil protection.

Limits of application

Abrasion forces are higher than grass, bushes, culms and plants can support.

Directions for dimensioning and design

The principle of sand retention through the roughness of the vegetation and of sand and silt stabilization of through the structuring and stabilizing action of roots applies along every coastal area. Suitable plant species are those with a stem and root system able to regenerate after being covered by sand. These species, such as strand grasses and coast bushes, can stabilize blown and drifted material.

2.3.8 Planting for wind and erosion protection

Problem

Hedges of trees and bushes are very effective protection systems against damages to land uses and infrastructures caused by wind and associated effects of desiccation, sand-, silt- and snow drifting. Hedges and woods can also be used at excavation-, deposition-, mining- and other industrial areas to reduce dust emission or dispersion. The use of a dense grass cover is also very effective in the prevention of dust dispersion by wind of landfills and other waste disposal sites.

Action

Wind as the main acting factor must be extensively characterised in terms of its strength, duration, frequency and direction.

Resistance

Critical values for the wind transport of materials according to their grain size, weight and moisture must be identified.

Species of grass, herbs and shrubs of dry and semi dry sites have proven of value when it comes to wide area erosion protection on surfaces endangered by wind erosion. Hedges made out of trees and bushes can affect the wind flow up to a distance of 10 fold the height of the hedge. The hedges should be designed permeable in order to reduce turbulences on the lee side of the fence. Hedges for protection against emission must be made by several multi layered plant rows.

Limits of application

Zones of excessive moisture and drought must be taken when choosing species of trees to be applied. In the case of Hedges to protect from emission at mining or industrial areas, species should be used which are tolerant to the specific emissions in addition to the other site conditions and constraints.

Directions for dimensioning and design

The aerodynamic impact can be prognosticated based on specific literature such as KOVALEV 2003. The development of a hedge height requires yearlong or even decade long planning, planting and maintenance. It is especially important to pay attention to irrigation and the protection from competing vegetation as well as from grazing by cattle or game.

Revegetation and recultivation on mining and industrial areas often requires investigation of soil concerning environmental impact. When dealing with brown fields and contaminated soil particular attention must be paid to maximal acceptable concentrations of pollutants in the soil and all dispersion and exposure pathways. A decision, whether a direct plantation is acceptable or if a cover layer of top soil or even a surface sealing is necessary must be made based on expert evaluation and existing regulations and guidelines. Planning and design of the vegetation cover should only start after a clear decision concerning the measures of environmental impact control and minimisation.

2.3.9 Water regime regulation

Problem

Intensive rainfall events may cause, particularly in areas with no or only little vegetation in gullies and other drainage channels, strong surface run off with a short time of concentration and causing intense erosion. This leads to sediment and mud loads with a negative impact on water quality. The accelerated run off reduces groundwater enrichment. A suitable coverage with vegetation such as wood, bushes and hedges can be used to regulate the water regime particular in extreme or very disturb sites like gullies, steep slopes or other erosion prone areas. The impact of these bioengineering measures can be especially important in catchments which sit above an area of flood

risk as well as a catchment belonging to hydro dam and other constructions of water supply.

Action

The main acting factors are precipitation, described in terms of intensity, duration and frequency as well as drought, described as the duration of a period without precipitation.

Resistance

Slopes and other areas should be covered by vegetation that potentiate percolation and decelerate surface run off. That is why a dense vegetation cover is needed as associated with complementary measures to increase the roughness of the surface. Slopes and gullies should be structured in a way that reduces flow velocity, increases the time of concentration, reduces the peak flow and improves infiltration. An improved infiltration can be achieved by enhance permeability and extending the surface retention. Bioengineering measures such as the plantation of a dense bush cover determining a clear increase of the surface roughness together with measures increasing the hydraulic roughness of channels (rock channels, planted gullies, torrents and creeks) are very effective in terms of these general goals. .

Limiting factors

Limiting factors are extreme conditions of the site such as slope gradient, exposure to light, site climate, type of soil, compaction, lack of nutrients and presence of toxic substances. Further limits in gullies and creeks are high flow velocity, shear stress and the impact of bed load. Infiltration might potentiate the risk of slope failure at endangered slopes. These different risks must be evaluated by geotechnical engineers.

Directions for dimensioning and design

The impact of infiltration and the velocity of surface run off can be predicted based on specific literature such as MARKART et al. 2004. The development of the target vegetation density and structure requires consistent planning, planting and caring over a period of years and decades to achieve and maintain the intended effects.

The regulation of infiltration and surface run off requires vegetation maintenance. The choice of the target vegetation must be based on the natural vegetation of the site to gain ecological stability and ensure an higher resistance to environmental stress and diseases and reducing therefore the maintenance demands and costs.

2.3.10 Areas destroyed by fire

Problem

Forest fire and other wild fire destroy vegetation as well as part or the totality of the litter and humus layers. The resulting effects are a higher risk of erosion and increased runoff which has to be immediately controlled by adequate measures. This is necessary in order to reduce the loss of soil and nutrients and facilitate a faster and easier revegetation. The importance of preventing nutrient leaching derives from the need to prevent eutrophication and the contamination of drink water reserves.

Action

The main actions are associated with the mass of dead plant material or the stock of flammable materials in

combination with climatic impacts such as drought, heat and wind (intensity, duration, frequency and direction).

Resistance

Wild fires are linked to dry weather conditions and dry locations. Large, monotone woods and forests favour the spread of the fire. Wide bands free of flammable materials (e.g. grass cover instead of bushes or trees) retard the progression of fire. These open space zones can also promote biodiversity and can be used for grazing.

The natural development of vegetation after a fire due is normally very limited due to intensity of disturbance of the ecological conditions, the lack of water and nutrients. . The first measures have to be aimed at preventing soil erosion. This can be done with temporary structures made out of available material. It is sensible to use charred trunks of trees on creeks, gullies and steep slopes to create pile walls able to retain soil. Cribwalls and other type of catch dams can also be used in gullies and creeks. It is also important to sow grass and herbs in order to create a dense grass and herbaceous cover of the soil in a short time. The seed mix should consist of a variety of species which are suitable for the extreme site conditions as well as fast growing species and species which belong to a later level of succession.

Limits of appliance

Methods of revegetating depend on the level of soil destruction. Rapid planting is essential to prevent the erosion fine and organic soil material.

Directions for dimensioning and design

The impact of linear erosion protection measures can be evaluated using erosion models. Vegetation of the retarding fire bands must site-specific and f correspond to the natural vegetation. The target vegetation should evolve in such a way that the risk of fire is reduced and that the vegetation is able to recover in a short period of time. Maintenance should include removal of biomass; grazing is a particularly good solution.

2.3.11 Bioengineering avalanche protection

Problem

Avalanches are natural hazards, which endanger human life and infrastructure in alpine and other high mountain regions. The breaking of avalanches can be avoided by a suitable and well maintained protection forest. This effect is achieved by the retaining action of stable and strong tree trunks that are able to retain the snow pressure that builds a force parallel to the slope. The forest acts also positively by promoting a more even distribution of the snow and its associated mechanic tensions. Vegetation can hardly stop an avalanche once it is broken off. The maintenance of a protection forest should therefore prevent this case from happening.

Action

Mechanical actions before the break off of an avalanche are created by the longitudinal component of snow weight parallel to the slope. The layer of snow holds different specific weights depending on the ratio of compaction; 1 KN/m³ in a loose state and compressed as ice 10 KN/m³. The layer of snow can present a thickness of several meters by the end of the winter.

A permanent pressure due to the slow movement (no break off) of the snow layer acts on vegetation. The so called snow creep / glide downwards leads to snow pressure in areas of 1-3.5 kN/m². The forces are strong enough to unroot small trees. When an avalanche breaks off it generates forces capable of breaking trees only after a fall of 50m. After 150m trees are generally broken or unrooted. The forces acting on the trees depend on type of avalanches: 3-5 kN/m² in case of powder avalanches and 10 - 50 kN/m² in case of flow avalanches.

Effect of vegetation in reducing avalanche impacts

The effect of vegetation in reducing avalanche impacts is determined by the different characteristics of the forest, and do not exist in areas without adequate forest cover.

The most important affects are:

- **Snow interception**

A part of the falling snow will be captured at the tree crown. A small part of it will evaporate. This leads to a thinner layer of snow which is more structured in the woods, than in open space. Wintergreen species have a higher ratio of interception than species without leaves in winter.

- **Radiation balance**

Microclimate is more balanced in a dense wintergreen forest. Rise of temperature at day and fall at night is minor compared to open space. This leads to a reduced risk of formation of a weaker layer within the accumulated snow layers.

- **Wind**

The impact of wind and aeolian transport of snow is less of a problem in compact tree formations. The mass of snow deposited on dense forested areas is higher than in clearings or areas without trees.

Resistance of vegetation against avalanches

The protection function of forest vegetation is to stop the avalanche from breaking off. If an avalanche brakes off, no forest will be able to stop this mass of snow. In order to prevent avalanches from breaking off it is important that forest vegetation is high enough (roughness of surface) to pierce through the layer of snow. No protection function exists if the layer of snow surmounts the roughness of surface (SAEKI u. MATSUOKA 1969). It is necessary to take particularly into consideration that small plant species, when completely covered by snow bend to the soil and facilitate the flow of snow by reducing friction and promoting the break down or the flow of avalanches. Small trees ensure, therefore only a given protection when they are not completely covered by snow and can even promote the occurrence of avalanches in mountain areas where the snow can accumulate to several meter thickness. Only continuous homogeneous forests can protect from this danger. Forest is an effective and economic protection against avalanches. The trunks of trees support and stabilise the layers of snow. Nevertheless this protection action cannot be overrated. Only a dense forest gives protection because it depends on the direct interaction between the snow layers and the individual trunk.

Limiting factors

The natural timberline, determined by altitude and climate, defines the limits of bioengineering appliance in the field of avalanche prevention. Local differences can occur according to the period of snow coverage, exposure to wind, cold temperature, soil types and level of humus. If particular attention is given to microclimatic and local topography is given there is the possibility that forest formations can occur or be installed above the average timberline. Young trees often die of fungal/ mould infection due to long coverage with snow. For example *Herpotrichia juniper* appears in areas stretching from the foothills of the Alps to the high mountains and affects the needles of spruces, pines, fir trees and juniper. The distribution area is from 900 up to 2000 meter above sea level. This fungus causes especially in the snow-prone area of foothills of the Alps a strong damage in regeneration forest formations. It affects trees in nature regenerations as well as in alpine reforestations and can also infect and destroy well developed and established trees.

Damage caused by game animals is a further threat to young trees. One must, nevertheless take into consideration that young trees are more flexible than older ones. therefore only trees with a diameter larger than 10 cm will crack due to the pressure of snow Causing the failure of reforestation projects of reforestation after 30 to 50 years due to lack of adequate maintenance.

Directions for dimensioning and design

The required forest profile depends strongly from the defined protection targets and the damage probability and intensity. For example, small glides of snow, which endanger people on ski slopes, can, if any, only be prevented by a very large ratio of wintergreen tree formation (crown ratio > 50%). The prevention of large avalanches in less susceptible areas is tendentially less demanding. Less dense tree formation as often occur around the timberline must, nevertheless be carefully evaluated. The crown ratio and eventual clearings in the tree formations in combination with the slope gradient are important criteria to take into consideration when evaluating protection functions (FREHNER 2005). Target value are 500 trunks per hectare for slopes with a gradient of ~35° and 1000 trunks per hectare for steeper slopes in order to prevent avalanches from breaking off. This trunk density is often not achieved in many subalpine areas. It is therefore important that clearances are no bigger than 15 to 25 m and a crown ratio of 30 to 50 % is ensured. The break off of avalanches is unlikely at a crown ratio of 50%, a slope gradient of 35° and with clearances not larger than 15m. The forest should consist of different age groups and species. Overthrown trees are an additional protection and if possible should not be removed. Complementary the particular silvicultural management of avalanche prone areas additional structures can be indispensable to prevent the break out of avalanches.. Examples of such complementary structures are, snow barriers, pilings, terraces and stone and soil piles.

Acronyms and Symbols	Terms and Explanations	Unit
A	Cross-section	m ²
A _p	Submerged area of vegetation, cross section	m ²
c _p	Flow resistance value of plants	-
c _v	Flow coefficient	-
c _w	Flow coefficient in building construction (wind)	-
F _{ST}	Flow resistance of single structures of vegetation	kN
G	Gravity acceleration = 9,81	m/s ²
Index i	For subcomponents	-
l _u * l _G	lateral area of the wall of the channel	m ²
m _v	specific density of vegetation in the case of flown against	-
Q	discharge	m ³ /s
R _{d,i}	Resisting force for dimensioning	-
R _{k,i}	resisting force (which can be derived due to the known nature scientific characteristics)	-
S _{d,x}	Load for dimensioning	-
S _{k,x}	Load (which can be derived due to the known nature scientific characteristics)	-
V	Median flow velocity at cross section	m/s
v _{crit}	Critical flow velocity	m/s
γ _i	partial safety factor according to Eurocode	-
γ _x	partial safety factor according to Eurocode	-
T	Shear stress in soil mechanics	kN/m ²
τ _f	Maximum shear resistance of soil	kN/m ²
τ ₀	Existing shear stress at an hydraulic event	N/m ²
τ _{crit}	Critical shear resistance for substrates, vegetation and methods	N/m ²

3.1 Construction Type Manual EFBE 2007

3. Soil and water bioengineering Methods

The methods of construction of Soil and water bioengineering are described in the Construction Type Manual published (ZEH 2007). The different methods of construction are organized according to their application as Preliminary work, work with plants and Maintenance. Each method of construction is described by a short, objective text and illustrative sketches and photos. The Construction type Manual is, therefore, part of the European Guidelines for Soil and water bioengineering

3.2 Application of the construction types

3.2.1 Decision criteria

The correct choice of a Soil and water bioengineering construction method as well of the association of plants to be applied is decisive to the fulfillment of the project targets.

The decision criteria are defined according to following objectives.

Protection

hydraulic, hydrological, geo-technical and safety-technical requirements of the construction type and the future vegetation

Ecological

amelioration of the ecological condition of, for example, a stream in terms of the development of its flora, fauna as well as its morphology, processes, functions and resources a defined by the European Water Framework Biotope structure as habitat

Landscape esthetic

best possible integration of the construction in the landscape insurance of the perceptibility of a stream in the landscape

Economical

use of plant material capable of vegetative reproduction and development as well as materials obtained locally or in the direct vicinity use of durable and low maintenance construction types and materials
Low cost construction and maintenance

Sustainability

use of natural construction material able of further development: live plants, wood, earth, rocks.
use of low energy construction materials

Societal

possibility of use by the population, tourism and leisure
creation of new green areas in urban areas

3.2.2 Decision matrixes

Decision matrixes for Bioengineering interventions in lakes and water courses and Decision matrixes for Bioengineering interventions in slopes and earthworks located in appendix.

4. Maintenance of soil and water bioengineering structures

4.1 Basic maintenance principles

Maintenance must occur only when necessary - "let instead of doing"

The need for maintenance will be determined through regular inspections and efficiency reviews (Chap. 5).

The following principles must be taken into consideration:

- The choice and application of the construction method must involve a minimum of maintenance costs
- It should fulfill the objectives as quick and with as low costs as possible
- The developed structure ensures the full and harmonious effectiveness of all technical, ecological, economical and esthetical objectives.
- Maximum diversity and biodiversity
- Safety for road, train and stream traffic
- Continuous contribution to an increased effectiveness
- It must be made clear that maintenance can also lead to negative developments. The adaptation of the maintenance approaches to the natural conditions and processes is the only method to avoid maintenance errors that can be more negative than no maintenance at all.
- The development of the maintenance works must be adapted to the development of the construction structures and the installed vegetation within the consideration of the defined target vegetation. (specific construction and vegetation maintenance
- Basic condition for fulfillment of the objectives of the intervention is the respect of the predefined maintenance steps within an expert monitoring of the evolution of the structures and vegetation.
- It is mandatory in a Soil and water bioengineering project the inclusion of the financial needs associated with an adequate maintenance by qualified personal.
- The maintenance organization must ensure the quality of the plant material (as construction material, support material, biomass, etc.), according to the same criteria used in the project.
- The moment and type of maintenance interventions must be recorded and documented.

4.2 Maintenance schedule

Completion maintenance / growth maintenance

Measures taken after the completion of the construction until the fulfillment of the construction objectives or the acceptance conditions by the client. These conditions are defined according to the pre-defined success criteria. These criteria must be clearly defined and located in the frame of the project and described in the project specifications.

Development maintenance

Measures aimed at ensuring the best possible development until the end of the warranty or the establishment of a functional plant cover.

Maintenance care

Measures to ensure the maintenance of the long term functionality of the installed vegetation.

Monitoring of the condition of the intervention

The evolution or regression of a functional vegetation cover is evaluated in the frame of the efficiency review (Chap. 5)

4.3 Typer of maintenance

Regular maintenance measures

Maintenance measures that are performed according to a regular schedule (see maintenance care).

Extraordinary maintenance measures

Maintenance measures necessary after extraordinary or unforeseen events (floods, plagues, invasive Neophyte species, wind throw, wet snow etc.).

4.4 Maintenance planning

The planning of the maintenance work is based on the maintenance principles. They include the maintenance sequence, its extent, the evaluation of the development of the vegetation through the efficiency review (Chap. 5) as well as the general description and details of the maintenance works. Attached must be all necessary maps, drawings, sketches, profiles, tables and site plans.

4.5 Maintenance implementation

Specific maintenance of the type of construction or the target vegetation

Each construction type needs specific maintenance interventions according to the target vegetation, the development of the plants and the conditions of the construction materials.

Main-tenance target	Main-tenance type	Main-tenance work	Main-tenance interval	Main-tenance time
---------------------	-------------------	-------------------	-----------------------	-------------------

According to the applied type of living materials we must differentiate the following construction types:

- Pioneer construction types (constituted only of pioneer species)
- Transition construction types (including pioneer species together with species of later stages of the ecological succession)
- Climax construction types (constituted only of species of the developed stage of the succession)

Maintenance works

Sketches and description can be found in Chapter 8 of the EFBE Construction Type Manual (Zeh, 2007)

For grasses, reed and herbs, following maintenance measures can be used:

- Mowing (partial, along stripes, seasonal, according to the maturation of seeds and fruits, using hardware and methods adapted to the biotope)
- Underwater mow
- Amelioration works like
- Reseeding
- Fertilizing
- Installation of sod slabs, new plants or plant parts
- Irrigation
- Collection and removal of garbage and refuse

For trees and bushes, following maintenance measures can be used:

- Sprouting from the root (partial alternated rejuvenation)
- Pollarding (on trees above the flood water level, along maintenance roads, according to cultural and ecological considerations)
- Thinning / removal of individual plants due to hydraulic, ecological or esthetical reasons
- Pruning
- Removal of invasive species like *Robinia* through the extraction of a 50 cm bark ring at circa 100 - 150 cm stem height
- Repair interventions like
- Replanting
- Fertilizing
- Maintenance of the tree cover density
- Irrigation
- Renew of the tree supports
- Collection and removal of garbage and refuse

Intervals of maintenance

The timely succession of maintenance interventions is defined according to:

- Development target
- Botanical and tree biological criteria and perspectives (best time for pruning in order to maximize the ability to heal the cuts)
- Hydraulic, hydrological, geo-technical and safety-technical requests
- Ecological and nature conservation considerations (closed season for flora and fauna, particularly for birds and fish)
- Landscape esthetical considerations
- Need of live material for the construction of other soil and water bioengineering interventions (must be permanently ensured respecting the specific regulations and specifications)
- Accessibility (for example more difficult in meadows during the vegetative period)

5. Efficiency review of soil and water bio-engineering methods

5.1 Basic principles of efficiency review

Monitoring is a basic condition to the sustained development of the specialized knowledge on soil and water bioengineering and the quality and safety of its interventions.

- The financial and man ware conditions for the monitoring must be ensured
- Monitoring must be performed by qualified personnel
- The interventions to be monitored must have a documented location and description of their construction and maintenance. An evaluation and assessment based on databanks must be possible. A basic condition will therefore be the standardized survey spreadsheets obtainable through the Internet.

5.2 Review of current state and development

State of the living construction material - trees and bushes

- Height
- Diameter (20 and 100 cm above ground)
- Density (nr. of sprouts/m²)
- Vitality (degrees of vitality according to BRAUN 1-5 or ROLOFF 0-3)
- Distribution of species etc.

State of living construction material - grasses, herbs, reeds

- Vitality (degrees of vitality according to BRAUN 1-5 or ROLOFF 0-3)
- Degree of ground cover
- Distribution of species
- Average height of the leaves
- Relation grasses/herbs

State of inert construction material

- State of logs - degree of decay (visual control of probes, technical control with a resistometer, etc.)
- State of the nails and wires
- State of other materials
- Degree of decay of inert regional construction material

Ecological conditions

The evaluation of the ecological conditions must be differentiated according to the development target:

- Biotope connectivity
- Evaluation of the habitat quality for the target species (Fauna and Flora)
- Water Framework Directive "good ecological conditions"
- Evaluation of the biological quality components
- General ecological effects
- evaluation of the ecological and morphological present state, evaluation of the influence of soil and water bioengineering construction methods on the stream structure resources and functionality
- The object and scale of reference used to evaluate the ecological conditions must be clearly presented (Cross section / individual intervention or section / global effect of several constructions)

5.3 Review of effectiveness and function

Hydraulic and hydrological functions

- Drainage conditions
- Protection against floods
- Retention
- Flood level
- Erosion events
- Influence on the regulation of stream flow, stream velocity and shear stress

Geo-technical and safety-technical functions

- Stability
- Durability
- Safety-technical function
- Degree of fulfillment of the biotechnical consolidation target
- Cracks and bulges
- Slope breaks
- Unstable shapes of the stems
- Existence of infiltration
- Bio-indication

Ecological functions

- Habitat creation
- Diversity of habitats
- Habitat networking
- Influence on the balance of Nature
- Influence of the structural diversity of streams
- Degree of achievement of the target vegetation / degree of naturalness

Landscape esthetical functions

- Landscape image and peculiarity as a cultural landscape

Socio economical functions

- Cost/benefit analysis
- Tourism
- Leisure
- Value of use and human experience
- Identity reference

Global evaluation**5.4 Review of sustainability and ecobalance**

Choice of the construction method - best adaptation to the fulfillment of the development targets.

Choice of materials - best adaptation to the respective construction method:

- Preferred or mandatory use of local inert construction material, native seed and plant material adapted and suited to the building demands
- Certification of origin (coco or jute geotextiles for example)

Maintenance interventions:

- Requirement
- Type of intervention (use of machines and what types).

Directrices Europeas de Bioingeniería del Paisaje

- 1. Principios básicos de los trabajos de bioingeniería del suelo**
 - 1.1 Definición de la bioingeniería del suelo
 - 1.2 Posibilidades y límites de la Bioingeniería del Paisaje
 - 1.3 La función de las plantas y de las formaciones vegetales en las intervenciones de Bioingeniería del Paisaje
 - 1.3.1 Funciones técnicas
 - 1.3.2 Funciones ecológicas
 - 1.3.3 Funciones estéticas
 - 1.3.4 Efectos económicos
 - 1.4 Desarrollo histórico de la Bioingeniería del Paisaje y su significado actual en el ámbito europeo
 - 1.5 Disciplinas relacionadas con la Bioingeniería del Paisaje
 - 1.6 Bioingeniería del Paisaje, protección de la naturaleza y deontología profesional
 - 1.7 Requisitos básicos para el éxito en los trabajos de Bioingeniería del Paisaje
- 2. Cálculo de soluciones de estabilización de laderas y riberas**
 - 2.1 Principios básicos de cálculo de soluciones de estabilización de Bioingeniería en laderas y riberas**
 - 2.1.1 Modelo de simulación de las técnicas de estabilización de Bioingeniería del Paisaje
 - 2.1.2 Posibles impactos sobre las técnicas de estabilización de bioingeniería a tener en cuenta en el diseño estructural
 - 2.1.3 Factores de la vegetación que mitigan los anteriores impactos
 - 2.1.4 La resistencia de la vegetación a los anteriores impactos
 - 2.1.5 Parámetros individuales para describir la resistencia de las formaciones vegetales
 - 2.1.6 Consideraciones básicas de naturaleza local sobre el uso de las plantas y la evaluación de la situación
 - 2.2 Integración de una obra de Bioingeniería del Paisaje en el proceso de planificación global**
 - 2.3 Recomendaciones para diferentes aplicaciones**
 - 2.3.1 La erosión de taludes de tierra
 - 2.3.2 Deslizamientos superficiales de tierra
 - 2.3.3 Erosión en cárcavas en pendientes y laderas
 - 2.3.4 Riberas de ríos y zonas adyacentes
 - 2.3.5 Márgenes de lagos
 - 2.3.6 Los diques y presas
 - 2.3.7 Protección de costas y litoral
 - 2.3.8 Pantalla vegetal contra el viento y las emisiones contaminantes
 - 2.3.9 Regulación del régimen hídrico
 - 2.3.10 Zonas afectadas por incendios
 - 2.3.11 La vegetación como protección ante aludes
- 3. Técnicas de bioingeniería del paisaje**
 - 3.1 Manual técnico EFBI 2007
 - 3.2 Aplicación de las técnicas constructivas
 - 3.2.1 Criterios de elección
 - 3.2.2 Matrices de decisión
- 4. Mantenimiento de las estructuras de Bioingeniería del paisaje**
 - 4.1 Principios básicos de mantenimiento
 - 4.2 Secuencia del mantenimiento
 - 4.3 Tipos de mantenimiento
 - 4.4 Planificación del mantenimiento
 - 4.5 Ejecución del mantenimientoMantenimiento específico según el tipo de técnica o de la vegetación deseada
- 5. Evaluación de la eficacia de las técnicas de bioingeniería**
 - 5.1 Principios de Evaluación
 - 5.2 Revisión del estado actual y del desarrollo
 - 5.3 Comprobación de la eficacia y de la función
 - 5.4 Revisión/Examen de sostenibilidad y equilibrio ecológico

1. Principios Básicos De Los Trabajos De Bioingeniería Del Suelo

1.1 Definición de la bioingeniería del suelo

Es una disciplina técnico-biológica que, con la ayuda de plantas y de formaciones vegetales, contribuye a proteger y garantizar los usos del suelo y construcciones así como a la restauración del Paisaje y del territorio.

Lo que caracteriza la Bioingeniería del Paisaje es la utilización de plantas o partes de ellas como material de construcción vivo, de tal manera que a lo largo de su desarrollo, junto con el suelo y los estratos geológicos contribuyen de manera sustancial a la estabilización duradera frente a todas formas de erosión. En la fase inicial, es a menudo necesaria una combinación con materiales no vivos que en algunos casos pueden hacerse cargo de la mayor parte de las funciones de sostén.

No obstante, se prioriza en estos casos la utilización de materiales orgánicos dado que éstos se degradan y se integran en el ciclo de la material mientras se va desarrollando la cubierta vegetal incrementándose progresivamente la estabilización...También es preferible la utilización de plantas autóctonas y adaptadas al lugar, pues éstas contribuyen al mantenimiento de la biodiversidad. Los objetivos de la planificación, del proyecto y de la ejecución son la protección y estabilización de las superficies de uso y de las infraestructuras, así como el desarrollo de los diferentes elementos y funciones del territorio y del paisaje.

1.2 Posibilidades y límites de la Bioingeniería del Paisaje

Los **ámbitos de intervención de la Bioingeniería del Paisaje** se corresponden con la estabilización de taludes, laderas, riberas, lagos, presas, vertederos, restauración de explotaciones mineras, así como áreas afectadas por diferentes infraestructuras lineales.

- En cursos fluviales, para la estabilización de márgenes con riesgo de erosión, consolidación de de cauces, para la revitalización de cursos de agua degradados, así como el aumento de la retención en las llanuras de inundación, la mejora de la protección frente a inundaciones todo ello mejorando la calidad y eficacia ecológica a la vez que se garantizan la seguridad de las presas, lagunas y márgenes fluviales
- En taludes y laderas para prevenir procesos erosivos superficiales y profundos, revegetación y estabilización de desprendimientos y deslizamientos, así como la estabilización de laderas con riesgo de deslizamiento a través de la fijación con las raíces y el drenaje del suelo a través de la transpiración de las plantas.
- En la mejora del régimen hídrico a nivel local y regional a través de técnicas adecuadas de bioingeniería del suelo, reforestaciones y restauración de la cubierta vegetal, tanto en laderas como en altas cotas de montaña., en la restauración hidrológico forestal, disminución de la escorrentía superficial promoción de la infiltración, etc.
- En zonas costeras y lacustres para fijar las orillas con riesgo de erosión, en la estabilización de diques, dunas y terrenos colindantes.
- En zonas húmedas para crear hábitats adecuados
- En áreas degradadas a causa de actividades extractivas o por actividades industriales, para el

establecimiento, desarrollo y consolidación de nuevas formaciones vegetales

La utilización de plantas es posible en todos los lugares donde se disponga de un hábitat potencial para el desarrollo de la vegetación. **Siempre que las capacidades técnico-biológicas de las plantas lo permitan, es posible crear una cubierta vegetal protectora y estabilizadora para prevenir la erosión, como sustituto de las técnicas constructivas convencionales.** Para elegir la solución adecuada, se requieren conocimientos de disciplinas de ingeniería civil, geotecnia y construcción, así como conocimientos de biología y ecología del paisaje. Estos conocimientos contribuyen a que las plantas seleccionadas se desarrollen una cubierta vegetal duradera y adaptada al lugar que pueda a la vez cumplir las funciones técnico-constructivas pretendidas. Junto con medidas de protección de la erosión y medidas para equilibrar el régimen hídrico, las técnicas de bioingeniería del suelo también influyen en el microclima, en la estructura de los biotopos y en la percepción del paisaje.

Ventajas de las técnicas de bioingeniería del suelo frente a las técnicas convencionales

- Desarrollo funcional más duradero a través de la capacidad de desarrollo y regeneración de las plantas y de las asociaciones vegetales.
- Establecimiento de una comunidad vegetal avanzada dentro de la seria dinámica de vegetación
- Aumento de la estabilidad del terreno con el desarrollo de las plantas
- Reacciones más favorables frente a las perturbaciones debido a la capacidad de adaptación de las plantas
- Adaptación de las plantas a las fuerzas agentes a través de su elasticidad, resistencia a la tracción y al establecimiento de nuevas de sucesión.
- Acción estructurante de las plantas
- Aumento de la biodiversidad y la funcionalidad del hábitat (ecología)
- Mejora d (estética del paisaje)
- Beneficio a factores socioeconómicos (turismo, ocio local)
- Medidas de bajo impacto, bajo requerimiento energético y que promueven el propio desarrollo autónomo de los sistemas naturales (decisiones sin arrepentimiento –no regret measures)

Con el **uso prioritario de material vegetal de origen local**, en vez de vegetal cultivado y de procedencia no local y/o regional, se consiguen otros efectos positivos añadidos:

- Estabilización exitosa y duradera, debido a su integración óptima en el ecosistema., mejor adaptación a condiciones extremas del lugar y a las características climáticas y geológicas específicas de la región.
- Mayor potencial para el desarrollo de comunidades vegetales típicas del entorno natural
- Mejor y más sostenible integración en el ecosistema y en el paisaje
- Mejor relación coste-beneficio y mayor rendimiento económico

En áreas urbanas , en casos de estabilización y de construcción de zonas verdes y de esparcimiento también

pueden utilizarse plantas no autóctonas adaptadas al lugar, que tengan propiedades biotécnicas, así como plantas perennes y arbustos ornamentales.

Los límites de la Bioingeniería del Paisaje son aquellos en los que las propiedades descritas, especialmente las propiedades técnicas de las plantas, no son suficientes para los fines previstos por ejemplo:

- Las fuerzas mecánicas agentes superan la capacidad de resistencia de las plantas y de las formaciones vegetales
- La profundidad de enraizamiento de las plantas es insuficiente para la consolidación de una ladera o de un talud
- Las condiciones para la germinación y el establecimiento de la vegetación sean tan difíciles que incluso con la utilización de materiales complementarios, no es posible la instalación de una cubierta vegetal adecuada (bad lands)
- Un mantenimiento inadecuado conduce a modificar las condiciones locales, influyendo de manera desfavorable sobre las medidas de estabilización del terreno o al control del caudal de los ríos.

Para poder seleccionar de manera adecuada las soluciones de Bioingeniería del Paisaje, hay que tener presente y conocer **las desventajas de las técnicas** frente a las soluciones constructivas tradicionales:

- Los trabajos de Bioingeniería del Paisaje están ligados a los ritmos de crecimiento de las plantas así como a otros factores que perturban la vegetación.
- A menudo se necesita más espacio para el desarrollo de la vegetación que en las estructuras convencionales.
- Las raíces y troncos pueden producir tensiones crecientes en estructuras constructivas debido a su progresivo incremento en diámetro
- El crecimiento de las raíces pueden producir deformaciones en construcciones y estructuras
- En el caso de árboles de gran porte, pueden generarse fuerzas que provoquen torsiones en la base del tronco y generen diferentes tensiones en el espacio enraizado.
- En el espacio enraizado pueden producirse pérdidas de cohesión del suelo y presiones sobre las estructuras
- Existen límites geotécnicos para la aplicación de la Bioingeniería del Paisaje
- Las dificultades de realizar cálculos exactos crean todavía incertidumbres en el empleo y la eficacia de las técnicas.

Estas desventajas “aparentes” se pueden compensar a menudo, con una gestión adaptada al momento y al lugar. Con frecuencia, es posible encontrar soluciones técnicas que integren los sistemas naturales circundantes.

1.3 La función de las plantas y de las formaciones vegetales en las intervenciones de Bioingeniería del Paisaje

La utilización de las propiedades plantas en los procesos constructivos se basa en una experiencia adquirida a lo largo de los siglos, siendo ya suficientemente conocidas propiedades desde antaño.

Diversas **propiedades** permiten a las plantas reaccionar de manera flexible a los cambios ambientales, lo que

constituye también la base de su eficacia técnica. Estas propiedades son las siguientes,

- La capacidad de propagarse y reproducirse de diversas formas –vegetativa y/o sexual.
- La capacidad de regenerarse tras haber sufrido daños o tras haber sufrido cambios ambientales
- Captar agua del suelo y llevarla a la superficie (evapotranspiración)
- Integrar, agregar, estructurar y articular diferentes materiales y estructuras
- Cubrir la superficie del suelo.
- Recoger y retener elementos sólidos en movimiento, sustancias disueltas y agua
- Tolerar el enterramiento, y el encharcamiento a través de la formación de nuevas raíces.
- Se adaptan a cambios ambientales locales como la variación del caudal del agua de un río.

Todas estas posibilidades dan lugar a funciones complejas de las plantas que, a grandes rasgos, pueden ser clasificadas en: Técnicas (1), Ecológicas (2), Paisajísticas (3) y Económicas (4).

El resultado de estas construcciones de bioingeniería son sistemas vivos que se desarrollan con una dinámica de regulación propia, sin necesidad de aportes energéticos artificiales, hasta alcanzar un equilibrio dinámico. Con la selección correcta de los materiales vivos e inertes, así como la técnica adecuada se consigue un sorprendente rendimiento con un mantenimiento lo más reducido posible (ver capta. 4). No obstante, hay que resaltar que en áreas fuertemente alteradas y en entornos urbanos, estos objetivos exigen un mantenimiento y cuidados muy especializados para garantizar los objetivos.

1.3.1 Funciones Técnicas

Dentro de las funciones técnicas de la Bioingeniería del paisaje, con particular relevancia en las acciones de protección y consolidación garantizadas por las plantas, se pueden destacar las siguientes:

- Cobertura del suelo con especies vegetales protegiéndolo contra los efectos causados por la precipitación, la erosión hídrica y eólica, aludes y desprendimiento de rocas.
- Acción de anclaje mecánico y efecto-de contrafuerte de las raíces.
- Cohesión y consolidación del suelo gracias a la agregación de partículas del suelo con ayuda del sistema radical,
- Agregación bioquímica de partículas de suelo a través de sustancias húmicas, micorrizas y micro fauna.
- Anclaje de la capa superior del suelo con la inferior
- Prevención del lavado de materiales finos por el efecto de filtrado.
- Aumento de la rugosidad del terreno por efecto de los brotes, ramas y hojas, así como retención de escombros, cantos rodados y masas de nieve
- Frenado y desvío de corrientes de aire y agua
- Acciones a nivel del espacio enraizado: compresión de las partículas del suelo por el crecimiento de raíces voluminosas, aumento de la porosidad del suelo a través del movimiento del aparato radical y aumento de la densidad del suelo debido al peso de la vegetación.

- Aumento de la cohesión y la estabilidad interna del suelo a través del drenaje y la extracción del agua por evapotranspiración.
- influencia positiva en el régimen hídrico gracias a la evapotranspiración, la retención de agua de lluvia, la retención de agua subterránea y la regulación de la infiltración del agua en el suelo

1.3.2 Funciones ecológicas

A través del empleo de la Bioingeniería del Paisaje se obtienen las siguientes mejoras a nivel de la calidad ambiental.

- Efectos positivos en las características del suelo tales como aumento del volumen de los poros y mejoras en las condiciones vitales para los microorganismos y la formación de humus y nutrientes.
- Desarrollo de comunidades vegetales (Sucesión ecológica) y mejora en las estructuras de los biotopos
- Creación de hábitats para la fauna
- Absorción y fijación de sustancias eutrofizantes o parcialmente venenosas
- Cambios beneficiosos sobre las condiciones microclimáticas.
- Absorción de ruido reduciendo su intensidad
- Filtración y retención de polvo y partículas así como de emisiones contaminantes a través de la deposición sobre las hojas y otras partes de las plantas.

1.3.3 Funciones estéticas

Los Impactos estéticos del paisaje se pueden minimizar de una manera natural con la aplicación de técnicas de Bioingeniería del Paisaje:

- La plantas y los grupos de vegetación contribuyen a mejorar las perspectivas visuales de un lugar
- Reemplazan técnicas constructivas tradicionales por formaciones vegetales siempre y cuando su efecto pueda garantizar una estabilización similar
- Garantizan una rápida integración de elementos constructivos con la vegetación colindante y, con ello, con el paisaje circundante
- Integración visual de construcciones ingenieriles en el entorno a través de la utilización de vegetación adaptada al paisaje
- Encuadre y enfatización de estructuras construidas
- Protección visual para minimizar el impacto de las grandes infraestructuras

La utilización de la Bioingeniería del Paisaje contribuye a disminuir los impactos visuales y paisajísticos y se posibilita que las grandes construcciones tengan un menor impacto paisajístico.

1.3.4 Efectos económicos

La utilización de la Bioingeniería del Paisaje garantiza, a través del conocimiento y de la utilización de las fuerzas vivas de la naturaleza la posibilidad de garantizar la regeneración de áreas sin vegetación con una mínima utilización de materiales y energía.

De esta manera, la Bioingeniería del Paisaje juega un papel importante para garantizar la sostenibilidad de las construcciones y obras de ingeniería civil.

- Recurriendo a sistemas constructivos vivos comprobados, ejecutados en gran medida mediante maquinaria, se pueden reducir costes en

comparación con las técnicas de ingeniería puras. Por ejemplo, con la utilización de partes de plantas con capacidad de reproducción vegetativa

- Con la utilización de materiales constructivos vivos se consigue una reducción de la cantidad de material requerido, a pesar de que represente un mayor coste en mano de obra.
- Teniendo en cuenta los condicionantes locales en la planificación, se reduce el volumen de material a transportar y los costes del transporte son más bajos. También a través de una apropiada reutilización de material vegetal, tierra y piedras.
- Gracias a las características especiales de las plantas vivas se reducen también los costes de mantenimiento de las obras de Bioingeniería del Paisaje.
- En el caso de aparecer daños en las obras de Bioingeniería los costes de renovación son habitualmente menores debido a la capacidad de regeneración de la vegetación.
- Factores socioeconómicos (por ejemplo, turismo en zonas de montaña, áreas de ocio y recreo locales)

1.4 Desarrollo histórico de la Bioingeniería del Paisaje y su significado actual en el ámbito europeo

La idea fundamental de la Bioingeniería del suelo es crear sinergias entre el uso humano del territorio y las necesidades de los procesos naturales. La idea de la Bioingeniería del suelo nace en Europa, probablemente porque las presiones en el territorio son especialmente elevadas debido a la densidad de población y a su larga tradición de uso del suelo.

Las técnicas de estabilización basadas en la utilización de las plantas vivas y partes de material vegetal en obras hidráulicas y terrestres se conocen desde antaño. A partir de estos trabajos de estabilización, originalmente artesanales, la Bioingeniería del Paisaje ha ido convirtiéndose en una compleja ciencia aplicada. A ello, han contribuido los siguientes elementos:

- Utilización de los conocimientos de la ecología del paisaje para una comprensión profunda del medio natural.
- Utilización del valor de ciertas plantas como indicadores para el evaluar un lugar determinado y su potencial de utilización.
- La utilización de materiales de obra específicos para el lugar y hábitats del que se trate.
- Los avances en la utilización de maquinaria para la construcción de estructuras vivas.
- Medidas de mantenimiento y desarrollo basadas en objetivos previstos
- La evaluación científica de los resultados obtenidos
- Incremento de la utilización de especies vegetales autóctonas locales, control de origen de las plantas y de los materiales constructivos naturales para asegurar que los métodos constructivos están en línea con los principios de conservación de la naturaleza, así como para la mejora de las estructuras fluviales y de los biotopos.
- Renuncia al uso de fertilizantes y de determinadas sustancias favorecedoras del crecimiento vegetal, cuando éstas puedan afectar negativamente a los cursos de agua y a los espacios protegidos.
- Utilización de novedosos materiales auxiliares de construcción ambientalmente asumibles.

Junto a necesidad actual de estabilización de laderas en la construcción de infraestructuras lineales, en las áreas costeras y en las obras hidráulicas, se presentan a futuro los siguientes retos:

- El cambio climático y las condiciones climáticas extremas van a incrementar los problemas de erosión. Por ejemplo, todo lo relacionada con inundaciones y las alteraciones en el permafrost. En este campo, la Bioingeniería del Paisaje ofrece soluciones.
- En situaciones de alteraciones del régimen hídrico, en cambios de las condiciones de drenaje debido a episodios de lluvias extremas y a cambios en el régimen de lluvias, las medidas de Bioingeniería del Paisaje contribuyen a disminuir sus efectos negativos.
- La utilización de técnicas de Bioingeniería del Paisaje reduce los procesos de desertificación y degradación.
- Una capa protectora de vegetación, basada en el uso de plantas de diferentes especies autóctonas y adaptadas al lugar, contribuye al mantenimiento y aumento de la biodiversidad.
- Un consumo menor de energía y de materiales, así como el uso de recursos renovables en las obras de Bioingeniería del Paisaje significa una utilización más eficiente de los recursos.
- El incremento de las plantaciones leñosas contribuye a la fijación de emisiones de CO_2
- Contribución al cumplimiento de los objetivos del Protocolo de Kioto, de la Convención de Río y de las diferentes directivas de protección del suelo, así como a la consecución de los objetivos de la Directiva Marco del Agua a través de los efectos de retención y conectividad de los hábitats.

En su conjunto, los principios de la Bioingeniería del Paisaje promueven la conciencia ambiental y una nueva cultura constructiva.

1.5 Disciplinas relacionadas con la Bioingeniería del Paisaje

Las técnicas de Bioingeniería del Paisaje se aplican actualmente en una gran variedad de disciplinas técnicas cuando se trata de labores de estabilización de suelo. Éstas son las siguientes:

- Planificación y gestión territorial Regadío
- Ingeniería agronómica
- Planificación agrícola
- Ingeniería fluvial e hidráulica
- Protección de costas
- Control de torrentes y avalanchas
- Ingeniería hidráulica industrial
- Minería
- Canteras y graveras
- Ingeniería ambiental y sanitaria
- Gestión del agua en áreas urbanas
- Gestión de aguas residuales
- Construcción de centros deportivos y de ocio
- Construcción de carreteras, líneas férreas y aeropuertos
- Caminos rurales y pistas forestales
- Vías peatonales y ciclistas y senderos para equitación
- Otras áreas de obras públicas

Además, también se utilizan los conocimientos básicos de la Bioingeniería del Paisaje en geotecnia, en la obra hidráulica y en la construcción.

La realización de intervenciones de Bioingeniería del Paisaje requiere de los conocimientos, formación y práctica de las distintas disciplinas:

Disciplinas	Área de conocimiento	Capacidades y conocimientos aplicados en la realización de proyectos
Botánica	Fitosociología Geobotánica	Análisis fitosociológico como base para la planificación y el proyecto , control de la vegetación , Control de calidad y de los resultados, seguimiento del desarrollo de la vegetación
Geología	Edafología, mejora de suelos, Mecanismos erosivos , protección de márgenes y zonas costeras	Informes geológicos Protección del suelo
Horticultura	Suelo, fertilización, mejora de suelos, plantas, métodos de plantación	Plantaciones y mantenimiento las mismas Control de resultados
Ingeniería agronómica	Suelo, fertilización, mejora de suelos, plantas, métodos de siembra, clima y microclima	Plantaciones y mantenimiento. Vegetación herbácea Control de resultados de las siembras
Ingeniería forestal	Suelo, fertilización, mejora de suelos, plantas, Silvicultura, talas, transporte madera	Reforestación, gestión forestal, gestión hidrológico forestal estabilización de laderas en pistas forestales. Control de resultados reforestación
Jardinería y paisajismo	Construcciones civiles e hidráulicas a pequeña escala. Remodelación de terreno y preparación del suelo. Plantaciones	Diseño, ejecución y mantenimiento de obras de Bioingeniería del Paisaje
Ciencias Ambientales Arquitectura del paisaje Planificación territorial	Procesos de planificación, planes marco, estudios impacto ambiental, planes de seguimiento, análisis viabilidad para la fauna, flora, hábitats. Pequeños trabajos hidráulicos y remodelación de terrenos. Plantaciones	Planes Marco, planificación del proyecto, vigilancia de la obra, diseño obras de bioingeniería
Ingeniería hidráulica Construcciones fluviales Control de torrentes Protección de costas	Obras hidráulicas de protección , ingeniería hidráulica, hidrotecnia , estabilidad, técnicas constructivas, planes marco, diseño de proyectos, ejecución	Planes Marco, Informes técnicos, Hidrotecnia, Viabilidad, planificación del proyecto, Ejecución, Vigilancia de la obra gestión del agua,
Construcción vías circulación	Carreteras, ingeniería civil y estructural, aterrazamientos, drenajes, estabilización, planes marco, diseño del proyecto, ejecución	Planes Marco, , planificación del proyecto, Ejecución, planes de Vigilancia de la obra
Minería	Geotécnica, ingeniería civil y estructural, ingeniería de procesos, planes marco, plan de trabajos, diseño del proyecto	Planes Marco, , planificación del proyecto, Ejecución, planes de Vigilancia de la obra
Geotecnia	Resistencia al cizallamiento, estabilidad estática	Informes, Viabilidad, Diseño del lugar, Estabilización laderas y pendientes, planificación saneamiento, control geotécnico
Desarrollo rural, geodesia	Técnicas agrarias, mejora de tierras, construcción caminos, edafología, agricultura, hidrotecnia	Planes marco, medidas de mejora, construcción caminos, estructuras agrarias, diseño del proyecto, vigilancia obra, ejecución. Control técnica de mejora de tierras

1.6 Bioingeniería del Paisaje, protección de la naturaleza y deontología profesional

La Bioingeniería del Paisaje puede participar substancialmente en la mejora de las condiciones ecológicas de los hábitats de acuerdo a las Directiva Marco del Agua, Directiva de protección de inundaciones, la Directiva de protección del suelo, así como otras directivas (por ejemplo la Directiva para la protección de hábitats y especies, o la protección del medio ambiente) y, haciendo uso de sus posibilidades, puede ayudar a restaurar áreas degradadas para recuperar su naturalidad. Constituye de esta manera una disciplina instrumental de la sostenibilidad.

La protección y la conservación de la naturaleza son los principales objetivos de la Bioingeniería del Paisaje. No obstante –al menos en los trabajos de estabilización- tiene que considerarse prioritario el asegurar las infraestructuras y los requerimientos para su uso.

Por otra parte, también pueden existir conflictos entre la Bioingeniería y la protección de la naturaleza. Si los requerimientos de protección de la naturaleza tienen prioridad, puede rechazarse la utilización de aquellas técnicas de bioingeniería que puedan perturbar los procesos de desarrollo sucesión -natural o modifiquen de manera sustancial la configuración natural de los terrenos. La selección de plantas de acuerdo con sus características pioneras y de promoción de las comunidades vegetales que garantizan la estabilización de los terrenos, pueden en algunas circunstancias, no estar basada solamente en s criterios de conservación de la naturaleza.

Como en todas las disciplinas de la ingeniería, también es válido para la bioingeniería del Paisaje que la experiencia, el conocimiento y la competencia profesional hayan de servir para utilizar los recursos de una manera óptima y ahorradora que asegure la proporcionalidad de los medios empleados.

El principio deontológico básico de la Bioingeniería del Paisaje aplica, en todos los proyectos, el principio del input del mínimo de energía: emplear tanto como sea necesario pero tan poco como sea posible”. La Bioingeniería del Paisaje está obligada a cumplir con este principio (directiva deontológica-ética profesional).

1.7. Requisitos básicos para el éxito en los trabajos de Bioingeniería del Paisaje

Los trabajos de Bioingeniería del Paisaje que tienen buenos resultados son aquellos en los que han participado las disciplinas necesarias y éstas han trabajado de manera interdisciplinar en el desarrollo del proyecto. Por ello, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Evaluación de la estabilización a conseguir: ¿puede ésta conseguirse con las técnicas de Bioingeniería?
- Análisis detallado de las condiciones del lugar y del medio natural así como de los aspectos micro climático del ámbito de actuación, análisis del sustrato edáfico con especial hincapié en las características químicas, físicas e hidrológicas del suelo.
- Evaluación de las condiciones de luz
- Utilización de conocimientos básicos sobre flora y fitosociología

- Presentación de la valoración básica y revisión de los datos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos y geotécnicos en aras a los objetivos perseguidos (según Directiva EFIB, capítulo 2).
- Valoración de las posibles interacciones con la infraestructura existente
- Considerar las posibilidades de mejora del ámbito de actuación
- Definición de la comunidad vegetal final deseada y con qué plantas pioneras, fases de la sucesión vegetal y medidas de mantenimiento puede ésta finalmente conseguirse.
- Consideración de escenarios de referencia de las mismas o similares características naturales
- Respeto de las reglas técnicas (normas, directrices, guías de las correspondientes disciplinas)
- Determinación de las medidas de mantenimiento y control (según Directiva EFIB, capítulo 4 y 5)

En Europa, la planificación y ejecución de obras de Bioingeniería del Paisaje debería de utilizar el Manual de técnicas de bioingeniería de la EFIB (ZEH 2007). En este manual, se reflejan las experiencias en este campo de numerosas y reconocidas personas profesionales del sector. Así mismo, el manual ha de contribuir a unificar la denominación de las diferentes técnicas en Europa (según Directiva EFIB, capítulo 3).

En todos los trabajos de Bioingeniería del Paisaje (la categorización de las tareas de planificación en categorías de dificultad I-III corresponden a la Norma EN DIN 1054 Geotécnica-EC 7) tienen que respetarse las leyes y reglas de la técnica de los correspondientes países (por ejemplo, las normas de seguridad y salud). Por otra parte, la dirección del proyecto tiene que observar sus propias normas específicas. Por esta razón, puede haber diferentes soluciones en los diferentes países europeos para una misma problemática y similares condiciones del lugar.

2. Cálculo de soluciones de estabilización de laderas y riberas

2.1 Principios básicos de cálculo de soluciones de estabilización de Bioingeniería en laderas y riberas

De acuerdo a las normas DIN 1055-100 (norma alemana) y CTE (norma española), toda construcción deberá ser diseñada y ejecutada de forma tal que todos los impactos y consecuencias que tengan lugar tanto durante su construcción como su funcionamiento deberán ser evaluadas y calculadas para asegurar su viabilidad técnica y su seguridad, evitando riesgos, fallos o deformaciones inaceptables. Durante su vida útil, la construcción, deberá mantener su capacidad de resistencia, su estado límite de servicio y su durabilidad siempre y cuando esté sujeta a un mantenimiento adecuado.

Desde el punto de vista del diseño estructural, la estructura será planificada y diseñada de acuerdo a la experiencia y a modelos desarrollados sobre la base de la estática, centrándose en sus características críticas, sus dimensiones y propiedades físicas. El modelo incorporará cargas (S) permanentes (subíndice g) y temporales (subíndice q). Los valores característicos (subíndice k) S_k de estas cargas se determinarán utilizando métodos científico-técnicos.

Mediante la multiplicación de los anteriores valores por factores parciales de seguridad (γ_x) se obtendrán los valores de cálculo de cada carga.

$$S_{d,x} = S_{k,x} \times \gamma_x$$

La construcción o sus componentes desarrollan resistencias (R) que se oponen a las solicitaciones externas. Los valores característicos de estas resistencias se denotan con R_k . Mediante la división de los anteriores valores por factores parciales de seguridad (γ_i) se obtendrán los valores de cálculo de cada resistencia. (R_d).

$$R_{d,i} = R_{k,i} / \gamma_i$$

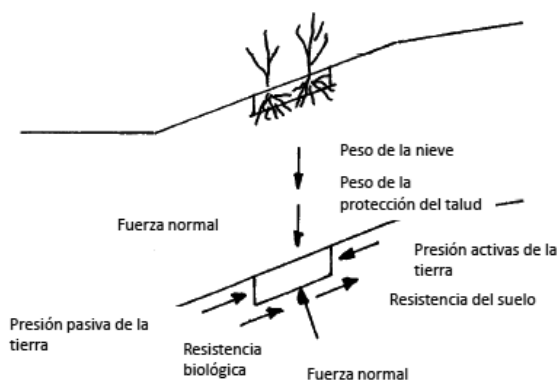
Durante el proceso de diseño se deberán contemplar las siguientes combinación es de posibles escenarios:

1. Combinaciones Standard o usuales. Combinaciones típicas de cargas permanentes y temporales.
2. Combinación poco frecuente de acciones o confluencia temporal poco frecuente de situaciones. Son escenarios críticos que pueden ser relevantes en los momentos más vulnerables de la obra de bioingeniería. Por ejemplo, en las fases iniciales cuando los efectos beneficiosos de la vegetación todavía no son relevantes.
3. Combinación excepcional de solicitaciones.

2.1.1 Modelo de simulación de las técnicas de estabilización de Bioingeniería del Paisaje

De forma análoga a otras técnicas de estabilización, cada construcción o componente de la construcción será definido mediante una única dovela (GROSS *et al.* 2006). En ésta se puede incluir la técnica de bioingeniería entera (técnica + zona de influencia de las raíces o suelo influenciado biológicamente) o partes o sub.-secciones de la misma definidas de acuerdo a variaciones internas o externas de sus características o de las fuerzas actuantes.

Se analizarán los elementos de estabilización desde el punto de vista del equilibrio estático, teniendo en cuenta todas las fuerzas estabilizantes y desestabilizantes sobre la superficie de deslizamiento o rotura. En este proceso de integración se considerarán tanto las fuerzas externas como internas.



Esquema de análisis de estabilidad de taludes de una técnica de estabilización de Bioingeniería del Paisaje.

Los distintos parámetros del análisis de estabilidad se verán afectados por factores parciales según la norma europea BS EN1997-2 2007.

2.1.2 Posibles impactos sobre las técnicas de estabilización de bioingeniería a tener en cuenta en el diseño estructural

Presencia de cargas muertas sobre la ladera, incluyendo el peso de la vegetación

La carga muerta incluye el peso de la vegetación (arbórea y arbustiva). Posibles valores de peso específico del suelo $\gamma' \left[\frac{kN}{m^3} \right]$ pueden encontrarse tabulados en publicaciones sobre diseño estructural. Valores del peso de la vegetación expresado en unidades de peso por unidad de área puede ser encontrado, por ejemplo, en FLL 2008.

La nieve

La nieve tiene un gran impacto sobre los taludes y las laderas. Actúa como una carga pero también es un agente erosivo y puede contribuir al fallo de la ladera. La importancia regional de la nieve deberá ser tenida en cuenta en el diseño y en el cálculo.

El viento

El impacto del viento depende de la ubicación y la orografía. El análisis de la influencia de la vegetación sobre el viento (y viceversa) es tratado en publicaciones especializadas, por ejemplo, SINN 1988 o WESSOLLY y ERB 1998.

La lluvia y el granizo

La lluvia es un agente fundamental en los procesos de erosión superficial y la vegetación cumple un papel protector y de conservación del suelo. Explicaciones físicas e información relacionada con estos fenómenos pueden ser encontradas en MORGAN 1999. La caracterización de la precipitación o tormenta, en el caso de la península ibérica, se hará en términos estadísticos de acuerdo a MAXPLUWIN (Máximas lluvias diarias en la España Peninsular).

La escorrentía

Las tormentas provocan procesos erosivos tanto por el golpeteo de las gotas de lluvia como por la escorrentía superficial. La intensidad de estos procesos depende de la intensidad de la lluvia, la conductividad hidráulica del suelo, la pendiente y la longitud de la ladera así como de la presencia o ausencia de vegetación. Información al respecto puede ser encontrada en MORGAN 1999, DVWK 1996 (en alemán), la Norma 5.2 IC y MAXPLUWIN.

El impacto del pastoreo y la caza

El impacto del pastoreo y la caza deberá ser comprobado en campo y controlado mediante medidas de seguridad adecuadas.

Impacto de otras actividades humanas (deportivas, recreativas, etc.)

Impactos debidos, por ejemplo, a esquí, trineos, motocross, bicicletas, olas debida a embarcaciones, baños, etc. deberán ser comprobados en campo.

Impactos debido al flujo de agua

La concentración de flujos de agua en regueros, cárcavas y barrancos da lugar a procesos erosivos severos. En los cauces de los ríos y arroyos se producen también procesos de erosión y sedimentación.

En relación al control de la erosión, la estimación del inicio de erosión es de gran importancia. En hidráulica fluvial los efectos erosivos del flujo de agua se expresan en términos de tensión cortante o tangencial τ_0 [N/m^2] y velocidad del agua v [m/s]. En general, los cálculos de la lámina de agua se realizan mediante modelos unidimensionales (por ejemplo, HEC RAS) y los valores de velocidad que se obtienen son valores medios dentro de cada sección transversal analizada. Se aconseja el análisis bi-dimensional del flujo de agua para el caso de grandes ríos y laderas de inundación. Para la estimación del cortante crítico se podrá utilizar bibliografía especializada (por ejemplo, SMERDON Y BEASLY, 1959 para el caso de suelos cohesivos, LANE 1953 para el caso de suelos granulares).

Los parámetros de diseño de una actuación en un río están muy influenciados por el periodo de retorno elegido. En áreas de bajo riesgo se pueden considerar periodos de retorno de 5 años. Para actuaciones que protejan, por ejemplo, importantes infraestructuras de transporte o edificaciones, periodos de retorno de 100 años son habituales (Norma 5.2 IC).

El efecto del oleaje

El efecto del oleaje se debe al impacto de las olas contra la orilla de un lago, río, bahía o canal. La intensidad del embate dependerá de la altura de la ola, la forma y rugosidad de la orilla. La presencia de vegetación afecta a este último parámetro. La altura de la ola dependerá de la fuerza del viento, la duración y longitud del desarrollo de la ola. Las olas producidas por embarcaciones dependerán de su tamaño, velocidad y distancia a la orilla. Más información al respecto puede ser encontrada en bibliografía específica.

Presiones y erosión originadas por arrastres de madera, restos o residuos y hielo.

Otros impactos producidos durante las inundaciones se deben a los impactos debidos a los materiales arrastrados por la corriente de agua. Estos materiales pueden ser madera, restos o residuos y/o hielo. Ésta posibilidad deberá ser tenida en cuenta en el diseño de las técnicas de bioingeniería a emplear. Las experiencias e informaciones locales son muy valiosas para estimar la influencia de estos factores.

Empuje activo del terreno

Las actuaciones sobre laderas de cierta inclinación deberán tener en cuenta el empuje activo de las tierras. Este podrá ser determinado de acuerdo a la teoría de empuje de tierras habitualmente utilizado en obras de ingeniería (por ejemplo, CALAVERA, 2001).

Presión hidrostática y empujes ascendentes

La presión hidrostática y el empuje de Arquímedes son conceptos claves en el diseño de las medidas de protección de laderas y riberas. Una situación crítica a evaluar consiste en la presencia de un nivel freático alto junto con un nivel de la lámina de agua bajo. La repetición de la anterior situación con una cierta frecuencia, puede ser causa del comienzo de inestabilidad de la ladera fluvial.

2.1.3 Factores de la vegetación que mitigan los anteriores impactos

Reducción del impacto del flujo superficial de agua mediante técnicas de bioingeniería dentro de la cuenca de captación

En el caso de pequeñas cuencas, la estructura y presencia de vegetación tiene una gran influencia en el caudal punta y en la velocidad del agua. Una adecuada cobertura reduce el caudal punta y las tensiones de arrastre. Una adecuada implantación y gestión de la vegetación es muy aconsejable en el caso de cuencas con problemas de incisión de cauce o de erosión en forma de barrancos.

Reducción del impacto de la presión intersticial del agua y la turificación mediante técnicas de bioingeniería dentro de la cuenca de captación

La vegetación tiene una gran influencia en el equilibrio hidráulico de los taludes y laderas. Influye en la frecuencia e intensidades de los caudales del agua sub-superficial y, por tanto, en los valores de presión intersticial en el pie de las laderas. Todavía no se ha logrado una estimación exacta de estos efectos aunque existentes publicaciones y experiencias al respecto. En cualquier caso, una prueba de este efecto se refleja en la relación directa existente entre las cortas a hecho y la frecuencia de deslizamientos.

Reducción del impacto de las tormentas de lluvia, granizo y los fuertes vientos mediante rodales de vegetación

El impacto de las tormentas de lluvia, de granizo o el efecto de los fuertes vientos sobre el suelo se ve claramente reducido por la presencia y desarrollo de una adecuada cobertura vegetal que sea capaz de amortiguar y disipar estos fenómenos.

2.1.4 La resistencia de la vegetación a los anteriores impactos

Tal y como se ha indicado en 2.1.1. La vegetación y su zona de influencia radical y biológica será tratada como una única entidad en estricta correlación con su medio circundante. En términos de análisis estático, se tratará como un bloque o se subdividirá en partes en función de las necesidades del modelo elegido para analizar el problema.

Resistencia a tormentas y a la erosión superficial

La experiencia ha demostrado que, una cobertura vegetal densa y completa, representa una buena de protección del suelo frente a los efectos erosivos de las tormentas y la escorrentía superficial.

En el concepto de cobertura del suelo se incluye todo material vegetal presente sobre el mismo. Por tanto, se incluyen también las partes del sistema radical que se desarrollan sobre el suelo y la hojarasca Según la norma alemana DIN 18917, el criterio de aceptación de la siembra de herbáceas incluye la obtención de un 50% de cobertura como mínimo.

Resistencia a la erosión tipo regueros debido a la escorrentía superficial

La concentración de los flujos de la escorrentía origina la formación de surcos y regueros de profundidad variable (de 0,1 a 0,4 m). Este fenómeno depende del caudal de escorrentía, su velocidad, la pendiente de la ladera, el tipo

de suelo y la intensidad y frecuencia de las lluvias. Estos procesos erosivos pueden controlarse y corregirse mediante el uso de una combinación adecuada de vegetación herbácea, arbustiva y arbórea. Es esencial conseguir que la vegetación reduzca la velocidad de la escorrentía y de lugar a procesos de sedimentación en los surcos y regueros existentes. Es también fundamental conseguir que los sistemas radicales refuercen el suelo de una manera densa y bien estructurada permitiendo una mejor resistencia al potencial de erosión de la escorrentía.

Resistencia a los flujos de agua

Según la literatura, existen fundamentalmente dos parámetros para traducir los efectos de la resistencia de la vegetación a los flujos de agua. Uno es la tensión cortante crítica $\tau_{crit.}$ (N/m²) y el otro la velocidad crítica $c_{rit.}$ (m/s). En general, los valores recogidos en la literatura son en condiciones de flujo uniforme y sin transporte de sedimentos. En las intervenciones de estabilización de bioingeniería se debe comprobar que las zonas adyacentes a la zona de actuación están bien protegidas contra la erosión y que no existen discontinuidades en términos de resistencia a la erosión. Se pueden encontrar valores estimados de tensión cortante crítica $\tau_{crit.}$ (N/m²) y velocidad crítica $c_{rit.}$ (m/s) en la norma alemana DIN 9661-2, GERSTGASER 1998, RAUCH 2006 y JOHANNSEN 1997 y 2008.

En el interior de barrancos cuando existe un flujo intenso de sedimentos, la presencia de vegetación puede dar lugar a la formación de cuñas de sedimentación debido a la deceleración del flujo de agua y, como consecuencia, a su menor capacidad de arrastre. Para asegurar este efecto es necesario mantener, de forma constante, una buena presencia de ramaje.

En el caso de uso de herbáceas y cañas o juncos, la mejora de los valores críticos se logra cuando se consigue una adecuada cobertura y densidad de hojas vivas y muertas, de tallos y raíces superficiales.

La presencia de estrato arbóreo y arbustivo mejora también los valores de resistencia críticos. Otro factor de mejora consiste en la presencia una estructura radical variada tanto de las raíces superficiales como de las más profundas. Junto a la recopilación de los datos existentes en la literatura, la resistencia a la erosión también puede ser estimada a partir de la observación de las zonas colindantes a la zona de actuación.

La resistencia de la vegetación de ribera está muy influenciada por el tipo de estratificación de la vegetación presente en la zona. Estos estratos y las especies de ribera son muy variados a lo largo y ancho de Europa. En la siguiente tabla se muestran valores medios de resistencias:

Estructura de la vegetación	τ_{crit} (N/m ²)	v_{crit} (m/s)
Saucedas arbustivas	200	2,5
Vegetación ribereña leñosa	100	2,0
Juncos o cañaverales	50	1,5
Praderas con inundaciones de corta duración	30	1,5
Praderas con inundaciones de larga duración	15	1,5

Las actuaciones de bioingeniería en ámbito fluvial pueden dar lugar a disminuciones importantes en la capacidad de desagüe del cauce. Esta posible situación deberá tenerse en cuenta en los proyectos pudiéndose plantear por ejemplo, el ensanchamiento del cauce como medida compensatoria. Una vez decidida la capacidad de desagüe a preservar, se deberá realizar un adecuado mantenimiento tanto de la vegetación como de los elementos de la técnica de bioingeniería construida de cara a la preservación de dicha capacidad hidráulica.

Resistencia a las olas

La mejora de la resistencia a las olas depende de la rugosidad de la superficie y su capacidad para disipar la energía de las olas. Aparte de la rugosidad, también influye la estructura de entramado de tallos, hojas y raíces a la hora de proteger la orilla o ribera.

La presencia de amplias zonas con juncos o cañas, saucedas arbustivas y ramas colgantes de sauces arbóreos, ha mostrado una buena capacidad de disipación la energía de embate de las olas. Los parámetros a considerar en el diseño son la densidad de tallos y su resistencia a flexión.

La evaluación de este efecto de cobertura deberá incluir la presencia combinada de hojarasca y raíces superficiales y sub-superficiales.

Un análisis bien caracterizado del entorno natural proporcionará información relevante de cara al diseño de las obras.

Resistencia a posibles sobrecargas

La incorporación de los efectos de posibles sobrecargas en el análisis es muy importante sobre todo en términos de la resistencia de la técnica o de los elementos que la componen. El conocimiento sobre esta capacidad de resistencia de las técnicas de bioingeniería ante sobrecargas inesperadas es todavía muy limitado y, por ello, se recomienda evaluar caso por caso. Ejemplos de estas situaciones críticas son la formación de pequeñas zonas erosionadas que puedan afectar a la vegetación adyacente, la caída de árboles de gran tamaño sobre la ladera u orilla ocasionando la apertura de zonas o huecos desprotegidos, el impacto debido a troncos arrastrados por el agua, etc.

2.1.5 Parámetros individuales para describir la resistencia de las formaciones vegetales

Los acrónimos y símbolos utilizados en esta sección se pueden encontrar en el apéndice del capítulo 2.

Cobertura de la vegetación

La cobertura describe el porcentaje de suelo cubierto por la vegetación. Es un criterio muy utilizado en el caso de comunidades herbáceas en relación a su resistencia a la escorrentía, erosión superficial y al viento. En el caso de formaciones con varios estratos su valor puede superar el 100%.

Densidad de las estructuras verticales de la vegetación - densidad de ramaje, tallos y troncos

La densidad de la estructura vertical de la vegetación corresponde a la densidad de las estructuras vegetativas verticales presentes por unidad de área (cantidad/m² o cantidad/ha). Estos valores afectan a la resistencia al viento o al flujo de agua ofrecida por la vegetación.

También se puede utilizar para obtener una estimación indirecta de la densidad de raíces.

Densidad específica de la vegetación en relación al flujo de agua en un cauce

Se puede obtener este valor siguiendo las indicaciones de INDLEKOFER 2000 donde se considera, para cada sección transversal del cauce, la suma de las superficies ocupadas A_{pi} por cada tipo estructural de vegetación (troncos, tallos, arbustos o herbáceas). A estos valores de superficie se les multiplica por un coeficiente de flujo. Por último, el anterior resultado se divide por el producto del perímetro del cauce y de la llanura de inundación $L_u \times L_G$:

$$m_v = \frac{\sum c_v \times A_{pi}}{L_u \times L_G} [-]$$

El coeficiente c_v representa el impacto de la vegetación en la velocidad del agua. Según los datos obtenidos en laboratorio, su valor oscila entre 1.2 y 1.5.

Superficie de contacto con el viento

La superficie de árboles y arbustos expuesta al viento se obtiene proyectando horizontalmente según la dirección del viento el área expuesta de la vegetación existente [m²]. En el caso de barreras de protección frente al viento, se puede estimar su permeabilidad en forma de porcentaje. En el análisis estático de la estabilidad de un árbol se suelen utilizar valores de coeficiente de flujo $c_w = 0.2$ a 0.4 (de forma análoga al análisis realizado para el caso de edificaciones).

Ratio de cobertura de las raíces

A la hora de estimar la influencia del sistema radical en la estabilidad de orillas y laderas se suele calcular un porcentaje de cobertura de raíces y un valor medio de la resistencia a tracción de las raíces que atraviesan la superficie de fallo.

Resistencia a cortante τ_r

En un suelo, los efectos estabilizadores debido al efecto de las plantas y organismos edáficos, dado su complejidad, no pueden ser caracterizados o estimados con parámetros sencillos como por ejemplo la densidad de raíces.

En general, se utiliza el valor de la resistencia a cortante τ_r (KN/m²) como parámetro integrador de los anteriores efectos, junto con otras variables mecánicas como la cohesión y el ángulo de fricción. Es en el término de cohesión donde se incluyen las influencias de tipo biológico de las raíces, las micorrizas y la estabilidad agregada. Por otro lado, la disminución de la humedad o el nivel freático debido a la evapotranspiración es considerada en el análisis de tensiones efectivas de la estabilidad del la ribera o ladera.

Resistencia a cortante crítica τ_{crit}

Este término τ_{crit} (N/m²) indica la máxima resistencia frente a las tensiones de arrastre del agua que una orilla es capaz de ofrecer. El valor de esta resistencia deberá incluir los efectos beneficiosos de la presencia de vegetación o de las técnicas de bioingeniería.

Resistencia al flujo de agua de una planta

La Resistencia individual de una planta (tanto parcial como totalmente sumergida) frente al flujo de agua puede ser calculada mediante las siguientes expresiones:

Caso de vegetación con comportamiento no elástico:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v^2}{2 * g} * A_P * c_P$$

Caso de vegetación con comportamiento elástico:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v}{2 * g} * A_P * c_P$$

Densidad de raíces D_{wz}

La densidad de raíces indica el número de raíces de un determinado rango de calibre (diámetro) por unidad de área. El valor de la densidad de raíces varía con la profundidad por lo que ésta tiene que ser indicada.

Sección transversal de las raíces SA_w

Este valor consiste en la suma de las secciones transversales de las raíces por unidad de área a una determinada profundidad. Es un parámetro muy útil de cara a la caracterización del sistema radical. Su valor disminuye con la profundidad.

Este parámetro es utilizado en los análisis de estabilidad de laderas y riberas para incluir los efectos de la vegetación y la mejora de las características resistentes del suelo.

2.1.6 Consideraciones básicas de naturaleza local sobre el uso de las plantas y la evaluación de la situación

A menudo, las zonas donde se intentan implantar soluciones de bioingeniería ofrecen problemas en el establecimiento de la vegetación. Un diseño con buenas opciones de éxito implica una cuidadosa caracterización tanto de la zona de construcción como de las zonas colindantes en relación a las posibilidades de implantación de una comunidad vegetal con porvenir. En el análisis de las particularidades de la zona de actuación, se deberán tomar en consideración los siguientes aspectos:

- Utilizar unidad de paisaje natural
- Localización, altitud sobre el nivel del mar
- Morfología, longitud de la ladera, pendiente, altura, orientación, forma de la orilla, forma de la orilla y caracterización de flujo de agua.
- Geología, suelo, edafología, secuencia de estratos.
- Macro- y microclima, temperatura, precipitación, episodios de tormentas, nieve, granizo, caracterización del viento y ventiscas.
- Vegetación natural y potencial, vegetación pionera y fases de evolución y regresión (serie vegetal). Vegetación presente en las zonas colindantes a la zona de actuación, competición y posibles sinergias.
- Información relevante de cara al diseño sobre la fauna de la zona.
- Usos del suelo y sus influencias sobre el proyecto.
- Figuras de protección, necesidades de protección.

Un diagnóstico y juicio adecuado solo será posible sobre la base de un análisis profundo y adecuado de la zona donde se va a actuar. Mediante este trabajo es posible tener éxito en el uso de las técnicas de bioingeniería lo que incluye una correcta selección de las técnicas, las especies vegetales y los materiales auxiliares a utilizar.

2.2 Integración de una obra de Bioingeniería del Paisaje en el proceso de planificación global.

El proceso de planificación global de una obra, la puesta en marcha y el desarrollo de una solución de Bioingeniería del paisaje se estructura como se indica a continuación:

- Caracterización del problema
- Anteproyecto
- Proyecto para la aprobación y la obtención de licencia por parte de las autoridades.
- Proyecto ejecutivo de detalle y preparación de la licitación de obras
- Ejecución y dirección de obra
- Labores de mantenimiento para el control del crecimiento y desarrollo durante el periodo de garantía
- Labores de mantenimiento hasta la obtención de la vegetación deseada
- Mantenimiento y cuidados de la comunidad vegetal deseada
- Control de la obtención del objetivo deseado

Caracterización del problema y anteproyecto

El proyectista debe abordar el análisis y el diagnóstico en una perspectiva abierta que tenga en cuenta todas las posibles soluciones sin ideas preconcebidas. Solo de esta manera podrá encontrar la solución óptima para la obra en función de las condiciones de existentes.

El problema de la protección contra la erosión demanda que se examinen una gran gama de posibilidades de actuación dentro del anteproyecto. Por ejemplo, en el caso de la protección de un margen, las siguientes variantes pueden tenerse en cuenta:

1. Permitir un desarrollo natural y excluir usos del territorio próximos a la orilla y que sean incompatibles con la regeneración
2. Conservar los encauzamientos como una solución técnica y mantener íntegramente los usos actuales
3. Llevar a cabo obras de protección de Bioingeniería para introducir la vegetación riparia y la eliminación de una parte de los usos del territorio que se encuentren directamente en proximidad con el cauce

Cuando se propone una solución de Bioingeniería en el marco de un anteproyecto, la ejecución debe ser posible teniendo en cuenta las condiciones del lugar. La vegetación prevista debe poder oponer la resistencia requerida frente a los efectos erosivos presentes

Proyecto para la aprobación y la obtención de licencia por parte de las autoridades

En el proyecto que debe ser aprobado debe de indicar pormenorizadamente la vegetación prevista concretamente el tipo de vegetación y de biotopo, así como indicar la caracterización de las especies principales y las labores de mantenimiento necesarios

Se deben describir de manera esquemáticas los pasos necesarios para una correcta introducción de la vegetación en las estructuras constructivas de bioingeniería elegidas, así como especificar los cuidados posteriores y evolución prevista de manera que se garantice el crecimiento adecuado de la vegetación. La resistencia de la vegetación objetivo ante las diferentes fuerzas susceptibles de actuar localmente, se deben comprobar y validar adecuadamente. El conjunto de las intervenciones de Bioingeniería tiene

que garantizar, de manera fehaciente, desde su instalación la resistencia adecuada y la seguridad.

En el caso de medidas a lo largo de un curso de agua, examinaremos la influencia de la vegetación en la capacidad hidráulica del tramo considerado y la posibilidad de aparición de daños al aumentar el nivel del agua o en el caso de inundaciones.

En el marco del análisis del proyecto en base a las leyes ambientales, se definirán las especies vegetales a utilizar (generalmente adaptadas a la serie de vegetación) y los materiales de construcción a emplear de manera que éstos se integren en las medidas de construcción dentro de un equilibrio natural y favorezcan un desarrollo natural de las aguas así como proporcionen un valor recreativo y paisajístico.

Una planificación que resulte apta para ser aprobada requiere también que se tengan en cuenta las superficies disponibles para las diferentes propuestas

Proyecto ejecutivo en detalle y licitación

Durante esta fase de planificación, se elabora el plan de obra y se estiman las necesidades técnicas y funcionales, de acuerdo con lo aprobado oficialmente y con la participación de los usuarios potenciales y residentes. También forma parte de esta fase la redacción detallada de los métodos de construcción de bioingeniería para la protección y revegetación de los sitios amenazados, incluyendo los análisis de suelo y otras evaluaciones del lugar.

Se deben señalar también el tamaño y la calidad requerida de los materiales vegetales - semillas, partes de plantas con capacidad de enraizamiento y plantas - así como la calidad y el dimensionamiento de otros materiales de construcción, tales como geotextiles, fajas, estacas y piedras. Durante esta fase de planificación, se debe poner el acento en definir y medir claramente los objetivos, teniendo en cuenta las normas de seguridad y salud, las disposiciones especiales del jefe de obra y las reglas generales de construcción de la técnica, de manera que se pueda clarificar las responsabilidades en caso de accidente o daño

Ejecución y dirección de obra de los trabajos

Habitualmente, la ejecución de los trabajos se asigna a una empresa cualificada en base a una oferta o a un concurso. El trabajo de dirección de obra lo lleva a cabo un estudio de ingenieros cualificados. La dirección de obra, en nombre del propietario, fiscaliza que los trabajos desarrollados estén en consonancia con el proyecto y estén conformes a los términos de la licitación y con la descripción de las tareas técnicas concretas y la normativa existente.

En el caso de que se produzcan problemas inesperados o que las condiciones locales (por ejemplo del suelo o del sustrato) no se correspondan con las características base del proyecto, compete también al gabinete técnico contratado para la dirección, el apoyar al propietario en la resolución de los problemas surgidos.

Mantenimiento durante el crecimiento y desarrollo durante el periodo de garantía

Durante el periodo de garantía plurianual, se incorporan a las medidas de construcción diversas labores de mantenimiento para garantizar el crecimiento y el desarrollo adecuado de la vegetación. Estas labores las debe realizar la empresa encargada de las obras.

Labores de desarrollo, conservación y mantenimiento

A la finalización del periodo de garantía, se realiza una inspección final y la recepción de la obra. El cuidado es entonces responsabilidad del propietario o de una empresa contratada para este fin. Estos trabajos de mantenimiento gestionarán adecuadamente el desarrollo de la vegetación leñosa hasta la consecución de la serie natural deseada. A partir de este momento se pasa a la fase de mantenimiento orientada a garantizar la funcionalidad técnica de la obra de Bioingeniería. (Véase el Capítulo 4).

Gestión de los procesos durante las fases de planificación, construcción y mantenimiento de las técnicas de Bioingeniería del Paisaje

Los procesos que llevan al desarrollo de una vegetación protectora que responda a las exigencias de Bioingeniería, debe organizarse sin interrupción para evitar la pérdida de información importante entre las distintas fases. Así en el proyecto de ejecución, tienen que quedar claramente indicadas y explicitadas las medidas relativas a la protección medioambiental y de la naturaleza que deben ser respetadas de acuerdo con los términos de la normativa en vigor. La vegetación (o formación vegetal) debe ser respetada en todas las fases de construcción y mantenimiento. No puede subordinarse a otros criterios como cuestiones estéticas, técnicas de construcción que comprometan la eficacia de dicha vegetación o ajustes contrarios a los objetivos de protección de la naturaleza.

2.3. Recomendaciones para diferentes aplicaciones

2.3.1 La erosión de taludes de tierra

Problemática

La erosión de taludes de tierra desprotegidos por la falta de vegetación, puede ocasionar un daño significativo en las obras de carreteras e infraestructuras de transporte, construcciones hidráulicas, minería y zonas de acopio en obra. Como consecuencia de esta erosión pueden producirse daños en la propia infraestructura lineal o en sus estructuras de drenaje.

Acción

Las acciones más comunes en las laderas de tierra originan la lluvia, el granizo, la escorrentía superficial difusa, la nieve, el viento fuerte, así como el impacto de los seres humanos y los animales.

Resistencia

El impacto de los seres humanos y los animales puede reducirse implementando medidas de seguridad y restricciones de uso. El establecimiento de un buen nivel de cobertura herbácea se ha demostrado adecuado en caso de tormenta y escorrentías locales. La cobertura general incluye las partes vivas (brotes, tallos, hojas y otros órganos vegetativos por encima del nivel del suelo,) y las hojas muertas mientras que se mantengan unidas a la planta, los sistemas de raíces superficiales y sub superficiales, así como sustratos resistentes a la erosión, como piedras, roca y madera. Agrupaciones

suficientemente densas de arbustos y árboles en combinación con una adecuada vegetación herbácea proporciona una buena protección contra la nieve y la acción del viento.

Factores limitantes

Son factores limitantes las condiciones extremas tales como el gradiente de pendiente, exposición a la luz o grado de insolación, microclima, tipo de suelo, nivel de compactación, la falta de nutrientes y la presencia de elementos o compuestos tóxicos.

Instrucciones para el dimensionamiento y diseño

La vegetación adecuada para su utilización en estas laderas se define de acuerdo con el análisis de la vegetación potencial y natural existente. La técnica para el control de la erosión y la siembra se eligen de acuerdo a la experiencia acumulada en situaciones similares.

Se recomienda realizar una evaluación de coste/ beneficio como se indica en la norma DIN 18918. Se debe realizar una evaluación más detallada de los posibles riesgos en caso de eventos extremos como lluvias torrenciales, fuertes vientos, elevadas cantidades de nieve considerando siempre los periodos de retorno adecuados a los objetivos y condicionantes de la intervención. La responsabilidad civil en el caso de eventos con una frecuencia por debajo del valor definido en proyecto es asumida por el proyectista y el director de obra y en caso de eventos extraordinarios, la responsabilidad es asumida por el cliente.

2.3.2 Deslizamientos superficiales de tierra

Problemática

La vegetación y las técnicas básicas de bioingeniería del paisaje solo eficaces en deslizamientos superficiales que son paralelos al plano de la pendiente, así como en pequeñas laderas de elevada pendiente con suelo poco cohesivo. Los árboles altos y pesados actúan desfavorablemente en pendientes pronunciadas, especialmente en suelo cohesivo. El problema de los deslizamientos es abordado por la bioingeniería del paisaje partiendo de los modelos disponibles de la mecánica de suelos, integrando los factores adecuados de resistencia y las acciones asociadas a las medidas proyectadas.

Acción

Un deslizamiento de ladera se origina por factores tales como el incremento de peso del suelo húmedo (incluyendo cargas tales como vegetación, nieve...), la presión hidrostática y la fuerzas agentes

Resistencia de la vegetación

Existe una tensión de corte τ_f (kN/m²) entre la capa de deslizamiento de suelo y el subsuelo. La tensión de corte se puede estimar a partir de datos referidos a capas de suelo similares. La tensión de corte resulta de la combinación de las características geo-mecánicas de rozamiento y cohesión. Es en este contexto en el que actúan los factores biológicos como por ejemplo las raíces, micorrizas y agregantes orgánicos naturales que constituyen la denominada cohesión biológica. Los parámetros de resistencia al corte de la vegetación varían fuertemente con la profundidad, la compactación y la

humedad del suelo, lo que hace que sea difícil de determinar (artículo 2.1).

Factores limitantes

Los siguientes factores pueden limitar o eliminar el efecto de las raíces en la estabilización de pendientes:

- Presencia de roca o de limos o arcillas muy compactados.
- Presencia de aguas subterráneas en el espacio en el que se desarrollan las raíces
- Sustratos tóxicos
- Otras características locales, que incidan en el crecimiento de las plantas

Criterios para dimensionar y diseñar en las laderas de tierra

Las condiciones para construir una cubierta estabilizadora con vegetación en las laderas de tierra son:

- Los estratos inferiores son estables.
- La tierra de los estratos inferiores es más permeable para el agua que las capas superficiales.
- no hay presión hidrostática en la capa superficial del suelo, debido a las aguas subterráneas o las filtraciones.
- El enraizamiento en el suelo es posible en relación a sus condiciones de porosidad del suelo, litología, pH ...
- la capa superior del suelo (estrato orgánico) tienen un espesor bajo por lo que las plantas en un tiempo relativamente corto, desarrollarán raíces en las capas inferiores por debajo del plano de deslizamiento potencial

Estas son las condiciones bajo las cuales es posible estimar el crecimiento del factor de seguridad debida a la vegetación en base a estudios en sitios de referencia recurriendo a modelos geotécnicos clásicos. De esta forma es posible determinar la acción de la vegetación en términos de tensión de corte en la zona específica del enraizamiento a lo largo del plano de deslizamiento

Taludes de elevada pendiente y suelo no cohesivo

Diversos experimentos han demostrado que es posible consolidar laderas de baja a media altura con ángulos justo por encima del ángulo de rozamiento interno del suelo estable mediante el uso de plantas de raíces profundas en combinación, durante el período de desarrollo de la planta, con técnicas de estabilización de bioingeniería del paisaje tales como los lechos de ramaje. La mejora de la estabilidad resultante puede ser estimada según SCHAARSCHMIDT 1971, SCHUPPENER 1994 y HÄHNE 1997.

Taludes de menor pendiente se pueden estabilizar hasta un ángulo máximo de 45 ° mediante la combinación de vegetación de enraizamiento profundo con una cobertura herbácea densa. Estructuras estabilizadoras complementarias de madera se utilizan durante el período de crecimiento y desarrollo de la vegetación como, por ejemplo, los entramados de madera viva que también puede resistir pequeños empujes activos. El dimensionamiento de un entramado es similar a las de un muro de gravedad, también es en parte basado en el método de tierra reforzada.

2.3.3 Erosión en cárcavas en pendientes y laderas

Problemática

Como resultado de la concentración de la escorrentía en pendientes largas y pronunciadas en las líneas de máxima pendiente, puede producirse la aparición de cárcavas. Otras causas de erosión en cárcavas son: suelos impermeables, la tala de bosques en zonas de cabecera o una mayor concentración de escorrentía por una carretera en construcción u otras intervenciones morfológicas.

El proceso de erosión avanza en la dirección contraria al flujo. Los deslizamientos de tierra como resultado de deslizamientos de estratos en las pendientes tienen un efecto creciente impredecible.

Acción

Basándose en modelos de escorrentía y en información sobre la precipitación local, se pueden estimar los caudales de punta de flujo máximo Q (m^3/s) definidos de acuerdo a un periodo de retorno predefinido ($1/n$ años)...El cálculo debe incluir la determinación de la media de la velocidad de flujo v (m/s) y la tensión tangencial de arrastre τ_0 (N/m^2).

Resistencia

El lecho de la cárcava así como la base de los taludes de se debe consolidar con vegetación arbustiva densa y de pequeños porte y con vegetación herbácea e igualmente densa... La vegetación debe ser capaz de resistir el desbordamiento, la erosión y la sedimentación. Se debe tener en cuenta además el nivel crítico de tensión tangencial τ_{crit} que inicia el proceso de erosión anteriormente mencionado.

Límites de aplicación

Altas velocidades de flujo y elevada tensión tangencial junto con una importante carga de sedimentos transportados limitan la aplicabilidad de los métodos de bioingeniería del paisaje. La exposición solar así como los posibles daños causados por el ganado también actúan como factores limitantes.

Criterios para el dimensionamiento y diseño

El impacto de los suelos impermeables dentro de la cuenca debe ser compensado por la construcción de balsas y otras medidas de retención de agua de lluvia. Se pueden emplear como referencia el análisis de los arroyos circundantes. Los resultados de los sitios de referencia deben ser comparados con los resultados teóricos obtenidos con los sistemas de validación hidráulica. De esta forma podemos obtener una buena caracterización.

Los cursos de agua próximos considerados como referencia deben servir de orientación para la selección de la vegetación local más adecuada así como las medidas complementarias, empleando la piedra de la zona y la madera que mejor se integren en los sistemas naturales locales. Las presas y los azudes no existen en la naturaleza. Estas alteran el paisaje natural, limitan e interrumpen los biotopos y son incompatibles con los objetivos de la Directiva Marco del Agua. Por lo tanto, el uso de medidas de estabilización lo más próximas a los sistemas naturales debe aplicarse siempre que sea posible. Sin embargo, en algunas regiones los azudes o las presas son la única manera de restaurar la erosión en cárcavas y arroyos por ejemplo, en zonas de alta montaña con alta densidad de población.

2.3.4 Riberas de ríos y zonas adyacentes

Problemática

En las riberas se producen arrastres, incisiones y otras formas de erosión debido a la dinámica natural de las riberas de los ríos y zonas adyacentes, incluyendo las llanuras de inundación. Estos procesos son fenómenos positivos, porque se trata de una dinámica natural en la geomorfología fluvial. Sin embargo, cuando las infraestructuras, otras construcciones o usos se ubican cerca del curso de agua es necesario garantizar su seguridad y protección contra daños. En los territorios de uso intensivo, y en particular en las cercanías o dentro de los asentamientos humanos la capacidad de descarga, el nivel máximo del agua en inundaciones y el flujo promedio de agua debe ser controlada con el fin de garantizar la seguridad de los edificios, infraestructuras y otros usos del suelo.

Acción

La fuerza de la corriente, caracterizada como velocidad de flujo v (m / s) y la tensión tangencial τ_0 (N/m²), así como las fuerzas impulsoras asociadas a materiales y al hielo transportados por la corriente deben ser tomadas en cuenta en las medidas de estabilización con técnicas de bioingeniería del paisaje. Impactos adicionales de los seres humanos y animales también son posibles y deben ser controladas por medidas especiales o por técnicas constructivas específicas. En los fenómenos de inundación, cuando el nivel del agua disminuye rápidamente, la diferencia de cota entre el nivel de las aguas subterráneas y el nivel de agua del río crea una presión hidrostática en las orillas de los ríos que puede ocasionar riesgos adicionales en la estabilidad de los taludes fluviales.

Resistencia

Las diferentes estructuras de vegetación ofrecen diferentes resistencias al flujo del agua. Una cobertura herbácea baja proporciona una protección muy eficaz contra la erosión y crea poca resistencia al flujo de agua. Los carrizos tienen un efecto similar, ya que se doblan en altas velocidades de flujo. Estructuras de madera (arbustos o árboles) reducen la velocidad del flujo del agua, así como su velocidad cerca del lecho del río y sus márgenes. De acuerdo con su densidad efectiva, la mayoría de las especies de sauce construyen un sistema radicular denso que protege la superficie del suelo de las riberas de los ríos. Por lo tanto, riberas y llanuras de inundación pueden ser protegidas contra la erosión dentro de los límites de la velocidad crítica c_{rit} i los valores críticos de tensión tangencial τ_{crit} .

Límites de aplicación

Junto con las limitaciones naturales de la zona de intervención, la máxima velocidad de flujo y tensión tangencial aceptables se deben tener en cuenta otros factores limitantes. Todas las especies vegetales tienen un límite determinado para su aplicación de acuerdo con su capacidad de resistencia a la velocidad del flujo, a la duración, frecuencia y profundidad de la inundación, la resistencia al corte. Otros factores también establecen límites como los asociados con hielo a la deriva o la naturaleza de los materiales transportados. Se recomienda investigar los límites de las especies vegetales en relación a su presencia sitios de referencia comparables.

La estabilidad general de una margen fluvial tiene que ser determinada en situaciones de máxima diferencia entre la cota de agua del cauce y el nivel del agua subterránea de la margen, de manera de considerar las situaciones de máxima presión hidrostática que actúa sobre ésta. Debido a su influencia en la reducción de la velocidad de flujo y por consiguiente del volumen de flujo, la utilización de vegetación leñosa debe ser utilizada con el máximo cuidado en áreas urbanas con el fin de comprometer la eficacia hidráulica de secciones intervenidas.

Instrucciones para el dimensionamiento y diseño

El diseño y construcción de medidas de estabilización naturales tienen que hacerse de acuerdo con la Directiva Marco del Agua. Esto incluye no degradar la zona de intervención y facilitar la evolución hacia un buen equilibrio ecológico. El uso de técnicas de bioingeniería del paisaje representa una contribución positiva, ya que éstas favorecen la estructura natural de la vegetación y la dinámica fluvial. Utilizan para su construcción material natural de la zona y especies de plantas específicas del sitio seleccionadas de acuerdo con la naturaleza de los problemas y el objetivo de la intervención. Se puede obtener información acerca de las estructuras a utilizar, de la vegetación y los límites en zonas de referencia cercanas a la intervención... Al intervenir en los cursos de agua siempre se ha de considerar la hipótesis de la restauración de la morfología y la dinámica natural del río, mediante la eliminación del elemento causante del impacto o cambiando los usos del suelo que puedan generar conflicto. Esta alternativa es la que mejor puede garantizar el buen estado ecológico y geomorfológico del río. Las medidas de estabilización del margen fluvial, así como de los márgenes con pendiente elevada sometidos a elevadas corrientes, deben construirse exclusivamente con materiales locales como rocas, madera o trocos y ramas obtenidas en el lugar. De esta forma, se crearán estructuras longitudinales, transversales a lo largo del perfil hidráulico, adecuadamente diversificadas para garantizar las diferentes funciones ecológicas de un río así como su continuidad y conectividad, al contrario de lo que ocurre con trazados y perfiles monótonos y estructuralmente homogéneos.

Las medidas de estabilización naturales y la restauración de una vegetación de ribera funcional sostenible determinan normalmente una reducción de la eficiencia hidráulica del curso de agua. Por lo tanto, un riguroso estudio hidráulico debe realizarse en todos los proyectos de Bioingeniería del Paisaje en ámbito fluvial con el fin de determinar la forma en que los niveles de agua, velocidad de flujo y otros procesos dinámicos asociados con el curso de agua puedan afectar a los usos de la tierra de los alrededores y las infraestructuras existentes. La estabilidad del margen o talud fluvial tiene que garantizarse en todas las condiciones hidrodinámicas e hidrostáticas.

Este proceso de planificación y diseño de los cursos de agua implican procesos importantes y complejos de coordinación entre técnicos, autoridades, residentes, y los grupos de protección del medio ambiente. Todas las partes involucradas deben cooperar con el fin de desarrollar un proyecto que cumpla con todas las condiciones para la aprobación y responder a las necesidades de los diferentes grupos

2.3.5 Márgenes de lagos

Problemática

A lo largo de las orillas de los lagos pueden producirse diferentes tipos de erosión que originan zonas escarpadas. Estos fenómenos naturales pueden aumentar debido a los tipos de usos de estas superficies de agua.

Acción

Las olas, tanto las naturales como las originadas por embarcaciones, junto con madera o residuos a la deriva o el hielo son los principales problemas a los que se enfrenta la bioingeniería en intervenciones en lagos. Las orillas se dañan por el acceso de barcos y otras actividades de recreación. Los animales también pueden tener un impacto negativo en la estabilidad de estos márgenes.

Resistencia

El suelo puede protegerse por una densa cobertura herbácea. Amplias zonas de carrizo reducen el efecto de las olas y protegen el suelo por medio de enraizamiento. Estructura bien desarrolladas de árboles y arbustos tienen también un efecto similar.

Límites de aplicación

Junto con las limitaciones propias de cada espacio, para cada especie vegetal existe un límite determinado de aplicación. Se determina por la altura, la frecuencia y duración de la inundación. La frecuencia de impacto de las olas es también de importancia, olas regulares originadas por el tráfico de buques pueden destruir una formación de carrizos que pueden resistir olas similares originadas durante una tormenta.

Instrucciones para el dimensionamiento y diseño

El uso agrícola, turístico y la planificación del paisaje debe tenerse especialmente en cuenta en el proceso de determinación de las técnicas de bioingeniería del paisaje para la estabilización de márgenes y orillas de lagos. Los usos conflictivos deben mantenerse lejos de la orilla. En general es útil ofrecer instalaciones de ocio atractivas en zonas adecuadas para proteger el entorno. La capacidad de carga y límites de la aplicación de la vegetación se debe determinar mediante el análisis de los sitios naturales comparables. Para asegurar un éxito del establecimiento de la vegetación son necesarias medidas de protección para impedir la circulación de personas y animales, impacto de trozos de madera, el pastoreo de ganado u aves acuáticas...

2.3.6 Los diques y presas

Problemática

Los diques y presas constituyen medidas estructurales para la protección de usos y edificios en zonas marginales frente a las inundaciones. Su objetivo es mantener, de forma duradera, niveles de agua elevados en canales, ríos y otras estructuras hidráulicas. En la fase de estiaje se puede dar en la margen "húmeda" un riego elevado de erosión similar al que se produce en los márgenes de ríos o lagos. Dado el alto riesgo asociado a una eventual rotura del dique o de la presa se deben garantizar medidas de control, restauración y refuerzo de la estructura que garanticen su estabilidad en todo momento. Es especialmente importante reaccionar rápidamente en la zona seca, cuando se produzcan pérdidas de agua por

infiltración y prevenir la erosión de la base de la estructura.

Acción

Los principales acciones derivan del propio peso de la estructura, viento, lluvia y escorrentía superficial. Las acciones adicionales se producen en la orilla del agua debido al flujo de agua, tensión tangencial, arrastre de madera a la deriva y las olas. Las diferencias en los niveles de agua pueden provocar deslizamientos después de una inundación en el lado húmedo del dique. Después de las inundaciones, debido a la presión hidrostática o desbordamiento del borde del dique, pueden ocurrir aguas abajo el derrumbe de taludes, la erosión del suelo por presión hidráulica y erosión por deslizamientos. El pastoreo (excepto ovejas), así como la circulación de motocicletas y coches puede dañar la vegetación. Un daño adicional es a menudo causado por la excavación de los animales.

Resistencia

Es común el uso de una cubierta de hierba densa en lugares donde la tensión tangencial y la velocidad de flujo no causarán daños en la vegetación. Además es una protección para los efectos de las olas y la erosión del viento. Hay, sin embargo, la posibilidad de que pueda ser dañado por el hielo a la deriva y trozos de madera. El riesgo de daño se puede reducir mediante el refuerzo de la capa superior del suelo (combinación de piedras y formaciones herbáceas densas) o mediante la instalación de formaciones densas de salicáceas en la zona frontal en los promontorios de los taludes más susceptibles a la erosión.

Una buena cobertura herbácea se utiliza para proteger la pendiente contra el viento y la lluvia. La cubierta vegetal permite una mejor detección de filtraciones de agua. El uso de una selección diversificada de especies autóctonas de pasto y hierbas eventualmente en combinación con la aplicación de heno trillado garantiza el desarrollo de un sistema radicular denso, diversificado y muy efectivo, por lo tanto, con un alto nivel de protección contra la erosión.

Límites de aplicación

Los límites de aplicación están asociados, en el lado del agua, con el nivel y la duración de la inundación. Otro factor limitante es la altura de las plantas individuales y su capacidad de carga contra el desbordamiento, la acción de las olas y el efecto de la madera o hielo a la deriva en la orilla.

Instrucciones para el dimensionamiento y diseño

Los diques y represas son construcciones de naturaleza y funcionalidad técnicas. En la mayoría de los casos el uso de técnicas de bioingeniería en base a formaciones herbáceas naturales es la forma más barata para proteger los diques contra la erosión. Si se supera el límite de aplicación de estas especies, es necesaria una combinación de vegetación y rocas. Se deben tener en cuenta en la planificación y en el proyecto las exigencias específicas de mantenimiento, defensa y eventual refuerzo. El nivel de humedad a lo largo de la pendiente en el lado seco del dique y las diferentes frecuencias y duración de las inundaciones en el lado húmedo tienen que tenerse en cuenta al elegir las especies de plantas adecuadas.

2.3.7 Protección de costas y litoral

Problemática

Las técnicas de Bioingeniería del Paisaje contribuyen de distintas formas a la protección y a la restauración de las costas. Por una parte, mediante medidas de protección y de desarrollo de zonas dunares y por otra parte mediante procesos que consoliden los diques de protección costera a través de la intervención y el mantenimiento de zonas de marisma contiguas. Las técnicas de Bioingeniería del paisaje empleadas antaño en las marismas eran designadas como "técnicas biogénicas de conquista de tierras al mar"

Acción

Viento y agua en combinación

Las técnicas de Bioingeniería del Paisaje se utilizan principalmente en las zonas de playa regresiva, es decir las zonas en las que las fuerzas erosivas predominan y originan el retroceso de las playas o de las dunas. En zonas costeras en progresión, la bioingeniería puede utilizarse para ayudar en el desarrollo y consolidación de dunas incipientes, mediante un adecuado desarrollo de la vegetación. En las zonas intermareales y de marismas, la acción de la Bioingeniería es la reducción de la energía del agua, que en situaciones de mareas vivas, el agua fluyendo descontroladamente puede dañar los diques y otras estructuras litorales. Una elevación natural de las zonas intersticiales puede contribuir a distribuir de manera más equilibrada la energía del mar, reduciendo las fuerzas agentes en la base de los diques y otras estructuras costeras

Resistencia

La dinámica natural de formación dunar y la biología de las especies vegetales dunares ilustran claramente sus posibilidades de utilización para la protección de las dunas. En las dunas regresivas, el acento se ha puesto en la resistencia de los tallos y hojas de la vegetación al viento mediante el aumento de la rugosidad con el consiguiente efecto de retener y depositar la arena que éste transporta. El enraizamiento de la arena depositada, consolida y estabiliza la duna así formada

En las zonas intersticiales y de marisma, la acción de la Bioingeniería se focaliza en la disminución de la energía de las olas y de los flujos de agua durante las mareas vivas, de modo que evite que la energía que actúa sobre los diques costeros pueda amenazar su estabilidad y seguridad. Esta reducción de energía se consigue aumentando la rugosidad del substrato, aumento provocado por las especies vegetales que garantizan simultáneamente una consolidación del suelo y su protección frente a la erosión.

El sistema radicular tiene una importancia capital, ya que cohesionan las partículas del suelo y es a la vez una estructura vez sólida y flexible. Las partículas del suelo poseen una estabilidad elevada en relación a las fuerzas agentes y la red de raíces, absorbe las fuerzas de tracción y de fricción inducidas por la corriente marina. Los procesos de sedimentación son potenciados, de esta forma, por la densidad estructural vertical y horizontal de la vegetación. La tasa de sedimentación está directamente correlacionada con la intensidad de inundación, la cual depende de la cota natural en la que se desarrollan los distintos biotopos en relación al nivel del mar (mediana de alta marea MThW)

La transmisión de la energía depende de la altura, de la elasticidad y de las capacidades de resistencia mecánica de la cubierta vegetal. Con un aumento progresivo de la altura de las plantas, se produce una reducción de la velocidad de la corriente y esto conlleva a una mejor protección del suelo

Límites de aplicación

Cuando las fuerzas abrasivas sean superiores a las que pueden soportar la vegetación, sea herbácea o arbustiva.

Instrucciones para el dimensionamiento y diseño

En las zonas costeras se aplican los mismos principios de los sistemas inertes de retención de arenas mediante un incremento de la rugosidad y su posterior fijación gracias al enraizamiento. Para esta finalidad se emplean especies cuyos sistemas radiculares sean capaces de consolidar y retener materiales friables como la arena, como es el caso de las especies herbáceas de zonas dunares o arbustos de zonas costeras. La biología de las especies es análoga y la selección de las especies depende de las condiciones ecológicas locales.

2.3.8 Pantalla vegetal contra el viento y las emisiones contaminantes.

Problemática

Se pueden establecer setos de árboles o de arbustos con el fin de proteger las superficies útiles y las vías de comunicación frente a la acción del viento y a los posibles daños asociados (desecamiento, deposición de arena y sedimentos, deposición y acumulación de nieve). Se emplean también los setos y las repoblaciones forestales para retener las emisiones de polvo y proteger las superficies de la erosión en los bordes de las superficies de extracción de áridos, de escombreras en las explotaciones mineras y de otras superficies de terrenos no cohesivos como terraplenes.

Acción

Cuando se trata del viento como agente principal, los factores a describir son la fuerza, la duración, frecuencia y dirección.

Resistencias

Los valores límites a partir de los cuales los materiales no cohesivos pueden ser susceptibles de erosión por el viento dependen de su peso específico, granulometría y humedad.

Las praderas semi áridas, en algunos casos las praderas áridas densas y los arbustos secos se han demostrado como muy útiles como protección frente a la erosión sobre superficies amenazadas de erosión por el viento. Los setos de árboles y arbustos atenúan el viento a una distancia correspondiente a aproximadamente diez veces la altura del seto. Estos setos deben formarse de manera permeable, de manera que reduzcan las turbulencias causadas por el viento. Los setos de protección contra emisiones contaminantes se dispondrán en diversas hileras o si son amplias, en diversas capas.

Límites de aplicación

Cuando se establecen las estructuras de protección sobre el terreno se tienen que tener en cuenta la capacidad de resistencia de las distintas especies del arbolado a la sequía. Con los setos de protección contra las emisiones contaminantes destinadas a las instalaciones industriales o

a la industria minera se debe indicar el nivel de emisión tolerado por las especies vegetales empleadas además de las características de plantación habituales

Consideraciones para el dimensionamiento y la planificación

Se puede evaluar el efecto aerodinámico, teniendo en cuenta las referencias bibliográficas entre las que se encuentran las de KOVALEV 2003. El desarrollo en altura del seto exige una planificación en la plantación y en el mantenimiento anual y decenal, con objeto de obtener y conservar los efectos deseados. En concreto se trata de tener en cuenta las necesidades de riego, de la protección contra la competencia de otra vegetación y los daños producidos por la fauna.

La revegetación de áreas industriales, terraplenes o escombreras de la industria minera exige a menudo un estudio de los substratos y del suelo en relación a su compatibilidad medioambiental. Los sitios contaminados y los suelos que contienen sustancias nocivas son factores limitantes y se deben tener en cuenta las diferentes fuentes de contaminación de las sustancias nocivas.

Solo podremos decidir si es factible la revegetación directa sobre el sustrato o se debe realizar en capas de impermeables, tras la realización de un análisis del suelo realizado de cara a la elección de la técnica vegetal y la planificación de la vegetación

2.3.9 Regulación del régimen hídrico

Problemática

Lluvias intensas pueden originar en un corto espacio de tiempo, en superficies desnudas o con poca vegetación, cárcavas y otras depresiones del terreno provocando una intensa escorrentía superficial con tiempos de concentración muy reducidos. Como consecuencia de estas fenómenos intensos de escorrentía a alta velocidad se produce erosión, aumento de la carga de sedimentos, comprometiendo la calidad de los recursos hídricos y una fuerte reducción en la tasa de recarga de los acuíferos. Recubrimientos vegetales apropiados como bosques, arbustos o setos en las zonas problemáticas creando sistemas vegetales consolidantes de las cárcavas se pueden utilizar para regular el régimen de las aguas. Estos efectos son especialmente importantes en las cuencas vertientes por encima de las zonas susceptibles de inundación así como en las cuencas de embalses y otras instalaciones de aprovisionamiento del agua.

Agente causante

Se debe describir con gran detalle el principal agente causante: la precipitación en cuanto a fuerza, duración, frecuencia, intensidad así como la duración de los periodos de sequía

Resistencias

Las laderas y otras superficies se deben recubrir con una cubierta vegetal adaptada que mejore la infiltración y dotarse de estructuras que aumenten la captación y frenen la escorrentía superficial. Se precisa por tanto de un recubrimiento vegetal denso así como de medidas tendentes a aumentar la rugosidad de la superficie. Las líneas de escorrentía deberán acondicionarse con una vegetación arbustiva que frene la escorrentía mediante estructuras rugosas (por ejemplo un canal de drenaje con el lecho rugoso) de manera que se reduzca la velocidad de escorrentía, aumente el tiempo de concentración, se

absorba las puntas de escorrentía y mejore las posibilidades de infiltración, por ejemplo mediante el aumento de la permeabilidad y la prolongación de la duración de la infiltración.

Factores limitantes

Los factores limitantes de estas intervenciones son las condiciones locales extremas, pendiente de la ladera, exposición, tipos de suelo, microclima, forma del terreno, reducida disponibilidad de sustancias nutritivas y presencia de sustancias tóxicas. En las líneas de escorrentía y en las cárcavas, los límites proceden también de la velocidad elevada de escorrentía, por los valores de la tensión de arrastre y por la acción del transporte sólido asociado. En aquellas pendientes amenazadas por deslizamientos con superficies de deslizamiento más profundo, una infiltración fuerte de agua puede aumentar el riesgo de rotura de la pendiente. Estas cuestiones deben ser aclaradas detalladamente por geotécnicos

Consideración para el diseño y la planificación

La influencia de la vegetación en la infiltración y velocidad de escorrentía superficial se puede evaluar en base a la literaturas especializada en esta disciplina, por ejemplo MARKART et al. 2004. El desarrollo y la densidad y estructura de la vegetación prevista exige de un proyecto, una plantación y un mantenimiento adecuado durante varios años, incluso decenios, con objeto de obtener y conservar los efectos deseados. La necesidad de gestionar simultáneamente la infiltración y la escorrentía superficial exige un mantenimiento regular de la vegetación. Se debe perseguir la obtención de la vegetación natural de la zona con objeto de garantizar unas condiciones ecológicas estables frente a, por ejemplo, vulnerabilidad a determinadas enfermedades y lograr contener, de esta manera, los gastos de mantenimiento.

2.3.10 Zonas afectadas por incendios

Problemática

La destrucción de la vegetación y de una parte de la capa de humus a causa de un incendio forestal o por la quema de rastrojos incrementa de manera instantánea el riesgo de erosión que debe controlarse mediante medidas de urgencia con objeto de reducir las pérdidas de nutrientes y de materia orgánica del suelo y permitir de esta manera un restablecimiento rápido de la vegetación

El arrastre excepcional de elevadas cargas de nutrientes puede provocar daños considerables, por ejemplo, provocando una eutrofización en las zonas de captación del agua potable y aguas debajo de los ríos.

Acción

Las acciones principales proceden de la masa de vegetación muerta, del stock de material inflamable, de los efectos climáticos como la sequía, la canícula y el viento en función de su fuerza, frecuencia y dirección

Resistencia

Los incendios están asociados normalmente con situaciones atmosféricas de sequía y con emplazamientos secos. Su propagación se puede acelerar si existe un stock de madera en las inmediaciones. Grandes franjas de terreno deforestadas desprovistas de toda biomasa inflamable y recubiertos únicamente de una vegetación herbácea como protección contra la erosión ofrecen una

buena resistencia contra la propagación de los incendios. Estas franjas de terreno libre favorecen la biodiversidad y pueden servir como pastos.

Tras un incendio, el desarrollo de la vegetación es limitada debido a la destrucción, a la sequía del lugar y al suelo quemado. Las primeras medidas tras un incendio deben ir encaminadas, por tanto a prevenir la erosión mediante la construcción de obras provisionales utilizando los materiales disponibles. Para esto tanto la utilización de los árboles en espiga y la colocación de ramaje en las cárcavas y fajinas en las laderas escapadas son muy eficaces, empleando para ello la madera quemada. La siembra de especies herbáceas, gramíneas y leguminosas, que puede formar rápidamente una cubierta vegetal es absolutamente necesaria. La mezcla de especies debe ser rica en especies y mostrar propiedades adaptadas a las condiciones extremas con especies que tengan una germinación rápida y que den lugar a la sucesión natural ulterior perteneciente a la zona considerada.

Factores limitantes

La contribución de la vegetación es limitada debido al grado de destrucción del suelo, lo que exige una revegetación rápida antes de que se produzca el lavado de los materiales finos y orgánicos.

Consideraciones para el dimensionamiento

El efecto de las medidas de protección lineares contra la erosión puede evaluarse en base a modelos de pronóstico de erosión. La vegetación herbácea de las franjas cortafuegos debe ser autóctona y adaptada a la situación geográfica, protegiendo el suelo de la erosión y permitiendo los pastos. La vegetación deseada será aquella que reduzca los daños futuros y que favorezca la recuperación tras un incendio. Los cuidados deberán prever a eliminación de la biomasa seca, así como su mejor utilización.

2.3.11 La vegetación como protección ante aludes

Problemática

Los aludes o avalanchas son fenómenos naturales que pueden poner en peligro tanto a los hombres, como a las infraestructuras. El desarrollo de un bosque protector mantenido de manera apropiada puede evitar la formación de los aludes si los troncos suficientemente sólidos amortiguan la presión de la nieve y la sobrecarga paralela a la pendiente. El bosque a su vez favorece la repartición uniforme de la nieve y de sus parámetros mecánicos. Una avalancha ya en movimiento no puede ser frenada por la vegetación. En la medida de lo posible, se debería prevenir este fenómeno mediante un mantenimiento adecuado de los bosques protectores.

Acción

Las acciones mecánicas que conducen al desencadenamiento de una avalancha están determinadas por la componente paralela de la masa del manto de nieve. El manto de nieve tiene una masa muy variable desde valores de alrededor de 1 kN/m³ en masas de nieve poco cohesionadas a 10 kN/m³ como forma de masas de nieve compacta. Hacia el final del invierno, la capa de nieve puede tener un espesor de varios metros.

Las capas de nieve ejercen permanentemente, a través de su lento movimiento de deslizamiento descendente (sin

desencadenar una avalancha) una presión sobre la vegetación de cerca de 1 a 3,5 kN/m².

Esta presión es suficiente para arrancar de raíz algunos arbustos. Cuando se desencadena una avalancha 50 metros de trayecto cuesta abajo son suficientes para que provoque una fuerza capaz de romper troncos de los árboles. Si el flujo sobrepasa los 150 metros de distancia, además de romper los troncos se pueden desradicar los árboles. Las presiones sobre los árboles dependen del tipo de avalancha: 3,5 kN / m² para las avalanchas de polvo y 10-50 kN / m² para avalanchas fluidas.

Efectos de la vegetación en la reducción de las tensiones

El efecto de la vegetación para reducir las tensiones depende de las distintas características del bosque. Entre los efectos más importantes podemos citar:

- **Interceptación de la nieve**
Durante las nevadas, parte de la misma es capturada por las copas de los árboles, parte de la cual se evapora. De esta manera la capa de nieve se hace menos densa y se estructura mejor en el bosque que en las zonas sin vegetación. En invierno, las especies de árboles de hoja perenne, tienen lógicamente, tasas de interceptación más alta que los árboles de hoja caduca.
- **Balance de la radiación**
En un bosque persistente con elevada densidad, el microclima es más equilibrado que fuera del bosque. El calentamiento durante el día de la capa de nieve y su enfriamiento durante la noche son menores. Se reduce de esta manera la probabilidad de formación de capas débiles y peligrosas en el manto de nieve.
- **Viento**
Los efectos relacionados con el viento y por lo tanto el posible movimiento de la masa de nieve son menos problemáticos en un espacio cerrado. Sin embargo, se pueden acumular grandes cantidades de nieve en los claros del bosque.

Resistencia de la vegetación frente a las avalanchas

La función protectora de la vegetación es evitar la avalancha. Sin embargo, cuando se desencadena una avalancha, ni siquiera un bosque intacto puede evitar el movimiento en masa de la masa de nieve. Con el fin de evitar el desencadenamiento de una avalancha, la vegetación debe ser lo suficientemente alta (rugosidad de la superficie) para atravesar la capa de nieve.

El efecto protector se pierde si la nieve cubre la rugosidad de la superficie (SAEKI y Matsuoka 1969). Además, debe tenerse en cuenta el hecho de que las plantas más pequeñas completamente enterradas bajo la nieve en particular las especies más cercanas al suelo pueden a su vez provocar la formación de avalancha, ya que promueven la formación de capas débiles en el manto de nieve y el deslizamiento de masas de nieve. Por lo tanto, la madera proporciona una cierta protección, siempre que no esté recubierta. Dado que en las regiones alpinas hay capas de nieve de varios metros, solo un bosque intacto en última instancia puede proporcionar una eficaz función protectora. El bosque juega por tanto un papel eficaz y económico anti aludes. Los troncos soportan la nieve y la estabiliza. Solo un bosque denso puede prevenir la activación de la avalancha porque el efecto de control solo se produce por el efecto directo del tronco.

Factores limitantes

El límite natural del bosque, determinado por la altitud y el clima, determina la utilización del bosque como protección contra los aludes. Junto a este factor se añaden las diferencias locales, tales como la duración de la cubierta de nieve, la exposición al viento, la temperatura, el tipo de suelo y la profundidad del suelo. . Teniendo en cuenta el efecto de microclima y la topografía en un lugar determinado, las masas forestales se pueden planificar en zonas subalpinas. Los árboles jóvenes a menudo mueren por enfermedades causadas por hongos debido a la duración de la capa de nieve. Por ejemplo, el fuego de primavera (*Herpotrichia juniperi*) ataca en las zonas pre alpinas hasta las zonas de alta montaña, provocando la caída de las acículas de las piceas, de los pinos, de los abetos y del enebro. Su área de difusión se sitúa entre los 900 y los 2.000 metros. Este hongo de nieve causa grandes daños especialmente en las zonas con grandes nevadas de la zona pre alpina durante la repoblación de un bosque, bien de manera natural o por plantaciones, dañando los árboles, incluso los más vigorosos. La fauna también provoca daños en los árboles jóvenes. Los árboles jóvenes son más flexibles que los viejos. Los árboles que se rompen debido a la presión de la nieve tienen un diámetro superior a los 10 cm. y los programas de repoblación se interrumpen tras 30 a 50 años debido a un mantenimiento deficiente

Dimensionamiento y planificación

El perfil que se requiere del bosque depende en gran medida del objetivo de protección esperado y del daño potencial existente. Pequeños cambios, como los que amenazan a los esquiadores, se puede prevenir si es posible –mediante una repoblación muy densa de árboles de hoja perenne. (Grado de recubrimiento en coronación de más del 50%) Para evitar zonas que desencadenen avalanchas más largas, se pueden imponer requisitos menos estrictos para una repoblación. El grado de recubrimiento en coronación y las dimensiones de los claros existentes junto con la pendiente de la ladera, los principales criterios para describir el efecto protector. (Frehner 2005). Como valor de referencia, se considera necesario para evitar la avalancha el tener como mínimo 500 troncos por hectárea en pendientes de entorno 35° y de 1000 troncos por hectárea en pendientes más acusadas.

Como la indicación del número de troncos en los bosques de las zonas sub alpinas no suele estar disponible, es absolutamente imprescindible que esta cifra esté a disposición. Los claros no deben exceder de 15 a 25 m, y el grado de recubrimiento en coronación debe llegar al 30 a 50% (con un grado de recubrimiento en coronación del 50% y una pendiente de 35 °, se considera muy poco probable que se desencadene una avalancha cuando el ancho sea de hasta 15 m). El bosque debe contener diferentes clases de edad y de especies. Los árboles caídos proporcionan protección adicional y de ser posible no deben ser retirados del bosque. La mayor parte de las veces, se deben llevar a cabo actuaciones adicionales con objeto de garantizar el éxito de una repoblación forestal cuya función sea la protección contra la avalancha. Este tipo de intervenciones son para la forestación son (junto a las protecciones usuales contra los aludes) tripodes, explosiones controladas, terrazamientos o creación de montículos de tierra.

3. Técnicas de Bioingeniería del paisaje

3.1 Manual técnico EFBI 2007

Las técnicas constructivas de Bioingeniería del Paisaje se describen en el Manual técnico publicado en (ZEH 2007). Las diferentes técnicas constructivas se organizan según sea su aplicación en Trabajos preliminares, Trabajo con plantas y Mantenimiento. Cada método de construcción se describe con un breve y objetivo texto con bocetos y fotos. El Manual técnico forma parte de la Directrices Europeas de Bioingeniería del Paisaje

3.2 Aplicación de las técnicas constructivas

3.2.1 Criterios de elección

La elección correcta del método de construcción de Bioingeniería del paisaje así como la asociación de plantas a utilizar será decisiva para conseguir los objetivos del proyecto.

Los criterios de decisión se definen según los siguientes objetivos:

Protección

Requisitos hidráulicos, hidrológicos, geotécnicos y de seguridad según el tipo de técnica y la futura vegetación

Ecológicos

Mejora del estado ecológico, por ejemplo, de una corriente de agua en términos del desarrollo de su flora y fauna así como su morfología, procesos, funciones y recursos tal y como se definen en la Directiva Marco Europeo de Agua. Estructura del biotopo como hábitat

Landscape esthetic

best possible integration of the construction in the landscape

insurance of the perceptibility of a stream in the landscape

Integración paisajística

Integrar de la mejor forma posible la construcción en el paisaje.

Asegurar la percepción de un curso de agua en el paisaje

Económicos

Emplear material vegetal con capacidad de reproducirse y desarrollarse de manera vegetativa así como el empleo de materiales obtenidos localmente o en las inmediaciones.

Emplear tipos y materiales de construcción duraderos y de bajo mantenimiento

Construcción y mantenimiento de bajo coste

Sostenibilidad

Emplear materiales de construcción naturales y capaces de posteriores desarrollos plantas vivas, madera, tierra, rocas.

Emplear materiales de construcción de baja energía

Sociales

Posibilidad de uso por la población, el turismo y para el ocio.

Creación de nuevas zonas verdes en entornos urbanos

3.2.2 Matrices de decisión

Matrices de decisión estar en apéndice.

4. Mantenimiento de las estructuras de Bioingeniería del paisaje

4.1 Principios básicos de mantenimiento

Sólo hay que realizar mantenimiento cuando sea necesario: "let instead of doing" "permitir/dejar en lugar de hacer". La necesidad de realizar mantenimiento se determinará en función de inspecciones periódicas y revisiones de eficacia. (Cap. 5).

Hay que tener en consideración los siguientes principios:

- La elección y aplicación de la técnica de construcción debe implicar el mínimo coste de mantenimiento
- Tiene que cumplir los objetivos tan rápido y con tan bajo coste como sea posible
- La estructura desarrollada asegura una completa y armoniosa efectividad de todos los objetivos técnicos, ecológicos, económicos y estéticos.
- Asegurar la máxima diversidad y biodiversidad
- Seguridad para el tráfico por carretera, tren y por vía fluvial
- Contribución continua para una creciente efectividad.
- Tiene que quedar claro que el mantenimiento también puede dar lugar a una evolución negativa. La adaptación de los enfoques de mantenimiento a las condiciones y procesos naturales es el único método para evitar errores de mantenimiento que pueden ser más contraproducentes que no realizar ningún tipo de mantenimiento
- El desarrollo de las labores de mantenimiento deben adaptarse al desarrollo de las estructuras de construcción y a la vegetación instalada / teniendo en cuenta la vegetación objetivo definida (mantenimiento específico de la estructura y de la vegetación)
- Un requisito básico para cumplir con los objetivos de intervención es el respeto de las etapas de mantenimiento predefinidos en el marco de una supervisión experta de la evolución de las estructuras y la vegetación.
- Es de obligado cumplimiento en todo proyecto de Bioingeniería del Paisaje, incluir las necesidades económicas asociadas con un adecuado mantenimiento por personal cualificado
- The maintenance organization must ensure the quality of the plant material (as construction material, support material, biomass, etc.), according to the same criteria used in the project.
- La empresa de mantenimiento deberá asegurar la calidad del material vegetal (como material constructivo, material de soporte, biomasa, etc.) según los mismos criterios empleados en el proyecto.
- Hay que registrar y documentar las fechas y los tipos de intervenciones de mantenimiento realizadas.

4.2 Secuencia del mantenimiento

Mantenimiento de terminación de obra y mantenimiento de crecimiento

Consiste en las medidas tomadas después de finalizar la construcción y hasta el cumplimiento de los objetivos de construcción o la aceptación de las condiciones por el cliente. Estas condiciones se definen según los criterios de éxito predefinidos. Estos criterios tienen que estar definidos de forma clara y ubicados en el marco del

proyecto así como descritos en el pliego de condiciones del proyecto.

Mantenimiento de desarrollo

Son las medidas destinadas a asegurar el mejor de los desarrollos posibles hasta finalizar el periodo de garantía o hasta establecer una cubierta verde funcional

Mantenimiento de seguimiento

Son las medidas para asegurar el mantenimiento de la funcionalidad a largo plazo de la vegetación instalada

Supervisión del estado de la intervención

La evolución o la regresión de una cubierta de vegetación funcional se evalúan en el marco de la revisión de la eficacia descrita en el siguiente capítulo (Cap. 5)

4.3 Tipos de mantenimiento

Trabajos periódicos de mantenimiento

Son trabajos de mantenimiento que se realizan según una programación normal (ver cuidados de mantenimiento)

Medidas extraordinarias de mantenimiento

Son medidas de mantenimiento necesarias después de acontecimientos extraordinarios o imprevistos (inundaciones, plagas, invasión de especies invasoras, caídas a causa de viento, nieve mojadas, etc.,)

4.4 Planificación del mantenimiento

La planificación de las labores de mantenimiento se basa en los principios de mantenimiento y que incluyen la secuencia de labores , el grado de las mismas , la evaluación del desarrollo de la vegetación mediante la revisión de la eficacia (Cap. 5) así como la descripción general y detalles de las labores de mantenimiento. Para ello tiene que adjuntarse todos lo necesario: mapas, dibujos, bocetos, perfiles, tablas y planos del emplazamiento.

4.5 Ejecución del mantenimiento

Mantenimiento específico según el tipo de técnica o de la vegetación deseada

Cada tipo de construcción necesita intervenciones de mantenimiento específicas según la vegetación objetivo, el desarrollo de las plantas y el estado de los materiales de construcción.

Según el tipo de materiales vivos empleados, debemos diferenciar los siguientes tipos de construcción:

- Técnicas de construcción pioneras (constituidos solamente por especies pioneras)
- Tipos de construcción transitorios (incluyen especies pioneras junto con especies de estadios posteriores en la sucesión ecológica)
- Tipos de construcción Clímax (constituido sólo por especies de estadio desarrollado en la sucesión)

Labores de mantenimiento

En el capítulo 8 del Manual Técnico del EFBI se encuentran los bocetos y la descripción de las labores de mantenimiento (Zeh, 2007)

Para gramíneas, cañas/carrizos y herbazales, pueden emplearse las siguientes medidas de mantenimiento:

- Siega (parcial, por hileras, estacional, según la maduración de las semillas y frutos, mediante aparatos y métodos adaptados al biotopo)
- Siega subacuática
- Labores de mejora como:
- Resiembra
- Fertilizado
- Instalación de tepes de césped, nuevas plantas o partes de plantas
- Irrigación
- Recogida y eliminación de basura y deshechos

Para árboles y arbustos pueden emplearse las siguientes medidas de mantenimiento:

- Recepado (rejuvenecimiento parcial)
- Desmochado (en los árboles por encima de la cota de inundación, a lo largo de los caminos de mantenimiento, de acuerdo con las consideraciones culturales y ecológicas)
- Aclarado/eliminación de plantas individuales por razones hidráulicas, ecológicas o estéticas
- Poda
- Eliminación de especies invasoras como *Robinia* a través de la extracción de un anillo de la corteza de 50 cm a unos 100 - 150 cm de altura del tallo

Intervenciones de reparación como:

- Replantado
- Abonado
- Mantenimiento de la densidad de la cubierta arbórea
- Irrigación
- Renovación de los soportes de los árboles
- Recogida y eliminación de deshechos y marras

Intervalos de mantenimiento

La sucesión en el tiempo de las intervenciones de mantenimiento se definen según:

- El desarrollo deseado
- Criterios y perspectivas botánicas (el mejor momento para la poda con el fin de maximizar la capacidad de cicatrización de los cortes)
- Requerimientos hidráulicos, hidrológicos, geotécnicos y de seguridad
- Consideraciones ecológicas y de conservación de la naturaleza (finalización de la temporada para la flora y fauna, en concreto para aves y peces)
- Consideraciones estéticas y paisajísticas
- Necesidad de material vivo para la construcción u otras intervenciones en bioingeniería del paisaje (tiene que asegurarse permanentemente respetando la especificaciones y la normativa específica)
- Accesibilidad (por ejemplo, es más difícil en los prados durante el período vegetativo en

Objetivo del mantenimiento	Tipo de mantenimiento	Labores de mantenimiento	Intervalo de mantenimiento	Momento del mantenimiento
----------------------------	-----------------------	--------------------------	----------------------------	---------------------------

5. Examen de la eficacia de las técnicas de Bioingeniería del Paisaje

5.1 Principios de Evaluación

El control tras la construcción es una condición básica para el desarrollo sostenido de los conocimientos especializados sobre la bioingeniería del paisaje, la calidad y seguridad de sus intervenciones.

- Debe garantizarse la supervisión de las condiciones laborales, financieras y económicas
- El control y el seguimiento debe ser realizado por personal cualificado
- Las intervenciones a controlar deben tener documentada su ubicación y la descripción de su construcción. También pueden emplearse evaluaciones y determinaciones obtenidas en bases de datos. Por tanto, serán requisito fundamental las hojas de cálculo de encuestas estandarizadas y que se consiguen online.

5.2 Revisión del estado actual y del desarrollo

Estado del material de construcción vivo - árboles y arbustos

- Altura
- Diámetro (20-100 cm por encima el suelo)
- Densidad (nº de brotes/ m²)
- Vitalidad (grados de vitalidad según BRAUN 1-5 o ROLOFF 0-3)
- Distribución de las especies
- etc..

Estado del material de construcción vivo – herbáceas, leñosas y cañizos

- Vitalidad (grados de vitalidad según BRAUN 1-5 o ROLOFF 0-3)
- Grado/Nivel de cobertura del suelo
- Distribución de las especies
- La altura media de las hojas
- Relación gramíneas / herbáceas

Estado de los materiales de construcción inertes

- Estado de los troncos - grado de descomposición (control visual de las sondas, control técnico con resistómetro, etc.)
- Estado de los clavos y alambres
- Estado de otros materiales
- Grado de descomposición de los materiales inertes de origen local

Condiciones ecológicas

La evaluación de las condiciones ecológicas debe diferenciarse según el objetivo de desarrollo deseado

- Conectividad de los biotopos
- Evaluación de la calidad del hábitat para las especies objetivo (flora y fauna)
- Directiva Marco del Agua "buen estado ecológico"
- Evaluación de los componentes de calidad biológicos
- Efectos ecológicos generales
- Evaluación del estado actual ecológico y morfológico, evaluación de la influencia de los métodos de construcción en Bioingeniería del paisaje sobre los recursos y la funcionalidad de la corriente de agua
- El objeto y la escala de referencia utilizados para evaluar las condiciones ecológicas deben presentarse de forma clara (Perfil / intervención individual o sección / efecto global de varias construcciones)

5.3 Comprobación de la eficacia y de la función

Funciones hidráulicas e hidrológicas

- condiciones de drenaje
- Protección contra inundaciones
- Retención
- Nivel de inundación
- Episodios de erosión
- Influencia sobre la regulación del flujo de la corriente, la velocidad de la corriente y la tensión de corte

Funciones geotécnicas y de seguridad

- Estabilidad
- Durabilidad
- Funciones de seguridad técnica
- Grado de cumplimiento del objetivo de consolidación biotécnica
- Grietas y abultamientos
- Roturas de pendiente
- Capas inestables en los tallos
- Existencia de infiltración
- Bio-indicación *Funciones ecológicas*
- Creación de hábitats
- Diversidad de hábitats
- Redes de hábitats
- Influencia en el equilibrio natural
- Influencia de la diversidad estructural de las corrientes
- Grado de cumplimiento del objetivo de vegetación / grado de naturalidad

Funciones paisajística

- Paisaje objetivo y peculiaridad como paisaje cultural

Funciones socio-económicas

- Análisis de coste / beneficio
- Turismo
- Ocio
- Valor de uso y experiencia humana
- Referencia de identidad

Evaluación Global

5.4 Revisión/Examen de sostenibilidad y equilibrio ecológico

La elección del método de construcción – el que mejor se adapte para cumplir los objetivos de desarrollo.

La elección de los materiales - el que mejor se adapte al correspondiente método de construcción:

- Se deben emplear materiales locales para la construcción tanto inertes, como biológico como semillas autóctonas de la zona y material vegetal adaptado y adecuado a las exigencias de construcción.
- Certificación de origen (de coco o de yute geotextiles, por ejemplo)

Intervenciones de mantenimiento

- Requisitos
- Tipo de intervención (empleo de maquinaria y tipo a utilizar)

Directrizes Europeias de Engenharia Natural

- 1. Princípios orientadores da Engenharia Natural**
 - 1.1 O conceito de Engenharia Natural
 - 1.2 Possibilidades e limites da Engenharia Natural
 - 1.4 Acções das plantas e formações vegetais nas intervenções de Engenharia Natural
 - 1.4 Desenvolvimento histórico da Engenharia Natural e seu significado actual para o espaço europeu
 - 1.5 Disciplinas envolvidas nas soluções de Engenharia Natural
 - 1.6 Engenharia Natural, Conservação da Natureza, deontologia profissional
 - 1.7 Condições básicas para o sucesso das intervenções de Engenharia Natural
- 2. Cálculos de intervenção de segurança recorrendo a Engenharia Natural**
 - 2.1 Fundamento dos Cálculos de intervenção de segurança recorrendo a Engenharia Natural**
 - 2.1.1 Modelo conceptual de estabilização em Engenharia Natural
 - 2.1.2 Influência das medidas de estabilização de Engenharia Natural em termos de projecto estrutural
 - 2.1.3 Acções da vegetação que reduzem as forças actuantes
 - 2.2.6 Resistência da vegetação às forças actuantes
 - 2.2.7 Parâmetros de descrição da resistência das formações vegetais
 - 2.2.8 Considerações básicas sobre a aplicação de plantas adequadas ao local e de avaliação dos factores ambientais do local de intervenção
 - 2.2 Integração do projecto e concepção especializados de Engenharia Natural no processo global de projecto, construção desenvolvimento e manutenção**
 - 2.3 Recomendações para domínios específicos de aplicação**
 - 2.3.1 Erosão em taludes e encostas
 - 2.3.2 Deslizamentos de terra superficiais
 - 2.3.3 Ravinamento em taludes e encostas
 - 2.3.4 Margens e leitos de cheia de linhas de água
 - 2.3.5 Margens de planos de água
 - 2.3.6 Diques e represas
 - 2.3.7 Protecção do litoral
 - 2.3.8 Protecção contra o vento e emissões poluentes
 - 2.3.9 Regulação do regime hídrico
 - 2.3.10 Áreas ardidas
 - 2.3.11 Protecção contra avalanches
- 3 Tipos de construção da Engenharia Natural**
 - 3.1 Manual técnico EFIB 2007
 - 3.2 Utilização dos tipos de construção
 - 3.2.1 Critérios de decisão
 - 3.2.2 Matrizes de decisão
- 4. Manutenção de intervenções de Engenharia Natural**
 - 4.1 Fundamentos da manutenção
 - 4.2 Sequência de manutenção
 - 4.3 Tipos de manutenção
 - 4.4 Planeamento da manutenção
 - 4.5 Condução da manutenção
- 5. Controle do sucesso das intervenções de Engenharia Natural**
 - 5.1 Fundamentos do controle do sucesso
 - 5.2 Controle da instalação e do seu desenvolvimento
 - 5.3 Controle da eficácia e da função
 - 5.4 Controle da sustentabilidade e eco-balanço

1. Princípios orientadores da Engenharia Natural

1.1 O conceito de Engenharia Natural

Engenharia Natural é um disciplina técnica-biológica que, com a ajuda de plantas e formações vegetais contribui para a protecção e segurança de usos do solo e edificações, assim como para a promoção do desenvolvimento da Paisagem e do Território.

Tal é conseguido ao utilizar plantas e partes de plantas como materiais de construção vivos, de modo a que, através do seu desenvolvimento, em articulação com o solo e o substrato geológico, venham a garantir uma contribuição muito relevante para a segurança duradoura contra todas as formas de erosão. Na fase inicial de estabelecimento é frequente ser necessário recorrer-se a combinações com materiais inertes que preencham as funções de suporte estrutural das cargas actuantes.

Preferidos para esses efeitos são principalmente materiais orgânicos, já que estes decaem naturalmente, ao mesmo tempo que o desenvolvimento do coberto vegetal garante uma estabilização e suporte crescente, sendo os produtos desse decaimento reintegrados nos ciclos naturais de materiais. São igualmente preferidas espécies e exemplares de plantas autóctones originárias da vizinhança directa do local de intervenção e características do mesmo, já que estas contribuem e promovem uma biodiversidade adequada ao local e à envolvente.

Os objectivos de planeamento, projecto e construção são a protecção e segurança de superfícies de uso e de infra-estruturas, assim como o desenvolvimento dos diferentes elementos e funções do território e da paisagem.

1.2 Possibilidades e limites da Engenharia Natural

Os **Domínios de aplicação da Engenharia Natural** são a consolidação de taludes, encostas, margens de linhas e planos de água, faixas marginais de infra-estruturas, diques, represas, aterros, zonas degradadas por explorações mineiras assim como zonas enquadrantes de infra-estruturas:

- Nas linhas de água, aplica-se na segurança e consolidação de margens ameaçadas pela erosão, condução do canal de escoamento, renaturalização de linhas de água degradadas ou fortemente alteradas, aumento da capacidade de retenção nas várzeas e leitos de cheia e decorrente protecção contra cheias, tudo em conjugação com o aumento da qualidade e funcionalidade ecológica e eficácia em termos de segurança e consolidação de diques, represas e áreas marginais.
- Em taludes e encostas, aplica-se na prevenção e impedimento de erosão superficial e profunda, reposição do coberto vegetal e estabilização de zonas de risco de aluimento assim como a protecção imediata e a longo prazo de encostas susceptíveis a escorregamento através do seu ancoramento com raízes e a drenagem do solo através da transpiração das plantas.
- No domínio da gestão e melhoria do balanço hídrico local e regional, aplica-se através de medidas de florestação e reposição de um coberto vegetal adequado em encostas abaixo e acima da „timberline“, assim como, através de medidas de engenharia natural adequadas, na correcção

torrencial, retardamento do escoamento superficial, promoção da infiltração, etc.

- Nas costas marítimas e lagunares, aplica-se na consolidação de áreas e margens ameaçadas pela erosão e na estabilização de diques, dunas e terrenos envolventes.
- Em zonas húmidas, aplica-se na criação de habitats adequados.
- Nas áreas degradadas por explorações mineiras ou por actividades industriais, aplica-se na consolidação, desenvolvimento e restabelecimento de novas estruturas vegetais.

A utilização de plantas é possível em todos os locais onde exista em habitat potencial para o estabelecimento da vegetação. **É possível e racional o estabelecimento de um coberto vegetal protector e estabilizador para a prevenção da erosão como substituto de intervenções técnicas tradicionais, sempre que as capacidades técnicas e biológicas das plantas sejam para tal suficientes.**

No desenvolvimento da solução técnica a empregar, utiliza-se conhecimento especializado de disciplinas da engenharia civil, geotecnia e ciências de materiais, assim como conhecimentos dos domínios da biologia e da ecologia da paisagem. Garantem-se deste modo as condições para o estabelecimento bem sucedido de um coberto vegetal adequado às condições ecológicas do local, que preencha, pelo seu desenvolvimento, os objectivos técnicos pretendidos. Além das medidas de protecção contra a erosão e de gestão do regime e balanço hídrico, a engenharia natural preenche igualmente importantes funções nos domínios da regulação microclimática, da gestão da estrutura de biótopos e da estética da paisagem.

Vantagens das intervenções de Engenharia Natural em comparação com técnicas construtivas tradicionais:

- Curvas de desenvolvimento funcional mais duráveis e sustentáveis devido à capacidade de desenvolvimento e regeneração das plantas e das associações vegetais.
- Possibilidade de instalação de uma comunidade vegetal correspondente a um estágio mais desenvolvido da sucessão vegetal.
- Aumento da estabilidade com o desenvolvimento das plantas.
- Reacção positiva às perturbações devido à capacidade natural de adaptação das plantas.
- Adaptação das plantas às forças nelas actuantes devido à sua elasticidade, resistência ao arranque e estabelecimento de novos padrões sucessionais.
- Acção estruturante das plantas.
- Aumento da biodiversidade e das funções de habitat (ecologia).
- Melhoria da qualidade visual (estática da paisagem).
- Favorecimento de factores socio-económicos (turismo, recreio).
- Medidas com impacte reduzido, baixo consumo energético e capazes de potenciarem o desenvolvimento autónomo dos sistemas naturais (medidas não susceptíveis de arrependimento – *no regret measures*).

Através do **uso generalizado de material vegetal de origem local**, assim como de variedades espontâneas

locais em detrimento de variedades modificadas de origem estranha ao local de intervenção, obtêm-se diversos efeitos positivos:

- Efeito durável e bem sucedido de consolidação devido à integração otimizada no ecossistema, melhor adaptação a condições locais extremas e a particularidades climáticas e geológicas locais e regionais,
- Potencial mais significativo de desenvolvimento de associações vegetais adequadas às características locais,
- Melhor e mais sustentável enquadramento nos processos e sistemas naturais,
- Melhor relação custo-benefício e melhor rentabilidade.

Em espaços urbanos, para efeitos de segurança e de edificação de espaços verdes e de lazer, podem também ser utilizadas espécies não autóctones, desde que adequadas ao local e às funções biotécnicas definidas. O mesmo pode ser referido relativamente a espécies com fins ornamentais.

Limites da Engenharia Natural: correspondem às circunstâncias em que as capacidades técnicas e funcionais das plantas são insuficientes para os fins em vista, como é o caso de:

- As forças mecânicas envolvidas são superiores à capacidade de resistência das plantas e formações vegetais,
- A profundidade do enraizamento das plantas é insuficiente para a consolidação de uma encosta ou talude,
- As condições de germinação e estabelecimento da vegetação são tão difíceis que, mesmo com a ajuda de materiais complementares, não é possível a instalação de um coberto vegetal adequado (*bad lands*),
- Uma manutenção inadequada conduz à modificação das condições locais, determinando condições adversas à consolidação e segurança dos terrenos e ao controle do escoamento fluvial.

De modo a poder seleccionar fundamentadamente as soluções de engenharia natural é necessário ter um conhecimento claro das **desvantagens da soluções técnicas de Engenharia Natural** comparativamente às soluções técnicas tradicionais:

- Os trabalhos de engenharia natural estão intimamente associados, quer ao ritmo de crescimento e desenvolvimento das plantas, como aos factores de perturbação da vegetação.
- Normalmente é necessário mais espaço para o desenvolvimento da vegetação do que para as estruturas tradicionais.
- As raízes e ramos das plantas podem desenvolver-se no interior de ranhuras ou falhas de construções e estruturas e, pelo aumento progressivo do seu diâmetro, originar tensões crescentes que ponham em causa a estabilidade e funcionalidade das mesmas.
- Os crescimento das raízes pode originar deformações em construções e estruturas.
- No caso de árvores de grande porte geram-se tensões decorrentes de momentos de força na base do tronco e tensões vários no espaço enraizado.

- No espaço enraizado podem originar-se perdas de coesão do solo ou pressões sobre estruturas construídas.
- Existem limites geotécnicos à aplicação das soluções de Engenharia Natural.
- A dificuldade em realizar cálculos precisos origina inseguranças na aplicabilidade e eficácia das técnicas.

Os inconvenientes percebidos são muitas vezes compensáveis através de uma gestão adequadamente realizada e orientada no espaço e no tempo. Frequentemente podem ser desenvolvidas soluções técnicas que enquadrem e integrem os sistemas naturais envolventes.

1.3 Acções das plantas e formações vegetais nas intervenções de Engenharia Natural

A aplicação de plantas em sistemas construtivos baseia-se na experiência reunida ao longo de muitos séculos de experiência.

As plantas são capazes de responder com flexibilidade às variadas condições ambientais devido a diversas **propriedades** que constituem, também, a base da sua eficácia técnica. Os exemplos mais relevantes dessas propriedades são:

- A capacidade de, através de múltiplas formas – generativas e/ou vegetativas - se reproduzirem e propagarem,
- A capacidade de se regenerarem após feridas ou alterações das condições ambientais,
- A capacidade de extrair água do solo evaporando-a para a atmosfera (evapotranspiração),
- A capacidade de interligar, agregar, estruturar e articular diferentes materiais e estruturas,
- A capacidade de cobrir a superfície do solo,
- A capacidade de reter partículas em movimento, substâncias dissolvidas e fluxos hídricos,
- A capacidade de suportar o soterramento ou a submersão através da formação de novas raízes,
- A capacidade de se adaptarem a alterações das condições ambientais como é o caso da variação do caudal de água num rio.

Destas propriedades decorrem diferentes capacidades das plantas que se podem agrupar em quatro categorias: Técnicas (1), Ecológicas (2), Estéticas (3) e Económicas (4).

Como resultado das intervenções construtivas de engenharia Natural originam-se sistemas vivos que, por via dos processos de sucessão natural, através de uma auto regulação dinâmica sem inputs externos de energia, se irão desenvolver e atingir uma situação de equilíbrio dinâmico. Através da escolha adequada de materiais de construção vivos e inertes, assim como do tipo de intervenção construtiva, conseguir-se-á uma sustentabilidade elevada com reduzidas necessidades de manutenção (ver Cap. 4). Torna-se ainda importante acentuar que em ambientes fortemente modificados e em espaços urbanos com destaque para as cidades, torna-se necessária uma manutenção muito especializada e orientada para garantir estes objectivos.

1.3.1 Acções técnicas

Das acções técnicas da engenharia natural com particular relevância para a eficácia da acções de protecção e consolidação asseguradas pelas plantas, devem destacar-se as seguintes:

- Cobertura do solo pelas formações vegetais protegendo-o contra a acção da precipitação, erosão hídrica e eólica, escorregamento de neve e aluimentos de pedras.
- Acção de ancoragem e de contraforte das raízes.
- Coesão e consolidação do solo através da agregação das partículas do solo pelas raízes das plantas.
- Agregação bioquímica das partículas do solo através das substâncias húmicas, micorrizas e da microfauna.
- Estruturação e ancoragem dos horizontes mais profundos.
- Prevenção do arrastamento de partículas finas através de acções de filtragem.
- Aumento da rugosidade do terreno através dos caules, ramos e das folhas, retenção de terras, cascalho e massas de neve.
- Retardamento e desvio de correntes de ar e de água.
- Acções ao nível do espaço radicular: compressão das partículas do solo pelo crescimento de raízes volumosas; aumento da porosidade do solo através do movimento dos do sistema radicular e aumento da densidade do solo devido ao peso da vegetação.
- Aumento da coesão e da estabilidade interna através da drenagem e extracção de água por evapotranspiração.
- Influência positiva no regime hídrico através da evapotranspiração da água do solo, retenção da precipitação, retenção da água do solo e regulação da infiltração no solo.

1.3.2 Acções ecológicas

Através das intervenções de engenharia natural conseguem-se as seguintes melhorias ao nível da qualidade ambiental:

- Acções positivas ao nível das propriedades do solo como o aumento do volume de poros assim como a melhoria das condições de vida dos microorganismos, promovendo a formação de húmus e a disponibilização de nutrientes para as plantas..
- Desenvolvimento de comunidades vegetais (sucessão ecológica) e melhoria da estrutura de biótopos.
- Criação de mais habitats para a fauna.
- Retenção, absorção e metabolização de substância eutrofizantes ou mesmo tóxicas.
- Melhoria do microclima local.
- Absorção de ruído reduzindo a sua intensidade.
- Filtração e retenção de poeiras e partículas do ar, assim como de gases poluentes, através da deposição nas folhas e outras partes das plantas.

1.3.3 Acções estéticas

Danos na qualidade estética da paisagem podem ser corrigidos com o recurso a intervenções de engenharia natural usando técnicas construtivas próximas do natural:

- Plantas e formações vegetais recompõem as perspectivas visuais de um local.
- Substituição de estruturas construídas tradicionais por formações vegetais, desde que a sua acções estabilizadora e protectora seja garantidamente equivalente.
- Rápida integração paisagística de obras geotécnicas, enquadrando-as nas formações vegetais adjacentes e

recompondo, dessa forma, a qualidade visual do local.

- Integração visual de estruturas construtivas exclusivamente técnicas através do uso de vegetação adequada à envolvente paisagística.
- Enquadramento e destaque de estruturas construídas.
- Protecção visual de estruturas de engenharia massivamente intrusivas na paisagem.

O recurso à engenharia natural conduz à redução dos impactes visuais e paisagísticos, garantindo uma melhor integração das estruturas construídas e menores impactes ambientais no domínio paisagístico.

1.3.4 Acções económicas

A aplicação da engenharia natural garante, através do conhecimento e da decorrente aplicação das forças vivas da natureza, que áreas sem vegetação sejam recultivadas com custos materiais e energéticos reduzidos.

Neste quadro, a engenharia natural assegura um papel muito relevante na garantia da sustentabilidade das construções e intervenções construtivas:

- Recorrendo a sistemas construtivos vivos comprovados, executados actualmente em grande medida com o recurso a maquinaria, consegue-se frequentemente uma redução de custos comparativamente aos sistemas construtivos da engenharia tradicional. Estas poupanças conseguem-se, por exemplo, pela utilização de espécimens vegetais com capacidade de estabelecimento e reprodução vegetativa.
- Através da utilização de materiais construtivos vivos capazes de se desenvolverem, consegue-se uma redução na quantidade de materiais de construção necessários, mesmo que tal signifique maiores custos em mão de obra.
- Através de uma reutilização fundamentada e adequada do material vegetal, do solo e das rochas, garantida por um planeamento orientado e adequado ao local de intervenção, reduzem-se os custos em materiais de construção e transporte.
- Condicionados à natureza e propriedades específicas das plantas utilizadas, os custos de manutenção podem ser consideravelmente reduzidos.
- No caso da ocorrência de danos nos sistemas construtivos de engenharia natural, estes podem ser corrigidos com custos reduzidos devido à capacidade regenerativa das plantas e das formações vegetais.
- Factores socio-económicos (Por ex. Turismo de montanha, recreio)

1.4 Desenvolvimento histórico da Engenharia Natural e seu significado actual para o espaço europeu

As bases conceptuais da engenharia natural permitem o desenvolvimento de sinergias entre o uso humano do território e os interesses e processos da natureza. A estrutura de pensamento subjacente a engenharia natural desenvolveu-se na Europa, provavelmente devido às diversificadas pressões de uso decorrentes da elevada densidade populacional e da longa história de intenso uso do território.

Desde há séculos que se utilizam estruturas construtivas de segurança e consolidação em linhas de água, encostas, taludes e outros domínios da engenharia civil e hidráulica,

que utilizam plantas e partes vivas de plantas como material de construção. Destas técnicas artesanais tradicionais de segurança e consolidação dos terrenos e dos espaços de uso, veio a desenvolver-se a engenharia natural até constituir a actual disciplina técnica e científica orientada para a aplicação e envolvendo um complexo leque de conhecimentos e técnicas.

Para tal contribuíram:

- Utilização dos conhecimentos da ecologia da paisagem para uma compreensão profunda dos espaços naturais;
- Utilização do valor indicador de plantas específicas para o diagnóstico e caracterização de um local e do seu potencial de uso;
- Aplicação, para cada local e espaço natural, dos materiais construtivos a ele adequados;
- Integração dos desenvolvimentos em termos de maquinaria, materiais e técnicas nas intervenções construtivas utilizando plantas e materiais vivos;
- Medidas de manutenção e gestão adequadas e orientadas aos objectivos da intervenção construtiva;
- Avaliação científica dos resultados obtidos;
- Utilização crescente de espécies de plantas autóctones, certificação de origem do material vegetal e da materiais construtivos naturais e adequados ao local, de modo a garantir os valores da conservação da natureza nos processos construtivos, além de garantir a melhoria estrutural das linhas de água e restantes biótopos intervencionados;
- Evitar a utilização de adubos e outros auxiliares do crescimento vegetal em linhas de água e áreas protegidas e sensíveis, quando elas possam ser prejudicadas na sua natureza e funcionalidade;
- Recurso a materiais construtivos inovadores e mais próximos do natural.

Além das necessidades constantes de consolidação de encostas e taludes em infra-estruturas lineares, da consolidação e segurança de sistemas costeiros e de margens de linhas de água, perspectivam-se novos desafios para o futuro:

- Alterações climáticas e acontecimentos extremos conduzindo a problemas crescentes de erosão, por exemplo devido a cheias ou a perturbações do *Permafrost*. A engenharia natural tem um leque diversificado de soluções para estes problemas.
- Perturbações do regime hídrico actual e modificação das condições de escoamento devido a eventos pluviosos extremos e à alteração da frequência e duração das chuvadas podem ser minimizadas com recurso a intervenções de engenharia natural.
- A aplicação de técnicas de engenharia natural pode contrariar processos de desertificação e de degradação.
- Um coberto vegetal protector, desenvolvido com a aplicação de comunidades vegetais autóctones de elevada diversidade específica e adequação às características e tensões locais, contribui decisivamente para a segurança e para o aumento da biodiversidade.
- Menores consumos energéticos e de materiais de construção, assim como a utilização de materiais construtivos capazes de desenvolvimento e regeneração, garantem um balanço positivo na utilização de recursos.

- Plantação crescente de lenhosas aumenta a retenção de CO₂.
- Cumprimento do protocolo de Quioto, acordos do Rio, directivas europeias de protecção do solo, assim como uma melhor implementação da directiva quadro da água através, nomeadamente, de uma melhor retenção hídrica e melhoria da conectividade entre os diferentes biótopos.

As bases conceptuais da engenharia natural contribuem positivamente para a consciência ambiental e para uma nova cultura de engenharia civil.

1.5 Disciplinas envolvidas nas soluções de Engenharia Natural

As técnicas de engenharia natural são hoje aplicadas em todos as intervenções de segurança e consolidação de uma ampla variedade de disciplinas técnicas:

- Ordenamento e gestão do território
- Engenharia hidro-agrícola
- Ordenamento e emparcelamento agrícola
- Engenharia fluvial e hidráulica
- Protecção costeira
- Protecção contra avalanches e torrencialidade
- Engenharia hidráulica industrial
- Engenharia mineira
- Extracção de pedra e outros inertes
- Engenharia sanitária
- Gestão de resíduos
- Construção de equipamentos desportivos e de recreio
- Construção de estradas, linhas de caminho de ferro, aeroportos e outras infra-estruturas de transporte
- Construção de caminhos e acessos agrícolas e florestais
- Construção de caminhos pedonais, cicláveis e hípicas
- Outras áreas de engenharia civil

Adicionalmente, o conhecimento técnico da engenharia natural é utilizado nos domínios da geotecnia, engenharia hidráulica e engenharia de estruturas.

Na realização de intervenções de engenharia natural envolve-se o conhecimento, formação e prática dos seguintes domínios e grupos profissionais:

Grupo profissional	Domínio de especialidade do ponto de vista da Engenharia Natural	Capacidades e conhecimentos aplicados no projecto e realização
Botânica	Fitosociologia Geobotânica	Levantamento fitossociológicos como base para o planeamento e projecto, controle de plantas, controle do sucesso e da qualidade, monitorização do desenvolvimento da vegetação
Geologia	Pedologia, Valorização do solo, Mecanismos erosivos, protecção de margens e zonas costeiras,	Pareces periciais geológicos, protecção do solo
Engenharia hortícola e de jardinagem	Solo, fertilização, melhoria do solo, plantas, plantação	Estabelecimento e manutenção das plantas, controle do sucesso, cobertura vegetal
Engenharia agrónómica	Solo, fertilização, melhoria do solo, plantas, sementeira, Clima e microclima	Estabelecimento e manutenção das plantas, vegetação herbácea, controle do sucesso, sementeira
Engenharia florestal	Solo, fertilização, melhoria do solo, plantas, Silvicultura, exploração florestal	Florestação, Gestão florestal, correcção torrencial, consolidação de taludes em caminhos florestais, controle do sucesso da florestação
Horticultura, jardinagem e paisagismo, Empresas de espaços verdes	Construção civil e hidráulica em pequena escala, modelação do local e preparação do solo, estabelecimento da vegetação	Planeamento, construção e manutenção de intervenções de engenharia natural
Engenharia do Ambiente Arquitectura paisagista Ordenamento do território	Processo de planeamento, planos quadro, plano objecto, Avaliação do impacte ambiental, planos de ordenamento e gestão do território, estudos de aptidão e susceptibilidade da Flora, Fauna e Habitats. Construção civil e hidráulica em pequena escala, modelação do local e preparação do solo, estabelecimento da vegetação, Clima e microclima	Planos quadro. Planos objecto, Fiscalização de obra. Projecto de intervenções de engenharia natural
Engenharia hidráulica, Construção fluvial, Correcção torrencial, Protecção costeira	Obras hidráulicas de protecção, Hidrotécnica, Hidráulica, Estabilidade, Técnica construtiva. Planos quadro, Planos objecto, Direcção de obra	Planos quadro, Pareceres, Hidrotécnica, análise de viabilidade, Planos objecto. Fiscalização de obra, Direcção de obra , controle do sucesso da obra hidráulica
Engenharia civil Construção de infra-estruturas rodoviárias e ferroviárias	Construção de estradas, Técnica construtiva, Drenagem, Estabilidade. Planos quadro, Planos objecto, Direcção de obra	Planos quadro. Planos objecto, Fiscalização de obra, direcção de obra,
Engenharia mineira	Geotécnica, Técnicas construtivas, engenharia de processo. Planos quadro, Plano de operação. Planos objecto	Planos quadro. Planos objecto, Fiscalização de obra, direcção de obra
Geotecnia	Resistência estrutural, Estabilidade	Pareceres, análise de viabilidade, modelação do terreno, estabilização de encostas e taludes, planos de correcção e recuperação, controle do sucesso da obra geotécnica
Engenharia da paisagem e do território Engenharia geográfica	Técnicas de desenvolvimento do território, sistematização rural, construção viária, pedologia, agricultura, hidrotécnica, Clima e microclima	Planos quadro, medidas de desenvolvimento rural, construção de caminhos, estruturas agrícolas, planos objecto. Fiscalização de obra, direcção de obra, técnicas de ordenamento e gestão, controle do sucesso

1.6 Engenharia Natural, Conservação da Natureza, deontologia profissional

A engenharia natural pode dar um contributo extremamente significativo na melhoria das condições ecológicas e dos sistemas biológicos, de acordo com o definido nas directivas quadros da água, da protecção contra cheias e da protecção do solo, assim como de outras directivas (como por exemplo as directivas Habitat e Aves e de promoção da qualidade do ambiente). Contribui igualmente para esses objectivos através da sua capacidade de reconstrução de zonas degradadas, restaurando-as para uma situação próxima do natural. Constitui assim uma disciplina instrumental da sustentabilidade.

A protecção e conservação da natureza constituem objectivos centrais da engenharia natural. Contudo, pelo menos no caso das intervenções de estabilização e de segurança, a garantia da segurança de infra-estruturas, do uso ou do direito de uso constitui o objectivo prioritário.

Da mesma forma, podem ocorrer conflitos entre a engenharia natural e a conservação da natureza. Quando as exigências da conservação da natureza são prioritárias, podem ser excluídas técnicas construtivas específicas quando entrem em conflito com processo sucessionais naturais, ou modifiquem a morfologia natural do terreno. A selecção das plantas de acordo com o seu carácter pioneiro e de promoção de comunidades vegetais que garantam a estabilidade dos terrenos, pode, em algumas circunstâncias, não estar totalmente em consonância com os critérios da conservação da natureza.

Como em todas as disciplinas da engenharia, também na engenharia natural a experiência, o conhecimento e a experiência profissional são as condições essenciais para uma utilização óptima e eficiente dos recursos, assim como da garantia da proporcionalidade e adequabilidade dos meios utilizados.

O princípio deontológico básico da engenharia natural é a aplicação, em todos os projectos, da lei da energia mínima: *tanto quanto necessário, mas tão pouco quanto possível*. Este é um princípio incontornável de qualquer projecto ou técnica de engenharia natural (ética deontológica).

1.7 Condições básicas para o sucesso das intervenções de Engenharia Natural

As intervenções bem sucedidas de engenharia natural são necessariamente aquelas que garantiram, para o sucesso do projecto, a intervenção e a estreita integração interdisciplinar das diferentes especialidades envolvidas. Para tal há que assegurar as seguintes condições:

- Determinação dos limites de segurança: é possível atingir os objectivos de segurança e realizar a obra com técnicas e meios de engenharia natural?
- Avaliação extremamente cuidada das condições regionais e locais, como as condições micro climáticas do local de intervenção ou as características químicas, físicas e hidrológicas do solo e outros substratos,
- Determinação das condições de incidência da luz solar,
- Utilização do conhecimento de base da fitossociologia e sobre a flora,

- Aferição dos critérios de avaliação e verificação dos dados hidrológicos, hidráulicos e geomecânicos em termos da problemática em causa (ver capítulo 2),
- Avaliação das eventuais interacções com infra-estruturas existentes,
- Determinação da possibilidade de melhorias das condições locais,
- Determinação e definição clara da vegetação – objectivo e de quais são as plantas pioneiras assim como as fases da sucessão ecológica e as medidas de cuidado e manutenção que permitem atingi-la,
- Determinação da áreas de referência em espaços naturais idênticos ou comparáveis,
- Consideração das regras da técnica (normas, directrizes, manuais das especialidades envolvidas),
- Definição dos critérios de controle das medidas de manutenção e de sucesso (ver capítulos 4 e 5).

Na Europa, no quadro do projecto e condução de trabalhos de engenharia natural deve-se utilizar o manual das técnicas construtivas de engenharia natural elaborado pela EFIB (ZEH 2007). Este livro integra e sumariza a experiência profissional de inúmeros especialistas. Constitui, na prática, a descrição tipológica dos diferentes métodos construtivos existentes na Europa (ver capít. 3).

Em todos os trabalhos de engenharia natural (a categorização das tarefas de planeamento e projecto em categorias de dificuldade (I – III) deve corresponder ao definido na norma EN DIN 1054 Geotécnica - EC 7) devem ser cumpridas estritamente as normas e regulamentos em vigor no país de execução (por exemplo em termos das regras de higiene e segurança no trabalho e de responsabilidade civil). Adicionalmente há que considerar as exigências específicas de cada dono de obra. Em resultado destes factores pode ocorrer que, para as mesmas condições locais e para o mesmo tipo de problemas, diferentes tipos de soluções técnicas tenham de ser aplicadas em diferentes países europeus.

2. Cálculos de intervenção de segurança recorrendo a Engenharia Natural

2.1 Fundamento dos cálculos de segurança em técnicas de Engenharia Natural

De acordo com a norma DIN 1055-100 e WETZELL 2006 uma construção tem de ser projectada e construída de modo que todos os riscos e impactes susceptíveis de ocorrer, quer durante a construção, como durante os seu previsível funcionamento e utilização, sejam determinados e avaliados, de forma a garantir a sua qualidade técnica e segurança, assim como prevenir qualquer risco, falha ou deformação inaceitável. Durante o período de vida útil projectado, a construção tem de manter a sua capacidade de carga, a sua funcionalidade e utilidade, assim como a sua durabilidade, dentro do quadro de manutenção previamente estabelecido e concretizado.

No quadro do projecto estrutural, a estrutura a ser edificada deve ser concebida de acordo com a experiência e com modelos de engenharia devidamente testados e aferidos, integrando as variáveis e características físicas relevantes para cada caso. Este modelo integrará as cargas (S) permanentes (g) ou temporárias (q). Estas cargas são determinadas com base no conhecimento científico e em estudos experimentais que permitem determinar valores característicos (índice k) S_k . A multiplicação por um valor

de segurança parcial γ_x determinará o valor indexado (índice d) para cada carga.

$$S_{d,x} = S_{k,x} \times \gamma_x$$

A estrutura construtiva ou os seus componentes oferecem uma resistência (R) determinável através do conhecimento científico e experimental (índice k) logo R_k . Dividindo pelo valor parcial de segurança correspondente γ_i permite determinar o valor específico da resistência R_d .

$$R_{d,i} = R_{k,i} / \gamma_i$$

No processo de concepção e desenho consideram-se as seguintes situações:

1. Regra geral – situações características ou mais frequentes
2. Situações excepcionais – combinações raras de circunstâncias ou situações temporárias mas que são comuns em processos construtivos. Em engenharia natural, a situação inicial, sem a vegetação adequadamente desenvolvida e, decorrentemente sem a sua acção técnica, pode incluir-se neste cenário conceptual.
3. Situações excepcionais

2.1.1 Modelo conceptual de estabilização em Engenharia Natural

Duma forma análoga ao processo de concepção estrutural, cada intervenção, construção ou elemento construtivo de estabilização de um talude ou encosta tem de ser definido e apresentado de um modo referido a um elemento (corte) autónomo e uniforme (GROSS u.a.2006) no quadro de um modelo de estabilidade geotécnica (por ex. método de equilíbrio limite ou de talude infinito). Este pode, inclusivamente, integrar o conjunto da intervenção de engenharia natural (vegetação + solo enraizado / influenciado por sistemas biológicos). Alternativamente podem ser apresentados apenas esquemas e cortes parcelares.

Os elementos de consolidação consideram-se em estado de equilíbrio quando todas as forças actuantes são equilibradas por forças de resistência ao longo do(s) plano(s) de descontinuidade, incluindo todas as forças exteriores.

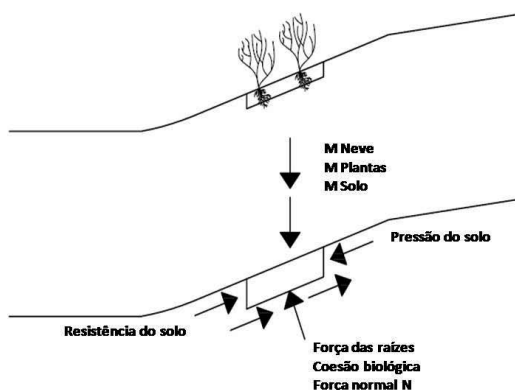


Ilustração de cálculo de estabilidade no quadro de um projecto de engenharia natural

2.1.2 Influência das medidas de estabilização de Engenharia Natural em termos de projecto estrutural

Massa inerte de uma cobertura de protecção de vegetação incluindo a camada de suporte da mesma

A massa inerte compreende o peso da parte aérea da massa de vegetação e o peso da camada de suporte (solo e raízes). Valores guias sobre a massa do solo $\gamma' \left[\frac{kN}{m^3} \right]$ podem ser obtidas em tabelas técnicas como por ex. DIN 1055. Valores guias unitários da massa da vegetação por unidade de superfície constam, por ex., de FLL 2008.

Neve

A neve constitui uma massa actuante sobre o talude. Actua como carga pode originar erosão ou deslizamentos. A determinação da massa deve referir-se à experiência regional e a ensaios no terreno.

Vento

As acções do vento dependem das localização geográfica e da morfologia local. Para a Alemanha valores guia constam da norma DIN 1055 parte 4. Indicações relativas à influência da vegetação podem ser obtidas na bibliografia especializada como por ex. SINN 1988 ou WESSOLLY e ERB 1998.

Acção das gotas de chuva e do granizo

A acção das gotas de chuva é um factor determinante nos processos erosivos em superfícies desprovidas ou com pouca vegetação. A caracterização física desta acção, assim como a sua quantificação pode ser obtida em MORGAN 1999. A classificação das chuvadas deve ter em conta a frequência e tempo de retorno de acordo com as estatísticas meteorológicas por ex.: KOSTRA ATLAS do DWD 1997 para a Alemanha.

Escoamento superficial em taludes e encostas

Em situações de chuvadas intensas ocorrem processos erosivos causados não só pela acção das gotas de chuva, mas também pelo escoamento da água em toda a superfície do talude ou encosta. Este escoamento depende da intensidade de cada chuvada, da permeabilidade do solo, do declive e comprimento da encosta, assim como da influência da vegetação. Informações e modos de quantificação podem ser obtidos em MORGAN 1999, DVWK 1996 e KOSTRA ATLAS do DWD 1997.

Acções da herbívoros (gado e fauna selvagem)

Estas acções têm de ser determinadas em cada local e reduzidas através do recurso a medidas adequadas de protecção.

Acções decorrentes do uso humano

Acções em encostas decorrentes de actividades como o ski, motocross, bicicletas de montanha, ou, no caso de margens de lagos e linhas de água, da actividade banhar e de embarcações têm de ser determinadas e avaliadas em cada local.

Acções de correntes de água

Correntes de água, seja em regos, valas ou ravinas (no caso de encostas, mas também em linhas de água e canais) podem originar erosão e sedimentação. Na consideração dos procedimentos de protecção contra a erosão, o início do movimento assume particular

relevância. Na bibliografia de engenharia hidráulica a acção da corrente de água é caracterizada através da tensão de arraste τ_0 $[N/m^2]$ e da velocidade da corrente v $[m/s]$. Normalmente dispõe-se apenas de valores médios para cada secção, determinados a partir de cálculos unidimensionais para cada altura de água, os quais, são agregados por coeficientes de consolidação de acordo com SCHROEDER e ROEMISCH 2001. Em linhas de águas largas ou no cálculo de escoamento em leitos de cheia, importa dispor de valores característicos obtidos a partir de modelos de escoamento bidimensionais.

Os valores característicos das forças actuantes dependem muito da selecção da frequência de retorno de situações de cheia. Para níveis pouco exigentes de protecção de margens (por exemplo em zonas agrícolas, basta considerar a cheia dos 5 anos, enquanto no que se refere a infra-estruturas rodoviárias e construções, tem de se ter em consideração a situação correspondente a uma cheia de 100 anos (considerar DIN 19661 Parte 1).

Acção das ondas

Este tipo de acção é causado pelo impacte das ondas sobre uma margem, seja ela de um grande lago, de uma linha de água bastante larga, de um estuário ou ainda de um canal navegável. A acção das ondas é determinada principalmente pela altura da onda, pela forma da margem assim como por factores de rugosidade como os originados pela vegetação. A altura das ondas naturais é determinada pela velocidade do vento, pela frequência e pelo período da onda. As ondas originadas por navios são determinadas pela dimensão dos mesmos, a sua velocidade e o afastamento às margens. Dados específicos constam da bibliografia especializada em protecção costeira e de vias fluviais.

Arraste e danos causados por detritos ou gelo flutuante

Associados a caudais de cheia ou a danos causados por ondas há ainda que referir os danos por arraste ou directamente causados por detritos ou por blocos de gelo flutuantes. No projecto de intervenções de protecção de engenharia natural há que ter em particular consideração esta acção combinada. A determinação das forças em presença deve ser realizada com base em determinações realizadas *in situ* e na experiência local..

Tensões activas associadas à pressão do solo

Na protecção de declives e encostas há que considerar a acção dos factores dinâmicos de tensão associados à pressão do solo. Eles podem ser determinados de acordo com as regras geotécnicas como as constantes de SCHMIDT 2006 ou DIN 4085.

Pressão hidrostática e movimento ascensional da água

Na protecção e consolidação de taludes, encostas e margens tem de se ter em consideração as forças associadas à pressão hidrostática e ao movimento ascensional da água. Para a determinação da pressão hidrostática devem considerar-se as combinações mais desfavoráveis de elevados níveis freáticos no solo e baixos níveis na linha de água. Estas diferenças de cota devem ser definidas de acordo com tempos de retorno específicos.

2.1.3 Acções da vegetação que reduzem as forças actuantes

Redução das acções das correntes de água através de intervenções de engenharia natural na bacia hidrográfica

Em pequenas bacias hidrográficas a estrutura da vegetação e o grau de cobertura que garante, têm uma influência marcante no caudal de ponta de uma curva de cheia e no seu tempo de concentração. O estabelecimento de um coberto vegetal adequado nas bacias hidrográficas problemáticas garante uma redução do caudal de ponta e da correspondente velocidade e capacidade de erosão e transporte (tensão de arraste), com consequências positivas muito significativas na prevenção da erosão ravinar de pequenos ribeiros de montanha.

Redução das acções associadas à pressão e movimento ascensional da água através de intervenções de engenharia natural na bacia hidrográfica

Em taludes e encostas a vegetação tem, através da evapotranspiração, uma influência marcante no regime hídrico da encosta, influenciando, desta forma, a frequência e intensidade da ocorrência de ressurgências, a altura do nível freático e a decorrente pressão da água no interior do maciço. Um cálculo preciso destas acções é neste momento muito difícil. Contudo, é perfeitamente reconhecido o aumento drástico dos escorregamento e aluimentos após a destruição do coberto vegetal de encostas.

Redução do impacte das gotas de chuva, queda de granizo e ventos fortes, através de formações lenhosas de protecção

O impacto das gotas de chuva, do granizo ou a acção dos ventos fortes são claramente reduzidos pela instalação de barreiras de vegetação ou uma cobertura vegetal adequada.

2.1.4 Resistência da vegetação às forças actuantes

Nesta descrição, tal como em 2.1.1, compreendem-se as formações vegetais, o solo enraizado e o conjunto das características do solo influenciadas pela presença da vegetação (microrganismos do solo, gels e outros agregantes de origem biológica...), como constituindo uma unidade a considerar nos cálculos de estabilidade, quer no local específico em análise, quer em parcelas específicas do mesmo ou da sua vizinhança directa.

Resistência contra a acção das gotas de chuva e escoamento superficial disperso originando erosão em superfície ou em regos

A experiência na Europa central mostra que um adequado coberto vegetal garante uma boa protecção do solo contra a erosão causada pela acção das gotas de chuva e do escoamento superficial. Este efeito protector da cobertura vegetal só é eficaz em solos susceptíveis à erosão e não em superfícies ou escarpas rochosas.

Por cobertura vegetal entendem-se todas as componentes aéreas das formações herbáceas incluindo os sistemas radiculares superficiais e a manta morta associada. Como critério para a aceitação de uma sementeira de um relvado de protecção, a norma DIN 18917 exige um grau de cobertura mínimo de 50 %.

Resistência contra a erosão ravinar em escoamentos superficiais

O escoamento superficial ocorrente sobre a superfície das encostas e taludes, em função do comprimento da encosta, do seu declive, tipo de solo, frequência e intensidade da precipitação, origina a formação de sulcos de erosão com profundidades de 0,10 – 0,40 m. Esta formação de sulcos de erosão pode ser corrigida através de uma cobertura vegetal constituída por arbustos e eventualmente árvores correspondentes às comunidades vegetais locais. É essencial garantir o estabelecimento e a manutenção de uma densa e robusta cobertura herbácea que cubra os sulcos e consolide o solo através de um denso sistema radicular.

Resistência contra a corrente da água

No que se refere à resistência da vegetação à acção da corrente de água em canais e linhas de água constam da bibliografia valores característicos para a tensão crítica de arraste τ_{crit} (N/m²), bem como para velocidade média crítica da corrente v_{crit} (m/s). Estes valores são válidos para condições de escoamento uniformes sem transporte de sedimentos, tendo em consideração que a zona de margem e da respectiva base estão adequadamente protegidos por medidas adequadas de engenharia natural. Valores da tensão crítica de arraste e da velocidade da água constam de DIN 19661 Parte 2, GERSTGASER 1998, RAUCH 2006 e JOHANNSEN 1997 e 2008.

Em canais onde ocorra transporte sólido, a presença de densas formações arbustivas na secção de escoamento pode determinar uma tal redução velocidade da corrente que, em vez de erosão, promove a sedimentação inclusive de materiais de grandes dimensões. Nestas situações importa garantir de forma durável uma elevada densidade de ramagem nas ravinas e outras linhas de drenagem susceptíveis à erosão.

Relvados e formações de caniço garantem os valores de protecção exigidos através de uma cobertura adequada pelas suas partes vivas e mortas e por um denso enraizamento superficial.

No caso das formações lenhosas, a acção de protecção das margens fluviais é assegurado por uma combinação de acções de retardamento do escoamento e pelo enraizamento denso do solo. Além da utilização de valores paramétricos constantes da bibliografia, a resistência oferecida pela vegetação ao escoamento pode também ser determinada em troços de referência em linhas de água naturais

A resistência à erosão em linhas de água garantida pela vegetação, depende muito das zonas de vegetação ao longo do perfil da margem. Estas zonas e as plantas aí ocorrentes são muito diferentes nos diferentes biomas europeus. Como valores indicadores aproximados, podem ser considerados os seguintes:

Estruturas de vegetação	τ_{crit} (N/m²)	v_{crit} (m/s)
Formações de salgueiro	200	2,5
Galeria ripícola	100	2,0
Canial de margem	50	1,5
Relvados, submersos durante curtos períodos	30	1,5
Relvados, submersos durante longos períodos	15	1,5

Associado à resistência ao escoamento determinada pelas intervenções de engenharia natural está associada uma redução, por vezes muito significativa, das condições de escoamento hidráulico da secção intervencionada. Esta consequência tem de ser tida em consideração no projecto de engenharia hidráulica e no projecto das medidas de manutenção da intervenção, de modo a garantir, em cada momento, a eficiência hidráulica definida para o troço em causa.

Resistência contra a acção das ondas

A resistência contra a acção erosiva das ondas depende do grau de rugosidade das estruturas existentes nas margens e da energia das ondas. Acessoriamente pode ser aumentada através duma adequada cobertura vegetal (incluindo a garantida pela manta morta originada pela mesma) e pelo sistema radicular superficial.

Formações densas de caniço, assim como densas formações arbustivas e arbóreas (ramos pendentes sobre a margem) têm-se provado muito eficazes na dissipação da energia das ondas. Os parâmetros de cálculo relevantes são a densidade da parte aérea da vegetação assim como a sua elasticidade.

Na determinação da acção de cobertura tem de se considerar o grau de cobertura da massa de folhas, assim como do aparelho radicular superficial e sub superficial.

De modo a obter valores de referência para o projecto deve-se proceder à sua determinação em locais de referência na zona de intervenção.

Acção da vegetação em situações de tensão extremas

A avaliação da estrutura e dos elementos construtivos em termos da sua resistência e capacidade de carga, constitui uma componente fulcral no processo global de concepção e avaliação da intervenção. O conhecimento específico da interacção destas características com as intervenções de engenharia natural é ainda insuficientemente conhecido. É aconselhada a avaliação detalhada caso a caso. Com efeito podem ocorrer focos pontuais de erosão no contacto com as estruturas construtivas e com formações vegetais já existentes. Adicionalmente, a ruptura do sistema vegetativo de uma margem pode originar danos devido a bloqueios da secção de vazão.

2.1.5 Parâmetros de descrição da resistência das formações vegetais

As abreviaturas e símbolos utilizados nas fórmulas são explicitados na tabela anexa ao capítulo 2.

Grau de cobertura da vegetação

O grau de cobertura da vegetação corresponde à percentagem da superfície do solo coberta pela vegetação. Este critério é normalmente utilizado na avaliação de relvados prados e outras formações herbáceas em relação com a sua resistência a acção erosiva das gotas de chuva, escoamento superficial difuso e vento, por ex. em encostas. Em situações onde ocorram diversos estratos de vegetação o grau de cobertura pode ultrapassar os 100%.

Densidade das estruturas verticais da vegetação – copas, ramos, talos, caules, e troncos

A densidade dos caules e talos em herbáceas e caniço, de ramos em arbustos e dos troncos em formações arbóreas descreve a densidade de ocorrência destas estruturas por

unidade de área (unidade/m² ou unidade/ha). Destes valores podem deduzir-se um grande número de índices de resistência, como por exemplo contra a acção do vento ou da corrente numa linha de água ou ainda contra a acção das ondas. Indirectamente podem também realizar-se estimativas relativamente à densidade de enraizamento.

Densidade específica da vegetação no sentido do escoamento (m_v)

A densidade específica da vegetação no sentido do escoamento corresponde, de acordo com INDLEKOFER 2000, às superfícies apresentadas pelas estruturas vegetais submersas perpendicularmente à direcção do escoamento A_{pi} multiplicadas pelo coeficiente de escoamento correspondente c_v e divididos pelo perímetro molhado quer da secção da linha de água, quer do leito de cheia quando for o caso $L_u \times L_G$.

$$m_v = \frac{\sum c_v \times A_{pi}}{L_u \times L_G} [-]$$

O coeficiente de escoamento c_v representa a influência da vegetação sobre a velocidade do escoamento. Actualmente, com base em investigações laboratoriais utiliza-se habitualmente um valor de $c_v = 1,2 - 1,5$.

Superfície de acção do vento

A superfície de acção do vento em lenhosas corresponde à projecção horizontal da área da vegetação exposta ao vento [m^2]. Em sebes de protecção contra o vento importa calcular também a sua permeabilidade expressa em %. Nos cálculos de estabilidade das formações arbóreas considera-se normalmente um coeficiente de

$$c_w = 0,2 - 0,4.$$

Grau de cobertura do aparelho radicular

Relativamente ao sistema radicular ocorrente numa encosta ou talude, na margem de um curso ou plano de água ou num plano de descontinuidade de um maciço, a sua estimativa é feita normalmente a partir do grau de cobertura da vegetação (%) e da estimativa da densidade e da resistência média das raízes que atravessam o plano de descontinuidade.

Tensão de ruptura τ_f

A acção estabilizante e de redução da erosão das plantas e do biota do solo é muito complexa e apresenta dificuldades na determinação de parâmetros mensuráveis como por exemplo acontece no caso da densidade de enraizamento.

É por isso adequado utilizar a tensão média de ruptura τ_f (KN/m²) como valor integrado dos parâmetros de mecânica dos solos como o atrito e a coesão, assim como de todas as influências cumulativas dos factores biológicos como o enraizamento, micorrizas, agregantes orgânicos (biogels), e o aumento da tensão de humidade do solo decorrente da evapotranspiração.

Tensão crítica de arraste τ_{crit}

A tensão crítica de arraste τ_{crit} (N/m²) descreve a resistência da cobertura vegetal de uma margem contra as forças erosivas associadas a uma corrente de água.

Resistência ao escoamento de estruturas vegetais individuais

A resistência ao escoamento por parte de estruturas vegetais ou de exemplares isolados pode ser calculada:

Para estruturas vegetais rígidas:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v^2}{2 * g} * A_P * C_P$$

Para estruturas vegetais elásticas:

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v}{2 * g} * A_P * C_P$$

Densidade de raízes D_{wz}

A densidade de raízes exprime o nº de raízes (com diâmetros dentro de um dado intervalo - por ex.: 1-5 mm) por unidade de superfície. Como a densidade de raízes varia com a profundidade, tem de ser indicada a profundidade da medição em referência.

Área específica do perfil de enraizamento SA_w

A soma das áreas das secções de raízes por unidade de área de um perfil de enraizamento fornece uma estimativa do grau de enraizamento. A profundidade de cada perfil de caracterização tem de ser indicada já que o parâmetro varia com a profundidade.

Com este parâmetro podem realizar-se cálculos do grau de segurança contra o deslizamento do solo proporcionado por um dado coberto ou estrutura vegetal tendo em consideração a força do sistema radicular e a correspondente tensão de ruptura.

2.1.6 Considerações básicas sobre a aplicação de plantas adequadas ao local e de avaliação dos factores ambientais do local de intervenção

Os locais onde se tornam necessárias medidas de engenharia natural são, frequentemente, locais onde a utilização e estabelecimento de vegetação é bastante difícil. A adequada caracterização e avaliação do local de intervenção como local de instalação de vegetação é uma condição necessária para o sucesso das medidas de segurança e consolidação projectadas.

Na caracterização do local de intervenção devem ter-se em consideração, entre outros, os seguintes aspectos:

- Unidade natural de paisagem
- Localização, altitude
- Relevo, comprimento e declive da encosta, altura da encosta, exposição, forma da margem e da linha de água
- Substrato geológico, solo, outros substratos, sequência de horizontes
- Macro e microclima, temperatura, precipitação, chuvadas extremas, neve
- Regime hídrico, água subterrânea, infiltração, frequência e duração de inundações, velocidade da corrente, tensão de arraste
- Flora natural da região, vegetação potencial natural (VPN), vegetação pioneira correspondente e estágios iniciais da sucessão, vegetação dos terrenos confinantes, concorrência e cooperação (efeitos de sinergia)
- Informação sobre fauna relevante para o projecto
- Usos e suas exigências ambientais, de segurança, espaço, etc.
- Directrizes da conservação da natureza e do ambiente

Só com base numa adequada e detalhada avaliação do local de intervenção pode determinar-se se uma dada medida de engenharia natural poderá ser bem sucedida e quais as medidas técnicas e materiais complementares necessárias, assim como quais são as plantas adequadas e quais as técnicas e materiais de apoio ao estabelecimento vegetal se pode garantir o seu estabelecimento bem sucedido.

2.3 Integração do projecto e concepção especializados de Engenharia Natural no processo global de projecto, construção desenvolvimento e manutenção

O processo global de planeamento, condução e desenvolvimento de uma intervenção de Engenharia Natural é organizado do seguinte modo:

- Determinação do problema, da tarefa e dos objectivos
- Projecto prévio
- Projecto para aprovação e licenciamento pela administração responsável
- Projecto de detalhe e preparação dos cadernos de encargos
- Construção e fiscalização de obra
- Manutenção de estabelecimento e desenvolvimento no prazo de garantia estabelecido
- Manutenção de desenvolvimento até ao plena estabelecimento da comunidade vegetal objectivo
- Manutenção da comunidade vegetal objectivo

Caracterização da tarefa e projecto prévio

O projectista deve colocar-se numa perspectiva aberta a todas as soluções, sem ideias preconcebidas. Só desta forma poderá desenvolver, no quadro das condições ocorrentes, a melhor solução.

No contexto da protecção contra a erosão, isso significa que, no âmbito do projecto prévio, têm de ser consideradas e discutidas um amplo espectro de soluções alternativas. Por ex. no que toca à protecção de margens de linhas de água contra a erosão:

1. Preservar a dinâmica de desenvolvimento própria da linha de água e abandonar os usos marginais.
2. Muros de protecção e contenção inertes de concepção da engenharia hidráulica tradicional de modo a salvaguardar os usos existentes sem qualquer alteração ou factor de risco.
3. Técnicas de protecção de engenharia natural, recorrendo a sistemas vegetais de protecção e consolidação, e implicando a retirada de uma dada área das margens às ocupações de uso actualmente ocorrentes.

Quando, no quadro do projecto prévio, for proposta uma solução de engenharia natural, ela tem de ser possível no quadro das condições locais. A vegetação projectada tem de ser capaz de resistir adequadamente às diferentes forças erosivas ocorrentes no local.

Projecto para aprovação e licenciamento pela administração responsável

No projecto apresentado para aprovação e licenciamento tem de ser claramente descritos o biótopo e a comunidade vegetal objectivo, identificada pelas associação vegetal ou espécies vegetais predominantes. A manutenção necessária tem também de ser claramente apresentada.

Os passos necessários para o estabelecimento inicial da vegetação em estruturas construtivas de engenharia natural, assim como as medidas de manutenção de estabelecimento e desenvolvimento, devem ser esquematicamente apresentados. A resistência da vegetação objectivo às diferentes forças susceptíveis de actuarem sobre o local, deve ser devidamente avaliada e comprovada. O conjunto da intervenção de engenharia natural tem de garantir, comprovadamente, desde a sua instalação, as exigências de resistência e segurança.

Em intervenções em linhas de água tem de se determinar qual a influência que a vegetação terá na eficiência hidráulica do troço de linha de água a intervir e se poderá originar factores de risco ou danos em situações de cheia ou inundação.

No quadro da avaliação do projecto nos termos da legislação ambiental em vigor, deve comprovar-se que as espécies vegetais e os materiais construtivos a utilizar, correspondem às condições e características locais, integrando-se nos processos naturais e na paisagem do local, permitindo o desenvolvimento equilibrado das linhas de água e potenciando o valor de recreio do local.

O projecto pronto para licenciamento tem de respeitar as áreas de intervenção disponíveis e ajustar as soluções às mesmas.

Projecto de detalhe e preparação dos cadernos de encargos

Nesta fase do projecto, de modo a responder aos pressupostos do licenciamento, assim como a garantir a compatibilidade com planos de pormenor e outros instrumentos de gestão do território em vigor, tem de ser desenvolvido um elenco detalhado das medidas e intervenções projectadas. Neste quadro integram-se a descrição detalhada das intervenções e sistemas construtivos de engenharia natural projectados, assim como a descrição e fundamentação da sua acção, em termos da protecção das zonas em riscos e da instalação bem sucedida da vegetação, e ainda a avaliação e caracterização detalhada das condições locais e das características do solo e dos maciços a consolidar ou de outros factores relevantes para o projecto.

Devem ser apresentado de forma detalhada as dimensões e qualidade dos materiais construtivos vivos – sementes, partes de plantas capazes de desenvolvimento adventício e plantas com raiz, assim como a natureza, qualidade e dimensões de todos os outros materiais construtivos como geotexteis, mantas orgânicas, fascinas, estacas, pedras e rochas, etc. Fundamental nesta fase do projecto é a apresentação, dimensionamento e descrição detalhada (inclusive, e com grande relevância, na forma gráfica) de todas as intervenções e da sua acção, assim como a indicação de todas as regras de higiene e segurança na estaleiro, e o elenco detalhadamente desenvolvido e apresentado, de todas as tarefas construtivas a realizar, tendo em consideração as regras técnicas a obedecer pelo empreiteiro e dono de obra, de modo a prevenir todas as eventuais situações de responsabilidade civil associadas a acidentes ou à incorrecta descrição dos procedimentos técnicos e construtivos no estaleiro.

Construção e fiscalização de obra

Actualmente, as tarefas construtivas são realizadas normalmente por firmas especializadas contratadas com base em concursos públicos.

A fiscalização de obra tem de ser realizada por um gabinete de engenharia qualificado. Este fiscaliza, em nome do dono da obra, o desenrolar dos trabalhos e a sua correspondência com o projecto, o respeito dos termos do caderno de encargos e da descrição das tarefas técnicas individuais assim como a sua adequada concretização. Em situações em que ocorram eventos naturais inesperados ou em que as condições do local (por ex. solo ou substrato) não correspondam às características de base do projecto, compete também ao gabinete contratado para a fiscalização, apoiar o dono da obra na resolução dos problemas daí decorrentes.

Manutenção de estabelecimento e desenvolvimento

A qualquer procedimento construtivo tem de estar claramente associado um período de garantia de vários anos, onde sejam realizados os necessários trabalhos de manutenção de estabelecimento e de desenvolvimento. Estas tarefas são normalmente assumidas pela empresa contratada para a construção.

Manutenção de desenvolvimento e de manutenção

Terminado o período de garantia ocorre a aceitação final da obra. A manutenção passa a ser assumida, a partir desse momento, pelo próprio dono da obra ou por firmas especificamente contratadas para tal. Estes trabalhos de manutenção envolvem o acompanhamento e conduções da vegetação lenhosa até ao pleno estabelecimento da formação vegetal alvo. A partir desse momento, passar-se-á à fase de manutenção orientada para a manutenção da eficácia técnica da intervenção de engenharia natural (ver capítulo 4).

Gestão do processo de projecto, construção e manutenção de intervenções de Engenharia Natural

Todo o processo até ao pleno estabelecimento e desenvolvimento de um sistema vegetativo de segurança e consolidação de engenharia natural tem de ser sistematicamente acompanhado e organizado de modo a garantir que, na transição entre as diferentes fases (projecto, construção e manutenção), não se percam informações cruciais. Desta forma, no projecto de execução têm de ser clara e insistentemente referidas e explicitadas quais são as medidas relativas à protecção do ambiente e da natureza que têm de ser respeitadas no quadro dos termos do licenciamento e das normativas em vigor. A vegetação (ou formação vegetal) alvo tem de ser respeitada em todas as fases da construção e manutenção, não sendo admissível ajustes posteriores decorrentes de objectivos de conservação da natureza, considerações estéticas ou a utilização de técnicas de construção que comprometam a natureza e eficácia técnica dessa vegetação.

2.3 Recomendações para domínios específicos de aplicação

2.3.1 Erosão em taludes e encostas

Problemática

A erosão em encostas e taludes sem vegetação pode originar danos muito significativos em obras de terra recentemente construídas em vias de comunicação (estradas, caminhos de ferro e outras infra-estruturas lineares), linhas de água, mineração e áreas de deposição de aterros. Como consequência podem ocorrer inclusive danos nas infra-estruturas em si ou nas instalações de drenagem e desvio de águas.

Ações

As acções mais frequente nas encostas de terra são a acção das gotas de chuva, do granizo, do escoamento superficial difuso, do escorregamento de mantos de neve, ventos fortes assim como acções antrópicas ou da fauna.

Resistência

As acções de origem antrópica ou associadas à fauna devem ser corrigidas com as medidas de segurança adequadas, assim como através de restrições ao uso das superfícies afectadas. Contra a acção das gotas de chuva e do escoamento superficial difuso, um coberto herbáceo denso tem-se demonstrado muito eficiente. Esta cobertura inclui, não só as plantas vivas (caules, rebentos, folhas) como toda a manta morta por elas produzida, como ainda o sistema radicular superficial e mesmo substratos resistentes à erosão como pedras, rochas, ou madeira. Contra o escorregamento de massas de neve e o vento, as formações vegetais de lenhosas arbustivas e arbóreas com densidades adequadas, assim como a vegetação herbácea, são as mais indicadas como medidas de protecção.

Factores limitantes

Os factores limitantes são condições ambientais extremas: declive, radiação, clima local, tipo de solo, a forma dos depósitos, escassez de nutrientes e presença de substância tóxicas.

Indicações para o cálculo e o projecto

A vegetação objectivo deve ser determinada com base numa caracterização do local de intervenção e de levantamentos florísticos e fitossociológicos da vegetação local. O procedimento técnico de instalação da vegetação deve ser determinado em parte com base na experiência existente relativamente ao próprio local ou a locais semelhantes do ponto de vista ecológico e edafoclimático.

É aconselhável uma avaliação fundamentada da relação custo / benefício, nos termos definidos na norma DIN 18918. Uma avaliação de risco mais detalhada e exigente é fortemente aconselhada no que se refere a eventos extraordinários, como chuvas extremas, ventos muito fortes, elevadas espessuras de neve, considerando sempre os períodos de retorno adequados aos objectivos e condicionantes da intervenção. Para efeitos de responsabilidade civil as situações de risco que ocorram abaixo destes patamares de projecto são assumidas pelo projectista e responsável pela obra e em situações excepcionais acima destes limiares, são da responsabilidade do dono da obra.

2.3.2 Deslizamentos de terra superficiais

Problemática

Formações vegetais e intervenções de engenharia natural só são comprovadamente eficazes em deslizamentos superficiais paralelos ao plano da encosta, assim como em encosta íngremes pouco elevadas de materiais pouco consolidados. São factores desfavoráveis a presença de árvores de grande porte em encostas muito íngremes, particularmente em solo coerente. A problemática do deslizamento de terras é estudada e modelada no quadro dos projectos de engenharia natural com recurso aos modelos de mecânica de solos disponíveis, integrando neles os factores adequados de resistência e as acções associadas às medidas projectadas.

Acções

No estudo e avaliação de rupturas de encostas são determinantes a massa do solo húmido (incluindo massas adicionais como a vegetação ou a neve), a pressão hidrostática e as forças actuantes.

Resistência da vegetação

Entre as camadas de solo susceptíveis de deslizamento e os estratos subjacente existe uma tensão de ruptura τ_r (kN/m²). Esta tensão de ruptura pode ser determinada a partir de formações semelhantes. A tensão de ruptura resulta da combinação das características geo-mecânicas de atrito e coesão. É neste quadro que actuam os factores biológicos como por exemplo as raízes, micorrizas e agregantes orgânicos naturais que são frequentemente descritos como coesão biológica. A dificuldade da determinação destes parâmetros prende-se com o facto desta resistência biológica variar com a profundidade, a densidade dos horizontes e a humidade do solo e ser, portanto, de difícil (ver ponto 2.1).

Factores limitantes

A acção das raízes na segurança contra o deslizamento de terras é limitada ou mesmo impedida pelos seguintes factores:

- estratos argilosos, siltosos ou rochosos muito compactos
- influência da água subterrânea no espaço de enraizamento
- substratos tóxicos
- outros factores locais que condicionem um desenvolvimento normal da vegetação.

Indicações para o cálculo e projecto de formações vegetais de estabilização de encostas sujeitas a deslizamentos superficiais

As condições para o adequado estabelecimento de um coberto vegetal estabilizador dos horizontes de solo enraizados são:

- o substrato é estável.
- o substrato é claramente mais permeável do que as camadas superficiais.
- não ocorre pressão hidrostática nas camadas superficiais devido a água subterrânea ou água infiltrada.
- o substrato permite, do ponto de vista da porosidade, componentes do solo e valor do pH, um adequado desenvolvimento das raízes.
- as camadas superficiais (estratos de desenvolvimento da vegetação) tem uma espessura suficientemente reduzida que garante que, num prazo de tempo

relativamente curto, as raízes das plantas atinjam e enraízem o estratos subjacente ao plano de escorregamento potencial.

Nestas condições é possível estimar o factor de segurança acrescido pela vegetação, com base em estudos em locais de referência, recorrendo a modelos geotécnicos clássicos. Dessa forma é possível determinar a acção da vegetação em termos da tensão de ruptura ou da área específica de enraizamento ao longo do plano de escorregamento.

Encostas muito declivosas e solos pouco coerentes

Várias investigações mostram que encostas e taludes com alturas reduzidas a médias e declives pouco superiores ao ângulo de atrito interno do solo constituinte, são facilmente consolidados com recurso a plantas de enraizamento profundo e à utilização de técnicas complementares de engenharia natural durante a fase inicial do desenvolvimento das plantas, como é um exemplo as faixas de vegetação. A capacidade de consolidação da vegetação pode ser prevista com base em SCHAARSCHMIDT 1971, SCHUPPENER 1994 e HÄHNE 1997.

Encostas e taludes de altura reduzida podem ser estabilizados para declives de até 45°, desde que, em combinação com a vegetação de enraizamento profundo, se proteja a superfície do solo com um coberto herbáceo denso. Na fase de estabelecimento e desenvolvimento da vegetação podem utilizar-se estruturas de suporte como os muros tipo Cribwall, que são capazes de suportar cargas activas relativamente pequenas. O cálculo é idêntico ao de outros muros de suporte como é o caso dos muros de terra armada.

2.3.3 Ravinamento em taludes e encostas

Problemática

Em encostas longas e declivosas ocorrem concentrações de escoamento em linhas de drenagem que podem vir a originar processos de ravinamento. Outras causas do ravinamento são a impermeabilização do solo, a desflorestação ou a concentração de escoamento devido à construção de passagens hidráulicas.

A erosão ravinar ocorre da base da encosta para cima. Esta pode ser fortemente acentuada por avalanches de lama decorrentes de deslizamentos e aluimentos ocorrentes a montante.

Acções

Com base em modelos de escoamento e em informação sobre a precipitação, é possível estimar os caudais de ponta Q (m³/s) para os tempos de recorrência definidos ($1/(n \text{ anos})$). Com base nestes dados e recorrendo aos modelos hidráulicos habituais, pode-se determinar a velocidade do escoamento v (m/s) e a correspondente tensão de arraste τ_0 (N/m²).

Resistência

O leito da ravina, assim como a base do talude ou encosta devem ser consolidados com vegetação arbustiva densa e de pequeno porte ou com vegetação herbácea resistente e igualmente densa. Esta vegetação deve ser capaz de resistir à submersão, às forças erosivas e à cobertura por sedimentos. Importa ter em consideração os valores críticos da tensão de arraste τ_{crit} acima referidos.

Limites de aplicação

Os limites de aplicação prendem-se com velocidades de escoamento e tensões de arraste muito elevadas, assim como com a acção dos materiais arrastados (areias, saibro pedras ou rochas).

Adicionalmente tem de se ter em consideração a exposição solar e a acção da herbivoria que pode comprometer o adequado desenvolvimento inicial da vegetação.

Indicações para o cálculo e projecto

Um forte impermeabilização da bacia hidrográfica afluente deve ser compensada através da construção de bacias e outras estruturas e medidas de retenção. Linhas de água semelhantes existentes na vizinhança podem ser tomadas como referência de projecto. Os resultados destas observações devem ser aferidos com os parâmetros obtidos com recurso a modelos hidro-técnicos devidamente validados, com base em observações e medições locais.

A consideração de linhas de água de referência na imediata vizinhança, deve servir de orientação para a selecção da vegetação local mais adequada, assim como das medidas complementares recorrendo a rochas, pedra e madeira que melhor se integrem nos sistemas naturais locais. Represas de contenção e correcção torrencial não ocorrem na natureza, constituindo perturbações estética e interrupções da continuidade ecológica, não se enquadrando nas directrizes da Directiva Quadro da Água. Por esse motivo, devem ser substituídas, sempre que possível, por intervenções o mais próximas possível do natural. Em zonas de alta montanha com uma intensa utilização humana, torna-se, contudo, imprescindível o recurso a essas estruturas, para a correcção de ravinas e de linhas de água torrenciais.

2.3.4 Margens e leitos de cheia de linhas de água

Problemática

Nas margens e leitos de cheia ocorrem, devido a fenómenos naturais, diferentes processos erosivos. Estes processos são, por um lado, desejáveis já que determinam a formação de estruturas e processos fluviais característicos e naturais. Por outro lado, junto às margens e nos leitos de cheia, existem em muitos locais, usos e infra-estruturas que têm de ser protegidas contra os danos por eles causados. Em ambos os casos, nas áreas humanizadas e em particular nas zonas urbanas, as condições de escoamento e os níveis de água em situações de cheia e de escoamento médio, têm de ser adequadamente geridos, de modo a evitar danos em usos, edifícios e infra-estruturas.

Acções

Nos processos de consolidação de margens com abordagens de engenharia natural, as acções a ter em consideração são, do lado da linha de água, factores de escoamento como a velocidade da corrente v (m/s) e a sua tensão de arraste τ_0 (N/m²) assim como forças de impulso associadas a materiais e gelo transportados pela corrente. Adicionalmente ocorrem acções determinadas por actividades humanas e de animais. Outro aspecto a ter em consideração são as forças de impulso hidrostático actuando sobre estruturas ou elementos construtivos. Com efeito, no quadro das variações do nível de água,

originam-se diferenças de cota entre a superfície da água livre e o nível piezométrico nos terrenos adjacentes, provocando tensões que podem originar rupturas nas margens.

Resistência

O escoamento na linha de água pode ser controlado por diferentes estruturas vegetais que oferecem diferentes tipos de resistência ao mesmo. Relvados e formações herbáceas densas garantem uma protecção eficaz da superfície do solo contra a erosão, assegurando, ao mesmo tempo, uma reduzida resistência ao escoamento. Um comportamento semelhante ocorre com as formações de caniço que se dobram sobre o solo quando submersos por correntes mais fortes. A vegetação lenhosa origina uma resistência ao escoamento significativa (quer ao nível do escoamento de fundo, quer do escoamento no centro do canal), diferenciada de acordo com a densidade da formação. Adicionalmente, a maioria das formações de salgueiro e espécies equivalentes asseguram um enraizamento denso do solo, garantindo uma protecção eficaz contra a erosão hídrica até aos valores críticos da velocidade de escoamento v_{crit} e da tensão de arraste τ_{crit} .

Limites de aplicação

Além dos factores locais habituais e dos limites críticos de velocidade e de tensão de arraste, existem ainda vários limites de aplicação específicos das linhas de água. Cada espécie vegetal tem uma capacidade limitada de resistência a factores como a duração, frequência e profundidade da submersão ou ainda à acção de gelo e detritos flutuantes ou de sólidos transportados e sedimentados. Estes limites têm de ser determinados, recorrendo-se, para tal, a locais de referência comparáveis na vizinhança do local de intervenção.

A estabilidade global de um talude de margem tem de ser determinada em circunstâncias de máxima diferença entre a cota da água no canal e o nível piezométrico da margem, de modo a considerar as situações de máxima pressão hidrostática interna. Em zonas urbanas, devido ao efeito de resistência ao escoamento e de decorrente redução da sua velocidade, o uso de vegetação lenhosa tem de ser conduzido com extremo cuidado para não comprometer a eficiência hidráulica das secções intervencionadas.

Indicações para o cálculo e projecto

Nas intervenções de renaturalização e consolidação de linhas de água tem de se obedecer aos objectivos definidos na Directiva Quadro da Água. Isso implica que não ocorra nenhuma degradação do estado actual da linha de água e que sejam garantidas as condições de desenvolvimento de melhores condições ecológicas. A engenharia natural está particularmente ajustada a estes objectivos, já que privilegia uma morfologia da linha de água adequada à natureza do local, utiliza materiais construtivos naturais do local e plantas autóctones locais, respeitando sempre as variações típicas de uma linha de água natural ou próximo do natural.

Recorrendo a locais de referência nas imediações do local de intervenção podem determinar-se quais são as estruturas de vegetação mais adequadas, assim como os seus limites de aplicação. Nas intervenções em linhas de água deve ter-se sempre em consideração a hipótese alternativa de retirar os usos marginais actuais e permitir a reposição da dinâmica fluvial natural. Medidas de

consolidação da base das margens ou de margens declivosas sujeitas a correntes fortes, devem ser constituídas exclusivamente por materiais locais como rochas, madeira ou troncos e ramos obtidos na vizinhança e em condições morfo-ecológicas idênticas. Desta forma criam-se estruturas longitudinais, transversais ou ao longo do perfil hidráulico, adequadamente diferenciadas, que garantam as diferentes funções ecológicas de um rio como a sua continuidade e conectividade, ao contrário do que acontece com perfis e traçados monótonos e estruturalmente homogêneos.

A naturalização do traçado e do perfil hidráulico, assim como a instalação de formações vegetais lenhosas, está normalmente associada a uma redução da eficácia hidráulica da secção da linha de água intervenionada. No quadro do projecto de engenharia hidráulica têm de ser realizados variados estudos e simulações hidráulicos, de modo a determinar como evoluirão as cotas de escoamento e a sua influência sobre os usos e infra-estruturas adjacentes. A estabilidade global de uma margem relativamente ao risco de ruptura tem de ser avaliada considerando as diferenças de cotas hidráulicas e piezométricas mais desfavoráveis.

O processo de planeamento e projecto de uma linha de água implica um complexa e delicada concertação e integração entre todos os interessados e afectados, sejam eles responsáveis administrativos, populações e donos de actividades económicas, políticos, organizações de conservação da natureza, etc. Durante o processo de planeamento e projecto tem de ser acordado com todos os interessados um conceito e uma solução viável e pronta para aprovação e licenciamento

2.3.5 Margens de planos de água

Problemática

Nas margens de lagos e outros planos de água podem ocorrer processos erosivos que originem a formações de escarpas de erosão. Estes fenómenos naturais são acentuados por muitos dos usos ocorrentes nesses planos de água.

Ações

Os agentes erosivos a ter em consideração na consolidação destas margens com medidas de engenharia natural são as ondas (de origem natural ou decorrentes da passagem de embarcações), assim como os decorrentes da acção de detritos e gelo flutuante. Zonas marginais atractivas são ainda afectadas pelo pisoteio e pelo movimento de embarcações. Podem também ocorrer danos causados pelo gado (por exemplo em zonas de bebedouro).

Resistência

O solo pode ser protegido por relvados densos e fechados. Amplas faixas de caniço reduzem a acção das ondas e protegem o solo através das suas raízes superficiais. O mesmo efeito é assegurado por vegetação lenhosas resistente à submersão temporária que apresente densos sistemas de ramos e troncos.

Limites de aplicação

Além dos factores locais gerais, cada espécie vegetal tem limites específicos de viabilidade. Estes limites ligam-se à altura e à duração máxima de submersão. Da mesma

forma, a frequência da acção das ondas constitui um factor crítico, já que ondas regulares originadas por embarcações podem destruir formações de caniço que, de outro modo resistiriam a tempestades intensas.

Indicações para o cálculo e projecto

No projecto de medidas de consolidação de margens de lagos e planos de água deve dar-se particular atenção aos aspectos paisagísticos e associados aos usos de recreio, de modo a garantir que se previnem usos excessivos dessas margens. Neste sentido importa garantir uma oferta de estruturas de recreio atractivas e adequadas que evitem a frequência das zonas degradadas a intervenionar. A capacidade de carga e os limites de aplicação da vegetação devem ser determinados em locais de referência localizados na envolvente directa. Nas fazes iniciais do estabelecimento e desenvolvimento da vegetação há que garantir o controle do acesso à zona de intervenção impedindo o pisoteio, a presença de gado, a acção de barcos e detritos flutuantes ou mesmo de aves aquáticas.

2.3.6 Diques e represas

Problemática

Os diques constituem medidas estruturais de protecção de usos e edifícios em zonas marginais e do leito de cheia ameaçadas por inundações. O seu objectivo é conter, de forma durável, níveis de água elevados em canais, rios e outras estruturas hidráulicas. Na fase seca, verifica-se, na margem "húmida" um risco elevado de erosão semelhante ao que se verifica nas margens de linhas e planos de água. Dados os elevados riscos associados à eventual ruptura de um dique, importa garantir um apertado controle, manutenção, reconstrução e reforço destas estruturas. Do lado seco importa garantir que infiltrações e ressurgências de água, assim como rupturas do maciço sejam prevenidas e imediatamente corrigidas.

Ações

As acções decorrem da massa do material constituinte do dique, do vento, da acção da precipitação e, do lado do rio (margem húmida), do escoamento (acentuado pelas tensões determinadas pela velocidade e tensão de arraste da corrente, materiais, detritos e gelo flutuantes, assim como, pela acção das ondas). Do lado húmido, após cheias, como consequência das diferenças de pressão hidrostática entre o dique e a superfície da água ou de eventuais galgamentos do coroamento do dique, podem ocorrer aluimentos, rupturas hidráulicas ou fenómenos erosivos. A herbívoros (com a excepção das ovelhas), assim como a circulação de veículos e cavaleiros podem danificar gravemente a vegetação. Outros danos podem ocorrer devido à acção de toupeiras ou outros animais que escavam os diques (lagostim de água doce).

Resistência

Relvados densos capazes de resistir nas situações de cheia à velocidade da corrente e à correspondente tensão de arraste, são a forma de protecção mais frequente. Adicionalmente estas formações herbáceas garantem a protecção contra a acção erosiva do vento e das ondas. Danos nestas formações herbáceas podem ser causados por detritos e gelo flutuante. Estes danos podem ser prevenidos através dum reforço do lado húmido com recurso, por exemplo, a combinações de enrocamento e formações herbáceas densas, ou pela instalação de densas formações de salgueiros arbustivos na zona frontal de

margens concavas sujeitas a tensões mais intensas em situação de cheia. Do lado terrestre (seco) utilizam-se os relvados de herbáceas como protecção contra a erosão do vento e da precipitação. Estes relvados facilitam a detecção atempada da ocorrência de ressurgências na massa do dique. Através da sementeira de espécies locais autóctones (por ex. recorrendo a técnicas de sementeiras com fenos), podem obter-se relvados de elevada biodiversidade florística, com sistemas radiculares diversificados e plurifuncionais e oferecendo, decorrentemente, uma elevada protecção contra a erosão.

Limites de aplicação

Os limites de aplicação do lado húmido estão associados à duração e profundidade máxima da submersão das plantas, assim como à capacidade de resistências das mesmas às correntes e ondulação e ainda à acção de detritos e gelo flutuantes.

Indicações para o cálculo e projecto

Diques e represas são, essencialmente, estruturas construídas de natureza e funcionalidade técnica. As medidas de segurança de engenharia natural utilizando formações herbáceas naturais, constituem normalmente soluções eficientes e baratas de protecção contra a erosão. Em situações em que os limites de aplicação da vegetação sejam ultrapassados, torna-se necessário recorrer a métodos combinados com pedras e enrocamento. As exigências específicas de manutenção, protecção, e eventualmente reforço, devem ser consideradas no projecto. Na selecção das plantas a instalar deve ter-se em consideração as diferentes faixas de humidade do lado "seco" do dique e as diferentes frequências de submersão no lado "húmido" do mesmo.

2.3.7 Protecção do litoral

Problemática

Existem diferentes formas como a engenharia natural pode contribuir para a protecção e modelação natural das zonas costeiras. Trata-se, por um lado, de medidas de protecção e desenvolvimento dunar e, por outro lado, da promoção da segurança de diques de protecção costeira através da intervenção e manutenção das zonas de sapal contíguas. No passado, intervenções de engenharia natural nas zonas de sapal eram designadas como "técnicas biogénicas de conquista de terras".

Acções

Vento e água em combinação

As medidas de engenharia natural são utilizadas principalmente em zonas de praia regressivas, ou seja, naquelas em que as forças erosivas predominam e originam o recuo das praias e dunas brancas, ou então em zonas de dunas interiores onde ocorre o risco de ruptura dos cordões dunares. Em zonas costeiras em progressão, a engenharia natural pode também ter um papel importante na estabilização e consolidação de dunas em formação, através do adequado desenvolvimento de vegetação.

Nas zonas intertidais e de sapal, as tarefas da engenharia natural prendem-se com a redução da energia da energia da água que, em situações de marés vivas, fluindo descontroladamente, pode danificar diques e outras estruturas litorais. A elevação natural destas zonas intertidais trava e distribui mais equilibradamente a

energia das marés, reduzindo as forças actuantes na base dos diques e outras estruturas costeiras.

Resistência

A dinâmica natural da formação dunar e a biologia das espécies vegetais dunares ilustram claramente a sua aplicabilidade na protecção costeira. No domínio das dunas regressivas a acção mais relevante é a resistência do caules e folhas da vegetação ao vento e, através do aumento da rugosidade, o decorrente efeito de retenção e deposição da areia por este transportada. O enraizamento da areia depositada, consolida e estabiliza a duna assim formada ou estabilizada.

Nas zonas intertidais e de sapal a acção da engenharia natural focalizam-se na redução da energia das ondas e dos fluxos de água durante os períodos de marés vivas, de modo a prevenir que a energia actuante sobre os diques costeiros passa ameaçar a sua estabilidade e segurança. Esta redução da energia é obtida através do aumento da rugosidade do substrato proporcionado por espécies vegetais que garantem, simultaneamente, uma consolidação do solo e a sua protecção contra a erosão. As raízes assumem, neste domínio, uma importância particular, devido à sua capacidade de consolidação das partículas de solo e ao facto de constituírem uma estrutura simultaneamente consistente e flexível. As partículas de solo apresentam uma elevada estabilidade relativamente a forças actuantes e as estruturas radiculares reduzem as acções de arranque e de transporte induzidas pelas correntes de maré. Os processos de sedimentação são potenciados, desta forma, pela densidade estrutural vertical e horizontal da vegetação. A taxa de sedimentação está directamente correlacionada com a intensidade de submersão, a qual depende da cota natural de ocorrência de cada tipo de comunidade biológica relativamente às cotas de maré. A dissipação de energia depende da altura das plantas, da sua elasticidade e da capacidade de resistência mecânica. Com um aumento progressivo da altura das plantas, ocorre uma redução da velocidade da corrente de maré e uma melhor protecção do solo.

Limites de aplicação

As forças de abrasão ultrapassarem a capacidade de suporte da vegetação, seja ela herbácea ou arbustiva.

Indicações para o cálculo e projecto

Em zonas costeiras aplicam-se os mesmo princípios dos sistemas inertes de retenção de areias, através do aumento da rugosidade e da posterior consolidação dos depósitos de areia através do enraizamento. Para estas finalidade utilizam-se espécies cujos sistemas radiculares sejam capazes de consolidar e reter materiais friáveis como a areia, como é o caso do estorno das praias. A biologia das espécies é semelhante ao longo das diferentes zonas costeiras, devendo a selecção das espécies ser feita de acordo com as condições ecológicas locais.

2.3.8 Protecção contra o vento e emissões poluentes

Problemática

Formações e sebes arbóreas e arbustivas podem ser utilizadas para a protecção de zonas de uso e infra-estruturas dos danos causados pelo vento ou a ele associados (exsicação, deposição de areia e sedimentos, deposição e acumulação de neve). Junto a zonas de

extração de inertes e outras áreas mineiras, assim como de áreas industriais, as sebes e formações florestais asseguram também a deposição de poeiras. Uma adequada cobertura vegetal previne ainda a dispersão de poeiras e partículas de aterros e outras superfícies de materiais não consolidados.

Acções

O vento, em termos da sua intensidade, duração, frequência e direcção é o principal agente a considerar e caracterizar.

Resistência

Os valores limite acima dos quais a erosão eólica actua sobre os materiais não consolidados depende da sua dimensão, peso e humidade.

Relvados de sequeiro e outras formações herbáceas ou arbustivas densas têm-se provado muito eficazes como sistemas de protecção das superfícies contra a acção erosiva do vento. Sebes arbóreas ou arbustivas afectam os fluxos do vento até uma distância equivalente a 10 vezes a sua altura. Estas sebes devem ser permeáveis, de modo a reduzir a turbulência a barlavento. Sebes para a protecção contra emissões poluentes devem ser constituídas por várias linhas ou ser largas e bem estruturadas internamente.

Limites de aplicação

Na instalação de sebes deve ter-se em consideração a resistência das espécies à secura. Em sebes de protecção contra emissões poluentes de actividades mineiras ou industriais deve-se determinar, na vizinhança do local de intervenção, a resistência das diferentes espécies a essas emissões.

Indicações para o cálculo e projecto

A acção aerodinâmica da vegetação pode ser determinada a partir de dados bibliográficos como por ex. KOVALEV 2003. O desenvolvimento das sebes em altura exige um adequado planeamento e plantação e uma manutenção que pode durar anos ou decénios para garantir os efeitos pretendidos. Em particular há que atender às necessidades de irrigação, protecção contra a competição e a herbívoros.

A cobertura vegetal de áreas industriais, aterros e outras zonas possivelmente contaminadas, implica uma adequada avaliação dos solos e substratos, de modo a prevenir eventuais impactes. Em zonas contaminadas importa determinar os ciclos de assimilação e transporte de substâncias contaminantes, assim como valores limites aceitáveis. Só com base em avaliações periciais, é que se pode decidir se se pode optar por uma cobertura vegetal simples, ou se é necessário proceder à cobertura impermeável dessas superfícies. Só depois deste determinação, é que se justifica uma caracterização técnica do solo e da vegetação, com vista à instalação de um adequado coberto vegetal.

2.3.9 Regulação do regime hídrico

Problemática

Chuvadas intensivas podem originar, num curto espaço de tempo, em superfícies com pouca ou sem vegetação, em ravinas ou em depressões, a formação de intenso escoamento superficial com tempos de concentração muito reduzidos. Como consequência destes fenómenos

intensos de escoamento, desenvolvem-se processos erosivos generalizados, produção de grandes quantidades de sedimentos, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos e uma drástica redução da taxa de recarga dos aquíferos. Um coberto vegetal adequado, como é o caso das formações florestais ou arbustivas, combinados com intervenções pontuais de engenharia natural nas áreas críticas (ravinas, encostas ou outras áreas susceptíveis de originar erosão ravinar ou outras formas de degradação erosiva de encostas), pode assegurar o controle dos balanços hidrológicos e do regime hídrico nos locais problemáticos. Estas acções são particularmente relevantes em bacias hidrográficas localizadas a montante de áreas de risco de cheia, assim como de albufeiras de barragens e de outros reservatórios de abastecimento de água.

Acções

Como principais agentes, podem identificar-se a precipitação em termos da sua intensidade, duração e frequência, assim como a seca em termos da duração dos períodos sem precipitação.

Resistência

As encostas e outras superfícies devem estar protegidas através de um adequado coberto vegetal potenciador da infiltração, complementado com estruturas que garantam uma retenção e retardamento do escoamento superficial. Um coberto vegetal denso é pois imprescindível, assim como todas as medidas que aumentem a rugosidade hidráulica da superfície do terreno. Todas as linhas de escoamento devem estar preenchidas com vegetação arbustiva retentora do escoamento, assim como estruturas de elevada rugosidade (por ex. leitos rugosos de enrocamento) que garantam uma drástica redução da velocidade do escoamento, um aumento do tempo de concentração, um amortecimento do caudal de ponta de cheia e potenciem a infiltração, através, por ex. do aumento da permeabilidade e do período de retenção.

Factores limitantes

Factores limitantes destas intervenções são as condições locais extremas - declive, exposição, clima local, tipo de solo, forma do terreno, reduzida disponibilidade de nutrientes, e presença de substâncias tóxicas. Em linhas de escoamento e ravinas ocorrem igualmente limiares de viabilidade em termos de velocidade do escoamento e valores da tensão de arraste, assim como a acção do transporte sólido ocorrente. Em encostas susceptíveis a aluimentos, com planos de deslizamento profundos, um aumento da taxa de infiltração pode aumentar o risco de ruptura da encosta. Estas questões devem ser clarificadas detalhadamente por geotécnicos

Indicações para o cálculo e projecto

A influência da vegetação sobre a taxa de infiltração e a velocidade do escoamento superficial pode ser determinada com base na bibliografia disponível, como é o caso de MARKART et al. 2004. O desenvolvimento do coberto vegetal (e correspondente densidade e estrutura) exige, um adequado projecto e planeamento, construção e manutenção ao longo de anos e decénios de modo a garantir o efeito desejado.

A necessidade de gerir, simultaneamente, a infiltração e o escoamento superficial, implica um adequado cuidado do coberto vegetal. Desta forma, deve-se orientar a vegetação

objectivo de acordo com a vegetação natural da região, de forma a criar condições ecológicas estáveis, com reduzida probabilidade de doenças e uma baixa necessidade de trabalhos de manutenção.

2.3.10 Áreas ardidas

Problemática

A destruição do coberto vegetal assim como de parte ou da totalidade do húmus do solo em virtude dum fogo florestal, origina um risco de erosão muito mais elevado, o qual deve ser controlado com medidas de emergência de modo a reduzir a perda de solo e nutrientes, e facilitar uma rápida reinstalação da vegetação. O arraste de grandes quantidades de nutrientes pode originar a contaminação a jusante, de linhas de água e de reservatórios de água (superficial ou subterrânea) originando, por exemplo, fenómenos de eutrofização.

Acções

As principais acções ligam-se à massa de material combustível, a acções climáticas como a seca, o calor extremo e o vento (intensidade, duração, frequência e direcção).

Resistência

Os fogos florestais ocorrem normalmente em situações climáticas e em áreas apresentando uma elevada secura. A propagação é determinada pelas formações vegetais ocorrentes, a morfologia do terreno e o vento. A resistência à propagação é proporcionada por amplas faixas não florestadas, com reduzidas quantidades de material combustível, apenas com um coberto vegetal herbáceo adequado à protecção contra a erosão. Estas amplas faixas de protecção potenciam a biodiversidade e podem ser utilizadas como áreas de pastoreio extensivo.

Após um fogo, a vegetação tem grande dificuldade em voltar a desenvolver-se devido à destruição sofrida, à secura do local e do solo queimado. Por esse motivo, as primeiras medidas a tomar, devem focalizar-se na prevenção da erosão com estruturas de retenção de materiais disponíveis no local. Exemplos são a utilização de troncos e árvores queimadas para criar barreiras transversais nas encostas e em ravinas ou para obstruir essas mesmas ravinas. É indispensável realizar imediatamente uma sementeira de herbáceas capaz de formar rapidamente um coberto protector denso. A mistura de sementes a utilizar deve ser muito diversificada em número de espécies e incluir espécies adaptadas a condições extremas, assim como espécies de crescimento rápido e espécies promotoras dos passos seguintes da sucessão ecológica.

Limites de aplicação

A instalação da vegetação está condicionada pelo grau de destruição do solo o que obriga a uma imediata sementeira (associada a medidas de fixação do solo e das sementes (palhas, mulch, agregantes, etc.)) que previna imediatamente a perda dos materiais finos e orgânicos do solo.

Indicações para o cálculo e projecto

A acção de medidas lineares de protecção contra a erosão pode ser determinada com base em modelos de erosão. A vegetação das faixas de protecção sem vegetação lenhosa deve corresponder às comunidades vegetais naturais do

local e deve garantir uma protecção contra a erosão do solo, assim como possibilitar o pastoreio extensivo. A vegetação objectivo deve desenvolver-se de forma a reduzir o risco de fogos futuros e a possibilitar que as plantas consigam voltar a rebentar após um fogo. A manutenção deve garantir a remoção da massa combustível em excesso, de preferência através da sua valorização económica.

2.3.11 Protecção contra avalanches

Problemática

Avalanches são riscos naturais que ameaçam quer pessoas, quer infra-estruturas, em zonas alpinas. Uma floresta de protecção adequadamente estabelecida e mantida pode impedir o desencadear de uma avalanche, quando um número suficiente de troncos de árvores resistentes e bem estabelecidos suporta a pressão da neve segundo a componente paralela ao plano da encosta. A floresta actua ainda de forma positiva em termos da distribuição homogénea da neve e dos parâmetros mecânicos do manto de neve. Quando ocorre uma avalanche é quase impossível esta ser travada pela vegetação. Através da adequada manutenção de florestas de protecção consegue-se minimizar este risco.

Acções

As acções mecânicas que conduzem ao desencadear de uma avalanche são determinadas pela componente paralela ao plano da encosta da massa do manto de neve. Este manto de neve apresenta massas muito variáveis desde cerca de 1 KN/m³ em massas de neve pouco consolidada até 10 KN/m³ em massas de neve compacta. No fim do inverno as camadas de neve podem atingir vários metros de espessura.

As camadas de neve exercem permanentemente, através do seu lento movimento descendente (sem desencadear uma avalanche), uma pressão sobre a vegetação de cerca de 1 a 3,5 kN/m². Esta pressão é suficiente para desenraizar árvores de pequeno porte. No caso de se desencadear uma avalanche, após apenas 50m de trajecto encosta abaixo, esta atinge um força de impulso capaz de quebrar troncos de árvores plenamente desenvolvidas. No máximo após um trajecto de 150m quebram-se troncos e desenraizam-se árvores. A pressão actuante sobre as árvores nessas circunstâncias depende do tipo de avalanche: 3 – 5 kN/m² para avalanches pulverulentas e 10 – 50 kN/m² para avalanches maciças.

Acção da vegetação na redução dos impactes

A acção da vegetação na redução dos impactes decorre das características particulares das florestas, condições que, naturalmente, não se verificam em zonas sem coberto florestal. As mais importantes são:

- Intercepção da neve
Durante os nevões parte da neve é interceptada pela copa das árvores. Uma pequena parte desta neve evapora-se. Desta forma a camada de neve nas florestas apresentará menor espessura e melhor estrutura do que em terreno não florestado. Em situações de temperaturas muito baixas, as espécies de folha perene apresentam uma melhor taxa de intercepção do que as espécies de folha caduca.
- Balanço de radiação
Numa floresta densa de espécies de folha perene, o microclima é mais equilibrado do que nos espaços

não florestados. O aquecimento da neve durante o dia e o seu arrefecimento durante a noite são menos acentuados. A probabilidade de formação de camadas menos consolidadas dentro da massa de neve é mais reduzida.

- Vento

A acção do vento e a decorrente dispersão ou acumulação localizada de neve são menos problemáticas em formações florestais densas. Contudo, em clareiras podem acumular-se massas de neve muito superiores às verificadas em zonas não florestadas.

Resistência da vegetação às avalanches de neve

A função protectora da vegetação consiste na prevenção do desencadear das avalanches. No caso de uma avalanche ocorrer, mesmo uma floresta intacta não tem capacidade de interromper o movimento das massas de neve. De modo a garantir que a vegetação evita o desencadear de uma avalanche, há que garantir que a altura das árvores (a rugosidade da floresta) é suficiente para reter as massas de neve. A capacidade de protecção desaparece quando esta rugosidade superficial é anulada pela massa de neve (SAEKI e MATSUOKA 1969). É necessário ainda ter em conta que formações arbóreas de baixo porte que sejam completamente cobertas por neve - em particular, espécies com enraizamento superficial - podem potenciar a ocorrência de avalanches, ao favorecer a formação de camadas de descontinuidade dentro da massa de neve e a conseqüente formação de planos potenciais de deslizamento. Deste modo, uma formação arbórea só oferece protecção contra avalanches desde que não seja completamente soterrada pela neve. Como em zonas alpinas propensas a avalanches se podem formar massas de neve com vários metros de espessura, só uma floresta bem desenvolvida e intacta oferece uma protecção contra avalanches. A floresta é, nestas circunstâncias, uma forma de protecção contra avalanches eficaz e de baixo custo. Os troncos suportam as massas de neve e estabilizam-nas. Esta acção de suporte não deve ser sobrestimada, sendo que apenas uma floresta densa consegue garantir uma efectiva protecção devido à elevada proximidade entre os troncos.

Factores limitantes

A "timberline" natural, determinada pela altitude e pelo clima, determina a aplicabilidade das florestas como protecção contra avalanches. Ocorrem variações locais em função da duração da cobertura de neve, da exposição ao vento, das temperaturas mínimas extremas, do tipo de solo e da espessura da camada de húmus. Tendo em consideração a acção do microclima e da micro-variação topográfica local, pode conseguir-se a instalação de formações florestais em algumas zonas subalpinas. As árvores jovens são susceptíveis a fungos quando estão cobertas por neve durante longos períodos. O fungo

Herpotrichia juniperi ocorre desde as zonas pré-alpinas até à alta montanha, e afecta as agulhas da maioria das coníferas. A sua área de dispersão ocorre entre 900 e os 2000m de altitude. Este fungo origina nas zonas pré alpinas muito nevosas graves danos nas formações jovens. Afecta árvores quer em situações de renovo natural, como resultantes de intervenções de silvicultura, chegando mesmo a infectar exemplares adultos completamente saudáveis.

Os grandes herbívoros são também responsáveis por importantes danos nas árvores jovens. Estas árvores, além do mais, são mais flexíveis do que os exemplares adultos. Por esse motivo, só a partir de diâmetros de tronco superiores a 10 cm é que se verificam rupturas dos troncos devido à pressão da neve, implicando que em formações com 30 - 50 anos com uma manutenção insuficiente se verificam rupturas da acção protectora contra avalanches.

Indicações para o cálculo e projecto

O perfil exigido à floresta de protecção depende fortemente dos objectivos de protecção e do potencial de danos específicos de cada local. Pequenos aluimentos de neve que ameacem, por exemplo, pessoas numa pista de ski só podem ser evitados (quando o podem) por formações muito densas de perenifólias (cobertura de copas >50%). Para evitar o desencadear de grandes avalanches podem considerar-se formações com densidades mais reduzidas. Formações dispersas como as frequentemente ocorrentes próximo da *timberline* devem ser sempre avaliadas de forma muito crítica. A densidade do copado e o grau de ocorrência de falhas na formação são, em combinação com o declive, critérios fulcrais na determinação da função de protecção (FREHNER 2005). Como valores guia para garantir uma protecção adequada contra avalanches, consideram-se densidades de 500 troncos por hectare para encostas com declives de 35° e de 1000 troncos por hectare para declives superiores. Como estas densidades de troncos raramente ocorrem em florestas subalpinas, deve ser garantido que não ocorrem falhas na formação superiores a 15 - 25 m e que o grau de cobertura não é inferior a 30 a 50 % (para uma densidade de cobertura de 50 % e um declive de 35° considera-se que falhas de formação até 15 m são aceitáveis para garantir uma protecção eficaz contra o desencadear de avalanches). A floresta de protecção deve apresentar uma boa diversidade etária e específica. Árvores tombadas garantem uma protecção acrescida, pelo que não devem, sempre que possível, ser removidas. Complementarmente às medidas específicas de gestão silvícola, devem ainda ser instaladas medidas adicionais de protecção como terraços, colinas de terra e estruturas metálicas de contenção.

Símbolos e acrónimos	Termos e significado	Unidade
A	Secção de escoamento	m ²
A _p	Secção submersa da margem com vegetação	m ²
c _p	Resistência da vegetação ao escoamento	-
c _v	Coefficiente de escoamento	-
c _w	Coefficiente de escoamento em construções em altura (vento)	-
F _{ST}	Resistência ao escoamento de estruturas vegetais isoladas	kN
g	Aceleração da gravidade = 9,81	m/s ²
Índice i	Para sub-componentes	-
I _u * I _G	Área coberta de uma margem de linha de água	m ²
m _v	Densidade específica da vegetação relativamente ao escoamento	-
Q	Caudal	m ³ /s
R _{d,i}	Valor de resistência para fins de dimensionamento	-
R _{k,i}	Resistência de um elemento construtivo (dedutível a partir do conhecimento científico das suas características)	-
S _{d,x}	Carga de dimensionamento	-
S _{k,x}	Carga (dedutível a partir do conhecimento científico das suas características)	-
v	Velocidade média numa secção de canal	m/s
v _{crit}	Velocidade crítica de escoamento	m/s
γ _i	Valor parcial de segurança de acordo com as normas europeias	-
γ _x	Valor parcial de segurança de acordo com as normas europeias	-
ε	Valor acentuador da força de tracção de acordo com SCHRÖDER e ROMISCH 2001	-
τ	Tensão de ruptura em mecânica de solos	kN/m ²
τ _f	Valor máximo da resistência à ruptura em solos	kN/m ²
τ ₀	Tensão de arraste ocorrente num dado evento	N/m ²
τ _{crit}	Tensão de arraste crítica para substratos diferenciados, vegetação ou sistemas e estruturas construtivas	N/m ²

3 Tipos de construção da Engenharia Natural

3.1 Manual técnico EFIB 2007

Os diferentes tipos de construção da engenharia natural estão elencados e descritos no Manual Técnico de Engenharia Natural editado pela EFIB: *Handbuch der Bautypen* (ZEH 2007). Os tipos construtivos elencados estão agrupados em trabalhos preparatórios, trabalhos com plantas e manutenção. Cada tipo construtivo é apresentado através de um texto sintético e ilustrado com fotografias e desenhos esquemáticos. O Manual Técnico de Engenharia Natural constitui um primeiro passo e um fundamento essencial para a elaboração das presentes directrizes europeias.

3.2 Utilização dos tipos de construção

3.2.1 Critérios de decisão

A escolha adequada da técnica construtiva e da comunidade vegetal a instalar é o factor decisivo no sucesso de qualquer projecto de engenharia natural e na sua capacidade de preencher os objectivos definidos. Como principais critérios de decisão devem considerar-se os seguintes objectivos:

Objectivos de protecção

Requisitos hidráulicos, hidrológicos, geotécnicos e de segurança técnica da técnica construtiva e da vegetação a instalar.

Objectivos ecológicos

Melhoria do estado ecológico. Por exemplo no caso de uma linha de água, integrando o adequado desenvolvimento da fauna e da flora, assim como da morfologia, processos, funções, recursos e qualidade, tal como definido na Directiva Quadro da Água. Estrutura de biótopos como habitats

Objectivos estéticos e paisagísticos

Enquadramento optimizado da intervenção na paisagem Preservação e afirmação da identidade e presença de uma linha de água.

Objectivos económicos

Utilização de material vegetal capaz de desenvolvimento e reprodução vegetativa obtido no local ou na sua vizinhança directa. Utilização de materiais duráveis e métodos de construção pouco exigentes em termos de cuidado e manutenção. Utilização de material vegetal capaz de instalação e reprodução vegetativa, Construção e manutenção de baixo custo.

Objectivos de sustentabilidade

Utilização de materiais construtivos naturais capazes de se desenvolverem: plantas vivas, madeira, solo, rocha. Utilização de materiais construtivos com baixo consumo de energia.

Objectivos sociais

Possibilidade de utilização pelas populações Recreio e turismo Criação de novos espaços verdes em zonas urbanas.

3.2.2 Matrizes de decisão

Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural em linhas de água: Apêndice

4. Manutenção de intervenções de Engenharia Natural

4.1 Fundamentos da manutenção

A manutenção só terá lugar quando for indispensável – „deixar em vez de fazer“. A necessidade de manutenção será determinada por um acompanhamento e monitorização regular da obra em termos do controle do seu sucesso e eficácia (ver capítulo 5).

As seguintes questões básicas têm de ser tidas em consideração:

- A escolha e a edificação das técnicas construtivas devem ter em consideração que as estruturas e sistemas vegetativos resultantes venham a exigir um mínimo de manutenção.
- Procurar atingir o objectivo com um mínimo de recursos e o máximo de eficácia e velocidade.
- Os objectivos de desenvolvimento devem integrar e harmonizar todos os critérios de eficácia (técnicos, ecológicos, económicos e estéticos).
- Maximização, na medida do possível, da diversidade estrutural e biológica.
- Segurança rodoviária, ferroviária e fluvial.
- Contribuição contínua para uma eficácia crescente e melhor adaptada.
- Tem de ficar claro que a manutenção pode conduzir a desenvolvimentos indesejados. A adaptação das medidas de cuidado e manutenção às condições e processos naturais é a única forma de evitar erros que podem ser mais perniciosos do que as situações decorrentes de não realizar qualquer manutenção.
- O desenvolvimento das medidas de manutenção deve adaptar-se ao desenvolvimento da intervenção construtiva e da vegetação instalada, e orientar-se de acordo com a vegetação objectivo e os objectivos gerais da intervenção (manutenção específica da construção e da vegetação).
- A condição de base para atingir os objectivos definidos é a garantia da realização sucessiva e articulada das medidas de manutenção e acompanhamento pré planeadas no quadro da monitorização pericial do desenvolvimento das estruturas e da vegetação.
- É imprescindível, para a adequada e bem sucedida realização dos trabalhos de manutenção, que os meios financeiros e de pessoal qualificados necessários à sua realização, sejam garantidos à partida no quadro da aprovação da obra de engenharia natural.
- A organização dos trabalhos de manutenção tem de garantir a qualidade e adequação das plantas e material vegetal vivo que utilizará (como materiais de construção vivos, materiais de complemento, biomassa etc.).
- Todos os trabalhos e momentos de manutenção devem ser registados e documentados.

4.2 Sequência de manutenção

Manutenção de estabelecimento / crescimento

Medidas a concretizar após o término da obra até ao pleno estabelecimento de um coberto vegetal viável, permitindo a aceitação da obra pelo respectivo dono de obra. A determinação da viabilidade do coberto vegetal instalado será determinada de acordo com critérios de sucesso previamente definidos. Estes critérios têm de ser claramente descritos no projecto e incluem o caderno de

encargos, devendo referir-se claramente a cada local e objecto específico da intervenção.

Manutenção de desenvolvimento

Medidas de garantia do desenvolvimento da vegetação até ao final da garantia ou até atingir um estado que garanta a plena funcionalidade da instalação.

Manutenção de seguimento

Medidas necessárias à manutenção durável da funcionalidade da instalação.

Monitorização da instalação

Determinação da evolução ou regressão da instalação através de um acompanhamento e avaliação do sucesso da mesma (ver capítulo 5)

4.3 Tipos de manutenção

Medidas regulares de manutenção

Medidas de manutenção realizadas em intervalos regulares (manutenção de seguimento)

Medidas ocasionais (extraordinárias) de manutenção

Medidas de manutenção tornadas necessárias devido a eventos extraordinários ou a processos imprevistos de desenvolvimento (inundações, doenças, invasão de espécies exóticas, vandalismo, derrube pelo vento, neve excessiva, etc.).

4.4 Planeamento da manutenção

O planeamento dos trabalhos de manutenção baseia-se nos princípios orientadores da manutenção. Ele tem de incluir a sequência dos trabalhos a realizar, a abrangência e natureza dos mesmos e a avaliação através dos critérios de avaliação do sucesso (ver Capítulo 5), assim como uma descrição detalhada dos trabalhos a realizar. O plano de manutenção deve incluir todas as desenhos, imagens, cortes e perfis, tabelas e plantas necessários à compreensão e realização do mesmo.

4.5 Condução da manutenção

Manutenção específica do tipo de construção e da vegetação alvo

Cada tipo de construção exige, em função da vegetação alvo, medidas específicas de manutenção, de acordo com o estágio de desenvolvimento das plantas e o estado dos materiais.

De acordo com o tipo de material vivo utilizado há que distinguir os seguintes tipos de intervenções construtivas:

- Intervenções construtivas pioneiras (consistem exclusivamente em instalações utilizando vegetação pioneira)
- Intervenções construtivas de transição (incluem espécies pioneiras, espécies dos estádios sucessionais e espécies da comunidade alvo)
- Intervenções construtivas climáticas (constituídas exclusivamente por espécies da comunidade alvo)

Trabalhos de manutenção

Descrições e ilustrações podem ser consultadas no capítulo 8 do Manual Técnico de Engenharia Natural (ZEH, 2007).

Para gramíneas, juncos caniços e outras herbáceas aplicam-se as seguintes medidas:

- Ceifas (parcial, em faixas, sazonal, de acordo com o estado de maturação das sementes e fruto, utilizando equipamento e maquinaria ajustados às características do biótopo)
- Herbáceas infestantes (ceifas aquáticas)
- Trabalhos de melhoramento como:
- Sementeira complementar
Fertilização
Plantação de placas de relva, torrões com vegetação e outros tapetes ou blocos relvados
Rega
Recolha e disposição de resíduos

Para árvores e arbustos recorrem-se às seguintes medidas:

- Desbaste (desbastes parciais para rejuvenescimento)
- Corte dos rebentos apicais (em árvores acima do nível de cheia, ao longo de estradas sempre de acordo com considerações ecológicas e culturais)
- Desbaste de formação / remoção de exemplares isolados (retirada de exemplares de acordo com considerações hidráulicas, estéticas ou ecológicas)
- Cortes de manutenção (podas)
- Retirada de anéis de casca retirando o câmbio vascular para matar os exemplares de espécies arbóreas infestantes (retira-se um anel com cerca de 50 cm a uma altura do tronco de cerca de 100 a 150 cm):
- Trabalhos de melhoramento como:
Plantação complementar e replantação
Fertilização
Manutenção da densidade de cobertura
Irrigação
Reparação e renovação dos tutores
- Recolha e disposição de resíduos

Intervalos de manutenção

A calendarização dos trabalhos de manutenção deve ser definida de acordo com:

- Objectivo de desenvolvimento
- Perspectivas fitossociológicas e dendrobiológicas (manutenção silvícola: seleccionar o melhor período para as podas, de modo a maximizar as condições de cicatrização dos cortes)
- Considerações hidráulicas, hidrológicas, geotécnicas e de segurança
- Aspectos e considerações ecológicas e de conservação da natureza (períodos de dormência para a flora e fauna, em especial aves e peixes, etc.)
- Aspectos estéticos e paisagísticos
- Necessidades em material vivo para outras obras de engenharia natural (deve ser permanentemente sujeita a regulamentações específicas para cada local ou região)
- Capacidade de disposição adequada de resíduos e materiais não utilizados ou utilizáveis
- Capacidade de acesso (dificultada, por exemplo, no período vegetativo de prados...)

Objectivo de manutenção	Tipo de manutenção	Trabalhos de manutenção	Intervalo de manutenção	Período de manutenção

5. Controle do sucesso das intervenções de Engenharia Natural

5.1 Fundamentos do controle do sucesso

A monitorização é uma condição essencial para a garantia duradoura da qualidade das intervenções e o desenvolvimento do conhecimento técnico da engenharia natural.

- É necessário garantir a existência de meios financeiros e humanos para realizar os trabalhos de monitorização.
- A monitorização tem de ser realizada por pessoal qualificado.
- As intervenções a monitorizar devem estar claramente localizadas e documentadas. Deve ser possível uma avaliação referida a bases documentais. Para tal devem elaborar-se protocolos de avaliação, inclusive disponíveis *on line*.

5.2 Controle da instalação e do seu desenvolvimento

Estado dos materiais de construção vivos – árvores e arbustos

- Altura
- Diâmetro (a 20 cm e 100 cm de altura do tronco)
- Densidade (nº de rebentos/m²)
- Vitalidade (Graus de vitalidade de acordo com BRAUN 1-5 ou ROLOFF 0-3)
- Distribuição específica
- Etc.

Estado dos materiais de construção vivos – Gramíneas, herbáceas, juncos e caniços

- Vitalidade
- Grau de cobertura
- Elenco específico
- Número de rebentos
- Altura média das folhas
- Proporção herbáceas / gramíneas

Estado dos materiais de construção inertes

- Estado dos troncos – grau de apodrecimento (controle visual de amostras, controle técnico com um resistómetro, etc.)
- Estado dos pregos e arames
- Estado dos outros materiais
- Grau de meteorização de materiais de construção inertes de origem local
- Danos construtivos devido a erosão e deformações
- Deficiências construtivas

Estado ecológico

Determinação diferenciada do estado ecológico das intervenções construtivas de Engenharia Natural de acordo com o respectivo objectivo de desenvolvimento como por ex.:

- Conectividade de biótopos (rede ecológica)
Determinação da qualidade de habitat das espécies-alvo (Fauna e Flora)
- „Bom estado ecológico“ de acordo com a Directiva Quadro da Água
Determinação dos componentes de qualidade biológica.
- Funções ecológicas gerais: Determinação do estado eco-morfológico, influência das intervenções de Engenharia Natural na qualidade e estrutura das linhas de água.

- Deve ser clarificada a escala de referência da determinação e caracterização do estado ecológico (transeptos / troços ou intervenções isoladas / acção integrada de várias intervenções)

5.3 Controle da eficácia e da função

Funções hidrológicas e hidráulicas

- Condições de drenagem
- Protecção contra cheias, retenção,
- Retenção
- Nível de cheia
- Eventos erosivos
- Influência na regulação do escoamento, velocidade, caudal sólido e tensão de arraste.

Funções geotécnicas e de segurança

- Estabilidade
- Durabilidade
- Função técnica de segurança e protecção
- Grau de sucesso biotécnico / de segurança
- Falhas e protuberâncias
- Deformações
- Assentamentos e afundamentos
- Deslizamentos de taludes
- Formas de tronco indicadores de instabilidade
- Infiltração e ressurgências
- Bio-indicação

Funções ecológicas

- Formação de habitats
- Diversidade de habitats
- Conectividade de habitats
- Acções nos sistemas e processos naturais
- Qualidade estrutural das linhas de água

- Estabelecimento da vegetação alvo / proximidade do natural

Funções estéticas e paisagísticas

- Imagem e qualidade visual, individualidade paisagística e cultural

Funções socio-económicas

- Análise custo-benefício / análise do valor de uso
- Turismo / recreio
- Valor de uso e de vivência humana
- Criação de uma identidade própria

Avaliação global

5.4 Controle da sustentabilidade e eco-balanço

Seleção da técnica construtiva – a mais apta ao preenchimento dos objectivos de desenvolvimento.

Escolha dos materiais – melhor adequação à técnica construtiva específica:

- Utilização preferencial de materiais construtivos locais, típicos da região e do local específico de intervenção, sejam eles materiais vivos ou inertes, salvaguardando sempre as exigências técnicas construtivas.
- Certificação de origem (mantas orgânicas etc.)

Medidas de manutenção:

- Exigências
- Modo de condução (maquinaria, incluindo tipos específicos)

Directives Européennes pour le Génie Biologique

- 1. Définition de génie biologique**
 - 1.1 Avantages et limites du génie biologique
 - 1.2 Avantages et limites du génie biologique
 - 1.3 Effets des plantes et des végétaux utilisés dans les ouvrages de génie biologique
 - 1.3.1 Effets mécaniques
 - 1.3.2 Effets biologiques
 - 1.3.3 Effets esthétiques
 - 1.3.4 Effets économiques
 - 1.4 Développement historique et importance du génie biologique dans l'espace européen aujourd'hui
 - 1.5 Domaines d'application des solutions de génie biologique
 - 1.6 Génie biologique, protection de la nature et déontologie professionnelle
 - 1.7 Conditions préalables pour des travaux menés avec succès
- 2. Dimensionnement Des Ouvrages De Génie Biologique**
 - 2.1 Principes de dimensionnement des ouvrages de génie biologique**
 - 2.1.1 Présentation de modèles d'ouvrages de génie biologique
 - 2.1.2 Sollicitations sur les ouvrages de génie biologique
 - 2.1.3 Effets de la végétation afin de réduire les sollicitations
 - 2.1.4 Résistances de la végétation face aux diverses sollicitations
 - 2.1.5 Paramètres descriptifs des résistances des peuplements végétaux
 - 2.1.6 Remarques préliminaires concernant l'utilisation de végétaux adaptés à la station et l'évaluation des facteurs d'emplacement
 - 2.2 Intégration d'un ouvrage de génie biologique dans le processus global de planification**
 - 2.3 Recommandations pour des domaines d'application courants**
 - 2.3.1 Erosion sur des talus de terre
 - 2.3.2 Glissements subsuperficiels
 - 2.3.3 Ravinement sur les versants et les talus
 - 2.3.4 Berges et glaciers en bordure des cours d'eau
 - 2.3.5 Berges en bordure des plans d'eau
 - 2.3.6 Digués et barrages
 - 2.3.7 Protection des côtes et du littoral
 - 2.3.8 Ecran végétal contre le vent et les émissions polluantes
 - 2.3.9 Régulation du régime des eaux
 - 2.3.10 Zones détruites par le feu
 - 2.3.11 Les végétaux comme protection contre les avalanches
- 3. Méthodes De Construction Des Ouvrages De Génie Biologique**
 - 3.1 Manuel de construction FEGB 2007
 - 3.2 Application des types de construction
 - 3.2.1 Critères de décision
 - 3.2.2 Matrices de décision
- 4. Entretien Des Ouvrages De Génie Biologique**
 - 4.1 Principes des travaux d'entretien
 - 4.2 Principes des travaux d'entretien
 - 4.3 Délimitation des travaux d'entretien
 - 4.4 Planification des travaux d'entretien
 - 4.5 Mise en œuvre des travaux d'entretien
- 5. Contrôle De L'efficacité Des Interventions De Génie Biologique**
 - 5.1 Principes des mesures de contrôle d'efficacité
 - 5.2 Contrôle de l'état et du développement des ouvrages et de la végétation
 - 5.3 Contrôle de l'efficacité et de la fonctionnalité des ouvrages et de la végétation
 - 5.4 Contrôle de la durabilité et écobilan

1. Principes des travaux de génie biologique

1.1 Définition du génie biologique

Le génie biologique, ou génie végétal, représente l'ensemble des techniques et stratégies utilisant les propriétés mécaniques et/ou biologiques des végétaux, pour : 1/ le contrôle, la stabilisation et la gestion des sols érodés ; 2/ la restauration, la réhabilitation ou la renaturation de milieux dégradés, y compris dans leur dimension paysagère ; 3/ la phytoréhabilitation ou phytoremédiation

La principale caractéristique du génie biologique est l'utilisation de plantes et de parties végétales comme matériaux vivants, de telle sorte qu'elles puissent apporter une contribution essentielle à la protection durable contre toutes formes d'érosion au cours de leur développement. En phase initiale, il est fréquent que des matériaux non-vivants soient utilisés, assurant dans certains cas en grande partie un rôle de stabilisation.

Néanmoins, les matériaux d'origine vivante sont privilégiés, car lors de leur phase de décomposition lente, la stabilisation de la couverture végétale s'accroît. En plus, ils s'intègrent dans le cycle de substances organiques, de même manière que les espèces indigènes locales, typiques et adaptées à la station (autochtones), puisque celles-ci, intrinsèquement, favorisent la diversité biologique du paysage local.

Les objectifs du génie biologique sont la protection et la sécurisation des personnes et des infrastructures, ainsi que le développement des éléments du paysage.

1.1 Avantages et limites du génie biologique

Les **champs d'application du génie biologique** résident dans la sécurisation et la restauration des talus, versants, berges, lits majeurs, digues, glaciers, barrages, sites et paysages miniers, etc., ainsi que les surfaces liées à la construction des infrastructures. Principalement, les techniques du génie biologique visent :

- le long des cours d'eau, à la consolidation des berges sous influence de forces érosives, au guidage de la ligne principale du courant, à la revitalisation et la renaturation des cours d'eau artificialisés, à l'amélioration de la rétention des zones humides, ainsi qu'à l'amélioration de la protection contre les crues, à la protection de digues, barrages et glaciers
- sur les talus et sur les versants, à empêcher l'érosion en surface et en profondeur, à la végétalisation et à la stabilisation des glissements superficiels et des ruptures de pente, ainsi qu'à la protection rapide et sur le long terme des zones exposées aux glissements de terrain, ceci au moyen d'un ancrage par des racines et d'un drainage du sol par l'évapotranspiration
- à l'amélioration du régime des eaux aux niveaux local et régional, par exemple par le reboisement et la remise en état du couvert végétal sur les versants, même en altitude ;
- sur les rivages lacustres et marins, à la fixation du trait de côte et des berges menacées d'érosion, ainsi qu'à la stabilisation des digues et des dunes
- à la création ou la renaturation d'habitats naturels au sein des zones humides
- à la consolidation, au développement et à la végétalisation de nouvelles structures dans les

paysages miniers et dans les friches industrielles.

L'utilisation des plantes est possible partout où un espace vital potentiel existe pour la végétation. **Une couverture végétale protectrice et stabilisatrice, visant à empêcher l'érosion, est possible en tant que remplacement ou comme supplément d'une technique de construction à condition que les capacités techniques et biologiques des plantes soient suffisantes.** Lors de la recherche d'une solution d'application du génie biologique, il est évident que des connaissances issues des disciplines du génie civil, ainsi que du domaine biologique et de l'écologie paysagère, doivent être réunies. L'objectif est d'obtenir sur le site en question, à partir de plantes indigènes et adaptées à la station, un peuplement végétal durable et capable de remplir les exigences liées à la consolidation technique du site.. Ainsi, aux côtés des mesures de protection contre l'érosion et des mesures de régulation du régime des eaux, les applications de génie biologique ont aussi des implications sur le microclimat, la structure et le fonctionnement du biotope et du paysage d'un espace donné.

Avantages du génie biologique par rapport au génie civil :

- efficacité de la stabilisation et résistance mécanique du sol croissantes au fur et à mesure du développement des végétaux et leur associations végétales
- réaction favorable aux perturbations grâce à la résilience des végétaux
- forces d'arrachement en partie dissipées grâce à la plasticité et la souplesse des parties aériennes et limitées par un ancrage profond dans le sol
- induction d'actions hydromécaniques dans le sol (interception, absorption et transpiration d'eau, augmentation de la cohésion du substrat, structuration du sol, effet de cintrage, etc).
- amélioration relative de la biodiversité et de la qualité écologique des habitats
- non perturbation des relations milieu aquatique/nappe phréatique (pas d'imperméabilisation des sols)
- augmentation des capacités auto-épuratrices des milieux restaurés
- concurrence d'espèces exotiques envahissantes
- moindres impacts morphologiques et hydrologiques induits à l'aval des protections, par rapport à des interventions au moyen de techniques issues du génie civil
- amélioration de la qualité du paysage
- Bénéfices pour les enjeux socio-économiques (tourisme, loisirs de proximité)
- travaux nécessitant peu d'interventions et d'énergie, encourageant l'autonomie du milieu.

Une **préférence pour un matériel végétal d'origine locale** et de nature sauvage, au lieu d'un matériel d'origine exotique et modifié, procure de plus les effets positifs suivants :

- effet de protection avec de meilleures chances de réussite et durable, avec une meilleure adaptation aux conditions locales et aux particularités climatiques et géologiques régionales

- une meilleure intégration au sein des associations végétales locales (les variétés « horticoles » peuvent avoir un comportement différent des variétés « sauvages »)
- meilleure intégration durable dans le paysage
- meilleur rapport coûts-avantages.

Les **limites de l'application du génie biologique** sont atteintes lorsque les effets décrits, en particulier les effets mécaniques des plantes, sont insuffisants, par exemple lorsque :

- la contrainte mécanique au regard des contraintes locales (proximité d'une habitation par exemple) dépasse la résistance des végétaux
- l'enracinement des plantes n'est pas assez profond pour résister aux ruptures de pente
- les conditions de germination et de vie, même avec l'aide de matériel auxiliaire, sont si mauvaises que la végétation peine à se développer
- des travaux d'entretien inadéquats mènent à des modifications des conditions locales de croissance, influençant alors défavorablement les travaux de protection.

Afin de favoriser les solutions de génie biologique, on doit être conscient de leurs **inconconvénients par rapport à celles du génie civil** :

- Les travaux de génie biologique sont liés au rythme de croissance des plantes, ainsi qu'aux contraintes écologiques du monde végétal
- Il est fréquent qu'un espace plus grand que celui perçu initialement soit nécessaire pour le développement de la végétation
- Les racines et les troncs des plantes peuvent provoquer des tensions dans les jointures des constructions techniques par leur croissance continue
- La croissance des racines peut conduire à la déformation des constructions
- Dans le cas de ligneux d'un poids important, il se peut qu'un couple de force autour du pied provoque des tensions et cisaillements du système racinaire de la souche
- Dans les zones de tension, des ameublissements du sol ou des déchaussements d'ouvrages peuvent se produire.
- Des limites géotechniques peuvent être atteintes.
- Les possibilités de calcul encore restreintes dans le domaine du génie biologique engendrent de nombreuses incertitudes.

Ces inconconvénients doivent souvent être compensés par une gestion adaptée dans le temps et l'espace. Dans de nombreux cas, des solutions d'ingénierie peuvent être trouvées en prenant en compte la nature environnante.

1.3 Effets des plantes et des végétaux utilisés dans les ouvrages de génie biologique

Les effets des plantes et des végétaux sont connus grâce à de nombreuses expériences et observations, souvent très anciennes.

Différentes **propriétés** permettent aux plantes d'assurer différentes fonctions et de répondre efficacement aux modifications de leur environnement, et ainsi d'être facilement et avantageusement utilisées pour la

construction d'ouvrages de protection. Elles peuvent :

- se reproduire de différentes manières – sexuée et/ou végétative ;
- se régénérer après avoir subi des dégâts et/ou des perturbations biotiques ou abiotiques
- assainir l'eau du sol jusqu'à la surface par évapotranspiration ;
- lier différents matériaux et entrelacer des structures ;
- recouvrir des surfaces dénudées et dégradées ;
- récolter et retenir l'eau, ainsi que des matières mobiles et dissoutes ;
- renforcer des remblais et supporter des ensevelissements par la formation de racines et de pousses (rhizomes) supplémentaires ;
- s'adapter à un changement de l'écoulement des eaux et aux modifications des conditions locales de la station.

De ces diverses possibilités ressortent des effets complexes des plantes que l'on peut classer en quatre catégories : effets mécaniques (1), effets biologiques (2), effets sur l'esthétique (3) et effets économiques (4).

L'utilisation du génie biologique débouche sur des systèmes vivants, se développant selon une succession naturelle, c'est-à-dire qui ont tendance à se développer par une autorégulation dynamique, sans apport énergétique artificiel tout en restant en équilibre. Avec des coûts d'entretien aussi restreints que possible, un choix correct des matériaux vivants comme non-vivants et de la méthode de construction, peut mener à une durabilité particulièrement élevée (cf. chapitre 4). Il faut toutefois souligner que dans certains espaces urbains fortement anthropisés, ces objectifs exigent des soins particuliers.

1.3.1 Effets mécaniques

Parmi les effets mécaniques principaux du génie biologique, en particulier en ce qui concerne leur capacité de consolidation des plantes, les effets suivants sont d'une importance particulière :

- Couverture du sol par les végétaux visant à la protection contre de fortes précipitations, l'érosion du sol par l'eau et le vent, les cavités neigeuses et les chutes de pierres ;
- Effet d'ancrage mécanique grâce aux racines ;
- Fixation et renforcement du sol par la fixation des particules du sol à l'aide des racines des plantes, des humines, des mycorhizes et de la microfaune, ancrage de la couche superficielle du sol avec le sous-sol, évitement de l'affouillement des matériaux fins par un effet filtrant ;
- Développement de la rugosité du terrain par des pousses, branches et feuillages, ainsi qu'à travers la rétention des éboulis, des galets et de la neige ;
- Ralentissement et détournement des courants d'eau et d'air ;
- Effets autour de l'espace racinaire, en particulier effet brisant par le grossissement des racines, ameublissement du sol lors du mouvement des souches et compactage en présence d'une pente dans le secteur du système racinaire ;
- Amélioration de la cohésion et de la résistance du sol par l'élimination de l'eau du sol ;

- Influence favorable sur le bilan hydrique par l'évaporation de l'eau du sol vers la surface, la rétention des eaux météoriques et de l'eau interstitielle, tout en maintenant une infiltration équilibrée.

1.3.2 Effets biologiques

Les interventions de génie biologique mènent aux améliorations suivantes sur la qualité de l'environnement :

- Effets positifs sur les caractéristiques du sol tels que l'augmentation du volume des pores, l'amélioration des conditions de vie des micro-organismes, la formation d'humus et d'éléments nutritifs végétaux ;
- Développement d'associations végétales (par l'effet de succession) et amélioration des structures de biotope ;
- Création d'habitats naturels pour la faune ;
- Assimilation et fixation de substances eutrophisantes en partie toxiques ;
- Modification favorable du microclimat ambiant ;
- Absorption du bruit de faible ampleur ;
- Filtrage des poussières, gaz d'échappement et dépôts en tous genres sur les parties végétales.

1.3.3 Effets esthétiques

Des dommages causés au paysage peuvent être atténués avec des interventions de génie biologique, tels que :

- Amélioration visuelle du paysage par des plantes et groupements végétaux ; Remplacement d'ouvrages de génie civil par des associations végétales, lorsqu'elles sont en mesure de garantir une stabilité comparable ;
- Intégration rapide des travaux de terrassement dans la végétation locale et donc dans le paysage environnant ;
- Insertion visuelle d'ouvrages de génie civil au paysage par l'utilisation d'une végétation adaptée à l'environnement végétal local
- Embellissement des bâtiments ;
- Création de rideaux végétaux par rapport à des ouvrages d'ingénierie massifs.

L'application du génie biologique contribue ainsi à restreindre les dérangements visuels du paysage. De plus, le génie biologique permet d'aménager des ouvrages de génie civil de façon compatible avec l'environnement naturel.

1.3.4 Effets économiques

Le génie biologique permet de remettre en culture des surfaces sans végétation, avec de faibles dépenses énergétiques et matérielles. De cette façon, le génie biologique apporte une contribution non négligeable à la mise en œuvre d'éléments durables dans le secteur de la construction :

- Les ouvrages végétaux, aujourd'hui en grande partie mis en place mécaniquement, sont beaucoup plus efficaces et permettent d'économiser des frais substantiels comparativement à des travaux purement du génie civil, par exemple grâce à l'utilisation de variétés de plantes multipliées par voie végétative ;
- L'utilisation de matériaux vivants se régénérant permet de réduire les dépenses matérielles, même si au départ des frais de main d'œuvre plus élevés peuvent être à prévoir ;
- Une utilisation opportune des matériaux végétaux, de la terre et des pierres sur place peut être

assurée par une planification adaptée aux conditions locales, en réduisant simultanément les frais de transport et les transports de masse ;

- Les frais d'entretien des ouvrages de génie biologique peuvent également être réduits grâce à l'auto-entretien des plantes vivantes ;
- Lors de l'apparition de dommages nuisibles aux ouvrages de génie biologique, les frais d'assainissement restent souvent relativement faibles grâce aux capacités régénératives des végétaux implantés.

1.4 Développement historique et importance du génie biologique dans l'espace européen aujourd'hui

L'idée fondamentale du génie biologique permet de créer des synergies entre les exploitations du paysage par les hommes et les intérêts de la nature. La structure de pensée du génie biologique a été mise au point en Europe, vraisemblablement car la pression d'une exploitation du paysage par les effets de l'urbanisation y a été et reste particulièrement élevée, en raison d'un peuplement dense et de sa longue tradition d'aménagement du territoire.

Depuis des siècles, des méthodes de construction prônant l'utilisation de plantes vivantes et de parties végétales dans l'aménagement des eaux et les travaux de terrassement sont connues. A partir de ces travaux à l'origine artisanaux, le génie biologique s'est développé en un domaine complexe orienté vers l'application pratique des connaissances, avec la contribution des éléments suivants :

- Mise en valeur des connaissances en l'écologie, avec pour objectif une considération géographique approfondie des espaces naturels ;
- Analyse de l'effet de certaines plantes, visant à mieux envisager leur potentiel pour une utilisation réfléchie dans l'espace et dans le temps ;
- Utilisation de matériaux de construction appropriés pour des espaces naturels donnés ;
- Utilisation du développement de la technique pour des méthodes de construction végétales ;
- Mesures d'entretien et de développement de la végétation selon l'établissement d'objectifs précis ;
- Evaluation scientifique de la réussite des interventions ;
- Utilisation d'espèces végétales locales, de matériaux de construction d'origines végétale et naturelle, visant à la protection et à la conservation de la nature lors de travaux de construction, ainsi qu'à l'amélioration de la structure et du fonctionnement des biotopes et des cours d'eau ;
- Renonciation aux engrais et à certains matériels d'aide à la végétalisation, lorsque ceux-ci nuisent aux cours d'eau et aux zones protégées ;
- Utilisation de matériel de construction moderne et compatible avec la nature.

En plus des nécessités toujours croissantes de consolidation des talus lors de travaux de voirie, le long des côtes et dans l'aménagement hydraulique, de nouveaux enjeux majeurs se révèlent également pour l'avenir :

- Le changement climatique et les événements extrêmes conduisent à des phénomènes d'érosion croissants, notamment dans les problématiques liées

aux crues et au pergélisol (permafrost). Le génie biologique peut proposer des solutions adaptées

- Les interventions de génie biologique contribuent à diminuer les nuisances liées aux modifications actuelles du régime des eaux et des conditions de leur écoulement dues aux précipitations intenses et aux périodes de pluie
- L'application du génie biologique atténue les processus de dégradation et de désertification
- Une couverture végétale de protection, réalisée par l'application de compositions végétales riches en espèces locales adaptées à la station, contribue à protéger et à améliorer la diversité biologique
- La faible consommation de matériaux et d'énergie, ainsi que l'utilisation de matériaux pouvant se régénérer lors de la mise en œuvre des ouvrages de génie biologique, assurent la préservation des ressources locales
- Les plantations de peuplements ligneux contribuent à la fixation du CO₂
- Le génie biologique répond au respect des objectifs du Protocole de Kyoto, des Accords de Rio et des Directives européennes de protection du sol, ainsi que la réalisation des objectifs de la Directive-cadre sur l'eau de l'UE, notamment par un effet d'interconnexion des habitats naturels.

Ce cadre de réflexion sur le génie biologique encourage la prise de conscience environnementale et fait avancer une nouvelle conception de l'acte de construire en Europe.

1.5 Domaines d'application des solutions de génie biologique

Aujourd'hui, les méthodes de construction du génie biologique sont appliquées dans de nombreux travaux de consolidation de plusieurs domaines, notamment les suivants :

- Aménagement du paysage
- Gestion naturelle des eaux
- Réglementation agricole
- Aménagement fluvial et aménagement hydraulique
- Protection des côtes et du littoral
- Corrections torrentielles et paravalanches
- Hydraulique industrielle
- Industrie minière
- Industrie d'extraction (pierre et terre)
- Aménagement des eaux en zone urbaine
- Gestion et traitement des déchets
- Construction de centres sportifs et d'équipements de loisirs
- Construction de places d'aérodrome, de routes et de voies ferrées
- Construction de chemins agricoles et sylvicoles
- Construction de pistes cyclables, chemins piétons et sentiers cavaliers
- Autres travaux de génie civil.

En plus de ces domaines, les connaissances fondamentales liées au génie biologique sont appliquées dans la géotechnique, le génie hydraulique et le bâtiment.

Les branches professionnelles suivantes permettent de transmettre les savoirs par l'intermédiaire de la formation initiale et continue :

Branche professionnelle	Connaissances techniques concernant le génie biologique	Tâches exécutées lors de la mise en œuvre d'un projet
Botanique	Sociologie végétale (phytosociologie) Géographie végétale (phytogéographie)	Intégration de la végétation comme fondements de la planification, contrôle végétal, contrôle de la qualité et évaluation des résultats, contrôle du développement de la végétation
Sciences de la terre	Pédologie, amélioration du sol, mécanismes de l'érosion, protection des côtes et des rives, climat et microclimat	Expertises géoscientifiques Protection du sol
Ingénierie en horticulture	Sol, fertilisation, amélioration des terres, plantes Méthodes de plantation	Colonisation des plantes et entretien Évaluation de la végétalisation
Ingénierie agricole	Sol, fertilisation, amélioration des terres, plantes Méthodes d'ensemencement	Colonisation des plantes et entretien Végétation herbacée, évaluation de l'ensemencement
Ingénierie forestière	Sol, fertilisation, amélioration des terres, plantes	Boisement, entretien des forêts protectrices, aménagement des ruisseaux,
	Sylviculture, exploitation forestière, livraison de bois	consolidation des pentes dans les sentiers forestiers, évaluation du taux de réussite du boisement
Aménagement de jardin Aménagement du paysage Entreprise de reverdissement	Petits aménagements hydrauliques et travaux de terrassement, aménagement d'un site et culture du sol Colonisation des plantes	Ebauche de projet, construction et entretien, interventions de génie biologique
Architecture du paysage Conception du paysage	Processus de planification, plans-cadres, planification d'objets, études d'incidences sur l'environnement, plan d'accompagnement des soins paysagers Examens de compatibilité des habitats de la faune et de la flore Petits aménagements hydrauliques et travaux de terrassement, aménagement d'un site et culture du sol Colonisation des plantes	Plans-cadres, planification d'objets, contrôle de construction, ébauche d'interventions de génie biologique
Ingénierie hydraulique Aménagement fluvial Correction torrentielle Protection des côtes	Aménagements hydrauliques de protection, ingénierie hydraulique, hydrotechnique, stabilité statique, technologie du bâtiment, plans-cadres, planification d'objets, mise en œuvre	Plans-cadres, expertises spécialisées, hydrotechnique, faisabilité, planification d'objets, contrôle de construction, mise en œuvre Évaluation des résultats de l'aménagement hydraulique
Ingénierie dans la construction routière	Construction d'axes de circulation, technique de construction, terrassement, drainage, stabilité statique, plans-cadres, planification d'objets, mise en œuvre	Plans-cadres, planification d'objets, contrôle de construction, mise en œuvre
Ingénierie dans les activités minières	Géotechnique, technique de construction, technologie des processus, plan-cadre, plan d'exploitation technique, planification d'objets	Plans-cadres, planification d'objets, contrôle de construction, mise en œuvre
Géotechnique	Résistance au cisaillement, stabilité statique	Expertises, faisabilité, topographie, stabilisation des versants et protection des berges, projet d'assainissement, évaluation des résultats géotechniques
Ingénierie dans les travaux ruraux et de mensuration	Technique de génie rural, amélioration des terres, construction de routes, pédologie, agriculture, hydrotechnique	Plans-cadres, mesures d'amélioration des terres, construction des routes, structures agricoles, planification d'objets, contrôle de construction, mise en œuvre, évaluation des résultats

1.6 Génie biologique, protection de la nature et déontologie professionnelle

Le génie biologique peut participer substantiellement à l'amélioration des rapports écologiques dans les habitats naturels, conformément à la Directive-cadre sur l'eau de l'UE, la Directive de protection contre les crues, la Directive de protection du sol ainsi que d'autres Directives (par exemple pour la protection des espèces et des biotopes, pour la conservation de la qualité de l'environnement) et ainsi contribuer, par ses diverses mesures, au rétablissement de surfaces perturbées vers un état proche de la nature. Les travaux de génie biologique sont synonymes de durabilité.

La protection de la nature est d'office l'un des objectifs des mesures inhérentes au génie biologique, même si, lors de travaux de stabilisation par exemple, la garantie du droit d'usage ou les exigences d'une exploitation viennent au premier plan.

Toutefois, des conflits peuvent exister entre les objectifs du génie biologique et ceux de la protection de la nature. Lorsque les intérêts de la protection de la nature priment, l'application des méthodes de génie biologique peut être rejetée afin de ne pas bouleverser les processus de développement quasi-naturels et modifier les configurations naturelles du terrain. De même, le choix de plantes d'après leurs qualités pionnières et la promotion de plantes indigènes dans le paysage ne peuvent être exclusivement entrepris selon des critères de protection de la nature.

Comme dans toutes les disciplines d'ingénierie, l'expérience, les connaissances et les compétences professionnelles sont utilisées dans le génie biologique afin d'assurer un emploi optimal et économique des ressources, ainsi que la proportionnalité des moyens mis en œuvre.

La déontologie professionnelle du génie biologique applique le principe « autant que requis, mais aussi peu que possible », de sorte que la dépense énergétique la plus faible possible soit appliquée dans la planification des mesures. Ce principe est un engagement du génie biologique (directive déontologique – éthique professionnelle).

1.7 Conditions préalables pour des travaux menés avec succès

Jusqu'à présent, des travaux mettant en œuvre des méthodes de génie biologique ont été réalisés avec succès lorsque les disciplines spécialisées nécessaires à la réussite du projet ont été prises en considération de manière étroite et intégrée. Pour ce faire, les points suivants doivent être observés :

- Évaluation du niveau de protection à atteindre: est-il effectivement possible de mettre en œuvre des solutions de génie biologique ?
- Examen consciencieux de l'espace naturel et des conditions de l'emplacement telles que le caractère microclimatique de la surface d'intervention, analyse des substrats avec une attention sur les propriétés chimiques, physiques et hydrologiques du sol ;
- Évaluation des conditions d'éclairage ;
- Utilisation des connaissances fondamentales en floristique et en phytosociologie ;
- Exposé des principes d'évaluation et vérification

des données hydrologiques, hydrauliques, géomécaniques et géotechniques concernées (cf. chapitre 2 des directives EFIB) ;

- Évaluation des interactions possibles avec l'infrastructure existante ;
- Considération des possibilités d'amélioration de l'emplacement ;
- Détermination de la végétation convoitée, type de plantes pionnières et autres phases de succession et mesures d'entretien à mettre en place pour atteindre l'objectif ;
- Considération d'espace de référence dans des endroits naturels similaires;
- Respect des règles techniques (normes, directives, manuels spécialisés) ;
- Détermination des mesures d'entretien et évaluation des résultats (cf. chapitres 4 et 5 des présentes Directives).

En Europe, lors de la planification et de la mise en œuvre des interventions de génie biologique, le manuel de construction de la FEGB (ZEH 2006) devrait être utilisé. Cette publication recueille les expériences professionnelles de nombreuses personnes actives dans le domaine et peut substantiellement contribuer à une désignation uniforme des méthodes de construction en Europe (cf. chapitre 3 des Directives).

Lors de tous travaux de génie biologique (la répartition des tâches de planification selon les catégories de difficultés I - III correspond à la norme EN DIN 1054 géotechnique - EC 7), les lois et les règles techniques du pays en question doivent être respectées (par ex. les règlements de prévoyance contre les accidents). En outre, les responsables des projets sont tenus d'observer leurs propres consignes spécifiques. C'est pourquoi des solutions différentes peuvent résulter de données similaires et de conditions locales semblables dans les différents pays européens.

2. Dimensionnement des ouvrages de génie biologique

2.1 Principes de dimensionnement des ouvrages de génie biologique

Conformément à DIN 1055-100 et WETZELL 2006, un ouvrage doit être construit et développé de manière à supporter, avec une fiabilité et une protection adéquate, toutes actions et influences pouvant potentiellement se produire à son encontre durant son établissement et son exploitation prévue, tout en évitant les défaillances et les déformations majeures. Pendant la durée de son exploitation, l'ouvrage doit conserver sa capacité de charge, sa capacité d'utilisation et ses propriétés de durabilité, avec des frais d'entretien appropriés.

Lors de la phase de planification de la structure portante, l'ouvrage sera ébauché d'après des valeurs empiriques et modélisé pour l'étude statique et son dimensionnement, c'est-à-dire que l'ouvrage sera réduit à ses dimensions essentielles et à ses propriétés physiques. On chargera le modèle par des sollicitations (S) constantes (g) ou variables (q). Pour le calcul des diverses sollicitations, des valeurs caractéristiques S_k (indice k) sont déterminées par les recherches en sciences naturelles et en ingénierie.

En multipliant par un coefficient partiel de sécurité spécifique γ_x , on obtient la valeur de calcul (indice d) de l'effet :

$$S_{d,x} = S_{k,x} \times \gamma_x$$

L'ouvrage ou l'élément partiel offre une résistance (R) pouvant être déduite des caractéristiques connues des sciences naturelles (indice k), donc R_k . En divisant par un coefficient partiel de sécurité correspondant γ_i , on obtient la valeur de calcul de la résistance R_d :

$$R_{d,i} = R_{k,i} / \gamma_i$$

Pour le dimensionnement, les situations suivantes sont examinées :

Cas de charge 1 (selon EC7 « BS-P ») : Situation de charge sur l'ouvrage constante ou récurrente - règle générale.

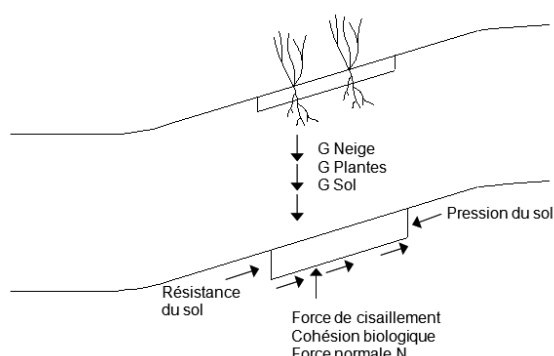
Cas de charge 2 (selon EC7 « BS-T ») : Combinaison rare de charge sur l'ouvrage des événements, respectivement situation temporaire, par exemple lors de la construction ou lors de la situation initiale, lorsque les ouvrages de protection du génie biologique peuvent aussi être évalués avec un effet réduit ou sans effet de la végétation.

Cas de charge 3 (selon EC7 « BS-A ») : Situation de charge sur l'ouvrage inhabituelle.

2.1.1 Présentation de modèles d'ouvrages de génie biologique

De façon analogue à la planification d'une structure portante, un ouvrage ou un élément partiel d'ouvrage sera défini par une coupe fermée (GROSS et al. 2006). Celle-ci peut tout autant représenter l'ensemble de l'ouvrage de revêtement du génie biologique (végétation + enracinement du sol, resp. influences biologiques du sol), que des coupes de secteurs intéressants pour l'étude.

L'élément de protection est placé en situation d'équilibre, dans lequel toutes les sollicitations et toutes les résistances sur la saignée sont appliquées en tant que forces externes.



Abstraction des forces externes sur un ouvrage du génie biologique (Modèle de structure simple)

2.1.2 Sollicitations sur les ouvrages de génie biologique

Charge nette d'une couche de revêtement végétalisé en tant que poids de la végétation plus poids de la couche portante de la végétation

La charge nette se compose du poids de la masse végétale en surface et du poids de la couche portante de la végétation. Des indications sur la densité du sol $\gamma' [\frac{kN}{m^3}]$ sont disponibles dans les tableaux techniques spécialisés, par exemple dans les normes DIN 1055, respectivement dans FLL 2008 pour le poids de la végétation en fonction de la surface.

Neige

Les sollicitations des charges dues aux masses de neige agissent sur les talus et, le cas échéant, mènent à des érosions ou à des glissements de terrain. Pour évaluer la situation, on se basera sur des expériences régionales.

Vent

Les sollicitations relatives au vent dépendent de l'espace naturel et des reliefs. Pour l'Allemagne, des modèles de calcul sont disponibles dans les normes DIN 1055-4. Des indications quant au développement de la végétation sont disponibles dans la littérature spécialisée sur la statique des arbres, par ex. SINN 1988 ou WESSOLLY et ERB 1998.

Rafales de pluie et orages de grêle

Les rafales de pluie constituent des sollicitations importantes dans le domaine de la protection contre l'érosion sur des surfaces nues ou en partie recouvertes de végétation. Des explications physiques et des paramètres sont disponibles dans MORGAN 1999. La classification des événements de précipitation doit se faire selon leur fréquence de répétition conformément aux statistiques météorologiques, pour l'Allemagne par exemple KOSTRA Atlas du DWD 1997.

Écoulements superficiels diffus sur des talus

Lors de fortes précipitations, des phénomènes d'érosion se produisent aussi bien à la suite de rafales de pluie qu'en raison d'écoulements superficiels diffus. Les érosions dépendent de l'intensité des précipitations, la perméabilité du sol, la pente et la longueur du versant ainsi que des effets de la végétation. Des indications sont disponibles pour l'Allemagne dans MORGAN 1999, DVWK 1996 et KOSTRA ATLAS du DWD 1997.

Effets des animaux de pâturage et du gibier

Les effets dus aux animaux de pâturage et au gibier doivent être répertoriés sur le terrain et diminués par des mesures préventives appropriées.

Effets des activités humaines

Les activités humaines telles que le ski, la luge, le motocross, le vélo tout terrain ou encore la navigation et les baignades doivent être répertoriées et examinées sur le terrain.

Effets des courants d'eau

Les courants d'eau dans les rigoles, ravines et fossés sur les talus et sur les versants, ainsi que dans les cours d'eau et dans les canaux peuvent conduire à de l'érosion et des déplacements du sol.

L'origine d'un mouvement est importante pour des considérations liées à la protection contre l'érosion. Dans la littérature spécialisée hydraulique, l'effet des courants hydrauliques est caractérisé par la force tractrice τ_0 [N/m^2] et la vitesse d'écoulement v [m/s]. En règle générale, seules des valeurs moyennes issues de calculs unidimensionnels de la hauteur du niveau d'eau sont disponibles pour un profil transversal de l'écoulement, auxquelles sont assignés des coefficients de renforcement d'après SCHROEDER et ROEMISCH 2001. Pour de larges cours d'eau ou des écoulements dans les zones alluviales, des paramètres déterminés par des calculs d'écoulement bidimensionnels sont opportuns. Les valeurs caractéristiques des diverses sollicitations dépendent fortement du choix de la fréquence de récurrence d'une crue de dimensionnement. Pour des stabilisations de berges de moindre importance, par exemple dans des zones de cultures agricoles ou maraîchères, la prise en compte des crues quinquennales peut suffire ; en revanche, pour des voies de communication ou des bâtiments importants, des événements centennaux doivent être à la base des calculs (cf. DIN 19661-1).

Impacts des vagues, ressac

Un ressac intervient suite à l'apparition de vagues sur les rives d'un grand plan d'eau, le long de larges cours d'eau, une baie de mer ou une voie de navigation. Le ressac dépend essentiellement de la hauteur des vagues, de la forme du rivage et des effets de la rugosité, par exemple celle de la végétation. La hauteur des vagues naturelles dépend de la force du vent, de la durée et de la longueur de développement de la vague. Les vagues d'un bateau dépendent du tonnage, de la vitesse et de la distance à la rive du navire. Des indications plus précises sont disponibles dans la littérature spécialisée sur la protection côtière et les voies de navigation.

Affouillement par des matières flottantes

Dans les cours d'eau, les courants provoqués par une crue ainsi que les remous des vagues entraînent fréquemment des débris flottants ou des morceaux de glace. La prise en compte de cet effet combiné est d'une importance considérable pour la stabilisation des berges par des techniques de génie biologique. L'évaluation se fait au moyen des expériences locales.

Pression du sol active

Lors de stabilisation de versants pentus, une pression du sol active peut se produire dans un espace restreint. Celle-ci peut être déterminée d'après les règles géotechniques, par exemple selon SCHMIDT 2006, DIN 4085.

Pression hydraulique et portance

Une pression hydraulique et une portance de grandeurs différentes peuvent opérer sur des stabilisations de rives et de versants. Des combinaisons défavorables de niveaux élevés des nappes d'eau souterraine, assortis de niveaux bas dans les cours d'eau, sont déterminantes pour l'évaluation de la pression hydraulique. Ce différentiel de niveau d'eau devrait avoir une fréquence de répétition appropriée.

2.1.3 Effets de la végétation afin de réduire les sollicitations

Réduction des effets des courants d'eau par des interventions de génie biologique dans les bassins versants

Dans des bassins versants de petite dimension, la couverture végétale a une influence nette sur le débit de pointe de l'onde de crue et de sa vitesse d'approche. En présence de ravinement ou d'érosion en profondeur dans les petits ruisseaux, une végétalisation appropriée du bassin versant contribue de façon claire et manifeste à l'abaissement des débits de pointe, ainsi que des vitesses d'écoulement et forces tractrices relatives.

Réduction de la pression hydraulique et de la portance par des interventions de génie biologique dans les bassins versants

Sur les pentes et sur les versants, la végétation impacte fortement le bilan hydrique du versant à travers l'évapotranspiration. Elle influe sur la fréquence et la force des eaux d'infiltration, ainsi que sur la pression hydraulique au pied de la pente. Une prévision de l'effet en regard d'un projet est encore difficile à estimer. A contrario, on dira plutôt que des glissements sur des sols déboisés peuvent poser problème.

Réduction des effets des rafales de pluie, orages de grêle et vent tempétueux par des formations végétales faisant écran de protection

Les sollicitations dues aux rafales de pluie, orages de grêle ou au vent tempétueux sur des sols bruts sans végétation sont clairement moindres en présence de formations végétales faisant office de protection et d'écran, que sur des surfaces ouvertes.

2.1.4 Résistances de la végétation face aux sollicitations

En ce sens sont compris, tel qu'indiqué au point 2.1.1, les végétaux et les secteurs de sol enracinés et ayant subi une influence biologique autre (champignons de sol, gels) pris comme un ensemble. Pour des considérations statiques, ces blocs ou entités seront représentés globalement ou en parts découpées de leur environnement.

Résistance face aux rafales de pluie et aux ruissellements superficiels diffus ayant comme conséquence une érosion de surface et en rigoles

Les expériences en Europe centrale montrent qu'une couverture végétale complète offre une bonne protection contre l'érosion due aux rafales de pluie et aux ruissellements superficiels diffus. Un recouvrement végétal n'est nécessaire que pour des sols sensibles à l'érosion et ne vaut pas sur des secteurs rocheux ou pierreux.

Les pièces végétales en surface de la couche herbacée, incluant les systèmes racinaires superficiels et les éléments végétaux morts accrochées aux tiges et aux racines, comptent comme couverture végétale. Comme critère d'acceptation d'un engazonnement, DIN 18917 recommande une couverture de 50 %.

Résistance à l'érosion en ravines lors de ruissellements en surface

Une faible concentration d'écoulement au bas d'un

versant, se produisant en fonction du relief de la pente, de l'inclinaison, du type de sol, de la fréquence et de l'intensité des précipitations, mène à la formation de ravines de 0,10 à 0,40 m de profondeur. Une telle formation de ravines peut être évitée par une combinaison d'arbres et d'arbustes adaptés à la station dont les composants recouvrent le sol. Une couche herbacée robuste recouvrant le fond de la ravine, avec un enracinement et une pénétration suffisamment profonde des racines ainsi qu'un degré de couverture élevé, sont essentiels.

Résistance face aux courants d'eau

Dans la littérature, aussi bien la force tractrice critique τ_{crit} (N/m²) que la vitesse d'écoulement moyenne critique v_{crit} (m/s) sont employées pour nommer la résistance de la végétation face aux courants d'eau dans les ravins et dans les cours d'eau. Les valeurs s'appliquent aux conditions d'écoulement homogènes sans transport de fond, à condition que les secteurs bordant les éléments de construction du génie biologique, par exemple les rives au pied des berges, soient suffisamment protégés contre l'érosion. Des valeurs pour les forces tractrices et les vitesses d'écoulement critiques sont disponibles dans DIN 19661-2, GERSTGRASER 1998, RAUCH 2006 et JOHANNSEN 1997 et 2008.

Dans les ravins propices au charriage, des peuplements serrés de buissons peuvent ralentir si fortement le courant que l'érosion fait place à un dépôt de matériaux charriés. Une densité élevée de branches est alors nécessaire en permanence dans le fond de la ravine.

Des roselières le long des cours d'eau et des engazonnements atteignent un bon niveau de protection lorsqu'ils présentent un recouvrement complet par du feuillage, des tiges et des systèmes racinaires proches de la surface, vivants ou morts.

Pour la ripisylve, l'effet est atteint par une combinaison du ralentissement de l'écoulement et de l'enracinement dans le sol.

En plus de l'utilisation des paramètres proposés dans la littérature spécialisée, la résistance des végétaux à l'érosion peut aussi être évaluée à partir de tronçons de référence dans l'espace naturel.

La résistance à l'érosion des plantes dans les cours d'eau dépend en grande partie de la zone de végétation et des plantes qui y poussent. Ces zones diffèrent fortement dans l'espace naturel européen. A titre indicatif, on peut donner comme valeurs de référence :

Structure de la végétation	τ_{crit} (N/m ²)	v_{crit} (m/s)
Oseraie, saulaie	200	2,5
Galerie forestière riveraine	100	2,0
Roselière le long des cours d'eau	50	1,5
Pelouse, immergée depuis peu	30	1,5
Pelouse, immergée depuis longtemps	15	1,5

Lors de stabilisation des berges par des mesures de génie biologique, une réduction parfois considérable de la

capacité de production hydraulique est liée à la résistance au courant. Cela doit être pris en compte par exemple par des élargissements de profil lors de projets hydrauliques, en conservant la capacité de production hydraulique lors de l'entretien ultérieur des cours d'eau.

Résistance à l'action des vagues

La résistance à l'action des vagues dépend en partie de la capacité de la structure de la couche supérieure à résister à l'énergie houlomotrice. Le substrat riverain peut être protégé directement par un recouvrement de la masse foliaire et du système racinaire proche de la surface.

Des peuplements larges et denses de roselières, des buissons de saulaie serrés ainsi que des grosses branches fortes en surplomb et des troncs d'arbre se sont montrés efficaces pour la conversion d'énergie. Les paramètres pertinents pour le calcul sont la compacité des pousses en surface et leur résistance à la flexion.

Afin d'apprécier l'effet de la couche de recouvrement, la masse foliaire ainsi que la couche racinaire superficielle et proche de la surface sont évaluées.

Afin de conserver des valeurs pertinentes pour la planification, des emplacements de référence dans l'espace naturel doivent être évalués.

Effet des peuplements végétaux lors des cas de surcharge

L'appréciation des ouvrages et des éléments de construction, au regard de leur capacité de surcharge, joue un rôle important dans l'évaluation globale. Cet aspect est peu connu quant à son effet sur les éléments de protection du génie biologique. Actuellement, il est recommandé d'évaluer cet aspect au cas par cas. Ainsi, des petites surfaces d'érosion se referment toutes seules fréquemment à partir de peuplements limitrophes. Enfin, la chute d'arbres riverains peut conduire à des dégâts par la formation d'embâcles en aval d'un cours d'eau.

2.1.5 Paramètres descriptifs des résistances des peuplements végétaux

Les abréviations et symboles employés ci-dessous sont résumés dans l'annexe du chapitre 2.

Couverture végétale

La couverture végétale décrit le pourcentage de recouvrement végétal par rapport à la surface du sol. Ce critère est courant lors de l'évaluation des prairies paysagères et des végétations herbues en regard de leur résistance aux vents, aux écoulements superficiels diffus, par exemple sur des talus. Lors de la mise en place d'une végétation à plusieurs couches, le degré de recouvrement peut s'élever à plus de 100%.

Compacité des structures de végétation verticales - densité du bouquet, des tiges, des branches ou du tronc

La compacité des brins et des bouquets pour les herbes et les graminées, des tiges pour les roselières, des branches pour les buissons et des troncs pour les arbres, décrit la densité des structures perpendiculaires en surface, en pièce/m² ou pièce/ha. A partir de là, de nombreuses résistances peuvent être déduites, par exemple la résistance au courant d'eau et au vent, ou encore à l'action des vagues. Des conclusions sur l'enracinement peuvent également être émises indirectement.

Densité d'approche spécifique de la végétation (m_v)

Pour le calcul de la densité d'approche spécifique de la végétation selon INDLEKOFER 2000, les surfaces de la structure végétale immergée perpendiculairement à la direction du courant A_{pi} sont additionnées, multipliées par un coefficient de courant c_v , puis rapportées à la couche de couverture du fond du chenal $L_u \times L_G$.

$$m_v = \frac{\sum c_v \times A_{pi}}{L_u \times L_G} \quad [H]$$

Le coefficient c_v sert à prendre en compte l'impact de la végétation sur la vitesse d'écoulement. Actuellement, la valeur c_v est estimée entre 1,2 et 1,5 sur la base d'expériences en laboratoire.

Surface exposée au vent

Pour les boisements, la surface exposée au vent est déterminée selon la projection horizontale de la surface d'arrachement des buissons, respectivement de l'arbre [en m^2]. Avec des haies en guise de protection contre le vent, une perméabilité au vent est alors estimée en pourcentage. Lors de considérations statiques des arbres, un coefficient de courant relatif au vent c_w est, par analogie aux approches de la force éolienne dans le génie civil, estimé entre 0,2 et 0,4.

Degré de recouvrement d'un système racinaire

Lorsqu'un système racinaire se manifeste à plat sur une rive, une pente ou un plan de stratification, une quantification en pourcentage par rapport au degré de recouvrement, voire par rapport au degré moyen de stratification, est possible.

Résistance au cisaillement τ_f

L'effet de stabilisation et d'amenuisement de l'érosion par des plantes et des organismes vivants du sol est très complexe et ne peut être indiqué simplement par des paramètres de mesure telle que la densité de l'enracinement.

En revanche, l'emploi de la résistance au cisaillement τ_f (KN/m^2) est pertinent en tant que paramètre total, cette résistance pouvant décrire aussi bien les paramètres mécaniques du sol, le frottement et la cohésion, ainsi que les influences biologiques interférant par les racines des plantes, les mycorhizes, les gels et les forces de succion de la végétation.

Force tractrice critique τ_{crit}

La force tractrice critique τ_{crit} (N/m^2) décrit la résistance d'un revêtement de talus, ici un peuplement végétal, face à un déversement lors d'un début d'érosion.

Résistance des structures de végétation face à l'écoulement

La résistance à l'écoulement des structures de végétation particulière traversées et éconduites par l'écoulement peut être calculée.

Pour des structures de végétation rigides :

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v^2}{2 * g} * A_P * C_P$$

Pour des structures de végétation élastiques :

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v}{2 * g} * A_P * C_P$$

Densité d'enracinement D_{WZ}

La densité d'enracinement indique le nombre de racines d'un certain diamètre donné sur une surface, par exemple les racines de 1-5 mm par unité de surface. Comme la densité varie selon la profondeur, l'emplacement considéré doit être indiqué car ce paramètre varie.

Surfaces spécifiques des coupes transversales des racines SAW

La surface totale des coupes transversales des racines par unité de surface donne un aperçu de l'enracinement. La profondeur de l'emplacement considéré doit être indiquée, puisque le paramètre varie fortement selon la profondeur.

Avec ce paramètre, les considérations usuelles sur la stabilité des recouvrements des couches supérieures du sol ou des couches porteuses de végétation parallèles à la pente peuvent être effectuées en tenant compte de la force de cisaillement des racines.

2.1.6 Remarques préliminaires concernant l'utilisation de végétaux adaptés à la station et l'évaluation des facteurs d'emplacement

Les emplacements destinés à recevoir des ouvrages de génie biologique sont souvent difficiles à végétaliser au vu de leurs conditions initiales. Une estimation correcte de la capacité des zones d'exploitation à être végétalisées est cependant une condition nécessaire pour la mise en œuvre fructueuse des mesures de protection et de consolidation prévues.

Pour l'examen d'un emplacement, on considérera entre autres les aspects suivants :

- Espace naturel
- Position dans l'espace, altitude (NN, NGF, MSL, ...)
- Relief, longueur et inclinaison de la pente, hauteur de la pente, exposition, formes de la rive et du cours d'eau
- Roches, sol, substrats, structure des strates
- Micro- et macroclimat, température, précipitations, tempêtes, neige
- Régime hydrique, nappe souterraine, eau d'infiltration, fréquence d'inondation, durée, vitesse de l'écoulement, force tractrice
- Flore naturelle de la région, végétation naturelle potentielle, végétation pionnière correspondante et phases de succession précoces, végétation de contact avec les zones de construction, concurrence et soutien mutuel (effets de synergie)
- Informations utiles concernant la faune
- Utilisations futures et exigences liées
- Délimitations de la protection de la nature et de l'environnement.

Ce n'est que sur la base d'un examen suffisamment précis de l'emplacement que l'on pourra juger si un ouvrage de génie biologique sera efficace, définir un choix sur les plantes appropriées ainsi que sur les méthodes et matériaux d'aide à la végétalisation pouvant favoriser l'établissement des végétaux.

2.2 **Intégration d'un ouvrage de génie biologique dans le processus global de planification**

Le processus global de planification, de mise en œuvre et de développement d'un ouvrage de génie biologique est structuré de la façon suivante :

- Saisie du cahier des charges
- Avant-projet et demande d'approbation des autorités en cas de marché public
- Conception du projet, consultation des entreprises susceptibles de la mise en œuvre et préparation d'une attribution
- Mise en œuvre, surveillance des travaux et opération de réception
- Soins de croissance et de développement durant la période de garantie du parfait achèvement en cas de marché public
- Entretien et soins de la végétation visée
- Contrôle de l'obtention de l'objectif défini
- Soins de développement jusqu'à l'obtention de la végétation visée sur la base du CCTG n°35 (en France) en cas de marché public.

Saisie du cahier des charges et avant-projet

Le maître d'œuvre doit aborder un cahier des charges en tenant compte de toutes les variantes afin, selon les conditions générales données, de trouver la meilleure solution pour le maître d'ouvrage.

La problématique de la protection contre l'érosion demande qu'une vaste palette de possibilités soit examinée dans le cadre de l'avant-projet. Par exemple, dans le cas d'une protection des berges, les variantes suivantes peuvent être envisagées :

1. Permettre un développement dynamique propre et renoncer aux utilisations proches de la rive.
2. Conserver les murs de rive comme fondations et conserver intégralement les utilisations actuelles.
3. Utiliser un ouvrage de protection de génie biologique pour obtenir une berge végétalisée et le retrait de l'utilisation d'une surface.

Lorsqu'une solution de génie biologique est proposée dans le cadre de l'avant-projet, celle-ci doit également être possible au vu des conditions de l'emplacement. La végétation visée doit pouvoir opposer une résistance suffisante aux effets prévus.

Conception du projet jusqu'à l'approbation des autorités

Dans un projet prêt à être approuvé figurent la végétation visée, notamment le type de végétation et de biotope, ainsi que les noms de quelques espèces principales. Les soins d'entretien nécessaires sont également précisés.

Les étapes importantes en rapport avec l'introduction de la végétation selon des méthodes de construction du génie biologique, ainsi que les soins de croissance et de développement de la végétation, sont aussi décrites sommairement. Les résistances de la végétation et des méthodes de construction du génie biologique vis-à-vis des effets attendus sont démontrées, éventuellement avec des exigences de protection temporairement diminuées durant la phase de construction.

Dans le cas de mesures le long des cours d'eau, on

examinera les influences de la végétation sur les capacités hydrauliques du tronçon déterminé et la possibilité d'apparition de dommages suite à des niveaux d'eau plus élevés ou des inondations.

Dans le cadre de l'examen du projet selon les lois environnementales, les espèces végétales à utiliser (généralement adaptées à la station) et les matériaux de construction sont définis, de sorte qu'ils intègrent les mesures de construction dans l'équilibre naturel et encouragent un développement naturel des eaux, ainsi qu'une valeur récréative du paysage.

Une planification apte à l'approbation tient compte des surfaces disponibles dans ces propositions.

Planification de la mise en œuvre et préparation de l'attribution

Durant cette phase de planification, le planning d'exécution, l'évaluation des quantités et les exigences fonctionnelles sont élaborés sur la base de l'approbation officielle et en concertation avec les futurs utilisateurs et les riverains. La rédaction détaillée des méthodes de construction du génie biologique pour la protection et la végétalisation des emplacements menacés fait aussi partie de cette phase, y compris l'examen des sols correspondants et autres évaluations de l'emplacement.

Les dimensions et la qualité requise des matériaux végétaux - semences, parties végétales susceptibles d'enracinement et plantes - sont mentionnées, tout comme la sorte, la qualité et le dimensionnement des autres matériaux de construction tels que des géotextiles de protection contre l'érosion, les fascines, les pieux et les pierres. Durant cette phase de planification, l'accent doit être mis sur des objectifs pouvant être clairement définis et mesurés, correspondants aux règles de précaution contre les accidents,

Mise en œuvre et surveillance des travaux

Dans la répartition usuelle des tâches de planification et de construction de nos jours, la mise en œuvre des travaux est attribuée à une entreprise qualifiée sur la base d'un appel d'offre sur le marché.

Sur mandat du maître d'ouvrage, le contrôle des travaux est effectué par un bureau de maîtrise d'œuvre qualifié conformément aux accords passés et aux règles de la technique. Lorsque des problèmes liés à la nature du sol ou à des phénomènes naturels inattendus ont lieu, le maître d'ouvrage sera soutenu dans la recherche de solution.

Soins pendant la croissance et le développement de la végétation

Durant la période de garantie de plusieurs années, des soins de croissance et de développement de la végétation sont incorporés aux mesures de construction. Ceux-ci sont généralement entrepris par la société en charge des travaux.

Soins de développement, conservation et entretien

A l'expiration de la période de garantie, une inspection finale est effectuée. Les soins sont ensuite à la charge du maître d'ouvrage lui-même ou d'une entreprise mandatée. Les longs processus de développement, par exemple lors de plantations de bois, doivent être soutenus

jusqu'à l'obtention de la végétation visée. Celle-ci sera alors entretenue selon les règles de l'art, afin de conserver ses fonctions propres au génie biologique (cf. chapitre 4).

Gestion du processus lors des phases de planification, construction et soins des mesures de génie biologique

Le processus menant au développement d'une végétation protectrice répondant aux exigences du génie biologique doit être accompagné, organisé sans interruption afin d'éviter la perte d'informations importantes lors de la transition entre deux phases. Ainsi, lors du planning d'exécution, il s'agit en général de clarifier les aspects de la protection de la nature et de l'environnement approuvés dans les plans et devant être particulièrement observés. Durant les phases d'exécution et de soins de développement, l'accent doit être mis sur la végétation définie. Elle ne peut être subordonnée à d'autres aspects tels que par exemple, la protection des espèces, le paysage ou la technologie des processus.

2.3 Recommandations pour des domaines d'application courants

2.3.1 Erosion sur des talus de terre

Problématique

Des phénomènes d'érosion sur des talus non protégés et non végétalisés peuvent provoquer des dégâts considérables, au niveau de terrassements aménagés en bordure de voies de communication, lors de travaux de construction hydraulique, dans l'industrie minière et l'aménagement de sites de décharge. Des dommages indirects et secondaires peuvent se produire sur les voies de communication ou sur les installations de drainage.

Sollicitations

Les sollicitations se produisant de manière récurrente sur les pentes proviennent des rafales de pluie et orages de grêle, des écoulements superficiels diffus, des cavités neigeuses, du vent ainsi que de l'influence des hommes et des animaux.

Résistances

Les sollicitations inhérentes aux hommes et aux animaux sont à remédier par des mesures préventives et des restrictions d'utilisation. Des peuplements d'herbes et de graminées avec un degré de recouvrement élevé ont fait leurs preuves contre les rafales de pluie et les écoulements superficiels diffus. Dans le cas d'un recouvrement total, on peut également tenir compte des pousses vivantes en surface, du feuillage, des feuilles mortes - pour autant que la plante soit encore vivante -, des couches racinaires proches de la surface ainsi que des substrats résistants à l'érosion tels que des pierres, des roches ou du bois. Des peuplements végétaux composés de buissons et dans certaines conditions d'arbres peuvent, avec une densité de peuplement appropriée, protéger des cavités neigeuses et du vent.

Facteurs de limitation

Des conditions d'emplacement extrêmes constituent des facteurs de limitation : inclinaison du terrain, exposition (=éclairage énergétique solaire), mésoclimat, types de sol, forme de stockage, carences en substances nutritives et présence de matières toxiques.

Indications pour les calculs et la planification

La végétation visée est définie sur la base d'un examen de

l'emplacement et du potentiel de végétalisation. Actuellement, la procédure de végétalisation est choisie selon les expériences dans l'espace naturel en question ou dans un espace semblable.

Une étude comparative explicative des risques et des coûts, à l'instar de DIN 18918, est recommandée. Afin d'apprécier le risque de manière optimale, les contrats de construction doivent indiquer les événements théoriques tels que les fortes précipitations, le vent tempétueux, les hauteurs de neige avec une récurrence (1/n années) propre au cahier des charges. En deçà de ce seuil, l'entreprise mandatée pour exécuter les travaux prend la responsabilité des dommages. Dans les cas d'événements plus rares, la responsabilité incombe au maître d'ouvrage.

2.3.2 Glissements subsuperficiels

Problématique

Comme cela peut être démontré, des peuplements végétaux et des ouvrages de génie biologique agissent uniquement contre des glissements subsuperficiels parallèles au versant, ainsi qu'en présence de sols non-cohésifs sur des talus très inclinés de faible hauteur. De grands arbres lourds ont un effet défavorable sur des talus raides, surtout en présence de sols cohésifs. La problématique des glissements est aussi traitée dans le génie biologique avec les modèles usuels de corps solides de la mécanique des sols. Des sollicitations et des résistances s'y appliquent.

Sollicitations

Les recherches ont démontré l'influence du poids du sol humide (ainsi que des cas de surcharge comme la végétation et la neige), de la pression hydraulique et de la portance lors de ruptures de talus.

Résistances par la végétation

Une résistance au cisaillement τ_f (kN/m²) peut se produire entre la couche de sol en mouvement et le sous-sol. Cette résistance au cisaillement peut être déterminée à partir de couches de sol comparables. La résistance au cisaillement se compose de l'addition des termes de mécanique des sols, le frottement et la cohésion. À cela s'ajoutent les influences biologiques issues entre autres des racines, mycorhizes et gels qui sont fréquemment décrits en tant que facteurs de cohésion biologique. Le fait que les paramètres de cisaillement biologiques varient fortement avec la profondeur, la densité de stockage et l'humidité du sol rend les paramètres difficiles à estimer (cf. section 2.1).

Facteurs de limitation

Les facteurs suivants limitent ou excluent l'influence des racines lors de mesures de protection contre les glissements : surfaces avec une présence importante de rochers, de vase ou d'argile, surfaces au-dessus des nappes d'eaux souterraines ou des eaux d'infiltration, substrats toxiques, ainsi que les facteurs usuels excluant une végétation vitale.

Recommandations pour le dimensionnement et la planification de couches porteuses de végétation résistantes au glissement sur des talus

Les conditions préalables pour la mise en place de couches porteuses de végétation résistantes au glissement

sur des talus englobent :

- un sous-sol stable
- un sous-sol nettement plus perméable que la surface
- l'absence de pression hydraulique en surface due à la présence de nappes souterraines ou d'eaux d'infiltration
- un sous-sol apte à l'enracinement par rapport au volume des pores, aux composants de sol et au pH
- une couche superficielle du sol (couche porteuse de la végétation) soit très fine, soit diminuée, de sorte que les plantes peuvent s'enraciner assez rapidement dans le sous-sol.

Sous ces conditions préalables, l'aptitude à résister contre les glissements peut être démontrée sur la base d'études entreprises sur des emplacements de référence par l'application de la modélisation du bloc (en all. Blockmodell). L'effet de la végétation peut alors être considéré soit par la résistance au cisaillement admise, soit à travers les surfaces des coupes transversales des racines en bordure de la couche.

Talus très inclinés composés de sols non-cohésifs

Différentes études font état de la faisabilité d'interventions par génie biologique sur des talus de faibles à moyennes hauteurs, avec un angle se situant juste en-dessous de l'angle de frottement interne du sol, si les ouvrages sont composés de plantes à racines profondes et sont stabilisés par des méthodes de construction du génie biologique tel que des arbustes dans leur phase initiale. L'augmentation de la stabilité peut être évaluée à l'instar de SCHAARSCHMIDT 1971, SCHUPPENER 1994 et HÄHNE 1997.

Des petits talus peuvent être formés avec un angle maximal de 45°, s'ils sont consolidés par des racines profondes et recouverts par une végétation fermée composée d'herbes et de graminées. Pendant la phase de croissance et de développement, des ouvrages de soutènement en bois peuvent être utilisés, par exemple des caissons en bois végétalisés fabriqués en moises et longrines. Ceux-ci ont l'avantage de résister également à une faible pression terrestre active. Le dimensionnement se fait de façon similaire aux autres types de barrage-poids, également selon la procédure de la terre renforcée (cf. Manuel de construction ZEH 2006).

2.3.3 Ravinement sur les versants et les talus

Problématique

Des concentrations de ruissellements superficiels se forment dans les cuvettes des versants longs et raides, ce qui peut mener à la formation de ravins d'érosion. L'érosion par ravinement peut aussi être causée par l'étanchéisation des surfaces, les déboisements dans les secteurs à fortes précipitations et les concentrations d'écoulement suite à des constructions de routes.

Lors d'érosion par ravinement, le processus d'érosion remonte vers l'amont (dans le sens contraire à l'écoulement). Des amplifications résultent de coulées de boue produites par des ruptures de pente détrempee.

Sollicitations

Par un modèle d'estimation précipitation – écoulement et sur la base d'une pluie de dimensionnement avec une récurrence adaptée ($1 / (n \text{ années})$), on peut déterminer les

débits de pointe des crues Q (m^3/s). A partir de là, on peut ensuite, à l'aide de calculs hydrauliques usuels, déterminer les vitesses d'écoulement moyennes v (m/s) et les forces tractrices sur le fond τ_0 (N/m^2).

Résistances

Le fond du rain et les berges inférieures doivent être recouvert par une végétation dense de petits buissons ou de bouquets de plantes vivaces solides. Le peuplement végétal doit pouvoir résister aux débordements, à l'érosion et aux envasements. Concernant les amorces d'érosion, les forces tractrices τ_{crit} ont été mentionnées auparavant.

Limites d'application

Des limites d'application résultent de vitesses d'écoulement et de forces tractrices élevées, parfois par l'action des matériaux charriés.

De plus, l'exposition constitue souvent une limite d'application aux côtés des facteurs usuels de localisation, ainsi que les dégâts et les abrutissements causés par les animaux sur les bois tendres.

Recommandations pour le dimensionnement et la planification

Des étanchéisations élevées dans les bassins versants doivent être compensées par des mesures de rétention des eaux de pluie. Les cours supérieurs avoisinants des ruisseaux de montagne peuvent être considérés dans certains cas comme objets de référence. Les résultats issus des emplacements de référence doivent être comparés aux paramètres de dimensionnement hydrotechniques déterminés théoriquement. A partir de ces résultats, on peut ensuite décider de mises en place supplémentaires ou d'abattements justifiés par endroit.

Les structures dérivées des cours d'eau de référence proches de la nature mènent à des modèles issus de peuplements végétaux adaptés à la station en combinaison avec des roches, des pierres naturelles et du bois mort. Des barrages en escalier n'apparaissent pas naturellement. Ils altèrent le paysage, entravent ou rompent les interconnexions des biotopes et ne sont pas compatibles avec les objectifs des Directives-cadres sur l'eau de l'UE. C'est pourquoi ils doivent être, là où c'est possible, remplacés par des ouvrages de protection proches de la nature. Néanmoins, dans les régions de haute montagne densément peuplées, ils constituent souvent la seule possibilité de stabilisation des ravinelements et des torrents, de sorte que leur application est inévitable dans ces régions.

2.3.4 Berges et glacis en bordure des cours d'eau

Problématique

Des affouillements et autres formes d'érosion apparaissent en raison des processus hydrodynamiques naturels sur les rives et les glacis, et plus généralement dans les zones alluviales. D'une part, ce développement est souhaité, car il mène à la formation de structures aquatiques typiques dans l'espace naturel. D'autre part, l'occupation du sol de grande utilité et des infrastructures importantes se trouvent à proximité des rives et doivent être protégées contre les dommages. Dans ces deux cas, dans le paysage culturel et surtout autour de ces sites, les capacités d'écoulement, ainsi que les niveaux d'eau en période

de crue, doivent être maîtrisés afin d'éviter des dommages aux bâtiments et aux infrastructures.

Sollicitations

En bordure des cours d'eau, des forces de courant agissent sur les consolidations de berges, quantifiées comme vitesse du courant v (m/s) et force tractrice τ_0 (N/m²), ainsi que force d'impulsion issue des bois flottants et des glaces. De plus, des influences dues aux hommes et aux animaux sont également possibles. En outre, certains ouvrages de protection peuvent être concernés par des phénomènes de la poussée d'Archimède. Lors de la décrue des cours d'eau, les différences de niveaux entre le niveau encore élevé des eaux de la nappe phréatique et le niveau bas des cours d'eau engendrent des forces de pression hydraulique pouvant entraîner des ruptures de pente.

Résistances

Des résistances peuvent être opposées aux courants d'eau par l'intermédiaire de différentes structures de végétation. Les pelouses offrent une protection extensive contre l'érosion et produisent ainsi une faible résistance à l'écoulement. Les roselières agissent de façon similaire dans les cours d'eau, en se pliant lors d'un courant plus conséquent. En fonction de la densité effective de peuplement, la végétation ligneuse provoque un ralentissement tant du courant moyen que de celui proche du sol. De plus, le sol proche de la surface s'enracine avec la plupart des essences de saules. De cette manière, les rives et les glacis peuvent être protégés de l'érosion jusqu'à ce que la vitesse d'écoulement critique v_{crit} et les forces tractrices τ_{crit} mentionnées auparavant soient atteintes.

Limites d'application

En plus des caractéristiques générales du site en question à consolider et des limites maximales admises pour les vitesses d'écoulement et les forces tractrices, des limites d'application spécifiques à l'écoulement existent. Pour chaque espèce végétale, il existe une limite inférieure pour son application, déterminée par les hauteurs, les fréquences et les durées maximales de submersion pouvant être supportées. D'autres facteurs, tels que l'effet des blocs de glaces ou des matériaux charriés, peuvent aussi constituer des limites d'utilisation. Ces dernières doivent être testées sur des emplacements de référence dans les divers espaces naturels.

En présence d'un niveau élevé de la nappe souterraine conjugué à un bas niveau des cours d'eau, la stabilité générale d'une berge doit être évaluée avec les pressions hydrauliques correspondantes. En raison de son effet réducteur sur la performance hydraulique, l'utilisation de végétaux ligneux dans des écoulements plutôt étroits peut être problématique.

Recommandations pour le dimensionnement et la planification

Afin de garantir un aménagement et une protection des cours d'eau proches de la nature, les objectifs de la Directive cadre sur l'eau de l'UE doivent être pris en compte. Cela signifie entre autres la non-aggravation de l'état actuel et le développement de conditions écologiques favorables. Dans le cas présent, la structure des cours d'eau sera particulièrement touchée par les interventions de génie biologique. A cet effet, un

aménagement typique de l'espace naturel, des matériaux naturels propres à l'emplacement et des plantes, avec une variation adaptée aux cours d'eau, sont recommandés. Des structures de végétation appropriées et leurs limites d'application peuvent être déduites à partir d'emplacements de référence dans l'espace naturel. Pour les cours d'eau, l'alternative « transfert de l'exploitation et développement des eaux en dynamique propre » doit toujours être examinée, car elle mène à un développement des cours d'eau proche de la nature. D'autres travaux de consolidation aux pieds des berges ou sur des rives inclinées fortement touchées par le courant seront exécutés exclusivement avec des pierres naturelles, du bois ou des branchages issus de l'espace naturel. Des structures variées doivent être mises en place le long et en travers du tracé, en tenant compte des interconnexions des biotopes pour la faune aquatique et en évitant la formation de profils monotones.

Un aménagement quasi-naturel et l'établissement de végétaux ligneux vont souvent de pair avec une réduction de la performance hydraulique d'un cours d'eau. Dans le cadre d'un projet d'aménagement de cours d'eau, d'importantes études hydrauliques sont mises en œuvre afin d'estimer le développement des niveaux d'eau et leurs conséquences sur leur utilisation. La stabilité globale d'une berge contre les ruptures doit subsister pour les différences de niveau d'eau ayant servi pour les calculs.

Les planifications le long des cours d'eau impliquent de vastes procédures de consultation entre les autorités compétentes, les riverains, les politiciens et les organisations de protection de la nature. Les parties concernées tâcheront de trouver une solution apte à être approuvée durant la phase de planification du projet.

2.3.5 Berges en bordure des plans d'eau

Problématique

Des formes d'érosion pouvant ressembler à un développement de falaise sur le littoral se produisent sur les berges en bordure des plans d'eau. Les phénomènes naturels peuvent être renforcés par des nuisances liées à leur utilisation.

Sollicitations

Les ouvrages de génie biologique à rôle de consolidation des berges sont sollicités par l'impact des vagues naturelles et des vagues de navigation, combiné aux débris ou aux glaces flottantes. Les zones riveraines attractives sont détériorées par les divers accès et les bateaux, parfois aussi par le bétail de pâturage.

Résistances

Le sol peut être protégé par un revêtement complet de gazon. Une large ceinture de roselières réduit l'impact des vagues et protège le sol par un système racinaire proche de la surface. Des peuplements ligneux submersibles avec des branches et des troncs évolués produisent un effet semblable.

Limites d'application

En plus des caractéristiques générales de l'emplacement, il existe pour chaque espèce végétale une limite inférieure à son application, déterminée par les hauteurs, les fréquences et les durées maximales de submersion pouvant être supportées. En outre, la fréquence des

sollicitations joue également un rôle, de sorte que des vagues de navigation constantes peuvent détruire un peuplement de roselières, qui pourrait résister à des vagues occasionnelles de même hauteur lors d'une tempête.

Recommandations pour le dimensionnement et la planification

Lors de la planification d'ouvrages de protection des rives des eaux de lac, les délimitations de l'aménagement des paysages et des espaces libres jouent un rôle important afin de tenir la forte pression d'utilisation à distance des rives. Généralement, des offres de loisirs attractives à proximité des rivages limiteront la pression. La capacité de charge et les limites d'application de la végétation doivent alors être déterminées sur la base d'emplacements de référence dans l'espace naturel. Lors de la végétalisation initiale d'un rivage, des mesures de protection à long terme contre les accès, les accostages, les dépôts de débris flottants, le bétail de pâturage et les oiseaux aquatiques sont nécessaires.

2.3.6 Dignes et barrages

Problématique

Les digues servent à la protection des exploitations et des bâtiments dans l'arrière-pays contre les inondations, jusqu'à un certain niveau d'eau, dans les rivières et dans le lit majeur endigué. Les digues servent à maintenir un niveau d'eau élevé constant dans le lit d'un cours d'eau, ou à maintenir un plan d'eau en faisant office de barrages. En période sèche, la problématique de l'érosion équivaut à celle des talus. En amont de l'ouvrage, les problèmes liés aux berges, plans ou cours d'eau se produisent. Des possibilités de contrôle, d'assainissement et de renforcement en cas de crue, tempête et pluie doivent être trouvées en fonction du potentiel de dommages considérable à la suite d'une rupture de digue ou de barrage. Il s'agit en particulier de pouvoir réagir de façon proactive et rapide lorsque des débuts d'érosion par suintement apparaissent.

Sollicitations

Les sollicitations proviennent du propre poids de l'ouvrage, du vent, des rafales de pluie, des écoulements superficiels ainsi que, du côté du parement amont, des effets de courant, de la force tractrice, des impacts de glace, matériaux flottants et des vagues. Du côté de l'eau, des glissements peuvent se déclencher suite à des différences de pression hydraulique après une crue. Du côté de la terre, des ruptures de talus, des renards hydrauliques et des érosions par suintement peuvent se produire en raison de la pression hydraulique ou suite à des débordements durant une crue. Les animaux de pâturage (excepté les moutons), tout comme des déplacements hippiques et les véhicules, peuvent considérablement endommager la végétation. D'autres dégâts peuvent également être causés par des animaux vivant dans le sol.

Résistances

Habituellement, des pelouses denses sont mises en place là où la force tractrice et les vitesses d'écoulement sont supportées lors d'une crue (voir plus bas). En outre, la pelouse sert de protection contre le ressac et l'érosion due au vent. Des dommages sur des talus de pelouse du côté du fleuve se produisent par

l'intermédiaire des glaces et des bois flottants. On peut éviter ces dégâts en renforçant les ouvrages de revêtement de berge (combinaison de pierres et revêtement herbeux) ou par l'installation de hautes rangées de saules sur les glacis devant des rives affouillées. Du côté terre, des pelouses denses rustiques sont utilisées comme protection contre le vent et les rafales de pluie. Elles permettent de déceler des débuts d'érosion par suintement. Par l'ensemencement de peuplements autochtones riches en espèces d'herbes et de graminées, obtenu par exemple par battage de foin, on obtient un système racinaire particulièrement différencié et ainsi une grande résistance à l'érosion.

Limites d'application

En amont de l'ouvrage, les limites d'application résultent des durées et des hauteurs maximales de submersion des différentes espèces végétales, ainsi que des limites de charge des graminées lors de débordement et de ressac combinés à des affouillements dus à des masses de glace ou à des bois flottants.

Considérations pour le dimensionnement et la planification

Les digues et les barrages sont avant tout des ouvrages de génie civil. Les protections de génie biologique mettant en œuvre des pelouses denses représentent dans la plupart des cas la solution la plus économique de protection contre l'érosion. Lorsque les limites d'application sont atteintes, des solutions en combinaison avec des pierres sont nécessaires. Les possibilités d'entretien, de défense et le cas échéant de renforcement doivent être considérées durant la planification. Lors du choix de la végétation, il faut prêter une attention particulière aux zones humides sur les talus, ainsi qu'aux fréquences et durées de submersion des talus situés du côté du cours d'eau.

2.3.7 Protection des côtes et du littoral

Problématique

Les interventions de génie biologique peuvent contribuer de plusieurs manières à la protection et à l'aménagement des côtes. Il s'agit d'une part de mesures de protection et de développement des dunes, d'autre part de procédures visant à la consolidation des digues par la construction et la conservation de glacis dans les zones intertidales. Les procédures de génie biologique autrefois mises en œuvre dans les vasières, appelées « conquête des terrains sur la mer biogène », ne sont aujourd'hui que très rarement employées.

Sollicitations

Elles sont dues à la combinaison des actions du vent et de l'eau.

Les ouvrages de génie biologique sont principalement utilisés dans les secteurs de plage rétrogressifs, c'est-à-dire sur lesquels les forces érosives prédominent et où le sable et les dunes blanches sont aplanies ou soufflées dans les cuvettes de vent dans les sections intérieures des dunes, ce qui peut conduire à la dissolution de la dune entière.

Le génie biologique peut intervenir dans le soutien de la consolidation de dunes dans les sections côtières progressives, c'est-à-dire là où des dunes se développent

par un approvisionnement de sable sur des plaques de sable, une croissance des plantes et des pré-dunes.

Sur les glacis, les données du problème résident dans la diminution de l'énergie hydraulique frappant les digues protectrices de plein fouet si elle n'est pas freinée par les glacis lors d'événements de crue. Une élévation du glacis pourra diminuer et distribuer plus uniformément l'énergie hydraulique et ainsi, diminuer la force frappant le pied de la digue.

Résistances

La dynamique de formation des dunes et la biologie des espèces végétales des dunes démontrent leurs possibilités d'utilisation pour la protection des côtes. Sur les dunes rétrogressives, l'accent est mis sur la résistance au vent et donc à la fonction de captage du sable, en augmentant la rugosité par la mise en place de branchages ou de pieds de plantes à l'aide de boutures et de plantations. L'enracinement des sables soumises au vent par des graminées indigènes et des buissons stabilise les dunes.

Lors de tempêtes, il est important, du point de vue du génie biologique, que le glacis réduise la hauteur et la fréquence des vagues frappant la digue principale et diminue l'énergie des vagues qui s'approchent. Une constitution rugueuse du fond renforce le frottement et abaisse ainsi la vitesse d'approche des vagues. En plus de cela, les espèces et les associations végétales stabilisent la structure du sol et atténuent l'érosion en freinant l'énergie du courant. Le système racinaire a une importance capitale, car il forme une liaison avec les particules du sol et est composé d'éléments solides et flexibles. Les particules du sol possèdent une stabilité élevée par rapport aux forces de pression et le réseau racinaire absorbe les forces de traction et de cisaillement induites par le courant. Dans ce cas de figure, les éléments sédimentaires dépendent de la densité structurelle de la végétation, aussi bien horizontale que verticale. Le taux de sédimentation est directement calculé en fonction de l'intensité d'inondation, qui dépend de l'altitude des types de biotope à la ligne médiane de marée haute (MThw). La transmission de l'énergie dépend de la hauteur, de l'élasticité de la couverture végétale et des capacités de résistances mécaniques des plantes. Avec une hauteur végétale croissante, la réduction des vitesses de courant augmente et conduit ainsi à une amélioration de la protection du sol.

Limites d'application

Les forces abrasives sont plus fortes que ne peuvent le supporter les herbes, buissons, tiges et plantes.

Considérations pour le dimensionnement et la planification

Aux abords des côtes, les mêmes principes de captage du sable par la rugosité et de fixation du sable et du limon par l'enracinement sont partout applicables. Les espèces pouvant consolider, par l'intermédiaire de leur structure racinaire à plusieurs niveaux, des matériaux tels que des herbacées de plage ou des buissons côtiers sont appropriées. La biologie des espèces est analogue et le choix des espèces dépend du type de paysage.

2.3.8 Ecran végétal contre le vent et les émissions polluantes

Problématique

Des haies d'arbres et de buissons peuvent être aménagées afin de protéger les surfaces utiles et les voies de communication contre le vent et les dommages consécutifs au dessèchement, au sable, aux limons ou à la neige entraînés par le vent. Aux abords des surfaces d'extraction du sol, des exploitations minières ou autres surfaces industrielles, des haies et des forêts peuvent aussi être utilisées afin de retenir les poussières, et les surfaces menacées d'érosion, par exemple les tumulus, seront directement végétalisés.

Sollicitations

Les facteurs relatifs au vent, en tant que sollicitation principale, doivent être décrits dans le détail : force, durée, fréquence et direction.

Résistances

Les valeurs limites au-delà desquelles les matériaux menacés d'érosion seront charriés doivent être mentionnées : granulométrie, poids, humidité.

Les prairies semi-sèches, dans certains cas les prairies sèches denses et les buissons secs, se sont avérés utiles comme protection contre l'érosion à plat sur des surfaces menacées d'érosion par le vent, par exemple sur des tumulus. Des haies d'arbres et de buissons atténuent le vent jusqu'à une distance correspondante à environ dix fois la hauteur de la haie. Ces haies doivent être aménagées de façon perméable, afin de réduire les turbulences causées par le vent. Des haies de protection contre les émissions polluantes doivent être disposées en plusieurs rangées ou de façon large et en plusieurs couches.

Limites d'application

Lors de la mise en place de structures de protection sur le terrain, les capacités de résistance à la sécheresse des différentes espèces d'arbres doivent être prises en compte. Avec les haies de protection contre les émissions polluantes destinées aux installations industrielles ou à l'industrie minière, il s'agit, en plus des facteurs d'implantation habituels, d'indiquer le niveau d'émission toléré par les espèces végétales employées.

Considérations pour le dimensionnement et la planification

L'effet aérodynamique peut être évalué en se référant à la littérature scientifique, entre autres KOVALEV 2003. Le développement en hauteur de la haie exige une planification conséquente, plantation et entretien pendant des années et des décennies afin d'obtenir et conserver les effets désirés. En particulier, il s'agit de tenir compte de l'irrigation, de la protection contre la végétation concurrentielle et des dégâts liés aux animaux.

La végétalisation de friches industrielles ou de l'industrie minière exige souvent une étude des substrats et des sols par rapport à leur compatibilité avec l'environnement. Des sites contaminés et des sols contenant des substances nocives sont des facteurs de limitation et les différentes voies de contamination des substances polluantes doivent être considérées. Ce n'est que sur la base de ces expertises qu'on pourra décider de

la faisabilité d'une végétalisation directe du substrat ou si un recouvrement sous forme de couches superficielles, de couches de rétention d'eau ou d'étanchéisation de la surface est nécessaire. Ensuite seulement, une analyse du sol destinée à la technique végétale et une planification de la végétalisation sur la base des résultats des expertises vaudront la peine.

2.3.9 Régulation du régime des eaux

Problématique

Dans les ravines et autres dépressions de terrain sur des surfaces nues ou pauvres en végétation, des épisodes pluvieux intenses peuvent conduire en un laps de temps très court à des ruissellements superficiels temporaires importants. Les conséquences de ces écoulements à vitesse élevée sont des érosions, de grands charriages de sédiments et de boue, des atteintes au patrimoine aquatique ainsi qu'une forte diminution de la capacité de formation des nappes souterraines. Des revêtements végétaux appropriés tels que des forêts, buissons ou des haies introduites sur les emplacements à problème par des systèmes végétaux de consolidation des versants, ravins et ravines, peuvent être utilisés pour réguler le régime des eaux. Ces effets sont particulièrement importants dans les bassins versants au-dessus des secteurs menacés par des crues, ainsi que dans les bassins versants à l'amont des barrages et autres installations d'approvisionnement en eau.

Sollicitations

Les facteurs relatifs aux précipitations, en tant que sollicitations principales, doivent être décrits dans le détail : force, durée, fréquence, intensité ainsi que la durée des périodes de sécheresse.

Résistances

Les versants et autres surfaces doivent être recouvertes d'une couverture végétale adaptée encourageant l'infiltration, et équipées de structures freinant le ruissellement superficiel. Pour cela, un revêtement végétal dense est nécessaire, ainsi que toutes les mesures destinées à augmenter la rugosité de la surface. Les ravins et les ravines doivent être aménagés avec une végétation buissonnante et des structures rugueuses (par exemple un canal à lit rugueux), de façon à diminuer la vitesse d'écoulement, augmenter le temps de concentration, absorber les pointes d'écoulement et améliorer les possibilités d'infiltration, par exemple par l'augmentation de la perméabilité et la prolongation de la durée d'infiltration.

Facteurs de limitation

Les conditions extrêmes d'emplacement - pente du versant, exposition, mésoclimat, types de sol, forme de stockage, carence en substances nutritives et présence de substances toxiques - constituent des facteurs de limitation. Dans les ravins et les ravines, des limites proviennent également des vitesses d'écoulement élevées, des forces tractrices et de l'effet des matériaux charriés. Dans les pentes menacées de glissement avec des surfaces de glissement plus profondes, une infiltration de l'eau plus forte peut augmenter le risque de rupture de la pente. Ce risque devrait être clarifié par appel aux métiers des géotechniciens.

Considérations pour le dimensionnement et la planification

L'influence de la végétation sur l'infiltration et la vitesse de l'écoulement en surface peut être évaluée en se basant sur la littérature spécialisée dans ce domaine, par exemple MARKART et al. 2004. Le développement de la densité et de la structure de végétation prévues exige une planification, une plantation et des soins conséquents sur plusieurs années voire des décennies, afin d'obtenir et conserver les effets désirés.

La nécessité de guider simultanément l'infiltration et les écoulements superficiels exige un entretien régulier de la végétation. Une végétalisation naturelle du secteur devrait être visée afin de garantir des conditions écologiques stables ayant, par exemple, une vulnérabilité faible par rapport aux maladies, et ainsi occasionner de faibles dépenses d'entretien.

2.3.10 Zones détruites par le feu

Problématique

La destruction de la végétation et d'une partie de la couche humifère par des incendies de forêt et autres incendies de friches conduit instantanément à un risque d'érosion accru, devant être contrôlé par des mesures d'urgence afin de réduire les pertes de nutriments et de matières organiques du sol, permettant ainsi un rétablissement rapide de la végétation. Les rejets exceptionnels de nutriments peuvent conduire à des dégâts considérables, par exemple une eutrophisation, dans les zones de captage de l'eau potable et les cours d'eau en aval.

Sollicitations

Les sollicitations principales proviennent de la masse des végétaux morts, respectivement du stock de matières inflammables, des effets climatiques tels que la sécheresse, la canicule, le vent selon sa force, sa durée, sa fréquence et sa direction.

Résistances

Les incendies de friches sont normalement liés à des situations atmosphériques sèches et à des emplacements secs. Leur propagation est encouragée par des stocks de bois accolés. De larges bandes de terrain dénuées de toute biomasse inflammable et recouvertes seulement d'herbes ou d'une végétation herbacée comme protection contre l'érosion offrent une bonne résistance contre la propagation des incendies. Ces bandes de terrain libre encouragent la diversité biologique et peuvent servir de pâturage.

Après un feu, le développement de la végétation est très limité en raison de la destruction, de la sécheresse de l'emplacement et du sol brûlé. C'est pourquoi la première mesure suite à un incendie doit principalement viser à la prévention de l'érosion avec la mise en place d'ouvrages provisoires au moyen des matériaux disponibles. Pour cela, des arbres en épi et des aménagements en rondins sur les ravins, ravines et versants escarpés sont opportuns en utilisant les troncs carbonisés. L'ensemencement d'herbes et de graminées pouvant rapidement former une couverture végétale fermée est nécessaire. Le mélange de semences devrait être riche en espèces et montrer des propriétés adaptées aux conditions extrêmes, avec des espèces

ayant une germination rapide et issues d'une étape de succession ultérieure pour l'emplacement considéré.

Facteurs de limitation

La contribution de la végétation est limitée par le degré de destruction du sol, ce qui exige un reverdissement rapide avant que les matériaux fins et organiques du sol ne s'érodent.

Considérations pour le dimensionnement et la planification

L'effet des mesures linéaires de protection contre l'érosion peut être évalué sur la base de modèles de diagnostic sur l'érosion. La végétation non-ligneuse des zones pare-feu doit être autochtone et adaptée à la station, tout en protégeant le sol de l'érosion et en permettant la pâture. La végétation visée doit être développée de façon à réduire les dangers futurs et favoriser la repousse après un feu. Les soins doivent prévoir une élimination de la biomasse sèche, au mieux son utilisation.

2.3.11 Les végétaux comme protection contre les avalanches

Problématique

Les avalanches sont des dangers naturels pouvant porter atteinte aussi bien aux hommes qu'aux infrastructures dans les régions alpines. Une forêt protectrice développée et soignée de manière appropriée peut empêcher le déclenchement des avalanches si des troncs solides suffisamment stables amortissent la pression issue des composants de la neige en surcharge et parallèles à la pente. De plus, la forêt favorise une répartition uniforme de la neige et améliore les paramètres mécaniques du manteau neigeux. Une avalanche lancée peut difficilement être freinée par la végétation. Dans la mesure du possible, ce cas devrait être évité par l'entretien des forêts protectrices.

Sollicitations

L'effet mécanique avant le déclenchement d'une avalanche provient des composants du poids du manteau neigeux parallèles à la surface du versant. Le manteau neigeux a une masse volumique allant d'environ 1 KN/m³ sans cohésion jusqu'à 10 KN/m³ sous forme de glace. Vers la fin de l'hiver, les manteaux neigeux ont une épaisseur de plusieurs mètres.

Par un mouvement lent de glissement (sans déclenchement d'avalanche) vers l'aval, le manteau neigeux exerce en permanence une pression parallèle à la pente sur la végétation comprise entre 1 et 3,5 kN/m². Celle-ci suffit pour déraciner quelques arbrisseaux. Lors du déclenchement d'une avalanche, 50 mètres suffisent pour que celle-ci atteigne une force d'impulsion nécessaire pour briser des troncs d'arbre. Au plus tard après une coulée de 150 mètres, les troncs seront rompus et les arbres déracinés. Les pressions qui s'exercent sur les arbres dépendent du type d'avalanche : 3 - 5 kN/m² pour des avalanches poudreuses et 10 - 50 kN/m² pour des avalanches coulantes.

Effets de la végétation visant à la réduction des sollicitations

L'effet de la végétation permettant de diminuer les sollicitations repose sur différentes particularités de la

forêt. Parmi les effets les plus importants, on peut citer :

- **Interception de la neige**
Lors de chutes de neige, une partie de celle-ci est captée dans les couronnes des arbres, dont une part s'évapore. Ainsi, le manteau neigeux est moins dense et plus structuré dans la forêt qu'en plein air. En hiver, les espèces d'arbres à feuilles persistantes ont logiquement un taux d'interception plus élevé que les espèces à feuilles caduques.
- **Bilan du rayonnement**
Dans une forêt persistante densément peuplée, le microclimat est plus équilibré qu'en dehors de la forêt. Le réchauffement du manteau neigeux le jour et son refroidissement la nuit sont moindres. La probabilité de formation de couches faibles et dangereuses dans le manteau neigeux est ainsi réduite.
- **Vent**
Les effets relatifs au vent et donc aux déplacements potentiels de la masse neigeuse sont moins problématiques dans un peuplement forestier fermé. Toutefois, de grandes quantités de neige peuvent se déposer dans les clairières des forêts.

Résistance de la végétation face aux avalanches

La fonction protectrice de la végétation consiste à empêcher le déclenchement des avalanches. Néanmoins lorsqu'une avalanche est déclenchée, même une forêt intacte ne peut généralement stopper les masses de neige en mouvement. Afin de pouvoir éviter le déclenchement d'une avalanche, la végétation doit être suffisamment haute (rugosité de la surface) afin de transpercer le manteau neigeux. L'effet de protection est perdu si le manteau neigeux recouvre ces rugosités de la surface (SAEKI et MATSUOKA en 1969). De plus, il faut tenir compte du fait que les plus petites plantes entièrement enfouies sous la neige – particulièrement les espèces facilement pressées au sol – peuvent elles-mêmes solliciter la formation d'avalanches, car elles favorisent la formation de couches faibles dans le manteau neigeux et le glissement des masses neigeuses. Ainsi, du « Krummholz » (all. : bois tortueux ; croissant dans les Alpes et Pyrénées en haute altitude formé par le vent) offre une certaine protection tant qu'il n'est pas recouvert. Puisqu'il existe des couches de neige de plusieurs mètres dans les régions alpines concernées par une activité d'avalanche, seule une forêt intacte peut finalement offrir une fonction de protection. La forêt joue alors un rôle de paravalanche effectif et économique. Les troncs soutiennent la couche de neige et la stabilisent. Cet effet de soutien ne doit pas être surestimé, car seule une forêt densément peuplée prévient les déclenchements d'avalanche puisque l'effet de soutien n'agit qu'à proximité directe du tronc.

Facteurs de limitation

La limite naturelle de la forêt, déterminée par l'altitude et le climat, fixe l'utilisation de la forêt comme protection contre les avalanches. A cela s'ajoute des différences locales telles que la durée du recouvrement neigeux, l'exposition au vent, la température, le type de sol et la profondeur de l'humus. Compte tenu de l'effet du microclimat et de la topographie à un emplacement donné, des peuplements forestiers peuvent aussi être restaurés dans les zones subalpines. De jeunes arbres meurent souvent en raison de maladies cryptogamiques ou de moisissures dues à la durée de recouvrement par la

neige. Par exemple, la brûlure printanière (*Herpotrichia juniperi*) sévit dans les Préalpes jusque dans les régions de haute montagne et frappe les aiguilles des épicéas, pins de montagne, pins d'arve, sapins et genévrier. Son secteur de diffusion se situe entre 900 et 2000 mètres d'altitude. Ce champignon de neige cause de grands dommages surtout dans les endroits fortement enneigés des Préalpes lors du repeuplement d'une forêt, frappant les arbres, également les plus vigoureux, aussi bien lors de repeuplement naturel que lors de boisement dans les massifs montagneux.

Les dégâts causés par le gibier sont une autre cause menaçant les jeunes arbres. Les arbrisseaux sont toutefois plus flexibles que les vieux sujets. C'est pourquoi, les arbres se brisent en raison de la pression de neige à partir d'un diamètre du tronc d'environ 10 cm et les programmes de boisement sont souvent un échec après 30 à 50 ans en raison d'un entretien déficient.

Considérations pour le dimensionnement et la planification

Le profil exigé de la forêt dépend fortement de l'objectif de protection attendu et du potentiel de dommages existant. De petits glissements du manteau neigeux, par exemple ceux menaçant des personnes sur une piste de ski, peuvent seulement être empêchés – si tant est possible – par un peuplement très dense (degré de recouvrement de la couronne supérieur à 50%) d'arbres à feuilles persistantes. Afin d'empêcher des zones de déclenchement d'avalanche plus larges, on peut imposer des exigences moins strictes à un peuplement. Une attention particulière doit être portée aux peuplements clairsemés, comme c'est souvent le cas à la limite supérieure de la forêt. Le degré de recouvrement de la couronne et les dimensions des clairières existantes sont, combinés à la pente du versant, des critères importants pour décrire l'effet protecteur (FREHNER 2005).

Comme valeur de référence, un nombre de 500 troncs par hectare sur des pentes d'environ 35° et de 1'000 troncs par hectare sur des pentes plus raides est considéré comme nécessaire afin d'empêcher des départs d'avalanche. Comme l'indication du nombre de troncs dans les forêts subalpines n'est pas souvent disponible, des chiffres doivent absolument être mis à disposition. Les clairières ne doivent pas dépasser les 15 à 25 m et un degré de recouvrement de la couronne doit atteindre les 30 à 50 % (avec un degré de recouvrement de la couronne de 50 % et une pente de 35°, le déclenchement d'une avalanche est considéré comme très peu probable pour une largeur de trouée allant jusqu'à 15 m). La forêt devrait contenir différentes classes d'âge et différents types de bois. Des arbres tombés offrent une protection supplémentaire et doivent si possible ne pas être dégagés de la forêt. La plupart du temps, des aménagements supplémentaires doivent être érigés afin d'assurer le succès d'un projet de boisement d'une forêt de protection contre les avalanches. De telles aides au boisement sont (à côté des aménagements de protection contre les avalanches habituels) des trépieds, des pilonnages, des terrassements ou des buttes de terre.

Formule	Désignation / Explication	Unité
A	Profil de l'écoulement en travers du courant	m ²
A _p	Surfaces immergées de la structure végétale en travers de la direction du courant	m ²
c _p	Résistance au courant des plantes	-
c _v	Coefficient de courant	-
c _w	Paramètre du courant dans le BTP	-
F _{ST}	Résistance au courant des structures de végétation isolées	kN
g	Accélération due à la pesanteur = 9,81	m/s ²
Indice i	Pour élément partiel	-
l _u * l _G	Couche de couverture du fond du chenal	m ²
m _v	Densité d'approche spécifique de la végétation	-
Q	Écoulement	m ³ /s
R _{d,i}	Coefficient de mesure pour la résistance	-
R _{k,i}	Résistance d'un élément pouvant être déduit des propriétés des sc. naturelles	-
S _{d,x}	Sollicitations, valeur de calcul	-
S _{k,x}	Sollicitations (valeurs caractéristiques issues des sc. naturelles et de l'ingénierie)	-
v	Vitesse d'écoulement moyenne dans le profil d'écoulement	m/s
v _{crit}	Vitesse d'écoulement critique	m/s
γ _i	Coefficient partiel de sécurité selon les normes européennes	-
γ _x	Coefficient partiel de sécurité selon les normes européennes	-
ε	Coefficient d'amplification pour les forces tractrices selon SCHRÖDER et ROMISCH 2001	-
τ	Tension de cisaillement dans la mécanique des sols	kN/m ²
τ _f	Valeur maximale de la résistance au cisaillement au sol	kN/m ²
τ ₀	Force tractrice existante lors d'un événement	N/m ²
τ _{crit}	Force tractrice critique pour substrat, végétation ou méthode de construction	N/m ²

3. Méthodes de construction des ouvrages de Génie biologique

3.1 Manuel de construction FEGB 2007

Les méthodes de construction des ouvrages de génie biologique ont été publiées dans le Manuel de construction de la Fédération Européenne pour le Génie Biologique (ZEH 2007). Chaque méthode est décrite selon les travaux préparatoires, les travaux avec les plantes et les soins d'entretien à effectuer. De plus, une description courte et pertinente, ainsi que des photos et des dessins appropriés, complètent chacune des méthodes. Le Manuel de construction était une première étape et constitue donc un élément important pour les Directives européennes pour le génie biologique.

3.2 Application des types de construction

3.2.1 Critères de décision

Le choix de la méthode de construction du génie biologique et d'une composition végétale adéquate est primordial pour la réalisation de l'objectif.

Les objectifs suivants s'appliquent en priorité en tant que critères de décision :

Objectif de protection

Méthodes de construction répondant aux exigences hydrauliques, hydrologiques et géotechniques en matière de sécurité et de végétation future.

Objectif écologique

Impératif d'amélioration de l'état écologique, par exemple un cours d'eau par rapport au développement de la flore, de la faune et de sa qualité biologique, tel que défini dans la Directive-cadre sur l'eau de la Commission européenne

-Structures de biotope comme habitats.

Objectif d'esthétique du paysage

Insertion optimale des méthodes de construction dans le paysage

Perceptibilité et visibilité d'un cours d'eau.

Objectif économique

Utilisation de matériel végétal capable de reproduction, de matériaux disponibles sur place ou dans des secteurs avoisinants

Application de méthodes de construction et de matériaux pérennes et demandant des soins extensifs

Construction et entretien bon marché.

Objectif de durabilité

Utilisation de matériau de construction naturel et se régénérant :

Plantes vivaces, bois, terre, pierre

-Utilisation de matériau économe en énergie.

Objectif social

possibilités d'utilisation par la population

Zone de récréation et tourisme

Création de nouveaux espaces verts dans les zones urbaines.

3.2.2 Matrices de décision

Ouvrages de génie biologique au bord des cours d'eau et Mesures du génie biologique visant à la consolidation des pentes et des talus: Appendice

4. Entretien des ouvrages de génie biologique

4.1 Principes des travaux d'entretien

Des mesures d'entretien ne doivent être entreprises qu'en cas de nécessité, selon le principe

« Laisser faire plutôt que faire ». La nécessité sera déterminée par des visites locales régulières, permettant l'évaluation des résultats (cf. partie 5).

On tiendra compte des principes suivants :

- Le choix et l'application des ouvrages doivent engendrer le moins d'entretien possible.
- Atteindre l'objectif avec peu de moyens et le plus rapidement possible.
- Définir et harmoniser les performances techniques, écologiques, économiques et esthétiques avec l'objectif de développement de la végétation.
- diversité biologique la plus large possible.
- Sécurité routière.
- Accompagnement continu visant un développement végétal optimal et adapté.
- Aligner les entretiens sur l'équilibre naturel afin de réduire les effets négatifs, car un entretien inadéquat peut être plus nuisible qu'aucun entretien.
- L'exécution des phases d'entretien doit être en adéquation avec le développement des ouvrages, en particulier le peuplement végétal qui en résulte (soins spécifiques au type de construction - végétation visée).
- La condition préalable pour la réalisation des objectifs est la suite coordonnée des différentes phases d'entretien et leur accompagnement technique.
- Un budget adéquat et un personnel qualifié en charge de l'entretien sont indispensables afin de mettre en œuvre des mesures d'entretien selon les règles techniques des méthodes de construction du génie biologique.
- L'utilisation et la valorisation du matériel végétal (en tant que matériaux vivants, matériel auxiliaire, biomasse etc.) doivent être garanties durant l'organisation des travaux d'entretien.
- Les travaux d'entretien et leur mise en œuvre doivent être documentés.

4.2 Déroulement des travaux d'entretien

Travaux d'entretien de parachèvement : Soins de finition et soins de croissance

Mesures entreprises dès l'achèvement des travaux de construction jusqu'à l'obtention d'un état recevable, respectivement la prise en charge de l'ouvrage par le maître d'ouvrage. Un état recevable est défini par des critères de réalisation appropriés, décrits selon les spécificités de l'emplacement et mentionnés dans le cahier des charges du projet.

Travaux d'entretien de confortement : Soins de développement

Mesures visant un développement optimal jusqu'à la fin du délai de garantie fixé au marché, avec l'obtention d'un état opérationnel.

Travaux d'entretien de conservation et maintenance

Mesures visant le maintien durable de l'état opérationnel.

Constat de l'état

L'état recevable, c'est-à-dire opérationnel, doit être validé

par un contrôle des résultats (cf. chapitre 5).

4.3 Délimitation des travaux d'entretien

Mesures d'entretien régulier (entretien ordinaire)

Mesures d'entretien mises en œuvre à intervalles réguliers (cf. Travaux d'entretien de conservation et maintenance).

Mesures d'entretien irrégulier (entretien extraordinaire)

Mesures d'entretien nécessaires suite à des événements inhabituels et à des développements inattendus (crues, organismes nuisibles, néophytes, vandalisme, chablis, neige humide, etc.).

4.4 Planification des travaux d'entretien

La planification des travaux d'entretien s'appuie sur les principes des soins, comprenant le déroulement, la délimitation, le constat de l'état par un contrôle des résultats (cf. chapitre

5), un aperçu et les détails concernant la mise en œuvre des soins. Des illustrations, photos, types de profil, tableaux et plans de situation servent comme documentation.

4.5 Mise en œuvre des travaux d'entretien

Entretien spécifique aux méthodes de construction et à la végétation ciblée

Chaque méthode de construction nécessite des exigences spéciales selon la végétation définie, le niveau de développement des plantes et l'état des matériaux.

Selon le type de matériaux végétaux utilisés, les méthodes de construction suivantes peuvent être différenciées :

- Méthodes de construction pionnières (composées exclusivement d'espèces pionnières, surtout en appliquant des essences de Saules)
- Méthodes de construction transitoires (composées d'espèces pionnières, d'espèces de la succession écologique et d'espèces de l'objectif de développement)
- Méthodes de construction de climax (composées exclusivement d'espèces conformes à l'objectif de développement).

Travaux d'entretien

Des dessins et des explications se trouvent au chapitre 8 du Manuel de construction (FEGB 2007).

Pour les graminées, les roselières et les herbes, on tiendra compte des mesures suivantes :

- Moissonnage (par secteur ou par tronçon, saison de fauche, après la maturité des fruits, avec des outils et appareils adaptés aux types de biotope)
- Herbes (fauche subaquatique)
- Travaux d'amélioration tels que :
Complément de semis
Complément d'engrais
Transplantation de végétation en plaques et mottes de gazon
Irrigation
- Ramassage et évacuation des déchets.

Pour les arbres et les buissons, on tiendra compte des mesures suivantes :

- Recépage (rajeunissement en alternant les sections)
- Etêtage (pour les arbres au-dessus de la limite du

lit normal majeur, le long de chemins aménagés du point de vue écologique et paysager)

- Éclaircissage/prélèvement de troncs à la pièce (élimination de certains bois pour des raisons hydrauliques, écologiques et esthétiques)
- Coupe d'entretien (conservation)
- Élimination des espèces d'arbres indésirables tel que le robinier (mise en place d'un anneau de 50 cm de longueur, à une hauteur d'environ 1 à 1.5 m)
- Travaux d'amélioration tels que :
Remplacement
Complément d'engrais
Entretien et recouvrement du pourtour de l'arbre
Irrigation
Renouvellement des fixations ou du soutien de l'arbre
- Ramassage et évacuation des déchets.

Intervalles de soins

La succession temporelle des étapes de soins est à mettre en place selon :

- Objectif de développement
- Aspects propres à la végétation et à la biologie des arbres (entretien des arbres : le meilleur moment de taille est pendant la période végétative, soit l'été, en raison d'une meilleure cicatrisation)
- Exigences hydrauliques et hydrologiques par rapport aux règles géotechniques et à la sécurité
- Aspects écologiques et législatifs sur la protection de l'environnement (repos biologique de la flore et de la faune, spécialement les poissons et les oiseaux)
- Aspect esthétique du paysage
- Besoin de matériel végétal pour la confection d'autres méthodes de construction du génie biologique (doit être possible toute l'année, les règlements juridiques locaux doivent éventuellement être complétés)
- Possibilité d'évacuation des matériaux non utilisables ou non récupérables
- Possibilités d'accès (par exemple accès difficile dans les prés durant la période de végétation).

Objectif	Type	Travail	Intervalle	Temps
----------	------	---------	------------	-------

5. Contrôle de l'efficacité des interventions de génie biologique

5.1 Principes des mesures de contrôle d'efficacité

Le suivi (monitoring) des interventions est la condition indispensable pour assurer une qualité durable et le développement continu des techniques de génie biologique. Ainsi :

- Les conditions financières pour le suivi doivent être assurées.
- Le suivi doit être effectué par un personnel qualifié.
- Les ouvrages à contrôler doivent être localisés et documentés quant à leur réalisation. Une évaluation d'après une base de données, ainsi que des questionnaires standardisés, accessibles sur Internet, doivent être possibles.

5.2 Contrôle de l'état et du développement des ouvrages et de la végétation

État des matériaux végétaux – arbres et buissons

- Hauteur
- Diamètre (à mesurer à 20 cm et 100 cm de la hauteur du tronc)

- Densité (nombre de pousses / m²)
- Vitalité (classes de vitalité selon BRAUN 1-5 ou ROLOFF 0-3)
- Composition des espèces
- Etc.

État des matériaux végétaux – graminées, herbes et roselières

- Vitalité
- Degré de recouvrement
- Composition des espèces
- Nombre de pousses en fleur
- Hauteur moyenne des feuilles
- Rapports graminées/herbe.

État des matériaux morts

- État des grumes – degré de putréfaction (contrôle visuel des coupes, contrôle technique à l'aide d'un résistographe, etc.)
- État des clous et des fils métalliques
- État des autres matériaux
- Degré de décomposition des matériaux de construction venant de la région
- Dégâts de construction dus à l'érosion et autres contraintes
- Défauts de construction.

État écologique

Relevé de l'état écologique des ouvrages de génie biologique, selon les objectifs de développement tels que:

- Interconnexion des biotopes
- relevé de la qualité de l'habitat pour les espèces ciblées (faune et flore).
- Directive-cadre sur l'eau (DCE) « bon état écologique » : relevé des composantes biologiques de qualité.
- Effet écologique général :
- relevé de l'état écomorphologique, influence des méthodes de construction des ouvrages de génie biologique sur la qualité des eaux et du patrimoine aquatique.
- Les valeurs de référence pour les relevés de l'état écologique doivent être définies (coupe transversale / méthode de construction isolée ou section / effet total de plusieurs méthodes de construction).

5.3 Contrôle de l'efficacité et de la fonctionnalité des ouvrages et de la végétation

Fonction hydraulique et hydrologique

- Capacité de débit
- Protection contre les crues, rétention des eaux
- Niveaux des hautes eaux
- Apparitions d'érosion
- Conclusion sur l'écoulement, la force tractrice et la vitesse d'écoulement.

Fonction en regard des règles de sécurité et de la géotechnique

- Stabilité
- Durabilité
- Fonction à l'égard des règles de sécurité
- Objectifs biotechniques atteints / protection
- Fissures et gonflements
- Déformations
- Affaissements et tassements
- Rupture de talus

- Formes de tronc courbées
- Suintement
- Indication biologique.

Fonction écologique

- Formation d'habitats
- Diversité des habitats
- Mise en réseau des habitats
- Conséquence sur un écosystème
- Qualité structurelle des eaux
- Réalisation de la végétation visée / proximité naturelle.

Fonction d'esthétique du paysage

- Paysagisme et spécificité culturelle du paysage.

Fonction socio-économique

- Analyse coûts - bénéfiques / analyse d'utilité
- Tourisme, loisirs de proximité
- Utilité et viabilité
- Formation d'une identité visuelle.

Évaluation globale

5.4 Contrôle de la durabilité et écobilan

Choix de la méthode de construction - qualité optimale pour la réalisation de l'objectif de développement.

Choix du matériel – qualité optimale pour la méthode de construction respective :

- Utilisation préférentielle de matériel végétal ou non végétal indigène, adapté à la station et à la surface, choisi selon les exigences de construction
- Certification (par exemple filet de coco, filet de jute, semences indigènes, etc.) Mesures de soins :
- Exigence
- Type de mise en œuvre (machines y compris type d'appareils)

Direttiva Europea per l'Ingegneria Naturalistica

- 1. Principi base degli interventi di Ingegneria Naturalistica**
 - 1.1 Il termine Ingegneria Naturalistica
 - 1.2 Possibilità e limiti dell'Ingegneria Naturalistica
 - 1.3 Efficacia delle piante e dei popolamenti vegetali nelle misure di ingegneria naturalistica
 - 1.3.1 Effetti tecnico-funzionali
 - 1.3.2 Effetti ecologici
 - 1.3.3 Effetto estetico-paesaggistico
 - 1.3.4 Effetti economici
 - 1.4 Sviluppo storico dell'Ingegneria naturalistica e suo significato per la regione europea di oggi
 - 1.5 Discipline correlate con le soluzioni dell'ingegneria naturalistica
 - 1.6 Ingegneria naturalistica, protezione della natura e competenze professionali (Deontologia)
 - 1.7 Prerequisiti per la riuscita degli interventi di ingegneria naturalistica
- 2. Valutazione della messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica**
 - 2.1 Principi di misurazione della messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica
 - 2.1.1 Presentazione del modello di messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica
 - 2.1.2 Influssi sulle opere di messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica nel senso della progettazione strutturale
 - 2.1.3 Influenze della vegetazione nel ridurre gli effetti
 - 2.1.4 Resistenze della vegetazione nei confronti dei citati effetti
 - 2.1.5 Singoli parametri per la descrizione delle resistenze di soprassuoli vegetazionali
 - 2.1.6 Osservazioni preliminari sull'impiego della vegetazione coerente rispetto alla stazione e sulla valutazione dei fattori della stazione
 - 2.2 **Integrazione della progettazione di settore e di dimensionamento di ingegneria naturalistica nell'intero processo di progettazione, esecuzione, sviluppo e manutenzione**
 - 2.3 **Raccomandazioni per ambiti di applicazione frequenti**
 - 2.3.1 Erosione scarpate in terra
 - 2.3.2 Scivolamenti superficiali
 - 2.3.3 Solchi di erosione su scarpate e versanti
 - 2.3.4 Sponde e golene di corsi d'acqua
 - 2.3.5 Sponde di acque stagnanti
 - 2.3.7 Protezione di coste marittime
 - 2.3.8 Piantagioni protettive contro il vento e le emissioni
 - 2.3.9 Regolazione del regime delle acque
 - 2.3.10 Zone distrutte da incendi
 - 2.3.11 Le piante come protezione antivalanghe
- 3. Metodi costruttivi dell'ingegneria naturalistica**
 - 3.1 Glossario d'ingegneria naturalistica EFIB 2007
 - 3.2 Uso del glossario
 - 3.2.1 criteri di scelta
 - 3.2.2 Matrici di scelta
- 4. Cure dei sistemi costruttivi d'ingegneria naturalistica**
 - 4.1 Principi
 - 4.2 Successione delle operazioni di manutenzione.
 - 4.3 Tipologia di manutenzione
 - 4.4 Pianificazione della manutenzione
 - 4.5 Gestione della manutenzione
- 5. Controlli finali delle opere d'ingegneria naturalistica**
 - 5.1 Regole per i controlli finali
 - 5.2 Controlli delle condizioni e dello sviluppo
 - 5.3 controllo dell'efficacia e della funzionalità
 - 5.4 Controllo della durata e del bilancio ecologico

1. Principi base degli interventi di Ingegneria Naturalistica

1.1 Il termine Ingegneria Naturalistica

L'Ingegneria Naturalistica è una disciplina tecnico – naturalistica, che contribuisce, con l'aiuto delle piante e delle associazioni vegetali, alla messa in sicurezza di aree di intervento e di interventi costruttivi, nonché allo sviluppo del paesaggio.

Principale caratteristica è che le piante e parti di piante sono utilizzati come materiali da costruzione vivi in modo che essi con il loro progressivo sviluppo in sinergia con il suolo e le rocce danno un contributo significativo alla protezione permanente contro tutte le forme di erosione. Nella fase iniziale è spesso necessaria una combinazione con materiali inerti, che in alcuni casi può assolvere la maggior parte delle funzioni di sostegno.

Tuttavia, i materiali organici sono preferiti perché questi si demoliscono in contemporanea con la crescente stabilizzazione e la copertura delle piante autoctone e portano al riciclo dei materiali, al contempo le specie vegetali autoctone e adattate alle condizioni locali, favoriscono la biodiversità coerente con il paesaggio naturale. Obiettivi della pianificazione e degli interventi costruttivi sono la tutela e la messa in sicurezza delle superfici di intervento e delle infrastrutture e al contempo lo sviluppo degli elementi costituenti il paesaggio.

1.2 Possibilità e limiti dell'Ingegneria Naturalistica

I campi di applicazione dell'Ingegneria Naturalistica sono la messa in sicurezza di scarpate, versanti, sponde, golene di espansione, argini, dighe, discariche, aree conseguenti ad attività minerarie e superfici collegate con le infrastrutture:

- I campi di applicazione dell'Ingegneria Naturalistica sono la messa in sicurezza di scarpate, versanti, sponde, golene di espansione, argini, dighe, discariche, aree conseguenti ad attività minerarie e superfici collegate con le infrastrutture:
- sui fiumi nel consolidamento delle sponde in erosione con tecniche di ingegneria naturalistica, modifica della direzione della corrente, rivitalizzazione di corsi d'acqua artificializzati anche aumentando le superfici di espansione nelle aree golenali e migliorando le misure di protezione contro le piene correlate con la loro funzionalità ecologica, misure di protezione funzionale e messa in sicurezza di argini, dighe e golene di espansione. su scarpate e versanti nella prevenzione delle erosioni superficiali e profonde, rivegetazione e stabilizzazione di frane e aree di scavo, nonché la protezione rapida e di lungo periodo dei versanti instabili mediante la funzione di ancoraggio delle radici e il drenaggio del suolo per l'effetto di pompaggio legato alla traspirazione delle piante.
- nel miglioramento delle risorse idriche locali e regionali attraverso adeguate misure di ingegneria naturalistica, riforestazione e ricostituzione di coperture vegetazionali sui pendii sino alle zone montane.
- a coste marine e dei laghi nel consolidamento di sponde a rischio di erosione e la stabilizzazione di dighe, dune e aree golenali.
- nelle zone umide nella creazione di habitat idonei.

- nelle zone minerarie e siti industriali nella messa in sicurezza, lo sviluppo e il rinverdimento di nuove strutture.

L'uso delle piante è ovunque possibile, dove esiste un potenziale habitat per la vegetazione. **E' sempre possibile l'utilizzo della copertura vegetazionale** di protezione e stabilizzazione **per impedire l'erosione in sostituzione e completamento** funzionale di metodi di costruzione tecnici, **a condizione che** le capacità bio-tecniche delle piante siano sufficienti. Per trovare le soluzioni vengono utilizzate sia le conoscenze professionali delle discipline tecnico - ingegneristiche che le conoscenze naturalistiche e dell'ecologia del paesaggio, per ottenere le finalità tecnico – funzionali mediante lo sviluppo di cenosi vegetali stabili con uso di piante adatte alle condizioni stazionali. Accanto alle misure di protezione dall'erosione e di compensazione del bilancio idrico i provvedimenti dell'ingegneria naturalistica producono anche interferenze sul microclima, sulla struttura dei biotopi e sulla ricostruzione del paesaggio.

Vantaggi delle misure di ingegneria naturalistica rispetto ai metodi di costruzione tecnici:

prolungamento nel tempo della curva di funzionalità legata allo sviluppo e alla capacità di rigenerazione delle piante e delle associazioni vegetali

- realizzare possibilmente uno stadio avanzato della serie dinamica della vegetazione natural
- stabilità accresciuta con lo sviluppo delle piante
- reazione favorevole ai disturbi dovuta alla capacità di adattamento naturale delle piante
- capacità di adattamento delle piante alle forze che agiscono su di esse per la elasticità, resistenza a trazione e nuove linee di successione
- azione delle piante sulla struttura
- aumento della biodiversità e della funzione di habitat (Ecologia)
- Miglioramento del paesaggio (estetica del paesaggio)
- favorire fattori socio-economici (turismo, attività ricreative)
- misure che generano scarse interferenze, che consumano poca energia e promuovono l'auto-sviluppo della natura (che sono dunque senza rimpianti - no regret).

Tramite l'uso prioritario del materiale vegetale di provenienza locale e di specie selvatiche invece che di allevamento e di provenienza esotica vi sono ulteriori effetti positivi:

- valido e debole effetto di messa in sicurezza mediante inserimento ottimale nell'ecosistema, un migliore adattamento alle condizioni estreme del sito e le caratteristiche climatiche e geologiche regionali,
- maggiore potenzialità di sviluppo di associazioni vegetali naturali tipiche del sito
- migliore e sostenibile integrazione nella gestione del paesaggio naturale
- migliore rapporto costi-benefici e una maggiore efficienza.

Nelle aree urbane, ai fini della sicurezza e manutenzione degli spazi liberi, possono tuttavia anche trovare le condizioni locali specie alloctone con caratteristiche biotecniche, nonché alberi e arbusti di uso ornamentale

Limiti dell'ingegneria naturalistica vengono raggiunti nei casi in cui gli effetti descritti, in particolare gli effetti tecnici delle piante non sono sufficienti, ad esempio quando:

- la sollecitazione meccanica supera la resistenza delle piante e dei popolamenti vegetali,
- le piante non sono radicate a profondità sufficiente per risanare scarpate in frana,
- le condizioni di vita e di germinazione sono così negative, anche con uso di ammendanti che difficilmente può svilupparsi la vegetazione (bad lands).
- manutenzioni inadeguate portano a modificare le condizioni del sito, che poi incidono negativamente sulle condizioni di sicurezza e di drenaggio.

Al fine di favorire soluzioni di ingegneria naturalistica, bisogna essere consapevoli degli svantaggi delle soluzioni di ingegneria naturalistica a confronto di quelle ingegneristiche:

- i lavori di ingegneria naturalistica sono legati al ritmo di crescita delle piante e fattori di disturbo del mondo vegetale.
- Spesso è necessario uno spazio maggiore per lo sviluppo della vegetazione.
- le radici e i fusti delle piante possono causare tensioni nelle fughe e giunti delle strutture ingegneristiche a causa della loro crescita in spessore.
- La crescita in spessore delle radici può portare a deformazioni strutturali.
- nel caso di alberi di grandi dimensioni si arriva a carichi di rottura sul momento di rotazione alla base del tronco e sulle varie forze di trazione nella sfera della piastra radicale
- nelle zone sottoposte a sforzo possono verificarsi cedimenti del suolo o sollevamenti delle strutture.
- possono essere raggiunti i limiti della stabilità geotecnica.
- le limitate possibilità di calcolo comportano ancora incertezze.

I "presunti" svantaggi possono spesso essere compensati da una specifica gestione temporale e spaziale. In molti casi si possono trovare più ampie soluzioni ingegneristiche, che coinvolgono la natura circostante.

1.3 Efficacia delle piante e dei popolamenti vegetali nelle misure di ingegneria naturalistica

Per quanto riguarda l'uso delle piante nelle costruzioni valgono le vecchie osservazioni spesso secolari sulla loro capacità di azione.

Diverse caratteristiche permettono alle piante di rispondere con flessibilità nel loro ambiente, in modo che possano essere utilizzate in operazioni di ingegneria strutturale. Esse possono:

- riprodursi con modalità diverse generative e/o vegetative
- rigenerarsi dopo i danneggiamenti e determinati cambiamenti ambientali
- pompare acqua dal suolo e restituirla attraverso le sue superfici (evapotraspirazione),
- unire diversi materiali, fornire aggrappaggio a strutture in rete
- fornire copertura superficiale

- fissare e stabilizzare materiali solidi sciolti e in movimento e acqua
- sostenere crolli e rigurgiti tramite lo sviluppo delle getti radicali
- adattarsi alle mutevoli condizioni del sito o al flusso di acqua.

Da queste possibilità si configurano complesse azioni delle piante che si possono dividere in quattro categorie: tecnico-funzionali (1), ecologiche (2) estetico-paesaggistiche (3) ed economiche (4).

Come risultato le costruzioni con metodi dell'ingegneria naturalistica sono da considerare sistemi viventi che restano in equilibrio sulla strada della successione naturale anche potenziale, tendono ad essere un'autoregolazione dinamica senza apporto di energia artificiale. Con una corretta scelta dei materiali vivi e morti e tipologie costruttive viene fornita una sostenibilità insolitamente alta e al minor costo possibile di manutenzione (vedi Capitolo 4). Tuttavia, si deve sottolineare che questi obiettivi richiedono una manutenzione particolare grandi cambiamenti nelle aree urbane molto modificate come per esempio nelle città.

1.3.1 Effetti tecnico-funzionali

Degli effetti tecnici, che sono in primo piano per l'ingegneria naturalistica e le funzioni di messa in sicurezza delle piante, i seguenti sono di particolare importanza:

- copertura del suolo da parte dei popolamenti vegetali per la protezione contro le forti piogge, erosione del suolo da parte dell'acqua e del vento, azione erosiva della neve e caduta di massi.
- ancoraggio meccanico e azione pilolo delle radici.
- consolidamento e fissaggio del suolo mediante aderenza delle particelle di suolo alle radici delle piante, l'incollaggio delle particelle di terreno da parte delle sostanze umiche, micorrize e microfauna, ammorsamento e ancoraggio del suolo superficiale con quello sottostante, impedendo il dilavamento del materiale fine per filtrazione.
- irruvidimento del substrato tramite tralci, rami e foglie, nonché trattenimento di masse di detriti, macerie e neve.
- rallentamento e deviazione di correnti d'aria e d'acqua.
- effetti nella rizosfera, in particolare effetto esplosivo derivato dallo spessore di crescita delle radici, allentando il terreno sul movimento della piastra radicale e compattando il terreno in pendenza nella zona del disco radicale
- aumentare la coesione e la coesione interna tramite rimozione di acqua dal suolo
- influenza positiva sull'equilibrio acqua per evaporazione delle acque di saturazione del suolo, la ritenzione di acqua piovana, ritenzione idrica del suolo e dosaggio delle acque di infiltrazione.

1.3.2 Effetti ecologici

Dall'applicazione delle misure di ingegneria naturalistica ci si deve attendere un miglioramento della qualità dell'ambiente come segue:

- Effetti positivi sulle proprietà del suolo come l'aumento del volume dei pori e il miglioramento delle condizioni di vita dei microrganismi e la formazione di humus e di nutrienti per le piante.

- Sviluppo delle comunità vegetali (successione) e il miglioramento delle strutture dei biotopi.
- habitat per la fauna.
- assorbimento e arresto dei fenomeni di eutrofizzazione e in parte delle sostanze tossiche.
- Modifica positiva del microclima
- assorbimento del rumore in piccola parte.
- filtrazione della polvere dell'aria, gas di combustione e depositi sulle parti delle piante.

1.3.3 Effetto estetico-paesaggistico

I danni del paesaggio possono essere risanati con i metodi costruttivi prossimonaturali dell'ingegneria naturalistica:

- piante e gruppi di piante alleggeriscono il paesaggio.
- sostituzione delle strutture tecniche con popolamenti vegetali quando viene garantito il loro corrispondente effetto di stabilità.
- rapida integrazione degli interventi di costruzione in terra con le associazioni vegetali circostanti e quindi nel paesaggio.
- inserimento visuale di interventi puramente tecnici nel paesaggio circostante mediante impiego di vegetazione coerente col paesaggio.
- composizione e accentuazione degli edifici.
- protezione visuale di strutture di ingegneria di grande impatto.

L'uso dell'ingegneria naturalistica contribuisce così a ridurre il disturbo visuale del paesaggio. Strutture di ingegneria possono essere di conseguenza configurate da forme meno impattanti per l'ambiente.

1.3.4 Effetti economici

L'ingegneria naturalistica applicata contribuisce alla conoscenza e all'uso corrispondente delle forze vive della natura di recuperare aree prive di vegetazione, con bassi costi di materiali e di energia.

Con questo l'ingegneria naturalistica dà un contributo significativo alla trasformazione delle regole sulla durabilità nelle costruzioni:

- Con l'aiuto di molte verifiche, oggi la gran parte degli interventi vivi eseguiti meccanicamente spesso possono ridurre i costi rispetto alle misure di attuazione di ingegneria puramente tecniche, per esempio con l'utilizzo di parti di piante moltiplicabili per riproduzione vegetativa.
- Mediante l'utilizzo di materiali da costruzione rinnovabili e riducendo così il costo dei materiali, anche a fronte di costi salariali più elevati.
- Attraverso il riutilizzo significativo di materiale vegetale, terra e rocce mediante pianificazione finalizzata locale con riduzione delle quantità e minor incidenza dei costi di trasporto.
- A causa delle particolari proprietà delle piante vive anche i costi di manutenzione delle opere di ingegneria naturalistica possono essere mantenuti bassi.
- quando si presentano danni a strutture di ingegneria naturalistica spesso i costi per il risanamento sono minori per la capacità di rigenerazione della vegetazione utilizzata.
- i fattori socio-economici (ad es. esempio il turismo in alta montagna, le attività ricreative)

1.4 Sviluppo storico dell'Ingegneria naturalistica e suo significato per la regione europea di oggi

L'idea di base dell'ingegneria naturalistica permette la creazione di sinergie tra gli usi antropici del paesaggio e le esigenze della natura. Il quadro concettuale dell'ingegneria naturalistica è nato in Europa, molto probabilmente a causa della pressione di utilizzo del territorio che in Europa è molto elevata a causa della densità degli insediamenti e il loro uso storico particolarmente elevato.

Da secoli sono conosciute le opere di messa in sicurezza con piante vive e parti di piante nelle sistemazioni idrauliche e nelle costruzioni in terra. Da queste origini di interventi di sistemazione manuali l'ingegneria naturalistica si è sviluppata in un complesso di conoscenze scientifiche orientate alle applicazioni. Queste hanno contribuito:

- a utilizzare le conoscenze dell'ecologia del paesaggio per una riflessione approfondita sulle aree naturali regionali;
- la valutazione dell'effetto di determinate piante per la valorizzazione di un sito e il loro uso potenziale
- l'uso di appropriati materiali da costruzione per i rispettivi siti ed aree naturali
- l'uso dello sviluppo delle tecniche meccaniche nelle costruzioni vive
- le misure di gestione e di sviluppo indirizzate a certe finalità
- la valutazione scientifica dei risultati raggiunti
- maggiore uso di specie vegetali autoctone e di provenienza locale, piante certificate e materiali da costruzione naturali, per soddisfare il concetto di conservazione della natura negli interventi di costruzione e al miglioramento della qualità dei corpi idrici e degli habitat
- rinuncia all'uso di concimanti e determinati ammendanti e rinverdimenti che possono compromettere le acque e le aree protette
- uso di moderni additivi naturali nelle costruzioni

Oltre alla necessità ancora esistente per il consolidamento delle scarpate nella costruzione delle infrastrutture di trasporto, delle sistemazioni costiere e idrauliche, derivano per il futuro, nuove sfide quali:

- I cambiamenti climatici e gli eventi meteorologici estremi portano a crescenti problemi di erosione, come i problemi delle alluvioni e del permafrost. Qui l'ingegneria naturalistica offre soluzioni.
- In caso di anomalie nel bilancio idrico attuale e alterazioni nelle condizioni di deflusso a causa di eventi estremi di precipitazione e periodi di pioggia modificati le misure dell'ingegneria naturalistica contribuiscono ad attenuare i fenomeni
- L'utilizzo delle tecniche costruttive dell'ingegneria naturalistica mitiga i processi di desertificazione e degrado.
- Una copertura vegetale protettiva, realizzata attraverso l'utilizzo di insiemi di piante ricche di specie con specie tipiche del sito e di provenienza locale, contribuiscono alla salvaguardia e incremento della biodiversità.
- l'utilizzo di materiali a basso consumo di energia di materie prime rinnovabili nei metodi dell'ingegneria naturalistica significa un uso positivo delle risorse.

- l'aumento della messa a dimora di piante legnose contribuisce al sequestro della CO₂.
- soddisfare i requisiti del protocollo di Kyoto, la Convenzione di Rio, le politiche europee di protezione del suolo e la realizzazione degli obiettivi della direttiva quadro sulle acque per effetto della ritenzione e la connettività degli habitat.

Le concezioni dell'ingegneria naturalistica promuovono la consapevolezza ambientale complessiva ed una nuova cultura negli interventi costruttivi.

1.5 Discipline correlate con le soluzioni dell'ingegneria naturalistica

Oggi i principi fondanti dell'ingegneria naturalistica sono utilizzati in molte discipline per tutti i principali interventi di messa in sicurezza. Questi includono:

- paesaggistica, idraulica civile
- riordini agricoli, ingegneria idraulica e fluviale
- protezione costiera, controllo dei regimi torrentizi e delle slavine, idraulica industriale
- Miniere, Altre attività estrattive
- idraulica dei centri abitati, Gestione dei rifiuti
- impianti sportivi e per il tempo libero
- la costruzione di strade, ferrovie e aeroporti
- viabilità agricola e forestale, viabilità pedonale, ciclabile ed ittica
- Altri interventi di Ingegneria Civile

Inoltre le conoscenze dell'ingegneria naturalistica vengono applicate in geotecnica, idraulica e negli interventi di costruzione. Le seguenti professioni usano la loro conoscenza quale fondamento della formazione e delle loro competenze in attuazione delle misure di ingegneria naturalistica: pagina 126

1.6 Ingegneria naturalistica, protezione della natura e competenze professionali (Deontologia)

L'ingegneria naturalistica può contribuire in modo significativo al miglioramento delle condizioni ecologiche degli habitat ai sensi della direttiva quadro EU sulle acque, la direttiva sulle alluvioni, la direttiva sulla protezione del suolo e di altre direttive (ad esempio per la protezione delle specie e degli habitat, la conservazione della qualità dell'ambiente) e alla loro capacità di ripristinare uno stato prossimo naturale di superfici devastate. Opere di ingegneria naturalistica significano sostenibilità.

La protezione della natura è sempre uno scopo ambito degli interventi di ingegneria naturalistica, anche se - almeno per i lavori di messa in sicurezza - resta prioritario garantire l'aspetto funzionale anche potenziale.

Tuttavia, può anche portare a conflitti tra ingegneria naturalistica e conservazione. Perseguendo prioritariamente gli interessi della conservazione della natura, gli interventi costruttivi di ingegneria naturalistica possono essere respinti perché la loro applicazione può portare a cambiamenti negativi nei processi evolutivi naturali e nelle morfologie prossime naturali cambierebbe. La scelta delle piante, tenendo conto del loro comportamento pioniero e la propagazione di piante autoctone in pieno campo non può essere effettuata unicamente su criteri di protezione della natura.

Come in tutte le discipline ingegneristiche è vero anche

per l'ingegneria naturalistica che l'esperienza, le conoscenze e le competenze professionali sono utilizzati per un uso ottimale ed efficiente delle risorse e di preservare la proporzionalità dei mezzi.

La competenza professionale nell'ingegneria naturalistica è tale che la legge del minimo dispendio di energia è utilizzata nella progettazione degli interventi: 'tanto quanto necessario, ma il meno possibile'. L'ingegneria naturalistica si fonda su questi principi di base (Line guida Deontologiche - Etica professionale).

1.7 Prerequisiti per la riuscita degli interventi di ingegneria naturalistica

I lavori di ingegneria naturalistica sono ad oggi da considerarsi riusciti, nel caso in cui sono stati coinvolti professionisti delle discipline necessarie, per il successo del progetto e questi hanno lavorato in stretta collaborazione interdisciplinare. Pertanto va posta attenzione ai seguenti punti:

- Valutazione della proposta ai fini della messa in sicurezza: può essere effettuata una lavorazione con uso esclusivo di tecniche di ingegneria naturalistica?
- Un attento esame della natura e delle condizioni del sito, come le caratteristiche microclimatiche della superficie di intervento, l'analisi del substrato pedologico ed in particolare dei parametri chimici, fisici e idrologici del suolo,
- Valutazione delle condizioni di illuminazione,
- utilizzo di conoscenze di base floristiche e fitosociologiche
- dichiarazione delle basi di valutazione e verifica dei dati idrologici, idraulici, geomeccanici e geotecnici per quanto riguarda i punti di domanda (cfr. direttiva EFIB capitolo 2),
- Valutazione delle potenziali interazioni con l'infrastruttura esistente,
- esame delle possibilità di miglioramento del sito, che insedia la vegetazione target desiderata, e con quali piante pioniere e altri stadi della successione e misure di gestione per raggiungerli
- considerazione delle distanze di riferimento nelle stesse aree naturali o similari
- il rispetto delle norme tecniche (norme, linee guida, manuali delle rispettive aree di competenza),
- istituzione di un protocollo di manutenzione e controllo dei risultati (cfr. Direttiva EFIB cap. 4 e 5).

In Europa, dovrebbe essere utilizzato nella pianificazione ed esecuzione di progetti di ingegneria naturalistica il Bautypenbuch EFIB (ZEH 2006). In questo libro è contenuta l'esperienza di lavoro di molti colleghi e colleghe professionisti. Essa può contribuire in modo significativo alla individuazione uniforme delle tipologie costruttive in Europa (cfr. Direttiva EFIB Capitolo 3).

In tutti i lavori di ingegneria naturalistica (la divisione delle attività di progettazione nelle difficili Categorie I - III corrisponde alla norma DIN EN 1054 Geotecnica - EC 7). Devono essere rispettate le leggi e i regolamenti di attuazione dei rispettivi paesi (ad esempio, le norme antinfortunistiche). Inoltre, i rispettivi promotori del progetto sono tenuti al rispetto delle proprie norme specifiche. Di modo che possono essere trovate diverse soluzioni anche per lo stesso problema e le stesse condizioni del sito nei diversi paesi europei.

Gruppo professionale	Conoscenze professionali con l'ottica dell'ingegneria naturalistica	Competenze necessarie per l'attuazione del progetto
Botanica	Fitosociologia Geobotanica	Recepimento delle conoscenze vegetazionali come base per la pianificazione. Controllo della vegetazione, garanzia della qualità e controllo delle prestazioni, monitoraggio dello sviluppo della vegetazione
Scienze della terra	Scienze della terra, Melioration, meccanismi dell'erosione, protezione delle sponde e delle coste, clima e microclima	Perizie geologiche, protezione del suolo
Realizzazione di giardini	Suoli, concimazioni, ammendamento die suoli, piante, riproduzione delle piante	Ambientazione e manutenzione delle piante, controllo dei risultati, rinverdimento
Scienze agrarie	Suoli, concimazioni, ammendamento die suoli, piante, produzione di sementi	Pflanzenansiedlung und Pflege Krautvegetation, Erfolgskontrolle Ansaat
Scienze forestali	Suoli, concimazioni, ammendamento die suoli, piante, Forestazione, produzione e commercializzazione del legno	Selvicoltura, gestione die boschi di protezione, sistemazioni idraulico forestali, consolidamento di scarpate nelle strade forestali, controllo die risultati, produzione del legno
Giardinaggio e paesaggistica, Imprese del verde	Piccole costruzioni idrauliche e in terra, lavorazioni in situ e die suoli, messa a dimora di piante	Progettazione, realizzazione e manutenzione degli interventi di ingegneria naturalistica
Architettura del paesaggio/progettazione del paesaggio	Processi di pianificazione, Piani d'ambito, Piani obiettivo, Studi di impatto ambientale, piani di gestione del paesaggio. Flora-fauna-studi di impatto ambientale, piccoli interventi di sistemazione idraulica e terrestre. Lavorazione in situ e die suoli, messa a dimora di piante	Piani d'ambito, piani obiettivo, sorveglianza e controllo degli interventi di ingegneria naturalistica
Ingegneria idraulica, dei fiumi e torrenti, protezione delle coste	Sistemazioni idrauliche, idrotecnica, idraulica, sicurezza die siti, tecnica delle costruzioni, piani d'ambito, piani obiettivo, direzione lavori	Piani d'ambito, perizie professionali, idrotecnica, Fattibilità, piani obiettivo, sorveglianza e direzione lavori, controllo dei risultati Amministrazione delle acque
Ingegneria civile Costruzione della viabilità	Costruzione di viabilità, tecnica delle costruzioni, costruzioni in terra, dremaggi, stabilità, progetti d'ambito, piani obiettivo, direzione lavori	Piani d'ambito, piani obiettivo, sorveglianza, direzione lavori
Ingegneria mineraria	Geotecnica, tecnica delle costruzioni, ingegneria gestionale, piani d'ambito, piani di servizio, piani obiettivo	Piani d'ambito, piani obiettivo, sorveglianza. Direzione lavori
geotecnica	Resistenza a taglio, stabilità	Perizie, fattibilità, paesaggio, messa in sicurezza di scarpate e pendii, progetti di risanamento, controllo geotecnico dei risultati
Ingegneria civile/topografia	Ingegneria civile, melioration, viabilità, suoli, paesaggio, idrotecnica	Piani d'ambito, misure di melioration, viabilità, infrastrutture agrarie, piani obiettivo, sorveglianza, direzione lavori, tecniche di melioration, conrollo die risultati

2. **Valutazione della messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica**
 2.1 **Principi di misurazione della messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica**

Secondo le norme DIN 1055-100 e WETZELL 2006 una costruzione deve essere progettata e costruita in modo tale da sopportare tutti gli effetti e le influenze che possono verificarsi durante la costruzione e l'uso regolare previsto dal progetto, con adeguata affidabilità e sicurezza, senza fallire e senza subire deformazioni non ammesse. Durante la sua prevista durata di utilizzo, l'opera deve mantenere la sua capacità di carico, di utilizzo e durata a fronte di azioni di manutenzione commisurate.

Nella progettazione strutturale di portata, l'opera è progettata basandosi su dati derivanti dall'esperienza e per l'analisi e valutazione statica su un modello di astrazione; ciò significa ridotto alle più importanti misurazioni ed alle caratteristiche fisiche. Questo modello viene sollecitato attraverso influenze (S) perduranti (g) o variabili (q). Per le sollecitazioni, vengono estrapolati, dalle analisi delle scienze naturali e delle costruzioni, valori caratteristici (indice k) S_k . Per moltiplicazione con uno specifico parziale fattore di sicurezza γ_x , si ottiene un valore di misurazione per la sollecitazione (indice d)

$$S_{d,x} = S_{k,x} \times \gamma_x$$

L'opera o una sua parte fornisce una resistenza (R), che può essere derivata dalle note proprietà delle scienze naturali (Indice k) cioè R_k . Dividendo R_k per un correlato parziale fattore di sicurezza γ_i si ottiene il valore di misurazione della resistenza R_d .

$$R_{d,i} = R_{k,i} / \gamma_i$$

Per la misurazione vengono prese in considerazione le seguenti situazioni:

Sollecitazione 1: costante o frequente situazione di misurazione - caso ordinario.

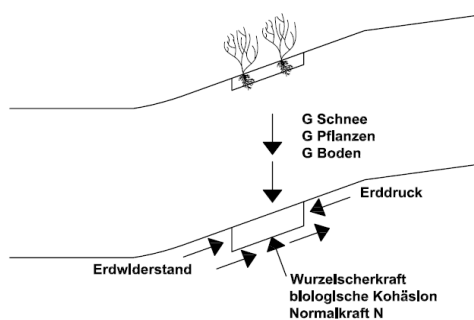
Sollecitazione 2: rara combinazione di eventi o situazione temporanea. Spesso la situazione della costruzione di ingegneria naturalistica, nella condizione iniziale, con scarso o assente apporto alla stabilizzazione esercitato dalla vegetazione, può essere valutato così.

Sollecitazione tre: situazione di progetto straordinaria.

2.1.1 **Presentazione del modello di messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica**

Analogamente alla progettazione strutturale l'opera considerata o una sua parte viene definita da una sezione chiusa (GROSS u.a.2006). Questo può comprendere sia l'intera opera di copertura con tecniche di ingegneria naturalistica (vegetazione + terreno attraversato dalle radici o strato di terreno biologicamente influenzato), oppure, per la progettazione, vengono estrapolate parti interessanti dell'opera.

L'elemento sicurezza viene posto in equilibrio, in quanto sia tutte le sollecitazioni sia anche tutte le resistenze vengono poste conseguentemente alla forze di taglio come forze esterne



Simulazione di una messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica su un singolo modello di azione di carico

2.1.2 **Influssi sulle opere di messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica nel senso della progettazione strutturale**

Peso proprio di uno strato di copertura di vegetazione e strato portante della vegetazione

Il peso proprio è costituito dal peso della massa di vegetazione epigea e dal peso dello strato superficiale portante la vegetazione. Indicazioni sul peso del terreno $\gamma' \left[\frac{kN}{m^3} \right]$ sono riscontrabili nelle tabelle riguardanti le tecniche costruttive come ad esempio nelle norme DIN 1055, mentre per il peso per unità di superficie della vegetazione ad esempio in FLL del 2008.

Neve

La neve agisce come influenza sui versanti in terra; essa agisce come sovraccarico e può portare ad erosioni o scivolamenti superficiali di versante. Nella determinazione di tale aspetto si ricorre alle esperienze di livello regionale.

Vento

Gli effetti del vento dipendono dall'ambiente naturale e dalla conformazione del versante. Per la Germania gli approcci alle misurazioni si trovano nella norma DIN 1055, parte 4. In letteratura si trovano indicazioni sull'influenza della vegetazione sui flussi d'aria; per la statica degli alberi ad esempio in SINN 1988 o WESSOLLY e ERB 1998

Impatto idrico e grandine

L'impatto idrico rappresenta un'influenza importante per il controllo dell'erosione del suolo su superfici senza vegetazione o parzialmente vegetate. Spiegazioni fisiche e dimensioni del fenomeno si trovano in MORGAN 1999. La classificazione degli eventi di precipitazione piovosa dovrebbe essere eseguita sulla base della loro ripetitività (frequenza) sulle base di statistiche meteo come per esempio KOSTRA Atlante del DWD 1997.

Deflusso superficiale diffuso sui pendii

Durante le precipitazioni intense così come a causa dell'impatto idrico, così come a causa del deflusso superficiale distribuito si originano fenomeni di erosioni. Queste dipendono dall'intensità della precipitazione, dalla permeabilità del suolo, dalla pendenza e lunghezza del versante e dalle influenze della vegetazione. Indicazioni al riguardo possono essere trovate in MORGAN1999, DVWK 1996 e KOSTRA ATLAS DWD 1997.

Effetti causati dagli animali al pascolo e dalla selvaggina

Gli effetti del pascolo del bestiame e della fauna selvatica devono essere sottoposti a controllo a livello locale e ridotti da adeguate misure di protezione.

Effetti dell'utilizzo antropico

Effetti sui versanti dovuti allo sci, slittino, motocross, mountain bike, così come onde provocate da imbarcazioni e da infrastrutture balneari sulle rive, devono essere controllati e valutati sul posto.

Effetti delle correnti idriche

Le correnti idriche sia in solchi da erosione, cunette e fossati su scarpate e pendii, sia in fiumi e canali portano a fenomeni di erosione e spostamenti di suolo.

Per le questioni legate al controllo dell'erosione è importante conoscere l'inizio del movimento. Nella letteratura del campo dell'ingegneria idraulica, l'influenza dell'acqua corrente viene analizzato, attraverso la sollecitazione al taglio τ_0 [N/m^2] e la velocità di scorrimento v [m/s]. In genere, per una sezione fluviale, sono disponibili i valori monodimensionali del valore medio del tirante d'acqua ai quali secondo SCHROEDER e ROEMISCH 2001 vengono affiancati valori di rafforzamento. Per corsi d'acqua larghi o per deflussi di ampie golene valori di riferimento ricavati da calcoli di deflusso bidimensionali possono risultare ragionevoli

I valori caratteristici degli effetti sono fortemente dipendenti dalla scelta della frequenza di ripetizione della misurazione degli eventi di piena. Per protezioni di sponda minori come ad esempio zone agricole e zone a verde, può essere sufficiente considerare un tempo di ritorno di 5 anni; per importanti strade principali e per gli edifici dovrebbe essere preso, come base di riferimento, per esempio, un tempo di ritorno di 100 anni (crf DIN 19661 parte 1).

Azione battente delle onde

L'azione battente delle onde si ingenera a causa del movimento ondoso sulla riva di un grande corpo idrico non corrente, un ampio corso d'acqua, una baia mariana o una via d'acqua navigabile. L'azione battente del moto ondoso è essenzialmente dipendente dall'altezza delle onde, dalla forma della riva, così come dalla scabrezza influenzata per esempio dalla vegetazione. L'altezza delle onde naturali dipende dalla forza del vento, dalla durata e dallo sviluppo in lunghezza delle onde stesse. Le onde provocate da imbarcazioni dipendono dalla dimensione dell'imbarcazione, dalla velocità e dalla distanza dalla riva. Informazioni più dettagliate possono essere reperite nella letteratura per la protezione delle coste e delle vie d'acqua.

Buche originate da materiale fluitato o da ghiaccio fluitato. Sia eventi di piena in corsi d'acqua, sia influenze da moto ondoso compaiono spesso in concomitanza con la presenza di materiale galleggiante trasportato o di ghiaccio trasportato. Per le opere di protezione delle rive con tecniche di ingegneria naturalistica è molto importante considerare l'effetto combinato. La valutazione deve essere effettuata sulla base di osservazioni sul posto.

Spinta attiva del terreno

Nel caso di versanti stabilizzati ripidi, la spinta attiva delle terre può comparire, come effetto, anche in ambiti ristretti. Può essere determinata sulla base delle regole geotecniche, come ad esempio SCHMIDT 2006, DIN 4085

Pressione dell'acqua e spinta idrostatica

Su mense in sicurezza di versanti e di sponde possono influire, in diverso grado, la pressione dell'acqua e la spinta idrostatica. Decisiva per la determinazione della pressione dell'acqua è la combinazione sfavorevole di alti livelli di falda, con bassi livelli di acqua nel corso d'acqua. Questa differenza di livello dell'acqua dovrebbe presentare un'adeguata frequenza di comparsa.

2.1.3 Influenze della vegetazione nel ridurre gli effetti

Riduzione degli effetti delle correnti d'acqua attraverso tecniche di ingegneria naturalistica nel bacino idrografico

Nei piccoli bacini idrografici, la struttura ed il grado di copertura della vegetazione hanno una notevole influenza sul picco dell'onde di piena e sulle loro velocità. Un rinverdimento adeguato del bacino idrografico critico contribuisce, in modo evidente e dimostrabile, alla riduzione dei picchi di deflusso e dalle velocità di deflusso e forze di trascinamento da essi dipendenti nel caso di forti e profonde erosioni di piccoli corsi d'acqua montani

Riduzione degli effetti della pressione dell'acqua e della spinta idrostatica attraverso tecniche di ingegneria naturalistica nel bacino idrografico

La vegetazione ha, su scarpate e pendii, una chiara influenza sull'evapotraspirazione, sul bilancio idrico del versante e influisce anche sulla frequenza e sulla forza del percolato di filtrazione e sulla pressione dell'acqua al piede del pendio. Una previsione degli effetti a livello progettuale è attualmente molto difficile. È chiaro al contrario che frane superficiali di versante che avvengono dopo tagli rasi della vegetazione, rendono evidente il problema.

Riduzione degli effetti dell'impatto delle gocce, all'impatto della grandine e forti venti attraverso soprassuoli boschivi di schermatura

Gli effetti dovuti all'impatto delle gocce, all'impatto della grandine o al forte vento su terreni minerali con assenza di vegetazione sono significativamente maggiori che nel caso di coperture o schermature con vegetazione boschiva.

2.1.4 Resistenze della vegetazione nei confronti dei citati effetti

In questa trattazione, come chiarito nel capitolo 2.1.1., i soprassuoli vegetazionali, lo strato di terreno attraversato dalle radici o altrimenti influenzato dagli aspetti biologici (funghi del terreno e Gele) vengono intesi come unicum e vengono estratti dal loro contorno in toto o in parte per il dimensionamento statico.

Resistenza contro l'impatto delle gocce d'acqua e del deflusso superficiale diffuso con conseguente erosione superficiale ed a rigagnoli

Le esperienze centroeuropee mostrano che la copertura totale tramite vegetazione permette una buona protezione

contro l'erosione dovuta all'effetto battente delle gocce d'acqua e al deflusso superficiale diffuso. La copertura è necessaria solo per i terreni soggetti ad erosione e non vale per le superfici a rocce nude o con sassi

Per il grado di copertura vegetazionale, valgono le parti epigee delle piante erbacee, compresi gli apparati radicali superficiali, parti morte delle piante che sono ancora ancorate a steli e radici. Come criterio per il collaudo di una semina con specie erbacee la norma DIN 18917 indica un grado di copertura del 50%

Resistenza contro l'erosione a rigagnoli e deflusso superficiale

La leggera concentrazione di acque nella parte bassa del versante che porta alla comparsa di rigagnoli di profondità compresa tra 0,10 – 0,40 m di profondità, sono dipendenti dalla morfologia del versante, dall'inclinazione, dalla tipologia di terreno e dalla frequenza ed intensità delle precipitazioni sul versante.

Resistenza contro il deflusso delle acque

Per la resistenza della vegetazione al deflusso superficiale delle acque in fossi ed in corsi d'acqua in letteratura vengono indicati valori critici di forza di trascinamento τ_{crit} (N/m²), così come velocità medie di deflusso critiche v_{crit} (m/s). I valori indicati valgono per condizioni di deflusso uniformi, in assenza di trasporto solido, basandosi sul presupposto che le aree di margine delle opere di messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica, come per esempio il piede delle opere spondali, siano sufficientemente garantite dall'erosione. Valori critici delle forze di trascinamento e delle velocità di deflusso delle acque si ritrovano nella DIN 19661, parte II e in GERSTGASER 1998, RAUCH 2006 e JOHANNSEN 1997 e 2008.

In solchi di erosione con trasporto di materiale solido, densi soprassuoli arbustivi nei solchi, riescono a rallentare il deflusso così fortemente, che si arriva al deposito di materiale grossolano trasportato invece che all'erosione.

Cotici erbosi e canne palustri da corsi d'acqua riescono a raggiungere i valori indicati nel caso di completa copertura originata da foglie vive e morte, da culmi e da apparato radicale superficiale

Nel caso di vegetazione arborea spondale legnosa, l'effetto è dato da una combinazione di rallentamento del deflusso e radicamento del terreno.

Accanto all'impiego di possibili parametri estrapolati dalla letteratura tecnica, si può derivare la resistenza di soprassuoli vegetazionali all'erosione anche da tratti di riferimento naturali.

La resistenza all'erosione di piante lungo i corsi d'acqua è fortemente dipendente dalla zona vegetazionale. Queste zone e le piante che sono presenti in queste zone sono molto differenti nei diversi ambienti europei. Come grossolani valori di riferimento possono essere indicati i seguenti:

Struttura vegetazionale	τ_{crit} (N/m ²)	v_{crit} (m/s)
Arbusteto a salici	200	2,5
Vegetazione spondale a galleria	100	2,0
Canneto lungo corso d'acqua	50	1,5
Cotico erboso, brevemente sommerso	30	1,5
Cotico erboso, lungamente sommerso	15	1,5

Con la resistenza al deflusso creato dall'impiego di tecniche di ingegneria naturalistica spondali con piante legnose, si deve considerare la correlata riduzione della capacità di deflusso idraulica. Questa deve essere tenuta in considerazione nella progettazione per esempio attraverso un ampliamento del profilo idraulico e/o la richiesta capacità di deflusso idraulica deve essere mantenuta dalla conseguente manutenzione del corso d'acqua.

Resistenza contro la forza battente del moto ondoso

La resistenza contro la forza battente delle onde è dipendente da quanto è scabra la struttura superficiale per dissipare l'energia delle onde. D'altro canto il substrato della riva può essere protetto dalla copertura diretta della massa fogliare o dall'apparato radicale superficiale.

Per la riduzione di energia sono efficaci soprassuoli a canne fitti ed estesi, soprassuoli arbustivi a salici così come rami grossi e fusti di piante legnose proteggenti. Parametri di misurazione rilevanti sono la densità dei getti epigei così come la loro flessibilità.

Per la valutazione dell'efficacia di copertura viene presa a riferimento la copertura della massa fogliare e lo strato interessato dall'apparato radicale superficiale o nelle immediate vicinanze della superficie.

Per ottenere valori validi per la progettazione, devono essere valutate stazioni di riferimento naturali

Effetti dei soprassuoli vegetazionali ai sovraccarichi

La valutazione di opere o di elementi costruttivi in relazione alla loro sovraccaricabilità, gioca nella valutazione complessiva un importante ruolo. E' poco noto l'effetto a tal riguardo di opere di messa in sicurezza con tecniche di ingegneria naturalistica. Attualmente si suggerisce di valutare tale influenza caso per caso. Infatti piccole zone d'erosione spesso si rimarginano a partire dai soprassuoli limitrofi. Di contro la comparsa di piante legnose spondali può portare a conseguenze negative attraverso l'occlusione nell'alveo.

2.1.5 Singoli parametri per la descrizione delle resistenze di soprassuoli vegetazionali

Le abbreviazioni ed i simboli qui impiegati sono riportati in allegato al capitolo 2.

Copertura della vegetazione

La copertura della vegetazione esprime la percentuale di copertura da parte della vegetazione della superficie del suolo. Questo criterio è usuale per la valutazione del prato e della vegetazione erbacea in termini di resistenza all'impatto delle gocce di pioggia, al deflusso superficiale ed al vento, per esempio, su scarpate. Nel caso di struttura vegetazionale multistrato il grado di copertura della vegetazione può superare il 100%.

Densità della struttura vegetazionale verticale – densità di steli, culmi, dei rami o dei fusti

La densità di steli e dei ciuffi di graminacee e leguminose, culmi di canne, rami nel caso di arbusti e fusti nel caso di soprassuoli arborei, descrive la densità delle strutture verticali per unità di superficie n.unità/m² o n.unità/ha. Da questo, possono essere derivate molte resistenze ad esempio contro il vento ed il deflusso delle acque come l'azione battente del moto ondoso. Indirettamente possono essere anche tratte conclusioni circa il radicamento.

Densità specifica della vegetazione investita dal flusso (m_v)

Secondo INDLEKOFER 2000 nel caso della densità specifica della vegetazione investita dal flusso, le superfici della struttura vegetazionale immerse nel flusso d'acqua, vengono sommate trasversalmente alla direzione della corrente A_{pi} moltiplicato con un coefficiente correttivo del flusso c_v e riferito alla superficie di copertura di scorrimento

$$m_v = \frac{\sum c_v \times A_{pi}}{L_u \times L_G} [-]$$

Il coefficiente C_v viene utilizzato per rilevare gli effetti della vegetazione sulla velocità di deflusso. Allo stato attuale, il valore di riferimento, in base alle prove di laboratorio, è indicato attualmente pari a $C_v = 1,2$ fino a 1,5

Superficie su cui la vegetazione esercita una influenza contro il vento

La superficie su cui la vegetazione legnosa esercita la sua influenza contro il vento è calcolata come proiezione orizzontale del margine della vegetazione degli arbusti e degli alberi $[m^2]$. Per le siepi di protezione dal vento viene stimata una permeabilità in %. Nel caso di considerazioni sulla statica dell'albero, analogamente all'approccio in edilizia dell'influenza della forza del vento viene stimato un coefficiente di flusso di $c_w = 0,2-0,4$.

Grado di copertura dell'apparato radicale

Per un apparato radicale, che si sviluppa su una sponda, su un pendio o che compare orizzontalmente all'interno di uno strato di terreno, si ha una quantificazione del grado di copertura in% oppure una valutazione della profondità media dello strato interessato.

Resistenza al taglio τ_f

L'effetto di stabilizzazione e di riduzione dell'erosione da parte delle piante e degli organismi del suolo è molto complesso e non si lascia determinare con semplici parametri misurabili come la densità di radicazione o similari. È ragionevole l'impiego della resistenza al taglio τ_f (KN / m²) misurabile come parametro somma, che descrive sia i parametri meccanici del suolo, attrito e coesione, sia le influenze biologiche, che si sovrappongono, esercitate dalle radici delle piante, micorrize, le forze di suzione e di coesione.

Forza di trascinamento critica τ_{crit}

La forza di trazione critica τ_{crit} (N/m²) descrive la resistenza di un'opera di copertura spondale, nel nostro caso di un soprassuolo vegetazionale, nei confronti di una sommersione all'inizio dell'erosione.

Resistenza al deflusso di singole strutture vegetazionali
La resistenza al deflusso di singole strutture vegetazionali che vengono attraversate o lambite dal flusso, può essere calcolata.

Per strutture vegetazionali rigide

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v^2}{2 * g} * A_P * C_P$$

Per strutture vegetazionali elastiche

$$F_{ST} = \rho * g * \frac{v}{2 * g} * A_P * C_P$$

Densità radicale

La densità radicale indica il numero di radici (in una determinato range di grandezza, per esempio 1-5 mm per unità di superficie). Dato che la densità radicale varia in funzione della profondità, deve essere indicata la profondità di osservazione nella stazione.

Superficie della Sezione trasversale specifica della radice SA_w

La superficie totale delle sezioni trasversali delle radici per unità di superficie fornisce una indicazione sul radicamento. La profondità dell'area di indagine deve essere specificata, dato che il parametro varia fortemente con la profondità.

Con questo parametro possono essere effettuate le usuali verifiche allo scivolamento per coperture del suolo superficiale o strati vegetazionali portanti orizzontali rispetto al versante con valutazione della forza di resistenza al taglio delle radici

2.1.6 Osservazioni preliminari sull'impiego della vegetazione coerente rispetto alla stazione e sulla valutazione dei fattori della stazione

I luoghi per l'intervento con tecniche di ingegneria naturalistica sono spesso, già solo dal punto di vista dell'impiego delle piante e dell'attecchimento, luoghi difficili da rinverdire.

La corretta valutazione del luogo di realizzazione dell'opera come luogo di insediamento della vegetazione è tuttavia una condizione necessaria per il successo di una tecnica di messa in sicurezza progettata.

Per la valutazione del sito d'intervento dovrebbero essere considerati, tra l'altro, i seguenti aspetti:

- spazio naturale
- posizione, altezza sul livello del mare
- Rilievo, lunghezza e inclinazione del pendio, altezza del pendio, esposizione, forma delle sponde e dei corpi idrici
- rocce, suolo, substrati, struttura degli strati
- Macro e micro clima, temperature, precipitazioni, precipitazioni intense, neve
- bilancio idrico, acque sotterranee, percolato, frequenza di inondazione, durata, velocità di deflusso, forza di trascinamento
- Flora naturale dell'area, vegetazione potenziale naturale, vegetazione pioniera associata e fasi iniziali di successione, vegetazione di contatto con la zona di intervento, concorrenza e sostegno reciproco (effetti di sinergia)
- informazioni sulla fauna rilevanti per la progettazione
- utilizzi e loro richieste

- determinazione della tutela della natura e dell'ambiente

Solo sulla base di un rilevamento sufficientemente preciso della stazione si può valutare, se un intervento con tecniche di ingegneria naturalistica avrà successo, quali piante siano adatte e con quale procedura e materiali ausiliari di rinverdimento o messe in sicurezza, può essere messa in opera.

2.2 Integrazione della progettazione di settore e di dimensionamento di ingegneria naturalistica nell'intero processo di progettazione, esecuzione, sviluppo e manutenzione

L'intero processo di progettazione, esecuzione, sviluppo di un intervento di ingegneria naturalistica è strutturato come segue:

- acquisizione degli obiettivi
- Progetto preliminare
- Progettazione preliminare fino all'approvazione da parte delle autorità
- Progettazione esecutiva e preparazione di un contratto
- Esecuzione e direzione lavori
- Cura nella fase di attecchimento e cura nella fase di sviluppo nel periodo di garanzia post chiusura cantiere
- Cura nella fase di sviluppo fino al raggiungimento della vegetazione finale
- Mantenimento, manutenzione e cura della vegetazione finale

Acquisizione degli obiettivi e progettazione preliminare

Un progettista d'opera dovrebbe confrontarsi, aperto ad ogni soluzione, con un determinato incarico, per trovare la migliore soluzione possibile per il committente date le condizioni al contorno date.

In caso di approcci legati alla protezione dall'erosione significa che, nell'ambito del progetto preliminare, viene discussa una vasta gamma di possibili soluzioni, come ad esempio, per il problema di una protezione spondale:

1. permettere l'autosviluppo dinamico e sospendere le utilizzazioni in prossimità della sponda
2. Muri spondali come soluzione ingegneristica di consolidamento in profondità, per mantenere completamente gli utilizzi in prossimità della sponda
3. Sistemazione spondale con tecniche di ingegneria naturalistica con scarpata di sponda rivegetata e scorporazione di una superficie dall'utilizzo in prossimità di sponda

Se nel progetto preliminare viene proposta una tecnica di ingegneria naturalistica, questa deve essere anche possibile partendo dalle condizioni stazionali. La vegetazione finale progettata deve poter opporre, alle sollecitazioni, un'adeguata resistenza

Progetto fino all'approvazione da parte delle autorità

Nel progetto approvato la vegetazione finale viene definita come vegetazione o biotipo con identificazione di alcune specie principali. Viene anche indicata la necessaria manutenzione di mantenimento. I passi necessari per inizializzare la vegetazione alle tecniche di ingegneria naturalistica, così come la manutenzione di attecchimento e sviluppo, vengono descritte

sommariamente. Vengono verificate le resistenze della vegetazione finale rispetto alle sollecitazioni attese ed anche quelle della tecnica di ingegneria naturalistica correlata a prefissate esigenze di sicurezza, considerando lo stato dell'opera come perdurante.

Nel caso di interventi sui corsi d'acqua deve essere verificato quale influenza abbia la vegetazione sulla capacità idraulica della sezione idraulica e se si possano ingenerare danni a causa di livelli di piena maggiori o da esondazioni

Nell'ambito della verifica dell'iniziativa progettuale rispetto alle leggi ambientali, vengono definite le specie di piante da impiegare (generalmente autoctone) ed i materiali da costruzione, così da inserire correttamente l'opera nell'ambiente naturale locale e nel contesto paesaggistico così come per favorire lo sviluppo naturale del corso d'acqua ed il valore ricreativo del paesaggio

La progettazione approvata tiene conto delle superfici a disposizione ed adegua la soluzione alle stesse

Progettazione esecutiva e preparazione del contratto

In questa fase progettuale vengono redatti, sulla base delle autorizzazioni e degli accordi con i fruitori ed i confinanti gli elaborati esecutivi, il computo metrico ed un capitolato. A questa fase appartiene l'elaborazione dettagliata delle tecniche di ingegneria naturalistica atte alla messa in sicurezza ed al rinverdimento di zone a rischio, compreso il terreno da impiegare e altre valutazioni stazionali

Vengono determinate le grandezze e le caratteristiche qualitative dei materiali da costruzione vivi – semi parti di pianta con capacità di emissione di radici e piante – così come le specie, qualità e dimensione degli altri materiali da costruzione, come per esempio geotessuti antierosivi, fascine, pali, sassi. Punto centrale di questa fase di progettazione è la definizione di condizioni chiaramente definite e calcolabili, che soggiacciono alle norme sulla sicurezza del lavoro in cantieri ed a specifiche prescrizioni del committente ed alle regole tecniche, cosicché in caso di danni sia chiara la problematica delle responsabilità.

Esecuzione e direzione lavori

Nell'attuale usuale divisione tra progettazione ed esecuzione, quest'ultima viene assegnata ad una ditta qualificata, sulla base di una gara d'appalto nell'ambito della quale è stato formulato un preventivo conveniente.

La sorveglianza sull'esecuzione viene assunta da un qualificato studio di progettazione. Questo, su incarico del committente, sorveglia i lavori in relazione alla rispondenza con gli elaborati di progetto e le regole tecniche. Nel caso si aspetti non previsti dalla progettazione o nel caso di eventi naturali il committente viene supportato nel trovare una soluzione al problema

Cura nella fase di attecchimento e sviluppo

All'opera si allega un piano di manutenzione per la fase di attecchimento e sviluppo per il periodo pluriennale di garanzia post chiusura cantiere. Questo piano viene attuato generalmente attraverso il gestore.

Cura nella fase di sviluppo, cura nella fase di mantenimento e manutenzione

A conclusione del periodo di garanzia post chiusura del cantiere segue una consegna finale. La manutenzione viene assunta dallo stesso committente o viene commissionata ad altra ditta. Si devono sostenere, nel caso di piantagione di piante legnose, processi di sviluppo pluriannuali, fino a quando viene raggiunta la vegetazione finale. Questa viene poi mantenuta correttamente, perché venga mantenuta la sua funzione nell'ambito dell'ingegneria naturalistica (si veda capitolo 4)

Gestione del processo di progettazione, costruzione e manutenzione delle tecniche di ingegneria naturalistica

Il processo fino allo sviluppo di una vegetazione protettiva di ingegneria naturalistica dovrebbe venire continuamente accompagnato ed organizzato, perché altrimenti, nel passaggio da una fase all'altra, vanno perse importanti informazioni.. Così nella progettazione esecutiva deve essere spesso chiarito, quali siano gli aspetti; derivanti dall'iter autorizzativo, che devono essere tenuti in particolare considerazione per il settore ambientale e di tutela della natura.

2.3 Raccomandazioni per ambiti di applicazione frequenti

2.3.1 Erosione scarpate in terra

Problematica

L'erosione su scarpate non protette e prive di vegetazione, può portare ad ingenti danni in caso di neo realizzazioni in terra nell'ambito della costruzione di infrastrutture stradale, opere idrauliche, cave e discariche. Danni susseguenti si possono verificare, nel caso di infrastrutture viarie, sia da soli che nelle opere di drenaggio delle acque superficiali

Sollecitazioni

Sollecitazioni frequenti su scarpate in terra sono l'effetto battente delle gocce d'acqua, l'effetto battente della grandine, scorrimenti superficiali diffusi, erosione da neve, venti forti così come sollecitazioni provocate dall'uomo o dagli animali

Resistenze

Sollecitazioni a causa dell'uomo e degli animali devono essere contrastate attraverso misure di protezione e limitazioni d'uso. L'effetto battente delle gocce d'acqua e quello dei deflussi superficiali diffusi, possono essere contrastati con soprassuoli di graminacee e leguminose con elevato grado di copertura. Per il grado di copertura totale possono essere presi in considerazione getti epigei vivi, foglie, foglie morte purchè ancora collegate con la pianta, strati radicali in prossimità della superficie del suolo, così come substrati resistenti all'erosione come sassi, rocce o legno. Contro l'azione erosiva della neve e del vento sono efficaci i soprassuoli vegetazionali che sono formati da arbusti ed alberi con adeguata densità, così come da vegetazione erbacea.

Fattori limitanti

Fattori limitanti sono condizioni estreme della stazione: inclinazione del versante, luce (=insolazione), clima del versante, tipologia di suolo, giacitura, mancanza di elementi nutritivi ed elementi tossici

Indicazioni per la misurazione e la progettazione

La vegetazione finale viene determinata sulla base di una valutazione sul posto e sulla base di una valutazione

botanica: Il processo di rinverdimento viene attualmente scelto sulla base di precedenti esperienze in ambienti naturali uguali o similari.

Viene suggerita l'esecuzione di una ripercorribile analisi rischio/costi come da allegato alla norma DIN 18918. Per una migliore valutazione del rischio dovrebbero essere ricomprese, nell'ambito dei contratti di esecuzione, oneri di misurazione di eventi come piogge intense, vento forte, altezze del manto nevoso con indicazione specifica dei compiti e della frequenza di ripetizione (1/(n anno)). Sotto determinate soglie, la ditta esecutrice assume la responsabilità per i danni, per eventi eccezionali il committente.

2.3.2 Scivolamenti superficiali

Problematica

Soprassuoli vegetazionali e tecniche di ingegneria naturalistica sono efficaci in modo dimostrabile solamente nel caso di scivolamenti superficiali paralleli al versante così come nel caso di scarpate di limitata altezza sovrainclinate in caso di terreni non coesivi. Un effetto negativo hanno alberi alti e pesanti su versanti molto inclinati, soprattutto su terreni coerenti. La problematica legata agli scivolamenti viene trattata, anche nell'ingegneria naturalistica, con gli usuali modelli dei corpi rigidi della meccanica dei terreni. Di seguito vengono esplicitate le sollecitazioni e le resistenze.

Sollecitazioni

Nel caso di analisi di frane di versante le sollecitazioni sono legate al peso del suolo umido (anche con sovraccarichi come vegetazione e neve), la spinta dell'acqua e le sovrappressioni

Resistenze attraverso la vegetazione

Tra lo strato di terreno in scivolamento ed il suolo sottostante può essere assunta una resistenza al taglio τ_f (kN/m²). Questa resistenza al taglio può essere derivata da strati di terreno paragonabili. La resistenza al taglio è formata dalla somma degli aspetti della meccanica dei terreni attrito e coesione. A questo si aggiungono le influenze biologiche tra le quali abbiamo le radici, le micorrize e gele, che spesso viene anche definita come coesione biologica. Il problema è che i parametri di taglio biologici variano fortemente con la profondità, densità dello strato e umidità del terreno e sono quindi difficilmente prevedibili (si veda capitolo 2.1.)

Fattori limitanti

I seguenti fattori limitano o escludono l'efficacia delle radici nel caso di scivolamenti: strati densi di limo, superfici con argilla o superfici a rocce, strati con acqua di falda o acqua di strato, substrati tossici, fattori stagionali usuali che impediscono lo sviluppo vitale delle piante

Raccomandazioni per la misurazione e la progettazione di superfici vegetazionali portanti su scarpate in terra più sicure nei confronti degli scivolamenti

Presupposti per la messa in opera su versanti di strati vegetazionali portanti più sicuri nei confronti degli scivolamenti sono:

- Il sottosuolo è in sicurezza
- Il sottosuolo è chiaramente più permeabile del suolo superficiale

- Non si genera nessuna spinta idrostatica sul suolo superficiale o non vi è presenza di acqua d'infiltrazione
- Il sottosuolo risulta per quanto attiene il volume dei pori, il contenuto in elementi del terreno, valori di pH ed altro, attraversabile dalle radici
- Il suolo superficiale (lo strato portante di supporto alla vegetazione) non è né molto sottile o povero, cosicché le radici delle piante in un tempo prevedibile penetreranno nel sottosuolo

Con questi presupposti la stabilità agli scivolamenti si riesce a determinare con un modello a blocchi rigidi sulla base di analisi e stazioni di riferimento. In questo senso si può valutare il contributo della vegetazione o attraverso la tensione di taglio ammissibile o attraverso la specifica superficie della sezione della radice nell'ambito del limite dello strato.

Scarpate eccessivamente acclivi in terreno incoerente

Diversi studi dimostrano è possibile creare delle scarpate basse e di media altezza con un angolo di declivio leggermente inferiore a quello dell'attrito interno del terreno, se su queste scarpate insistono delle piante a radici profonde e se le scarpate stesse nella fase iniziale vengono stabilizzate con interventi di ingegneria naturalistica come per es. le gradonate vive. L'incremento di stabilità può essere pronosticato seguendo quanto esposto da SCHAARSCHMIDT 1971, SCHUPPENER 1994 e HÄHNE 1997.

Scarpate basse possono essere formate con un angolo massimo di 45°, se sono sia messe in sicurezza da radici profonde sia coperte superficialmente da una vegetazione erbacea continua. Nella fase di attecchimento e di sviluppo si usano delle opere di sostegno in legno, per es. palificate, le quali resistono anche ad una limitata spinta attiva del terreno. Il dimensionamento avviene come per altri muri a gravità, in parte anche secondo il procedimento delle terre armate.

2.3.3 Solchi di erosione su scarpate e versanti

Problematica

Sui versanti lunghi e ripidi, le acque superficiali si concentrano in avvallamenti, che possono comportare la formazione di canali di erosione. Altre cause dell'erosione a solchi possono essere le seguenti: impermeabilizzazione di superfici, disboscamenti nella zona delle precipitazioni nonché concentrazione degli scarichi dovuti alla costruzione di percorsi.

Nel caso dell'erosione a solchi, il processo erosivo si svolge in senso contrario alla direzione del flusso dell'acqua, e quindi in salita. Il processo si rinforza in maniera non prevedibile a causa di colate di fango la cui formazione è dovuta a scivolamenti sui versanti intrisi di acqua.

Fattori di influenza

Partendo da un modello precipitazioni/deflussi ed in base alla pioggia di riferimento con un determinato tempo di ritorno ($1/(n \text{ anni})$), si possono calcolare le portate di piena Q (m^3/s). Da questi possono essere calcolati, con gli usuali calcoli idraulici, le velocità medie di deflusso v (m/s) e le forze di trascinamento che si creano sul fondo dell'alveo τ_0 (N/m^2).

Resistenza

Il fondo e le scarpate inferiori del solco dovrebbero essere ricoperte da una vegetazione arbustiva fittamente ramificata o da robuste erbacee cespitose. La vegetazione deve resistere al deflusso, all'erosione e all'interramento. Sono già state menzionate precedentemente le forze di trascinamento critiche τ_{crit} per l'inizio dell'erosione.

Limiti dell'applicabilità

I limiti dell'applicabilità sono dati da velocità di deflusso e forze di trascinamento alte nonché dall'azione del trasporto solido sul fondo.

Frequentemente un limite di applicabilità è costituito dalla luce oltre che da fattori stazionali come i danni arrecati alle legnose dal bestiame e dalla selvaggina.

Raccomandazioni per il dimensionamento e la progettazione

Ampie aree impermeabili presenti nel bacino di raccolta dovrebbero essere compensate con degli interventi di ritenzione delle acque meteoriche. Torrenti montani limitrofi possono eventualmente valere quali elementi di riferimento. Valori misurati in questi tratti di riferimento dovrebbero essere confrontati con i parametri di dimensionamento idraulici calcolati a priori. Da ciò si potranno dedurre delle opportune modifiche ai valori dovute alle condizioni locali.

Strutture dedotte da torrenti naturaliformi, possono condurre a modelli di riferimento alla progettazione con vegetazione autoctona in combinazione con roccia, pietrame e legname. Serie di sbarramenti non esistono in natura. Esse deturpano il paesaggio, ostacolano o interrompono le connessioni ecologiche e non sono compatibili con gli obiettivi delle Direttive quadro europee sulle acque. Per questo motivo esse dovrebbero essere sostituite, dove possibile, con strutture naturaliformi. Nell'alta montagna densamente popolata spesso esse rappresentano, però, l'unica possibilità di sistemazione di solchi e torrenti, ragion per cui il loro impiego in tali regioni risulta inevitabile.

2.3.4 Sponde e golene di corsi d'acqua

Problematica

Ad opera di processi idrodinamici naturali, lungo le sponde e nelle golene si formano delle conche di erosione ed altre forme erosive. Da un lato ciò è gradito perché comporta la creazione di strutture tipiche in corsi d'acqua naturali, d'altra parte lungo le sponde spesso si concentrano attività e infrastrutture di grande importanza che devono essere protette. In entrambi i casi nel paesaggio seminaturale e soprattutto presso i centri abitati devono essere conservate le capacità di deflusso nonché i tiranti idrici in caso di piena e morbida, per evitare danni agli edifici e le altre attività del territorio.

Fattori di influenza

Le difese spondali di ingegneria naturalistica, sono soggette alle forze del deflusso, identificate nella velocità di deflusso v (m/s) e la forza di trascinamento τ_0 (N/m^2), nonché forze d'impulso quali per esempio l'influenza di legname o ghiaccio flottante. In aggiunta si deve tenere conto dell'influenza dell'uomo e degli animali. Inoltre, singole difese o elementi costruttivi cominciano ad essere esposti alla spinta idrostatica. Quando i tiranti iniziano a scendere possono svilupparsi fenomeni di scivolamento di

sponde, causate della differenza di livello tra la falda ancora alta ed i tiranti del corso d'acqua già bassi.

Resistenza

Per mezzo di diverse strutture vegetazionali si possono contrapporre elementi di contrasto alla corrente d'acqua. Il tappeto erboso offre una protezione antiersiva di natura superficiale e produce una modesta resistenza al deflusso. Un'azione simile è quella esercitata dai canneti nei corsi d'acqua i quali si ribaltano in caso di piena. A seconda della sua densità di ramificazione la vegetazione legnosa comporta un rallentamento sia della velocità di deflusso media che di quella vicina al fondo. Inoltre la maggior parte delle specie di salici radica densamente la parte superficiale del suolo. Grazie a questa caratteristica le sponde rimangono protette contro l'erosione fino al raggiungimento delle predette velocità di flusso v_{crit} e forze di trascinamento τ_{crit} critiche.

Limiti dell'applicabilità

Oltre ai fattori generali del sito e i limiti massimi ammissibili di velocità di deflusso e forze di trascinamento, sussistono i seguenti limiti specifici di applicabilità lungo corsi d'acqua. Per ogni tipo di pianta esiste un limite inferiore di applicabilità della stessa. Questo limite viene determinato attraverso la massima altezza, frequenza e durata di sommersione a cui può resistere. Anche altri fattori, come l'azione erosiva del ghiaccio o il trasporto solido, possono rappresentare dei limiti dell'applicabilità. I limiti dell'applicabilità dovrebbero essere determinati nelle tratte di riferimento naturali.

La stabilità totale di una scarpata della sponda deve essere data in presenza di un alto livello della falda e di un rispettivo basso tirante nel corso d'acqua con le pressioni idrauliche che ne risultano. A causa dell'effetto di riduzione dell'efficienza idraulica l'impiego di essenze legnose può diventare problematico nelle strette sezioni di deflusso dei centri abitati.

Raccomandazioni per il dimensionamento e la progettazione

Gli interventi di sistemazione e protezione dei corsi d'acqua devono rispettare gli obiettivi della direttiva quadro UE sulle acque. Ciò comporta un divieto di peggioramento dello stato attuale, ed un obbligo di sviluppo verso buoni condizioni ecologiche. Grazie all'ingegneria naturalistica si agisce in maniera particolare sulla morfologia dei corsi d'acqua. A tale scopo si raccomandano morfologie dei corsi d'acqua riferite ad un tratto di riferimento naturale, materiali di costruzione tipici della zona di intervento e specie vegetali nella loro variabilità naturale. Dagli elementi di riferimento presenti nello spazio naturale, si possono dedurre le strutture idonee della vegetazione e i loro limiti di applicabilità. Per i corsi d'acqua si dovrebbe sempre analizzare l'alternativa della rinuncia allo sfruttamento dei terreni circostanti e dello sviluppo dinamico del corso d'acqua, in quanto quest'alternativa conduce ad uno sviluppo naturale del corso d'acqua stesso. Ulteriori lavori di messa in sicurezza eseguiti al piede della scarpata o lungo le sponde ripide maggiormente colpite dalla corrente, vengono eseguiti esclusivamente mediante pietre naturali, legno o ramaglia provenienti da aree circostanti naturali. In tale contesto si creano delle strutture variabili rispetto al profilo longitudinale e quello trasversale, si tiene conto

delle connessioni ecologiche per la fauna acquatica e si evita la formazione di profili monotoni.

La sistemazione naturaliforme e l'insediamento di specie legnose sono spesso connessi con la riduzione della capacità idraulica di un corso d'acqua. Nell'ambito di un progetto di opere idrauliche, si effettuano estese ricerche idrauliche per pronosticare lo sviluppo dei tiranti e degli effetti che essi avranno sui territori interessati. La stabilità totale che una sponda presenta rispetto ad un crollo, deve essere conosciuta anche in riferimento alla differenza di livello d'acqua che sta alla base del dimensionamento.

Le opere progettate lungo i corsi d'acqua sono legate ad importanti processi di concertazione tra le amministrazioni coinvolte, i proprietari dei terreni interessati, la politica e le organizzazioni ambientaliste. Insieme a tutti gli stakeholder coinvolti, si sviluppa una soluzione progettuale approvabile.

2.3.5 Sponde di acque stagnanti

Problematica

Sulle sponde di acque stagnanti si creano delle forme di erosione che possono assomigliare a quelle conosciute lungo le sponde marine. In tale contesto i fenomeni naturali vengono potenziati dall'azione antropica.

Fattori di influenza

Sulle difese spondali di ingegneria naturalistica agiscono le onde naturali e di quelle prodotte da imbarcazioni, in combinazione con materiale e ghiaccio flottante. Zone della sponda interessate da attività di svago vengono danneggiate mediante il calpestio e dalle barche. Eventuali altri danni si creano ad opera del bestiame pascolante.

Resistenza

Il suolo può essere protetto per mezzo di un tappeto erboso continuo. Larghe fasce di canneto riducono il battito delle onde e proteggono il suolo tramite le radici superficiali. Le specie legnose sommergibili che presentano ramificazioni molto sporgenti svolgono una funzione simile.

Limiti dell'applicabilità

Oltre ai fattori generali del sito per ogni specie vegetale esiste un limite minimo di applicabilità. Questo limite viene determinato dal livello massimo, frequenza e durata ammissibile di sommersione. Inoltre ha un ruolo la frequenza delle onde, ragion per cui l'azione continua delle onde provocate da imbarcazioni può distruggere un canneto che potrebbe resistere se le onde - della stessa altezza - fossero soltanto occasionali (in caso di perturbazioni, ecc.).

Raccomandazioni per il dimensionamento e la progettazione

Nella progettazione di difese spondali di laghi l'impostazione della progettazione paesaggistica degli spazi aperti svolge un ruolo importante ai fini di tenere lontana dalle sponde la forte pressione antropica. Di regola per tale scopo si devono proporre delle proposte ricreative interessanti situate nelle vicinanze. Il limite di resistenza e di applicabilità della vegetazione dovrebbero essere determinate in base a aree naturali limitrofe di riferimento. In caso di inerbimento ex novo delle sponde si rendono necessarie delle misure protettive contro il

calpestio, l'approdo di imbarcazioni, l'azione scavante del materiale flottante, il bestiame pascente e gli uccelli acquatici.

2.3.6 Argini

Problematica

Gli argini servono alla protezione di attività e di edifici da piene e mareggiate o a mantenere un determinato livello d'acqua in un corso d'acqua o specchio d'acqua pensile. Nella fase asciutta la problematica erosiva corrisponde a quella di semplici scarpate; sul lato dell'acqua si creano i problemi delle sponde delle acque stagnanti o correnti. A causa del notevole potenziale di danno in caso di rotture di argini, è necessario garantire le operazioni di controllo, risanamento e rinforzamento durante una piena, una tempesta, pioggia e in condizioni di oscurità. In particolare si deve reagire tempestivamente e rapidamente a situazioni di sifonamento (piping) ed ai cedimenti degli argini per sormonto.

Fattori di influenza

I fattori di influenza sono il peso proprio del terreno, il vento, l'urto delle gocce di pioggia, gli scoli superficiali e inoltre, sul lato bagnato l'azione delle correnti, le forze di trascinamento, gli urti di materiale e ghiaccio flottante nonché del battito delle onde. Sul lato dell'acqua dopo una piena si possono verificare dei franamenti dovuti alle differenze di pressione idrostatica. Sul lato di terra in caso di piena si può verificare il cedimento per erosione delle scarpate, liquefazioni o sifonamenti. Il bestiame pascolante (tranne le pecore), i cavalli ed i veicoli possono danneggiare notevolmente la vegetazione. Altri danni si creano a causa di cunicoli animali.

Resistenze

Vengono previste superfici erbose dense laddove essi resistono alle forze di trascinamento e le velocità di deflusso delle piene (vedi sopra). Inoltre il prato serve come protezione contro il movimento delle onde e contro l'erosione eolica. Qui i danni arrecati alle scarpate fluviali erbose sono dovuti al ghiaccio e legno flottante. Questi danni possono essere evitati attraverso il rafforzamento delle opere di consolidamento (opere di consolidamento combinate in pietra e erbacee) oppure attraverso il posizionamento di alte gallerie di salici arbustivi nelle golene davanti a sponde in erosione. Sul lato terra vengono realizzati inerbimenti paesaggistici per la protezione contro il vento e la pioggia. Essi consentono di riconoscere i sifonamenti. Attraverso la semina di associazioni autoctone e ricche di specie di erbacee, per es. per mezzo di fieno trebbiato si ottiene una radicazione differenziata e quindi un'alta resistenza contro l'erosione.

Limiti dell'applicabilità

I limiti dell'applicabilità sul lato acqua sono dati dalla durata ed altezza di sommersione massima possibile delle singole specie vegetali nonché dai limiti di resistenza delle erbacee in caso di inondazione e movimento delle onde in combinazione con la presenza di legno e ghiaccio flottante.

Raccomandazioni relative al dimensionamento ed alla progettazione

Gli argini sono in primo luogo delle opere tecniche. Gli interventi di ingegneria naturalistica con inerbimenti paesaggistici, rappresentano nella maggior parte dei casi

la possibilità più economica di protezione contro l'erosione. In caso di superamento dei limiti dell'applicabilità si rendono necessarie soluzioni combinate con pietre. Durante la progettazione va tenuto conto delle possibilità di manutenzione, difesa ed eventualmente rafforzamento. Nella selezione delle piante va tenuto conto delle differenti zone di umidità delle scarpate sul lato terra e della differente frequenza e durata di sommersione della scarpata lato fiume.

2.3.7 Protezione di coste marittime

Problematica

Gli interventi di ingegneria naturalistica possono contribuire in molteplice maniera alla protezione e sistemazione di coste. Si tratta da una parte di interventi di protezione e di sviluppo presso le dune e d'altra parte di procedimenti per la protezione di argini attraverso la realizzazione e conservazione di aree tampone sul lato dell'arenile di marea. I metodi di ingegneria naturalistica impiegati nel passato nell'arenile di marea (venivano chiamati "recupero biogeno di terreno") oggi vengono impiegati soltanto raramente.

Fattori di influenza

Si tratta delle azioni esercitate dalla combinazione di vento ed acqua.

Gli interventi di ingegneria naturalistica servono prevalentemente nelle zone di spiaggia retrogressive, quindi in quelle zone in cui prevalgono le forze erosive e in cui la spiaggia nonché le dune bianche vengono sbancate oppure, nelle zone interne, a causa del vento si creano delle conche che possono comportare la sparizione di intere dune. Nei tratti progressivi di costa, e quindi lì dove le dune si sviluppano grazie all'adduzione di sabbia, alle platee di sabbia, la crescita vegetale e le pre-dune, l'ingegneria naturalistica può essere un sostegno nella formazione delle dune.

Nella zona antecedente gli argini il compito da svolgere consiste nella riduzione dell'energia dell'acqua la quale in caso di inondazioni urterebbe contro gli argini di protezione senza essere frenata. Tramite terreni sopraelevati posti davanti agli argini, l'energia dell'acqua viene frenata e distribuita in maniera più uniforme. La forza urtante il piede dell'argine si riduce.

Resistenze

La dinamica dello sviluppo delle dune e la biologia delle specie vegetali delle dune ne dimostrano le possibilità di impiego per la protezione di coste. Nella zona delle dune retrogressive la resistenza nei confronti del vento e quindi la funzione di intercettazione delle sabbie viene aumentata per mezzo di ramaglia o di culmi di piante inseriti quali talee o mediante piantagione. La radicazione della sabbia apportata col vento da parte delle erbacee e gli arbusti consolida le dune.

Rispetto all'impiego dell'ingegneria naturalistica nella zona antecedente gli argini è importante il fatto che questi terreni in caso di mareggiate riducano sia l'altezza e la frequenza delle onde che raggiungono l'argine principale sia l'energia delle onde che si avvicinano velocemente. Grazie alla scabrosità viene rafforzato l'attrito al fondo riducendo la velocità. In aggiunta le specie e le società vegetali esercitano un'azione stabilizzante sulla

compattezza del suolo e vi riducono l'erosione, frenando l'energia di deflusso. Particolarmente importanti sono le radici, costituite da elementi rigidi ed elastici, che si legano alle particelle del suolo. Le particelle del suolo posseggono un'alta stabilità nei confronti di forze a pressione, mentre le radici contrastano le forze di trazione e di taglio indotte dalla corrente. Il potere di sedimentazione in tale contesto dipende dalla densità strutturale della vegetazione, sia in senso orizzontale che in senso verticale. Il tasso di sedimentazione presenta un rapporto immediato con l'intensità di inondazione, la quale dipende dalla quota dei tipi di biotopo rispetto al livello medio di alta marea. La trasmissione dell'energia dipende dall'altezza di crescita, dall'elasticità delle piante e dalla loro resistenza meccanica. Con altezza delle piante crescenti aumenta la riduzione delle velocità della corrente d'acqua comportando quindi una migliore protezione del suolo.

Limiti dell'applicabilità

Le forze di abrasione sono più forti della resistenza che le erbe e degli arbusti, i culmi e le piante possono opporre.

Raccomandazioni relative al dimensionamento ed alla progettazione

Per i siti costieri vale dappertutto lo stesso principio dell'intercettazione della sabbia attraverso la scabrosità e del consolidamento di sabbia e limo attraverso la radicazione. Sono idonee quelle specie in grado di consolidare il materiale apportato dal vento o dall'acqua, grazie alla struttura delle loro radici distribuite su più livelli, come le erbe da spiaggia ed i cespugli costieri. Sotto l'aspetto biologico le specie sono simili, la selezione delle specie dipende dal tipo di paesaggio.

2.3.8 Piantagioni protettive contro il vento e le emissioni

Problematica

Le siepi formate da alberi ed arbusti possono essere predisposte a protezione di terreni e di vie di comunicazione contro i danni prodotti dal vento e dall'essiccazione o dall'apporto (tramite il vento) di sabbia, limo o neve. Al margine di aree di superfici estrattive e di altre aree industriali, le siepi e i boschi possono essere impiegati anche per filtrare la polvere. In alternativa si procede direttamente all'inerbimento delle superfici esposte all'erosione (p.es. discariche di miniera).

Fattori di influenza

Come fattore principale va descritto in maniera più dettagliata il vento caratterizzato dall'intensità, dalla frequenza e dalla direzione.

Resistenze

I valori limite per i quali le sostanze esposte al pericolo erosivo vengono rimosse, dovrebbero essere noti: il diametro del grano, il peso, l'umidità.

Come protezione antierosiva superficiale su superfici esposte al vento, per es. discariche, hanno dato buona prova di sé i prati semiaridi, eventualmente anche i prati aridi densi ed i cespugli aridi. Le siepi arboreo-arbustive riducono le forti correnti di vento fino ad una distanza che corrisponde all'incirca al 10 volte l'altezza della siepe. Queste siepi dovrebbero essere presentare una certa

permeabilità al vento per ridurre le turbolenze che si creano sul lato sottovento. Le siepi protettive contro le emissioni vengono eseguite a più file oppure larghe con più strati.

Limiti dell'applicabilità

Nella realizzazione di siepi campestri va tenuto conto dei limiti di siccità delle specie arboree. Per le siepi protettive contro le emissioni a favore di impianti estrattivi ed industriali, oltre ai fattori stagionali usuali deve sussistere la compatibilità tra le emissioni e le specie vegetali impiegate.

Raccomandazioni relative al dimensionamento ed alla progettazione

L'effetto aerodinamico può essere pronosticato in base alla letteratura tecnica, tra gli altri KOVALEV 2003. Lo sviluppo dell'altezza delle siepi richiede una progettazione, piantagione e cura coerente svolta per decenni, per ottenere gli effetti desiderati e per mantenerli in funzione. In particolare qui si deve tener conto dell'irrigazione, della protezione contro la vegetazione concorrente e contro la brucatura della selvaggina.

L'inerbimento di siti industriali ed estrattivi richiede spesso un esame dei substrati e dei suoli sotto l'aspetto dell'impatto ambientale. In presenza di contaminazioni e di terreni contenenti sostanze nocive, vanno rispettati i valori limite e i vari percorsi di diffusione delle sostanze nocive. Soltanto in base a perizie specialistiche si può decidere se l'inerbimento immediato del substrato sia ammissibile o se siano necessarie delle coperture costituite da strati di copertura, strati di regimazione delle acque o impermeabilizzazioni della superficie. Soltanto dopo aver chiarito questi punti, vale la pena eseguire un esame del terreno sotto l'aspetto del verde tecnico e progettare in conseguenza l'inerbimento.

2.3.9 Regolazione del regime delle acque

Problematica

Le precipitazioni intense sulle superfici prive di vegetazione o scarsamente vegetate, possono comportare la formazione di portate di deflusso molto intense con brevi tempi di corrivazione in solchi d'erosione o avallamenti. Le conseguenze sono erosioni, grandi quantità di trasporto solido, un peggioramento della qualità dell'acqua e una ridotta formazione dell'acqua di falda. Per la regolazione del regime dei deflussi si possono impiegare delle coperture vegetali adeguate, come il bosco, gli arbusti o le siepi arbustive, i quali vengono piantati nei siti problematici per mezzo di tecniche di ingegneria naturalistica volte alla protezione di pendii, solchi d'erosione e fossati. Questi effetti sono di particolare importanza nei bacini idrografici che interessano zone ad alto pericolo idraulico e nei bacini idrografici posti a monte di dighe e di altri impianti di approvvigionamento idrico.

Fattori di influenza

Come fattori principali devono essere descritti più dettagliatamente le precipitazioni, con la durata, la frequenza e l'intensità, nonché la siccità come durata dei periodi privi di precipitazioni.

Resistenze

I pendii ed altri superfici dovrebbero essere ricoperti di un'adeguata copertura vegetale la quale favorisce l'infiltrazione dell'acqua, e dovrebbero essere dotati di strutture che frenino lo scolo superficiale. A tale scopo è richiesta una densa copertura vegetale come anche tutti gli interventi che aumentano la scabrosità della superficie. Tutti i solchi d'erosione ed i fossati dovrebbero essere rivestiti con vegetazione arbustiva idraulicamente attiva e con altre strutture scabre (per es. solchi cespugliati) facendo sì che la velocità di deflusso venga ridotta, il tempo di corrivazione venga aumentato, il picco della curva di deflusso venga smorzato e le possibilità di infiltrazione venga migliorata, per es. mediante l'aumento della permeabilità e il prolungamento della durata di infiltrazione.

Fattori limitanti

Sono fattori limitanti le condizioni estreme del sito (la pendenza, l'esposizione, il microclima, i tipi di suolo, la geomorfologia, la mancanza di sostanze nutrienti e il contenuto di sostanze tossiche). Nei solchi d'erosione si creano anche dei limiti dovuti alle alte velocità di deflusso, alle forze di trascinamento ed all'effetto del trasporto solido. Per pendii suscettibili al franamento con superfici di scorrimento ad una profondità maggiore, l'aumento dell'infiltrazione dell'acqua può aumentare il pericolo di cedimento del versante. Ciò deve essere verificato da ingegneri geotecnici.

Raccomandazioni relative al dimensionamento ed alla progettazione

L'influenza che la vegetazione esercita sull'infiltrazione e sulla velocità del deflusso superficiale può essere pronosticata in base alla letteratura tecnica, per es. MARKART et al. 2004. Lo sviluppo della densità e struttura della vegetazione di progetto richiede una progettazione, piantagione e manutenzione coerente e svolta per decenni, per ottenere gli effetti desiderati e per mantenerli in atto.

La necessità di gestire contemporaneamente l'infiltrazione nonché il deflusso superficiale, richiede interventi di manutenzione della vegetazione. A tale scopo la vegetazione, a cui si mira, dovrebbe orientarsi alla vegetazione naturale della stazione, per ottenere condizioni ecologicamente stabili, per es. con una limitata vulnerabilità nei confronti di malattie, e per riuscire così a limitare l'onere manutentivo.

2.3.10 Zone distrutte da incendi

Problematica

La distruzione della copertura vegetale nonché di una parte dello strato di humus a causa di un incendio boschivo comporta come conseguenza un rischio più elevato di erosione il quale deve essere controllato con interventi immediati per limitare le perdite di terreno e di sostanze nutrienti e per consentire un rapido reinsediamento della vegetazione. I rilasci straordinari di sostanze nutrienti possono comportare notevoli pregiudizi a carico delle zone di tutela dell'acqua potabile e delle acque situate a valle, per es. si possono avere delle eutrofizzazioni.

Fattori di influenza

I fattori di influenza principali sono la quantità di materiale vegetale morto e la scorta di sostanze combustibili, i fattori climatici come la siccità, la calura e il vento con la sua forza, durata, frequenza e direzione.

Resistenze

Gli incendi in natura sono normalmente connessi con condizioni atmosferiche di siccità e siti aridi. La diffusione viene favorita da associazioni vegetali arboreo-arbustive collegate. Le resistenze contro la diffusione di un incendio consistono in larghe fasce di terreno prive di biomassa combustibile e ricoperte soltanto da una vegetazione erbosa come protezione antierosiva. Queste fasce aperte di terreno favoriscono la biodiversità e possono essere utilizzate come pascoli.

Dopo un incendio lo sviluppo della vegetazione è molto limitato a causa della distruzione, della aridità del sito e del terreno bruciato. Per questo motivo il primo intervento deve essere diretto alla prevenzione dell'erosione tramite opere provvisorie fatte di materiali disponibili. A tale scopo sono utili la posa di alberi grezzi e la sistemazione dei solchi, fossati e pendii ripidi con tondame, impiegando i tronchi carbonizzati. È assolutamente necessario l'inerbimento per ricreare presto una copertura vegetale compatta. Il miscuglio di semenze dovrebbe essere ricco di specie e presentare sia delle specie idonee per le condizioni di sito estreme, sia delle specie a rapido accrescimento, sia delle specie di un successivo stadio di successione, sempre in relazione al sito specifico da inerbire.

Limiti dell'applicabilità

La rivegetazione viene definita dal grado di distruzione del suolo, che richiede un rapido inerbimento prima che venga eroso il materiale fine ed organico del suolo.

Raccomandazioni relative al dimensionamento ed alla progettazione

L'effetto di interventi lineari di protezione antierosiva può essere previsto in base a modelli di erosione. La vegetazione di fasce antincendio prive di vegetazione arborea dovrebbe essere adatta al sito e autoctona, dovrebbe proteggere il suolo contro l'erosione nonché consentirne la destinazione a pascolo. La vegetazione a cui si mira dovrebbe essere sviluppata in modo da ridurre il pericolo di incendi futuri e di far sì che le piante dopo un incendio possano ricacciare. Le operazioni di manutenzione dovrebbe prevedere l'eliminazione della biomassa secca, preferibilmente l'utilizzazione della stessa.

2.3.11 Le piante come protezione antivalanghe

Problematica

Le valanghe costituiscono pericoli naturali che minacciano sia le persone che le infrastrutture di regioni alpine. Il distacco di una valanga può essere impedito da un bosco protettivo costruito e curato in maniera adeguata, se per mezzo di robusti fusti d'albero abbastanza stabili si riesce ad assorbire la componente parallela al pendio del carico dovuto alla neve. Inoltre il bosco agisce favorevolmente sulla distribuzione uniforme della neve e sui parametri meccanici della copertura nevosa. Una valanga già staccata invece non si lascia praticamente più frenare dalla vegetazione. Mediante una

idonea manutenzione del bosco protettivo, si dovrebbe essere in grado di evitare questo caso il più possibile.

Fattori di influenza

Il fattore meccanico che provoca la valanga si basa sulla componente del peso proprio (della copertura nevosa) parallela alla superficie del versante. La copertura nevosa presenta pesi specifici molto differenti a seconda dello stato non compatto (ca. 1 kN/m³) o compattato come il ghiaccio (fino a 10 kN/m³). Verso la fine dell'inverno le coperture nevose hanno uno spessore di più metri.

Attraverso il lento movimento proprio la copertura nevosa (senza distacco di valanghe) verso valle (strisciamento o scorrimento della neve) esercita sulla vegetazione una pressione permanente e parallela al versante compresa nella fascia tra 1 e 3,5 kN/m². Ciò è sufficiente per sradicare piccoli alberi. Una volta che una valanga si è distaccata e si muove verso valle, già dopo ca. 50 m raggiunge delle forze d'impulso capaci di spezzare tronchi d'albero. Al più tardi dopo una lunghezza della traiettoria della valanga di 150 m i fusti d'albero vengono spezzati oppure sradicati. Le pressioni esercitate in tale occasione sugli alberi dipendono dal tipo di valanga: 3 – 5 kN/m² per le valanghe nubiformi e 10 – 50 kN/m² per le valanghe radenti.

Gli effetti della vegetazione ai sensi della riduzione dei fattori di influenza

L'effetto della vegetazione sulla riduzione dei fattori d'influenza si basa su varie peculiarità del bosco, che vengono a mancare sui siti deforestati. Le più importanti sono le seguenti:

- intercettazione della neve

Durante la caduta della neve una parte della stessa viene intercettata dalle chiome degli alberi. Una parte minore di questa neve sublima. In tale maniera la copertura nevosa del bosco ha uno spessore minore ed è più strutturata di quella dello spazio libero. Alle basse temperature le sempreverdi presentano un maggior potere di intercettazione delle specie caducifoglie.

- Regime dell'irradiazione

In un bosco di sempreverdi fitto, il microclima è più equilibrato che all'esterno di tale bosco. Il riscaldamento della copertura nevosa durante il giorno e il raffreddamento durante la notte sono minori. La probabilità di formazione di pericolosi strati deboli all'interno della copertura nevosa si riduce.

- Vento

L'azione del vento e con ciò i possibili trasporti di masse nevose da un punto all'altro sono meno problematici in un bosco compatto. Tuttavia nelle radure all'interno di un bosco possono essere depositate quantità maggiori di neve rispetto a zone prive di bosco.

Resistenza della vegetazione nei confronti di valanghe nevose

La funzione protettiva della vegetazione consiste nell'impedire il distacco di valanghe. Ma una volta avvenuto il distacco, nemmeno un bosco intatto riesce a fermare la valanga. Ai fini di impedire il distacco di una valanga per mezzo della vegetazione, l'altezza deve essere sufficiente per superare la copertura nevosa. La funzione protettiva viene meno nel momento in cui questi elementi di scabrezza superficiali sono completamente coperti dalla neve (SAEKI e MATSUOKA 1969). Inoltre va tenuto conto del fatto che le piante completamente innevate, e particolarmente le specie che si piegano facilmente fino al

suolo, possono persino favorire la formazione di valanghe in quanto determinano strati preferenziali di scorrimento all'interno della copertura nevosa ed il conseguente movimento delle masse nevose. Per questo motivo le legnose basse o di portamento prostrato offrono una protezione soltanto fino a quando non sono completamente coperto dalla neve. Considerato che nelle regioni alpine interessate da valanghe si registrano altezze della neve di più metri, soltanto un bosco intatto può offrire una vera funzione protettiva. A tale riguardo il bosco è una protezione antivalanghe efficace ed economica. I fusti stabilizzano la copertura nevosa. Questo effetto non deve però essere sopravvalutato, perché solo un bosco fitto protegge contro il distacco di valanghe visto che l'effetto protettivo è dato soltanto a distanze minime dal tronco.

Fattori limitanti

Il limite superiore naturale del bosco, legato all'altitudine e al clima, determina l'idoneità del bosco quale protezione antivalanghe. Peculiarità derivano localmente dalla durata della copertura nevosa, dall'esposizione rispetto al vento, dalle temperature basse, dal tipo di suolo e dalla profondità del terreno vegetale. Se si tiene conto degli effetti del microclima e della topografia locale, il rimboschimento è possibile anche nella zona subalpina. Gli alberi giovani periscono spesso a causa di malattie dovute a funghi o muffe e causate dalla lunga copertura nevosa. La muffa nera della neve (*Herpotrichia juniperi*) è per esempio diffusa dalle prealpi fino all'alta montagna e colpisce gli aghi dell'abete rosso, del pino, dell'abete bianco e del ginepro. È distribuito tra i 900 e i 2000 metri sopra il livello del mare. Questo fungo legato alla neve, provoca grandi danni al ringiovanimento del bosco, soprattutto nei siti molto innevati delle prealpi. Esso colpisce sia il ringiovanimento naturale del bosco che i rimboschimenti montani, dove colpisce anche alberi molto vitali.

I danni da brucatura rappresentano un ulteriore problema per gli alberi giovani, che in compenso hanno un portamento più flessibile rispetto a quelli più anziani. Per questo motivo gli alberi si spezzano a causa della pressione della neve soltanto a partire da un diametro del fusto superiore a circa 10 cm, e i progetti di rimboschimento falliscono spesso dopo 30-50 anni a causa della cura mancante.

Raccomandazioni relative al dimensionamento ed alla piantagione

Il profilo del bosco ideale dipende fortemente dall'obiettivo di protezione atteso e dal potenziale di danno esistente. Piccoli smottamenti di neve, che p.es. mettono a rischio le persone che si trovano su di una pista da sci, possono essere evitati solamente da boschi di sempreverdi molto fitti (grado di copertura delle chiome >50%). Per evitare i distacchi di valanghe su superfici più ampie, il bosco deve soddisfare requisiti meno rigidi. Boschi radi, che frequentemente si trovano vicino al confine superiore del bosco, devono sempre essere valutati criticamente. Il grado di copertura delle chiome e le dimensioni delle aperture presenti, in combinazione con la pendenza del versante, sono importanti criteri per descrivere l'effetto protettivo (FREHNER 2005). Come valore indicativo per evitare il distacco di valanghe si considera necessario un numero di 500 tronchi all'ettaro per versanti aventi una pendenza intorno a 35° e un

numero di 1000 fusti all'ettaro per versanti più ripidi. Considerato che questi numeri sono molto rari nei boschi subalpini, si dovrebbe tentare di mantenere le radure presenti nel bosco in dimensioni non maggiori di 15-25 m in diametro, e che si raggiunga un grado di copertura delle chiome compreso tra il 30 e il 50% (con un grado di copertura delle chiome pari al 50%, una pendenza del versante di 35° si ritiene che il distacco di valanghe sia molto improbabile fino ad una ampiezza della radura pari a 15 m). A tal fine il bosco dovrebbe presentare una strutturazione diversificata rispetto alle età e le specie arboree presenti. Alberi morti offrono una protezione ulteriore e non dovrebbero essere rimossi dal bosco. Per lo più per realizzare con successo i progetti di rimboschimento di boschi di protezione, devono essere erette protezioni aggiuntive (oltre alle usuali protezioni contro il distacco di valanghe), quali cavalletti a tre piedi, palizzate, terrazzamenti o valli.

3. Metodi costruttivi dell'ingegneria naturalistica

3.1 Glossario d'ingegneria naturalistica EFIB 2007

I metodi costruttivi dell'ingegneria naturalistica sono riportati nel glossario EFIB (ZEH 2007). Le stesse modalità di costruzione sono menzionate in lavori precedenti. Ogni modalità di costruzione è descritta con un breve testo e mostrata attraverso fotografie e disegni significativi. Il glossario era un primo passo e quindi un presupposto importante per la definizione delle direttive europee EFIB.

3.2 Uso del glossario

3.2.1 Criteri di scelta

La corretta scelta delle modalità costruttive in ingegneria naturalistica e la corretta composizione floristica è decisiva per il raggiungimento degli obiettivi.

Criteri di scelta/decisione valgono i seguenti obiettivi:

Protezione

Modalità costruttive richieste per una sicurezza idraulica, idrologica, geologica e la futura vegetazione

Ecologia

Miglioramento della condizione ecologica, per esempio limitatamente a un corso d'acqua, come definito nelle direttive della commissione europea sull'acqua, si rileva la necessità dello studio sullo sviluppo di flora, fauna e miglioramento del corpo idrico.

Struttura dei biotopi in quanto habitat.

Paesaggistico

Miglior inserimento della struttura nel paesaggio mantenendo i caratteri per la forte riconoscibilità del corpo idrico.

Economico

Utilizzo di materiale vegetale riproducibile vegetativamente, di materiale proveniente dalla stessa località o da località poste nelle vicinanze.

Utilizzo di modalità costruttive durature e con possibilità di cure di mantenimento di tipo estensivo.

Manutenzione a basso costo.

Altri obiettivi tecnici

Utilizzo di elementi costruttivi naturali secondari: piante vive, legno, terra, pietra.

Utilizzo di materiali da costruzione a basso impatto energetico.

Sociali

Riattivazione di attività ricreative e turistiche.

Realizzazione di nuovi spazi verdi negli insediamenti residenziali

3.2.2 Matrici di scelta

Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica sui corsi d'acqua e Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica su pendio e versante: appendice.

4. Cure dei sistemi costruttivi d'ingegneria naturalistica

4.1 Principi

Si procede con le manutenzioni solamente se queste sono anche consigliate "lasciare invece di fare".

La necessità d'intervento viene definita solo attraverso regolari visite tecniche o i controlli sul raggiungimento degli obiettivi.

Devono venire osservati i seguenti principi:

- Uso e realizzazione di tecniche a basso costo di manutenzione;
- Raggiungimento dell'obiettivo con il minor uso di mezzi e nel minor tempo possibile;
- Con un certo obiettivo di sviluppo vengono definite l'efficacia tecnica, economica, ecologica ed estetica;
- Aumento dell'eterogeneità e della biodiversità;
- Sicurezza del traffico;
- Raggiungimento di un continuo e sempre maggior grado di efficacia;
- Deve essere chiaro che con la manutenzione si possono anche causare effetti negativi. Definizione delle cure secondo un principio naturale per la riduzione di possibili effetti negativi poiché manutenzioni sbagliate possono essere peggiori dei non-interventi;
- L'orientamento della manutenzione deve assecondare lo sviluppo delle tecniche e più in particolare considerare la vegetazione che in esse si insedierà (manutenzione orientate allo sviluppo della vegetazione);
- Premessa per il raggiungimento degli obiettivi è definire la sequenza delle manutenzioni e il loro supporto specialistico;
- Per la definizione di cure specialistiche nelle tecniche d'ingegneria naturalistica sono da prevedere risorse finanziarie specifiche e qualificate maestranze;
- L'organizzazione della manutenzione deve prevedere l'utilizzo e la preparazione di materiale vegetale idoneo, (d es. materiale vivo, biomasse, materiale di supporto ecc.);
- Ogni operazione di manutenzione deve venire documentata.

4.2 Successione delle operazioni di manutenzione.

Cure di completamento e di accrescimento

Si tratta delle misure dalla conclusione del cantiere fino al raggiungimento dell'attecchimento della vegetazione, ossia fino alla presa in consegna del cantiere da parte del

committente. L'attecchimento viene definito attraverso specifici criteri. Questi devono essere definiti nel progetto e descritti nell'elenco delle attività.

Cure durante sviluppo

Si tratta delle misure fino al miglior sviluppo possibile e fino alla fine del periodo di garanzia, ossia fino al raggiungimento della capacità funzionale della vegetazione.

Cura di mantenimento

Si tratta delle misure che consentono un mantenimento duraturo della capacità funzionale della vegetazione.

Definizione dello stadio di evoluzione

La capacità funzionale della vegetazione viene definita attraverso controlli conclusivi (v. capitolo 5)

4.3 Tipologia di manutenzione

Misure di manutenzione ordinaria

Si tratta delle misure di manutenzione che devono venire condotte con regolarità.

Misure di manutenzione straordinaria

Si tratta delle misure di manutenzione che si rendono necessarie a seguito di eventi straordinari e sviluppi non prevedibili (acqua alta, attacchi parassitari, invasione di piante alloctone, atti di vandalismo, tempeste di vento, neve bagnata ecc.).

4.4 Pianificazione della manutenzione

La pianificazione si basa sui principi della manutenzione. Comprende la sequenza delle operazioni di manutenzione, la definizione dello stadio evolutivo della vegetazione attraverso i controlli finali (v. cap. 5), una supervisione e i dettagli per la corretta gestione delle operazioni di manutenzione, come materiale cartaceo si devono consegnare disegni, foto, sezioni, tabelle e planimetrie.

4.5 Gestione della manutenzione

Definizione delle cure in funzione dei metodi costruttivi

Ogni metodo costruttivo necessita, in funzione della vegetazione obiettivo, specifiche misure di manutenzione a seconda dello stadio evolutivo delle piante e dello stato dei materiali.

A seconda dei differenti materiali vivi impiegati si distinguono i seguenti metodi costruttivi:

- Metodi costruttivi pionieri (si basano esclusivamente su specie pioniere, compreso il salice);
- Metodi costruttivi di transizione, comprendono le specie pioniere, le specie della successione vegetazionale e le specie obiettivo;
- Metodi costruttivi Climax (si basano esclusivamente sulle specie obiettivo).

Lavori di manutenzione

I disegni e le spiegazioni si trovano nel glossario (EFIB 2007 al cap. 8).

Per monocotiledoni, canne e dicotiledoni valgono le seguenti misure:

- Operazioni di taglio (modalità di taglio o di sfalcio, sfalcio a gradoni, dopo la maturazione dei frutti, utilizzare macchinari e strumenti idonei al biotopo);
- Sfalcio sottacqua;

- Operazioni di ritocco quali trasemina, concimazione di copertura, trapianto su sodo, trinciatura, posizionamento di piote erbose, irrigazione;
- Raccolta dei rifiuti e loro allontanamento.
- Per gli alberi e gli arbusti valgono le seguenti misure:
- Taglio del legno (modalità di taglio alternato e tagli di ringiovanimento)
- Capitozzatura (sugli alberi al di sopra o lungo la linea di piena, lungo i sentieri di manutenzione in considerazione di valutazioni ecologiche o paesaggistiche)
- Eliminazione di singoli esemplari (taglio di singole piante per motivi idraulici, ecologici ed estetici)
- Tagli di manutenzione (tagli di mantenimento)
- Cercinatura delle specie non desiderate come le robinie (asportare un cerchio di corteccia per 50 cm di lunghezza ad un'altezza fra 100 e 150 cm del fusto)
- Operazioni di ritocco come reimpianti, concimazioni di copertura, cure e coperture della corteccia dei tronchi, irrigazione, legature o rinnovo delle protezioni degli alberi
- Raccolta e allontanamento dei rifiuti

Tempistica delle operazioni di cura

La sequenza temporale delle cure è da definire a seconda di:

- Obiettivo di sviluppo
- Punti di vista dello stato vegetativo e di biologia vegetale (manutenzione degli alberi: miglior momento delle potature è in estate per una migliore chiusura delle ferite di taglio!)
- Indicazioni idrauliche, idrologiche, geologiche e di sicurezza
- Aspetti ecologici e di protezione della natura (specifici periodi per flora e fauna specialmente per pesci e uccelli)
- Aspetti paesaggistici, riuso di materiale vivo per la realizzazione di ulteriori opere d'ingegneria naturalistica (deve essere possibile durante tutto l'anno stabilire leggi specifiche)
- Possibilità di non reperimento di materiale utilizzabile
- Ulteriori possibilità (es. periodo vegetativo dei prati)

5. Controlli finali delle opere d'ingegneria naturalistica

5.1 Regole per i controlli finali

La premessa per una sicurezza qualitativa di durabilità e per uno sviluppo tecniche dell'ingegneria naturalistica è il monitoraggio.

- Per il monitoraggio devono venir garantite risorse finanziarie e di personale
- Il monitoraggio deve essere condotto da personale qualificato
- Le misure per i controlli devono venire documentate e adeguatamente localizzate. La valutazione deve essere possibilmente basata sulle banche dati la premessa di ciò sono formulari standard accessibili possibilmente attraverso Internet.

5.2 Controlli delle condizioni e dello sviluppo

Condizioni del materiale vivo-piante e arbusti

- Altezza
- Diametro (da misurare a 20 e 100 cm del tronco)
- Densità (n° di germogli/mq)

- Vitalità (grado di vitalità secondo Braun 1-5 o Roloff 0-3)
- Consociazione specifica
- Ecc.

Stato del materiale vivo-monocotiledoni e dicotiledoni/canne

- Vitalità
- Grado di copertura
- Consociazione specifica
- N° di germogli a fiore
- Lunghezza media delle foglie
- Rapporto mono/dicotiledoni

Stato del materiale inerte

- Condizioni della paleria-grado di marcescenza (controlli visuali dei tagli, controlli tecnici tramite resisto grafo)
- Stato dei chiodi e dei fili
- Stato dell'ulteriore materiale
- Grado di decomposizione del materiale inerte autoctono
- Danni alle costruzioni a causa di erosione e deformazione, o per difetti di costruzione

Stato ecologico

Differenti considerazioni dello stato ecologico delle opere d'ingegneria naturalistica a seconda dell'obiettivo di sviluppo:

- Connessione tra biotopi; valutazione della qualità degli habitat per le specie obiettivo (fauna e flora)
- Direttive sull'acqua "buono standard ecologico" : valutazione delle componenti di qualità biologica
- Effetti ecologici complessivi: valutazione dello stato eco morfologico, effetto delle opere di ingegneria naturalistica sulla struttura del corso d'acqua e sul corso d'acqua in se.
- Deve venire chiarito di volta in volta il grado di copertura per la valutazione dello standard ecologico (sezioni, singole opere, effetto complessivo di più opere)

5.3 controllo dell'efficacia e della funzionalità

Funzioni idrauliche e idrologiche

- Capacità di deflusso
- Protezione dalle piene e capacità di trattenuta
- Stato delle piene
- Presenza di punti di erosione
- Restrizioni al deflusso, tensione lenta e velocità della corrente

Funzioni di sicurezza tecnica e geologica

- Stabilità
- Durevolezza
- Sicurezza
- Raggiungimento di obiettivi biotecnici e di sicurezza
- Fessurazioni e rotture
- Deformazione
- Sprofondamenti e abbassamenti
- Smottamenti
- Casualità della forma
- Punti di penetrazione delle acque
- Bioindicatori

Funzioni ecologiche

- Costruzione di habitat

- Diversificazione degli habitat
- Connessione fra gli habitat
- Sviluppo di situazioni naturaliforme
- Struttura dei corsi d'acqua
- Raggiungimento di una vegetazione climax /prossima a quella naturale

Funzioni estetico-paesagistiche

- Singolarità del paesaggio e del paesaggio culturale

Funzione socioeconomica

- Analisi costi benefici
- Turismo e aspetti ricreativi
- Vivibilità
- Identificazione del quadro territoriale

Valutazione complessiva.

5.4 Controllo della durata e del bilancio ecologico

Scelta della tecnica – migliore idoneità possibile per il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo.

Scelta di materiali con la migliore idoneità possibile per le rispettive opere.

- Preferenza per l'uso di materiali vivi e inerti tipici dei luoghi, appartenenti ai luoghi, e tipici per l'ambiente tutti definiti a seconda delle richieste costruttive
- Certificazione di provenienza

Misure per la cura

- Necessità
- Modalità di conduzione (macchinario compreso il tipo)

Literature

Literatur, nationale Normen

Bibliografía de referencia, Normativa nacional

Bibliografia, Normas nacionais

Littérature, normes nationales

Bibliografia, Normativa italiana

Adam P., Debiais N., Gerber F., Lachat B. 2008. Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. La documentation française, Paris, 290 p.

AA.VV Manuale tecnico di IN. Regione Emilia Romagna, Assessorato all'ambiente, Regione del Veneto Assessorato Agricoltura e Foreste – 1993

AA.VV Opere e tecniche di IN e recupero ambientale. Regione Liguria, Ass. edilizia, Energia e Difesa del suolo – 1995

AA.VV Interventi di sistemazione del territorio con tecniche di IN. Regione Piemonte Direzione tutela e risanamento ambientale, Programmazione gestione rifiuti; Direzione Opere Pubbliche – 2003

AA. VV. Linee guida per capitolati speciali per interventi di IN. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – PODIS – 2006

AA. VV. Linee guida alla progettazione degli interventi di IN nelle Marche. Sezione Regionale AIPIN Marche – 2010

AA. VV. "Studio generale per la definizione delle Linee Guida regionali per la realizzazione degli interventi di riassetto idrogeologico con tecniche di Ingegneria Naturalistica" Regione autonoma Sardegna – 2010

AA.VV. Glossario dinamico per l'ambiente e il paesaggio. in ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture, Volume III, ISPRA Manuali e Linee Guida n.78.1/2012

Ausbildungsförderwerk Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau e.V. (1995): Naturnaher Wasserbau. Heft 3. Bad Honnef

Begemann, W., H.M. Schiechl (1994): Ingenieurbiologie. Bauverlag Wiesbaden und Berlin

Bellelli L. et al., 2010, "Mitigazioni a verde con tecniche di rivegetazione e Ingegneria Naturalistica nel settore delle strade" In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume I, Manuali e Linee Guida n.65/2010, ISPRA

Bentivenga M. et al., 2010, "Interazione fra infrastrutture lineari e patrimonio geologico" In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume I, Manuali e Linee Guida n.65/2010, ISPRA

Bittmann, E. (1965): Grundlagen und Methoden des ingenieurbiologischen Wasserbaus, in: Der biologische Wasserbau an den Bundeswasserstraßen. Stuttgart.

Blasi C. et al., 2010, "Analisi e progettazione botanica per gli interventi di mitigazione degli impatti delle infrastrutture lineari" In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume I, Manuali e Linee Guida n.65/2010, ISPRA

Briem, E. (2003): Formen und Strukturen der Fließgewässer – ein Handbuch der morphologischen Fließgewässerkunde. Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik. Hennef.

BWK Bund der Ingenieur für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. 1999: Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern

Cornellini P., 1996: Interventi di rinaturazione in ambito fluviale con tecniche di ingegneria naturalistica. Tevere n.2: 22 – 28

Cornellini P., 1992. Problematiche ed esempi concreti relativi all'uso delle specie autoctone negli interventi di ripristino in ambito ferroviario. Verde Ambiente, suppl. n.6: 22-29.

Cornellini P., 2009 La palificata loricata. Acer n. 5
Cornellini P. Una nuova tipologia. La palificata viva tipo "Roma". Acer 1/2001

Cornellini P, Crivelli C. Palmeri F., Sauli G., 2001: Sistemazione idraulica di corsi d'acqua mediterranei . Acer n.2

Cornellini P, Crivelli C. Sauli G., 2001: Dal progetto al collaudo – Le sistemazione idrauliche del canale di Mergozzo (VB). Acer n.4

Cornellini P., Federico C., Pirrera G., 2009. Arbusti autoctoni mediterranei per l'ingegneria naturalistica. Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali. Azienda Foreste Demaniali Regione Siciliana.

Cornellini P. Ferrari R., 2008 Manuale di ingegneria naturalistica per le scuole secondarie. Regione Lazio
Cornellini P., Palmeri F., Sauli G., 2002. Le specie autoctone da impiegare negli interventi di ingegneria naturalistica. Acer n.6.

Cornellini P. Ruggeri L. 2009 L'ingegneria naturalistica nella sistemazione idraulica e nella riqualificazione ambientale. Pag 21-24 De Rerum Natura - Rete delle Riserve Naturali d'Abruzzo

- Cornelini P., Sauli G. 2005 Esperienze di sistemazioni idrauliche in ambito mediterraneo. Alberi e territorio n.7-8
- Cornelini P., Sauli G. Manuale di indirizzo delle scelte progettuali per interventi di difesa del suolo con tecniche di IN. PODIS Ministero Dell'Ambiente - 2005
- Cornelini P., Sauli G. 2007 Atti Jornada: La Bioingeniería en la Restauración Fluvial del Paisaje Mediterráneo "La biongeniería en ámbito mediterráneo y fluvial. Problemática y resultados" Casade Cultura Coma i Cros – Salt (Gerona) Espana 15 febrero
- Cornelini P., Sauli G., 1991. Mantenimento della diversità biotica negli interventi di rinaturalizzazione con tecniche di ingegneria naturalistica. Atti Convegno Soc. Ital. di Ecologia "La diversità biotica nella valutazione di impatto ambientale", L'Aquila, 29 maggio 1991: 75-82.
- Cornelini P., Sauli G., 2012. Principi metodi e deontologia dell'ingegneria naturalistica - Regione Lazio
- De Antonis L., Molinari V.M., "Ingegneria Naturalistica: nozioni e tecniche di base" Regione Piemonte
- De Antonis L., Molinari V.M., "Ingegneria Naturalistica: nozioni e tecniche di base" Regione Piemonte
- Dinetti M. Fauna selvatica e strade: più sicurezza per uomo e natura - Bandecchi & Vivaldi – Pontedera - 1999
- Dinetti M. Infrastrutture ecologiche. Il Verde Editoriale – 2000
- Dinetti M. et al. Atti del convegno: "Infrastrutture viarie e biodiversità. Impatti ambientali e soluzioni di mitigazione". Pisa, 25 novembre 2004. Provincia di Pisa e Lipu. Stylgrafica Cascinese, Cascina (PI) – 2005
- Dinetti M. Rischio di conflitto. Reti ecologiche l'impatto delle strade sulla fauna. Acer 1/2007 33-35
- Dinetti M. (a cura di) Infrastrutture di trasporto e biodiversità: lo stato dell'arte in Italia. Il problema della frammentazione degli Habitat causata da autostrade, strade, ferrovie e canali navigabili. I.E.N.E. (Infra-Eco-Network-Europe), sezione Italia – 2008
- Dinger F. 1997. Végétalisation des espaces dégradés en altitude, Editions Cemagref, Antony, 144 p.
- DVWK Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau 1991: Merkblatt 22B – Hydraulische Berechnung von Fließgewässern.
- DWA-M 519 Merkblatt im Gelbdruck 2014: Technisch-biologische Ufersicherungen an schiffbaren Binnengewässern.
- DWA-M 617 Merkblatt im Gelbdruck 2013: Ingenieurbio-logie an kleinen und mittleren Fließgewässern.
- Ferrari R. 2006- Quaderni di cantiere delle opere di ingegneria naturalistica e manuali di ingegneria naturalistica. Volumi 1 - 18. Regione Lazio.
- Fernandes, J.P. e A. Freitas (2011): Introdução à Engenharia Natural. Coleção Nascentes para a Vida. EPAL. Lisboa.
- Fernandes, J.P. e C. S. Cruz. (2011). Limpeza e Gestão de Linhas de Água - Pequeno Guia Prático. Coleção Nascentes para a Vida, EPAL, Lisboa.
- Florineth F. Prezzi 1994 per i lavori di IN. Azienda Speciale per la regolazione dei Bacini Montani, Bolzano - 1994
- Florineth F. Piante al posto del cemento. Il Verde Editoriale – 2007
- Florineth, F. (2012): Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbio-logie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag. Berlin-Hannover.
- Floss, R. 2006: Handbuch ZTVE Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau. Kirschbaum v.
- Frohmann, M. (2003) Hrsg.: Tabellenbuch Landschaftsbau. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart
- Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (2000): Restauración del paisaje: Obras de bioingeniería: Técnicas mixtas de revestimiento de taludes: NTJ 12S-3 . Barcelona: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (Normas Tecnológicas de Jardineria y Paisajismo).
- Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (2010): Restauración del paisaje: Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas de revestimiento y de estabilización aplicables en ámbitos fluviales: NTJ 12S-5 . Barcelona: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (Normas Tecnológicas de Jardineria y Paisajismo).
- Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (2012): Restauración del paisaje: Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas de protección superficial del suelo: NTJ 12S-1 . Barcelona: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (Normas Tecnológicas de Jardineria y Paisajismo).
- Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (2013): Restauración del paisaje: Obras de bioingeniería del paisaje: Técnicas de estabilización de suelos: NTJ 12S-2 . Barcelona: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. (Normas Tecnológicas de Jardineria y Paisajismo).
- Gebler, R.-J. (2005): Entwicklung naturnaher Bäche und Flüsse. Maßnahmen zur Strukturverbesserung. Verlag Wasser + Umwelt, Watzbachtal.
- Geiger, W., Dreiseitl, H., Stemplewski, J. (2009): Neue Wege für das Regenwasser – Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten. 3. völlig neue überarbeitete Auflage. Oldenbourg Industrie-verlag, München
- Gerstgraser, C. (1998): Ingenieurbio-logische Bauweisen an Fließgewässern – Grundlagen zu Bau, Belastbarkeiten und Wirkungsweisen. Dissertation Universität für Bodenkultur Wien.
- Generalitat Valenciana (2008): Manual de propagación de árboles y arbustos de ribera- Una ayuda para la restauración de riberas en la región mediterránea (RIPIDURABLE-INTERREG IIIC)

- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (1980): Ingenieurbio­logie – Uferschutzwald an Fließgewässern. Jahrbuch 1. Aachen.
- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (1985): Ingenieurbio­logie - Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Jahrbuch 2. Aachen.
- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (1996): Ingenieurbio­logie im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Ingenieurbau­technik. Jahrbuch 6. Aachen.
- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (1998): Ingenieurbio­logie - Die mitteleuropäischen Erlen. Jahrbuch 7. Aachen.
- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (1997): Ingenieurbio­logie und stark schwankende Wasserspiegel an Talsperren. Jahrbuch 8. Aachen.
- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (2000): Ingenieurbio­logie - Sicherungen an Verkehrswegeböschungen. Jahrbuch 9. Aachen.
- GESELLSCHAFT FÜR INGENIEURBIOLOGIE e.V. (2006): Ingenieurbio­logie - Revitalisierung kleiner Fließgewässer im Berg- und Hügelland Jahrbuch 11. Aachen.
- González del Tánago, M. y García de Jalón, D. (1995): Restauración de ríos y riberas. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.
- Hacker, E. und. Johannsen, R. (2012): Ingenieurbio­logie. Ulmer Verlag.
- Hähne, K. (1994): Der Einfluss von Gräser- und Kräuterwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und Böschungen. Dissertation Technische Universität Berlin.
- Johannsen, R. u. Markart, G. (2007): Hydrologische Grundlagen der Ingenieurbio­logie. Mitteilungen der Gesellschaft für Ingenieurbio­logie 29
- Kompatscher P. Linee guida per la gestione sostenibile delle acque meteoriche. Agenzia provinciale per l'ambiente, ufficio tutela acque. Bolzano - 2008
- Köstler, J .N., E. Brückner, H. Bibelriether (1968): Die Wurzel der Waldbäume, Paul Parey. 284 S.
- Kruedener, A. v. (1951): Ingenieurbio­logie. Reinhardt Verlag München Basel.
- Kovalev, N. (2003): Bodenschutz durch Flurgehölz-systeme in der Russischen Föderation. Mensch & Buch Verlag Berlin.
- Krautzer, B., Peratoner G., Bozzo F. Specie erbacee idonee al sito. Produzione del seme ed utilizzo per l'inerbimento in ambiente montano. Provincia di Pordenone – 2004
- Kutschera, L., E. Lichtenegger (1997): Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen, Stapfia 49, OÖ Landesmuseum Linz.
- Kutschera, L., E. Lichtenegger (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher, Leopold Stocker, Graz.
- Lachat, B. 1994. Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales. Paris : ministère de l'Environnement, Diren Rhône-Alpes, 135 p.
- Levsen, P. (1961): Die Begrünung der Dünen. Ein Erfahrungsbericht. Angewandte Pflanzensoziologie Heft 17.
- LFU Landesamt für Umweltschutz Baden- Württemberg (laufend fortgeschrieben): Handbuch Wasser – Naturnahe Bauweisen im Wasserbau
- Lux, H. (1964): Die biologischen Grundlagen der Strandhaferpflanzung und Silbergrassaat im Dünenbau. Angewandte Pflanzensoziologie Heft 20.
- Manfredi A. La ricostruzione sostenibile. Il modello Versilia. Comunità Montana Alta Versilia –2002
- Markart G., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza und R. Stern (2004): Provisorische Geländeanleitung zur An­schätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden. Bundesministerium LFUW Wien.
- Massanés, R. Y Evers, A. (2000): Corredors blaus i verds- Manual de restauració de riberes fluvials. Fundació Terra, Barcelona.
- Menegazzi G., Palmeri F. Manuale di dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica – Regione Lazio 2007
- Ministero Dell'ambiente, Servizio Via Commissione Via Linee guide per capitolati speciali per interventi di IN e lavori di opere a verde. Prestampa AIPIN- TS – 1997
- Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti Strade e fauna selvatica: come migliorare la sicurezza Direzione generale della motorizzazione e della sicurezza del trasporto terrestre – 2002
- Ministère de l'équipement, des transports et du logement. 1999. Cahier des clauses techniques générales – Fascicule spécial n°35 – Aménagements paysagers, Aires de sports et de loisirs de plein air, avril 1999, Direction des journaux officiels, Paris, 375 p.
- Ministry of Transport, PublicWorks and Watter Management Habitat fragmentation and Infrastrukturen. Proceedings of the International Conference on Habitat fragmentation, Infrastructure and the role of ecological engineering, 17-21 September 1995, Maastricht and the Hague, the Netherlands 1997. Road and Hydraulic Engineering Division DWW. 1997
- Morgan, R. P. C. (1999): Bodenerosion und Bodenerhaltung. Enke Verlag Stuttgart.
- Oplatka, M. (1995): Beanspruchung von Weiden durch Strömung. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

- Palmieri, F. (2001): Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial. Gobierno Vasco, Departamento de Transportes y Obras Públicas, Vitoria.
- Palmeri F. Et Al. Manuale tecnico di IN della Provincia di Terni. Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni. PTCP Provincia di Terni – 2003
- Paolanti M., 2010, “Il trattamento dei suoli nei ripristini ambientali legati alle infrastrutture” In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume I, Manuali e Linee Guida n.65/2010, ISPRA
- Patt,H., Jürging, P. u. Kraus, W. 2004: Naturnaher Wasserbau. Springer Verlag
- Rauch, H.P. (2006): Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen am Beispiel einer ingenieurbioologischen Versuchsstrecke am Wienfluss. Dissertation Universität für Bodenkultur Wien Nr. 63.
- Regione Lombardia Deliberazione Giunta Regionale 29 febbraio 2000 - N. 6/48740 Approvazione direttiva "Quaderno opere tipo di IN. BUR della Lombardia 9 Maggio 2000 1° supplemento straordinario al n. 9 - 2000
- Regione Toscana Principi e Linee Guida per l'IN, Voll. 1 e 2, Collana Fiumi e Territorio – 2000 e 2001
- Rey, F. 2011. Génie biologique contre l'érosion torrentielle. Editions Quae. 100 p.
- Saiz de los Terreros, M. et all. (1991): Canalización y dragado de cauces: Sus efectos y técnicas para la restauración de ríos y riberas. Diputación Foral de Alava, Vitoria.
- Sauli G. Soil Biological Engineering Works in the Road Sector and their Applications in Different Climatic Conditions. The Environment In Road Location And Design. AIPCR Helsinki, 14-15 maggio 1998
- Sauli G. Utilisation du génie végétal pour la protection des berges en Italie. Séminaire transnational «au fil de l'eau» Berdes et rivières d'Europe Valence (F) 30/09 – 2/10 1998
- Sauli G. Casistica di interventi di IN: costi e risultanze. Atti del Convegno transnazionale "Efficacia e costi degli interventi di IN" EFIB - AIPIN Trieste 25-27 novembre 1999
- Sauli G. The transfer of soil bioengineering into new climatic, edaphic and floristic zones. Atti della Conferenza 1999 «Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization» IECA Manila 19-21 aprile 1999
- Sauli G. Linee Guida sugli interventi di mitigazione delle grosse infrastrutture soggette a procedura V.I.A. Commissione V.I.A. Ministero Ambiente – 2003
- Sauli G., “Interventi di rivegetazione e ingegneria naturalistica nel settore delle infrastrutture di trasporto elettrico” In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume III, , ISPRA Manuali e Linee Guida n.78.2/2012
- Sauli G., Cornelini P., Preti F. Manuale d'IN applicabile al settore idraulico. Regione Lazio - 2002
- Sauli G., Cornelini P., Preti F. Manuale 2 d'IN applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose. Regione Lazio - 2003
- Sauli G., Cornelini P., Preti F. Manuale 3 d'IN Sistemazione dei versanti. Regione Lazio - 2006
- Sauli G. et al. Problemi e tecniche negli studi di impatto ambientale delle Grandi Opere. Colombo – 2006
- Sauli G. et al., 2010, “Mitigazioni a verde con tecniche di rivegetazione e Ingegneria Naturalistica nel settore delle strade” In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume I, Manuali e Linee Guida n.65/2010, ISPRA
- Sauli G., Siben S. Tecniche di rinaturazione e di IN: esperienze europee. Patron – 1992
- Schaarschmidt, G. und Konecny, V. (1971): Der Einfluss von Bauweisen des Lebendverbau auf die Standsicherheit von Böschungen. Mitteilungen Institut für Verkehrswesen TH Aachen Heft 49
- Schiechtl, H. M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Grundlagen, lebende Baustoffe, Methoden. Callwey Verlag München.
- Schiechtl, H. M. (1980): Bioengineering for Land Reclamation and Conservation. University of Alberta Press, Alberta, Canada.
- Schiechtl H. M., Stern R. Bioingegneria forestale, basi, materiali da costruzione vivi, metodi. Castaldi – 1991
- Schiechtl H. M., Stern R. IN, manuale delle opere in terra. Castaldi – 1992
- Schiechtl, H. M. (1992): Weiden in der Praxis. Die Weiden Mitteleuropas , ihre Verwendung und Bestimmung. Patzer Verlag Berlin-Hannover.
- Schiechtl, H. M., Stern, R. (1992): Handbuch für naturnahen Erdbau. Eine Anleitung für ingenieurbioologische Bauweisen. Österreichischer Agrarverlag Wien.
- Schiechtl H. M., Stern R. IN – Manuale delle costruzioni idrauliche. ARCA – 1994
- Schiechtl, H. M., Stern, R. (2002): Handbuch für naturnahen Wasserbau. Eine Anleitung für ingenieurbioologische Bauweisen. 2.Auflage. Verlag Ernst und Sohn Berlin.
- Schlüter, U. (1990): Laubgehölze. Ingenieurbioologische Einsatzmöglichkeiten. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- Schlüter, U. (1996): Pflanze als Baustoff – Ingenieurbioologie in Praxis und Umwelt. 2.Auflage. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- Schmidt, G. y Otaola-Urrutxi, M. (2002): Aplicación de técnicas de bioingeniería en la restauración de ríos y riberas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX, Madrid.

Schröder, W., K. Römisch (2001): Gewässerregulierung Binnenverkehrswasserbau. Werner Verlag

Schuppener, B. (2003): Geotechnische Bemessung von Böschungssicherungen mit Pflanzen. 4. Österr. Geotechniktagung Tagungsbeiträge Wien S. 55-70

Skirde, W. (1978): Vegetationstechnik, Rasen und Begrünungen. In: Schriftenreihe Landschafts- u. Sportplatzbau Heft 1. Patzer Verlag.

SNEEP – UNEP. 2008. Erosion, végétalisation, environnement - Agissons ensemble pour les générations futures ! Edition UNEP, Paris, 88 p.

Stowasser, A. (2011): Potentiale und Optimierungsmöglichkeiten bei der Auswahl und Anwendung ingenieurbioologischer Bauweisen im Wasserbau. Institut für Umweltplanung, Leibnitz Universität Hannover, Schriftenreihe Umwelt und Raum, Bd. 5.

Tobias, S. (1991): Biotechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel. Dissertation ETH Zürich Nr. 9483

Wessolly, L. und Erb, M. (1998): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag Berlin.

Zeh H. et al. Ingenieurbioologische Uferverbauungen, Bauweisen und Beispiele im Kanton Bern. Baudirektion des Kantons Bern – 1988

Zeh, H. Ingenieurbioologische Bauweisen. Studienbericht Nr. 4. Eidenössisches Verkehrs und energiewirtschafts departement Bundesamt für Wasserwirtschaft – 1993

Zeh, H. Tecniche di IN. Rapporto di studio Nr. 4, 1993. Il Verde Editoriale - 1997

Zeh, H. (2007): Ingenieurbioologie. Handbuch Bautypen. vdf Hochschulverlag Zürich.

Normen und Richtlinien

- Eurocode 7 - DIN EN 1997 Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
- DIN 4084 Gelände- und Böschungsbruchberechnungen
- DIN 4124 Baugruben und Gräben, Böschungen, Arbeitsraumbreiten u. Verbau
- DIN 18196 Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- DIN 18300 Erdarbeiten
- DIN 18310 Sicherungsarbeiten an Gewässern, Deichen und Küstendünen
- DIN 18320 Landschaftsbauarbeiten
- DIN 18918 Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Ingenieurbioologische Sicherungsbauweisen
- DIN 18920 Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen
- DIN 19657 Sicherungen von Gewässern, Deichen und Küstendünen
- DIN 19660 Landschaftspflege bei Maßnahmen der Bodenkultur und des Wasserbaus
- DIN 19661 Wasserbauwerke Teil 2 – Sohlsicherungen
DIN 19663 Wildbachverbauung
- DIN 19712 Flussdeiche
- DIN 38 410 Biologisch-ökologische Gewässeruntersg.

RAS-LP 2 (1993): Richtlinie zur Anlage von Straßen: Teil Landschaftsgestaltung . Abschnitt 2: Grünflächen, Planung, Ausführung, Pflege, Lebendverbau. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen - FGSV.

RAS-LG 3 (1983): Richtlinie zur Anlage von Straßen: Teil Landschaftsgestaltung . Abschnitt 3: Lebendverbau. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen FGSV.

RAS –EW (2005): Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen g. FGSV.

Merkblatt über Baumstandorte und Ver- und Entsorgungsanlagen FGSV, ATV 1989.

Merkblatt über einfache landschaftsgerechte Sicherungsbauweisen. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen FGSV 1991

Normativa italiana

L. 25 luglio 1904 n°523 “Testo unico sulle opere idrauliche”

D.M.20 agosto 1912 “Approvazione delle norme per la preparazione dei progetti di lavori di sistemazione idraulico-forestale nei bacini montani”

L. 18 maggio 1989 n°183 “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”

L. 2 maggio 1990 n° 102 “Disposizioni per la ricostruzione e la rinascita della Valtellina.”

DPCM 23 marzo 1990 “Atto di indirizzo e coordinamento ai fini della elaborazione e della adozione degli schemi previsionali e programmatici di cui all'art. 31 della legge 18 maggio 1989, n. 183, recante norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo” (G.U. n. 79 del 04.04.1990)

DPR 14 aprile 1993 “Atto di indirizzo e coordinamento alle regioni recante criteri e modalità per la redazione dei programmi di manutenzione idraulica e forestale”
L. 8 ottobre 1997 n° 344 “Disposizioni per lo sviluppo e la qualificazione degli interventi e dell'occupazione in campo ambientale”

L. 2 ottobre 1997 n° 345 “Finanziamenti per opere e interventi di viabilità, infrastrutture, di difesa del suolo, nonché per la salvaguardia di Venezia”

L. 3 agosto 1998 n°267 (conversione con mod. del D.L. 11/06/1998 n°180) “Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella Regione Campania”

Testo coordinato D.L. 11 febbraio 1994 n° 109 “Legge quadro coordinata con le modifiche introdotte dal Ddl A.S. 2288 in materia di lavori pubblici. (Merloni Ter 1998)

D.M. 4 febbraio 1999 “Attuazione dei programmi urgenti per la riduzione del rischio idrogeologico, di cui gli articoli 1, comma 2, e 8, comma 2, del D.L. n°180, convertito, con modificazioni, dalla legge 3 agosto 1998, n°267”

...Sezione 5 - Intervento proposto (corrispondente all'allegato 5).
Descrizione dell'intervento. Si deve indicare la tipologia degli interventi previsti, l'estensione (lunghezza degli argini, superficie del versante da sistemare, volume dell'invaso e dimensione dello sbarramento, ecc.), i materiali utilizzati; l'eventuale ricorso a tecniche **d'ingegneria naturalistica**.

D.P.R. 2 settembre 1999 n° 348 "Regolamento recante norme tecniche concernenti gli studi di impatto ambientale per alcune categorie di opere"

... 4. Impianti per la produzione dell'energia idroelettrica con potenza di concessione superiore a 30 MW incluse le dighe ed invasi direttamente asserviti.

C) Dighe ed invasi direttamente asserviti: ...

- misure di migliore inserimento nel paesaggio e nell'ecosistema, attraverso l'uso preferenziale di ecosistemi-filtro e di tecniche di **ingegneria naturalistica**

D. Lgs. 11 maggio 1999, n° 152 "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della Direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane"

articolo 1, lettera d; articolo 3, comma 6; articolo 41, comma 1; Allegato 1

D.P.R. 21 dicembre 1999, n°554 "Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici 11 febbraio 1994, n°109, e successive modificazioni"

...TITOLO I Organizzazione dei lavori pubblici
Capo I - Potestà regolamentare

2. Definizioni.

1. Ai fini del presente regolamento si intende per:

...

f) opere o lavori di presidio e difesa ambientale e di **ingegneria naturalistica**: quelli, puntuali o a rete, destinati al risanamento o alla salvaguardia dell'ambiente e del paesaggio;

...

Capo II - La progettazione Sezione prima:
Disposizioni generali

5. Il documento preliminare, con approfondimenti tecnici e amministrativi graduati in rapporto all'entità, alla tipologia e categoria dell'intervento da realizzare, riporta fra l'altro l'indicazione:

a) della situazione iniziale e della possibilità di far ricorso alle tecniche di **ingegneria naturalistica**;

D.P.R. 25 gennaio 2000, n°34 Regolamento recante istituzione del sistema di qualificazione per gli esecutori di lavori pubblici, ai sensi dell'articolo 8 della legge 11 febbraio 1994, n. 109, e successive modificazioni.

OG 13: OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA(42)

D.M. 4 ottobre 2000, n°175 Rideterminazione e aggiornamento dei settori scientifico-disciplinari e definizione delle relative declaratorie, ai sensi dell'art. 2 del decreto ministeriale 23 dicembre 1999

Allegato. Declaratorie dei settori

AGR/08 IDRAULICA AGRARIA E SISTEMAZIONI IDRAULICO-FORESTALI

Il settore raggruppa i temi di ricerca riguardanti l'idrologia del suolo e dei piccoli bacini e i processi di erosione, e integra i risultati con le conoscenze necessarie per la progettazione di opere di sistemazione idraulico forestale e di captazione, trasporto e tutela dell'acqua per uso agricolo, la definizione e messa a punto di criteri per la gestione delle risorse idriche territoriali. Le competenze formative riguardano l'idraulica agraria e forestale, l'idrologia e difesa del suolo, le tecniche di **ingegneria naturalistica** e le sistemazioni idraulico-forestali, la tutela ambientale e la gestione integrata dei piccoli bacini, le risorse idriche nei sistemi agroforestali, l'approvvigionamento e smaltimento delle acque, gli impianti idrici per l'azienda agraria e le industrie agroindustriali, l'irrigazione e il drenaggio

L. 23 marzo 2001, n°93 "Disposizioni in campo ambientale"

L. 1 agosto 2002, n° 166 "disposizioni in materia di infrastrutture e trasporti"

...Art. 7. (Modifiche alla legge 11 febbraio 1994, n. 109. Ulteriori disposizioni concernenti gli appalti e il Consiglio superiore dei lavori pubblici)

1. Nelle more della revisione della legge quadro sui lavori pubblici, anche allo scopo di adeguare la stessa alle modifiche al titolo V della parte seconda della Costituzione, alla legge 11 febbraio 1994, n. 109, e successive modificazioni, sono apportate le seguenti modificazioni:

a) l'articolo 2 e' sostituito dal seguente: "Art. 2. - (Ambito oggettivo e soggettivo di applicazione della

legge). - 1. Ai sensi e per gli effetti della presente legge e del regolamento di cui all'articolo 3, comma 2, si intendono per lavori pubblici, se affidati dai soggetti di cui al comma 2 del presente articolo, le attività di costruzione, demolizione, recupero, ristrutturazione, restauro e manutenzione di opere ed impianti, anche di presidio e difesa ambientale e di **ingegneria naturalistica**. Nei contratti misti di lavori, forniture e servizi e nei contratti di forniture o di servizi quando comprendano lavori accessori, si applicano le norme della presente legge qualora i lavori assumano rilievo economico superiore al 50 per cento.

D.M. 3 settembre 2002, Linee guida per la gestione dei siti Natura 2000

Ordinanza P.C.M. dd 20 marzo 2003, n°3274 primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica

Testo unico in materia ambientale D.Lgs. 03 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale", pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 14 aprile 2006, n. 88, S.O.

Authors and collaborators of the Guidelines proposal
Autoren und Mitarbeiter/innen des Richtlinienentwurfs
Autores y colaboradores en la elaboración de las directrices
Autores e colaboradores do projecto de Directrizes
Auteurs et collaborateurs ayant participé au projet des Directives

Stephan Bloemer, Düsseldorf
João Paulo Fernandes, Évora
Florin Florineth, Wien
Peter Geitz, Stuttgart
Christoph Gerstgraser, Cottbus
Frank Graf, Birmensdorf
Eva Hacker, Aachen/Hannover
Rolf Johannsen, Erfurt
Nicole Kovalev, Berlin
Gerhard Markart, Innsbruck
Marco Molon, Bozen
Hans-Peter Rauch, Wien
Fabio Palmeri, Bozen
Alexander Prokop, Wien
Paola Sangalli, San Sebastian
Guliano Sauli, Triest
Andreas Stowasser, Dresden
Rolf Studer, Fribourg
Astrid Subatzus, Dörrwalde
Thomas Weibel, Wädenswil
Karl-Josef Witt, Weimar

Translation in English:

Rosemarie Stangl, Wien
João Paulo Fernandes, Évora

Traducción castellano:

Pilar Barraqueta
Çinta Caltes
Paola Sangalli
Albert Sorolla
Guillermo Tardío

Tradução portuguesa:

João Paulo Fernandes, Évora

Traduction en français :

Rolf T. Studer, Fribourg

Relecture du français :

Klaus Peklo, Parisot
Freddy Rey, Grenoble

Traduzione italiana a cura di:

AIPIN – M. Molon, F. Oggionni., F. Palmeri, G. Sauli

Responsible for the Publication

Prof. Dr. Eva Hacker

President of the German Association for Soil Bioengineering (GfI) and of the European Federation for Soil Bioengineering (EFIB)

Verantwortlich für die Veröffentlichung

Prof. Dr. Eva Hacker

Vorsitzende der Gesellschaft für Ingenieurbio­logie e.V. und Präsidentin der Europäischen Föderation für Ingenieurbio­logie (EFIB) - Gesellschaft für Ingenieurbio­logie in Deutschland e. V. , Eynattener Strasse 24 F , D - 52064 Aachen

Responsable por la publicación

Prof. Dr. Eva Hacker

Presidenta de la Asociación Alemana de Bioingeniería (GfI) y de la Federación Europea de Ingeniería del Paisaje (EFIB)

Responsável pela publicação

Prof. Dr. Eva Hacker

Presidente da Associação Alemã de Engenharia Natural (GfI) e Federação Europeia de Engenharia Natural (EFIB)

Responsible pour la publication

Prof. Dr. Eva Hacker

Présidente de la société pour le génie biologique allemande et Présidente de la Fédération Européenne de Génie Biologique (FEGB)

AEIP Asociación Española de Ingeniería del Paisaje

Secretaría nacional A.E.I.P.

Montesol 24, Apartado de correos 5064, E – 20080 San Sebastian

www.aeip.org.es

AGéBio Association Française Pour Le Génie Biologique Ou Génie Végétal

Cemagref de Grenoble,

2 rue de la Papeterie, BP 76,

38402 St Martin d'Hères cedex

www.agebio.org

AIPIN Associazione Italiana per la Ingegneria naturalistica

Via Del Monte 2

34121 Trieste

www.aipin.it

APENA Associação Portuguesa de Engenharia Natural

A/C: CEABN, Instituto Superior de Agronomia (ISA), Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa

www.apena.pt

Gesellschaft für Ingenieurbio­logie in Deutschland e. V.

Eynattener Strasse 24 F

D - 52064 Aachen

www.ingenieurbio­logie.com

ÖWAV Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Arbeitsgruppe Ingenieurbio­logie

Mark- Aurel-Strasse 5

A-1100 Wien

www.oewav.at

Verein für Ingenieurbio­logie

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Life Sciences und Facility Management

IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Schönenbergstrasse 72, Postfach

CH 8820 Wädenswil

www.ingenieurbio­logie.ch

Appendix
Anhang
Apêndice
Apêndice
Appendice
Appendice

Decision matrixes for Bioengineering interventions in lakes and water courses
Entscheidungsmatrix für ingenieurbioologische Maßnahmen an Gewässern
Matrices de decisión para intervenciones de Bioingeniería en Medios hídricos
Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural em Meios hídricos

Matrices de decision Mesures du génie biologique au bord des cours d'eau

Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica sui corsi d'acqua

Decision matrixes for Bioengineering interventions in slopes and earthworks
Entscheidungsmatrix für ingenieurbioologische Maßnahmen zur Hang- und Böschungssicherung

Decision matrixes for Bioengineering interventions in gullies
Entscheidungsmatrix für ingenieurbioologische Maßnahmen zur Runsen- und Grabensicherung

Matrices de decisión para intervenciones en pendientes y laderas
Matrices de decisión para intervenciones en regatos y cárcavas

Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural na estabilização de taludes e encostas
Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural na recuperação de ravinas de erosão

Matrices de décision - Mesures du génie biologique visant à la consolidation des pentes et des talus
Matrices de décision - Mesures du génie biologique visant à la récupération des ravins d'erosion

Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica su pendio e versante

Decision matrixes for Bioengineering interventions in lakes and water courses
Entscheidungsmatrix für ingenieurbioologische Maßnahmen an Gewässern
Matrices de decisión para intervenciones de Bioingeniería en Medios hídricos
Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural em Meios hídricos

Classification, Einteilung, Clasificación, Classificação	Construction technique, Bautyp, Técnica constructiva, Técnica construtiva	Function and efficiency, Funktion und Wirksamkeit, Función y eficacia, Função e eficácia						Velocity, Fließgeschwindigkeit, Velocidad de la corriente, Velocidade da corrente			Shear stress, Belastbarkeit, Capacidad de resistencia, Resistência à tensão de arraste τ			
		Structural measures, Strukturierungsmaßnahmen, Medidas estructurales	Safety measures, Sicherungsmaßnahmen, Medidas de seguridad	Superficial construction types, Flächige Bauweise, Técnicas constructivas superficiales, Técnicas construtivas superficiais	Linear construction types, Lineare Bauweise, Técnicas constructivas lineales, Técnicas construtivas lineares	Punctual construction types, Punktuelle Bauweise, Técnicas constructivas puntuales, Técnicas construtivas pontuais		0 – 1 m/s	1 – 3 m/s	> 3 m/s	< 100 N/m ²	100 – 200 N/m ²	> 200 N/m ²	
Linear constructions, Längsbauwerke, Construcciones lineales, Construções lineares	Grass lawn, Rasen,		X	X				X				X		
	Grass sods, Grassoden	X	X	X				X	X	X		X	X	X
	Wattle fence, Flechtzaun, Trenzado de mimbre, Entrançados		X		X			X	X	X		X	X	
	Fascine, Faschine, Fajinas, Fascinas		X		X			X	X	X		X	X	X
	Brush mattress, Spreitlage, Estera de ramajes, Esteira de ramos		X	X				X	X	X		X	X	X
	Live pilot wall on the bank slope, Rangenverbau glatt Piloten uferseitig, Lechos de ramaje de consolidación de taludes de ribera, Degraus vivos de consolidação de taludes da margem ¹		X		X			X	X	X		X	X	X
	Live pilot wall on the slope toe, Rangenverbau glatt Piloten böschungseitig, Lechos de ramaje de consolidación de base de margen, Degraus vivos de consolidação da base da margem ¹		X		X			X	X			X	X	
	Fascine wall, Faschinenwand, Pared de fajinas, Parede de Fascinas		X		X			X	X	X		X	X	X
	Bank pile wall, Uferpfahlwand, Entramado simple, Fascinas sobre faixas de vegetação		X	X	X			X	X			X	X	
	Vegetated Cribwall, Uferkrienerwand, Entramado vivo, Muro de soporte de madeira "Cribwall" com vegetação		X	X	X			X	X			X	X	
	Gabion, Drahtsteinwalze, Gavión, Gabião ¹		X		X			X				X		
	Double row palisade, Verlandungszaun, Red de sedimentación, Rede de sedimentação ¹		X		X			X	X			X	X	
	Groin, Lahnung, Empalizada filtrante de margen, Paliçada filtrante de margem ^{1, 3}		X		X	X		X				X		
	Branch packing, Astpackung, Hatillo de ramas, Feixes de ramos ¹		X	X				X				X		
	Log brush barrier, Gitterbuschbau, Trenzado de ramas muertas, Entrançado de ramos mortos ¹		X	X				X				X		
	Fascines with brush layers, Weidenfaschine auf Buschlage, Fajinas de sauce en margen, Fascinas no talude da margem				X			X	X			X	X	
	Soft geotextile gabion with brush layers, Geotextilpackung auf Buschlage, Geotextil cubriendo la margen, Geotextil cobrindo a margem em talude		X	X	X			X	X			X	X	
	Geotextile with live cuttings, Geotextil mit Steckhölzern, Geotextil con estacas vivas, Geotextil com esteira de ramagens viva	X	X	X				X	X			X	X	
	Tree spur, Raubäume, Árboles agrupados, Árvores para protecção de margens ¹	X	X			X		X				X		
	Root stock, Wurzelstöcke, Rizomas, Tocos enraizados	X				X		X	X			X		
	Cuttings between loose rockfil, Steckhölzer zwischen Steinblöcken, Estacas de sauce en escollera, Estacas de salgueiro em enrocamento	X	X			X		X	X	X		X	X	X
	Cuttings on the bank slope, Steckhölzer in der Uferböschung, Planta leñosa enraizada, Estacas de salgueiro em no talude da margem	X	X			X		X				X		
	Bare root planting, bewurzelte Laubgehölze, Planta leñosa enraizada, Plantas lenhosas enraizadas	X	X			X		X				X		
	Live groins, Lebende Bühnen, Estacas vivas, Esporões vivos	X	X			X		X	X	X		X	X	X
	Living siltation construction, Buschbautraverse, Redes de ramas vivas, Esporão de ramos vivos	X	X			X		X	X			X	X	
	Living brushes and combs, Lebende Bürsten und Käämme, Cepillos y peines vivos, Pentês e escovas vivos	X	X			X		X	X			X		

1 Without scientific demonstration (empiric values and indirect literature references)	1 Sin demostración científica experimental (basado en la experiencia o en referencias bibliográficas indirectas)
2 Construction destroyed or damaged	2 Técnica constructiva destruida o dañada
3 On lakes	3 En lagos
1 Keine wissenschaftlichen Ergebnisse (Erfahrungswerte und Verweis auf Sekundärliteratur)	1 sem demonstração científica experimental (baseado na experiência ou em referências bibliográficas indirectas)
2 Bauweisen zerstört bzw. geschädigt	2 técnica construtiva destruída ou danificada
3 An Seen	3 em lagos

Matrices de decision Mesures du génie biologique au bord des cours d'eau

Classement		Méthode de construction	Fonction et efficacité					Vitesse d'écoulement			Capacité de charge		
Ordre			Mesures de structuration	Mesures de protection	Construction à plat	Construction linéaire	Construction ponctuelle	0-1 m/s	1-3 m/s	>3 m/s	<100 N/m ²	100 - 200 N/m ²	
		Ouvrage longitudinal	Construction lisse	Tressage		x		x		x	x	x	x
Rangée de fascines				x		x		x	x	x	x	x	
Tapis de branches à rejet				x	x			x	x	x	x	x	
Clôture ¹ lisse (Pilots côté talus)				x		x		x	x	x	x	x	
Clôture ¹ rugueuse (Pilots côté eau)				x		x		x	x		x	x	
Paroi de fascines				x		x		x	x	x	x	x	
Paroi de pieux en bord de rives ¹				x	x	x		x	x	x	x	x	
Caisson en bois végétalisé ¹				x	x	x		x	x	x	x	x	
Gabion métallique en rouleau ¹				x		x		x			x		
Clôture d'atterrissement ¹				x		x		x	x		x	x	
Construction rugueuse	Palissade filtrante ^{1,3}			x		x		x			x		
	Ouvrage en paquet ¹			x	x			x			x		
	Treillis de branches ¹			x	x			x			x		
	Fascines sur lits de plançons				x			x	x ²		x	x ²	
	Rouleaux en géotextile sur lits de plançons			x	x			x	x ²		x	x ²	
	Arbres en épi ¹		x	x			x	x			x		
	Rangée de souches		x				x	x	x ²		x ²		
	Boutures de saule (entre blocs de pierre)		x	x			x	x	x	x	x	x	
	Boutures de saule (sur talus de terre)		x	x			x	x			x		
	Plants de feuillus enracinés		x	x			x	x			x		

Classement		Méthode de construction	Fonction et efficacité					Vitesse d'écoulement			Capacité de charge		
Ordre			Mesures de structuration	Mesures de protection	Construction à plat	Construction linéaire	Construction ponctuelle	0-2 m/s	1-4 m/s	>3 m/s	<100 N/m ²	100 - 200 N/m ²	
Ouvrage transversal	Construction rugueuse	Epi végétalisé ¹	X	X			X	X	X	X	X		
		Traverse buissonnante ¹	X	X			X	X		X	X		
		Brosses ¹ et peignes vivants	X	X			X	X		X			
¹ Pas de résultats scientifiques (valeur empirique ou renvoi sur littérature secondaire) ² Ouvrage détruit, respectivement endommagé ³ En bordure des lacs													

Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica sui corsi d'acqua

suddivisioni		tecniche	funzioni e efficacia					velocità di scorrimento			resistenza	
disposizione			misure strutturali	misure di sicurezza	tecniche areali	tecniche lineari	tecniche puntuali	0-1 m/s	1-3 m/s		<100 N/mq	100-200 N/mq
		scabro	Liscio	siepi perimetrali		X		X		X	X	
fascinata				X		X		X	X		X	X
copertura diffusa				X	X			X	X		X	X
Rangen verbau glatt ¹				X		X		X	X		X	X
Rangenverbau rau ¹				X		X		X	X		X	X
fascinata				X		X		X	X		X	X
palificata ¹				X	X	X		X	X		X	X
palificata ¹				X	X	X		X	X		X	X
gabbionata ¹				X		X		X			X	
Ripasicmanto di siepi ¹				X		X		X	X		X	X
Repellente vivo ¹³			X		X		X			X		
Ramaglia ¹			X	X			X			X		
Graticciata con ramaglia ¹			X	X			X			X		
Fascina sdi salice su gradonata (ribalta viva)					X		X	X ²		X	X ²	
Gradonata con uso di geostuoia			X	X			X	X ²		X	X ²	
Pianta intera ¹	X		X			X	X			X		
Ceppaie	X					X	X	X ²		X ²		
Talee di salice (tra le pietre)	X		X			X	X	X		X	X	
Talee di salice nella gradonata viva	X		X			X	X			X		
Piantine radicate	X		X			X	X			X		
Repellenti vivi ¹	X	X			X	X	X		X	X		
Traverse vive ¹	X	X			X	X	X		X	X		
Pettini vivi ¹	X	X			X	X	X		X			

¹non ci sono risultati scientifici (valori di esperienze o riferimenti di letteratura)

² opere danneggiate

³ su laghi

Decision matrixes for Bioengineering interventions in slopes and earthworks

Entscheidungsmatrix für ingenieurbioologische Maßnahmen zur Hang- und Böschungssicherung

Application, Anwendung		Construction type, Bautypen									
		Protection against superficial erosion, Oberflächenschutzfunktion,	Stabilization to a depth, Bewehrungsfunktion, < 0.2 m	Stabilization to a depth, Bewehrungsfunktion, > 0.2 m	Biological drainage function, Biol. Entwässerungsfunktion,	Technical drainage function, Techn. Entwässerungsfunktion,	Beginning of the effectiveness, Beginn der Wirksamkeit,	Duration of the effectiveness, Dauer der Wirksamkeit,	Spatial effectiveness, Räumlicher Wirksamkeit,	Cost, Kosten,	
Sowing and revegetation methods, Ansaat- und Begrünungsmethoden	Dry sowing, Trockensaat	3	1		1		2	2	3	1	
	Hydroseeding, Nasssaat	3	1		1		2	2	3	1	
	Mulch seeding, Mulchsaat	3	1		1		1	2	3	2	
	Seeding mat, Saatmatten, Rohfaserplatten	3	1		1		2	2	3	3	
	Sods, sod rolls, Rasenziegel, Vegetationsstücke	3	1		1		1	2	3	2	
	Topsoil application, Oberbodenauftrag	2	1		1		3	2	3	2	
	Pit planting, Lochpflanzung,	2	1		1		2	3	1	2	
	Angle planting, Winkel- und Klemmpflanzung	2	1		1		2	3	1	2	
	Berm planting, Bermpflanzung	2	1		1		2	3	1	2	
	Contour planting, Cordoinpflanzung	2	1		1		2	3	2	2	
Row planting Riefenpflanzung	2	1		1		2	3	2	2		
Slope drainage, Hangentwässerung	Branch drainage, Astdrainage	1	2			3	1	1	2	1	
	Drainage fascines, Drainfaschinen	1	2		3	2	2	3	2	1	
	Seepage ditch, Sickergräben	1	2			3	1	3	2	2	
	Open drains, Drainkanäle	1	2			3	1	3	2	3	
	Slope fascines, Hangfaschine	2	3		2		2	3	2	1	
Slope stabilization, Böschungssicherung	< 20 cm										
	Vegetated pile wall, Bepflanzte Piloten	3	3		1		1	3	2	2	
	Live slope grid, Lebender Hangrost	3	3		1		1	3	3	3	
	20 – 200 cm										
	Vegetated Cribwall, Bepflanzte Holzkrienerwand	3		3	2		1	3	2	3	
	Vegetated concrete Cribwall, Bepflanzte Betonkrienerwand	3		3	2		1	3	2	3	
	Vegetated rock paving, Bepflanzte Blocksteinmauer	3		3	2		1	3	2	3	
Vegetated gabions, Bepflanzte Steinkörbe /Gabionen	3		3	2		1	3	2	3		
Vegetated reinforced earth, Lebend bewehrte Erde	3		3	2		1	3	2	3		
Brush layer, Lagenbau	3		3	2		2	3	2	2		

Decision matrixes for Bioengineering interventions in gullies Entscheidungsmatrix für ingenieurbioologische Maßnahmen zur Runsen- und Grabensicherung

Application	Construction type	Protection against superficial erosion	Protection against deep erosion	Biological drainage function	Technical drainage function	Beginning of the effectiveness	Duration of the effectiveness	Spatial effectiveness	Cost
Longitudinal constructions	Tree spur, Raubäume	1	2			1	2	2	1
	Branch layering of gullies, Runsenausbuschung	1	2	2		2	2	2	1
	Vegetated rough bed channel, Begrünte Rauhbettrinne	1	2	1	3	1	3	2	2
	Vegetated stone drain, Bepflanzte Steinkünette	1	3	1	3	1	3	2	3
	Vegetated wooden chase, Bepflanzte Holzkünette	1	3	1	3	1	2	2	3
Transversal constructions	Live palisade, Lebende Palisadenwand	1	2	2		3	2	1	1
	Vegetated block ramps, Lebende Schwelle	1	2	2		3	2	1	1
	Vegetated wooden weir, Bepflanzte Holzsperrre	1	3	2		1	3	1	3
	Vegetated gabion weir, Bepflanzte Steinkorbssperre	1	3	2		1	3	1	3
	Vegetated rock weir, Bepflanzte Blocksteinsperre	1	3	2		1	3	1	3

Legend			
Degree of technical achievement	1 = small	2 = medium	3 = high
Beginning of the effectiveness	1 = immediately	2 = after several weeks	3 = after several months
Duration of the effectiveness	1 = short term (1 - 5 years)	2 = medium term (5 - 10 years)	3 = long term (more than 10 years)
Spatial effectiveness	1 = punctual	2 = linear	3 = area
Cost	1 = small	2 = medium	3 = high

Matrices de decisión para intervenciones en pendientes y laderas

Utilización		Tipologías constructivas	Protección erosión superficial	< Estabilización profundidad 0.2 m	> Estabilización profundidad 0.2 m	Función de mejora ecológica	Función de mejora técnica	Inicio de la eficacia	Duración de la eficacia	Eficacia espacial	Coste económico
Métodos de siembra y revegetación	Siembra a voleo	3	1		1		2	2	3	1	
	Hidrosiembra	3	1		1		2	2	3	1	
	Siembra con acolchado	3	1		1		1	2	3	2	
	Siembra con manta orgánica	3	1		1		2	2	3	3	
	Tepes, fragmentos vegetales	3	1		1		1	2	3	2	
	Mejora del suelo	2	1		1		3	2	3	2	
	Plantación en hoyo	2	1		1		2	3	1	2	
	Plantación en zanja ó con inclinación	2	1		1		2	3	1	2	
	Plantación en terraza	2	1		1		2	3	1	2	
	Plantación en cordón	2	1		1		2	3	2	2	
	Plantación en relieve	2	1		1		2	3	2	2	
Drenaje de laderas	Drenaje con hatillo de ramas	1	2			3	1	1	2	1	
	Fajinas de drenaje	1	2		3	2	2	3	2	1	
	Fosos de drenaje	1	2			3	1	3	2	2	
	Canaletas	1	2			3	1	3	2	3	
	Fajinas en laderas	2	3		2		2	3	2	1	
Estabilización talud/Profundidad	< 20 cm	Muro de pilotes plantado	3	3		1		1	3	2	2
		Enrejado vivo	3	3		1		1	3	3	3
	20 – 200 cm	Entramado de Madera vivo	3		3	2		1	3	2	3
		Entramado de hormigón vegetado	3		3	2		1	3	2	3
		Escollera revegetada	3		3	2		1	3	2	3
		Gavión revegetado.	3		3	2		1	3	2	3
		Muro verde	3		3	2		1	3	2	3
Construcción en tongadas	3		3	2		2	3	2	2		

Matrices de decisión para intervenciones en regatos y cárcavas

Utilización	Tipologías constructivas	Protección erosión superficial	Estabilización profundidad		Función de mejora ecológica	Función de mejora técnica	Inicio de la eficacia	Duración de la eficacia	Eficacia espacial
			< 0.2 m	> 0.2 m					
Construcciones longitudinales	Árboles enteros talados	1	2	-	-	1	2	2	1
	Consolidación arbustiva de cárcavas y regatos	1	2	2	-	2	2	2	1
	Canal de lecho rugoso vivo	1	2	1	3	1	3	2	1
	Cuneta de piedras plantada	1	3	1	3	1	3	2	3
	Cuneta verde	1	3	1	3	1	2	2	1
Construcciones transversales	Construcción de empalizadas	1	2	2	-	3	2	1	1
	Rampas vivas	1	2	2	-	3	2	1	1
	Umbral de troncos plantado	1	3	2	-	1	3	1	3
	Umbral de gaviones plantado	1	3	2	-	1	3	1	3
	Umbral de piedra plantado	1	3	2	-	1	3	1	3

Leyenda			
Grado de eficacia técnica	1 = bajo	2 = medio	3 = elevado
Inicio de la eficacia	1 = inmediato	2 = tras diversas semanas	3 = Tras diversos meses
Duración de la eficacia	1 = A corto plazo (1 - 5 años)	2 = Medio plazo (5 - 10 años)	3 = Largo Plazo (más de 10 años)
Efectividad espacia	1 = puntual	2 = lineal	3 = área
Coste	1 = bajo	2 = medio	3 = alto

Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural na estabilização de taludes e encostas

Utilização		Técnica construtiva									
		Protecção contra a erosão superficial	Estabilização de profundidade < 0.2 m	Estabilização de profundidade > 0.2 m	Função de drenagem biológica	Função de drenagem técnica	Início da eficácia	Duração da eficácia	Eficácia espacial	Custo económico	
Métodos de sementeira e de revegetação	Sementeira manual	3	1		1		2	2	3	1	
	Hidrosementeira	3	1		1		2	2	3	1	
	Sementeira com fenos ou mulch	3	1		1		1	2	3	2	
	Sementeira com manta orgânica	3	1		1		2	2	3	3	
	Tapetes de relva, torrões vegetados	3	1		1		1	2	3	2	
	Solo vegetal com sementes	2	1		1		3	2	3	2	
	Plantação ao covacho	2	1		1		2	3	1	2	
	Plantação em vala com declive	2	1		1		2	3	1	2	
	Plantação em terraços	2	1		1		2	3	1	2	
	Plantação em cordões	2	1		1		2	3	2	2	
Plantação em relevo	2	1		1		2	3	2	2		
Drenagem de encostas	Drenagem com feixes de ramos	1	2			3	1	1	2	1	
	Fascinas de drenagem	1	2		3	2	2	3	2	1	
	Fossos de drenagem	1	2			3	1	3	2	2	
	Canaletas	1	2			3	1	3	2	3	
	Fascinas em declive no talude	2	3		2		2	3	2	1	
Estabilização de encostas	< 20 cm	Degraus de troncos com vegetação	3	3		1		1	3	2	2
		Grade viva	3	3		1		1	3	3	3
	20 – 200 cm	Muro de madeira “Cribwall” com vegetação	3		3	2		1	3	2	3
		Muro de betão “Cribwall” com vegetação	3		3	2		1	3	2	3
		Enrocamento vegetado	3		3	2		1	3	2	3
		Gabião com vegetação lenhosa	3		3	2		1	3	2	3
		Muro armado de geotextil com faixas de vegetação	3		3	2		1	3	2	3
Faixas de vegetação em aterro	3		3	2		2	3	2	2		

Matriz de decisão para as técnicas de Engenharia Natural na recuperação de ravinas de erosão

Utilização	Técnica construtiva	Protecção contra a erosão superficial	Protecção contra erosão profunda	Função de drenagem biológica	Função de drenagem técnica	Início da eficácia	Duração da eficácia	Eficácia espacial	Custo económico
Construções longitudinais	Árvore inteira para protecção de ravina	1	2	-	-	1	2	2	1
	Consolidação de ravinas com ramagem viva	1	2	2	-	2	2	2	1
	Canal enrocado de leito rugoso vivo	1	2	1	3	1	3	2	1
	Canaleta de pedra plantada	1	3	1	3	1	3	2	3
	Canaleta de madeira plantada	1	3	1	3	1	2	2	1
Construções transversais	Muro vivo em paliçada	1	2	2	-	3	2	1	1
	Degrau vivo	1	2	2	-	3	2	1	1
	Açude vivo em madeira	1	3	2	-	1	3	1	3
	Açude vivo em gabião	1	3	2	-	1	3	1	3
	Açude vivo em pedra	1	3	2	-	1	3	1	3

Legenda			
Grau de preenchimento da função	1 = reduzido	2 = médio	3 = elevado
Início da eficácia	1 = imediatamente	2 = após algumas semanas	3 = após vários meses
Duração da eficácia	1 = curto prazo (1-5 anos)	2 = médio prazo (5-10 anos)	3 = longo prazo (mais de 10 anos)
Espacialidade da eficácia	1 = pontual	2 = linear	3 = em superfície
Custo	1 = reduzido	2 = médio	3 = elevado

Matrices de décision - Mesures du génie biologique visant à la consolidation des pentes et des talus

Application	Méthode de construction	Fonction de protection de la surface	Fonction d'armature <0,2m	Fonction d'armature <2,0m	Fonction de drainage biologique	Fonction de drainage technique	Début de l'effet	Durée de l'effet	Déploiement de l'effet	Coûts	
Méthodes d'ensemencement et de végétalisation	Ensemencement à sec	3	1	-	1	-	2	2	3	1	
	Semis hydraulique	3	1	-	1	-	2	2	3	1	
	Semis avec paillage	3	1	-	1	-	1	2	3	2	
	Nattes préensemencées, plaques de cellulose brute	3	1	-	1	-	2	2	3	3	
	Motte de gazon, pièces de végétation	3	1	-	1	-	1	2	3	2	
	Remblayage de la couche supérieure du sol	2	1	-	1	-	3	2	3	2	
	Plantation par trous	2	1	-	1	-	2	3	1	2	
	Plantation en coin ou en fente	2	1	-	1	-	2	3	1	2	
	Plantation en berme	2	1	-	1	-	2	3	1	2	
	Plantation en cordon	2	1	-	1	-	2	3	2	2	
	Plantation en strie	2	1	-	1	-	2	3	2	2	
Drainage de versant	Branches de drainage	1	2	-	-	3	1	1	2	1	
	Fascines de drainage	1	2	-	3	2	2	3	2	1	
	Puits d'infiltration	1	2	-	-	3	1	3	2	2	
	Canaux de drainage	1	2	-	-	3	1	3	2	3	
	Fascines en talus	2	3	-	2	-	2	3	2	1	
Consolidation de talus – couches de sol instables de... - à...	0.1 - 0.2 m	Paroi de pilotes végétalisée	2	3	-	1	-	1	3	2	2
		Armature végétalisée en bois	3	3	-	1	-	1	3	3	3
	0.30 - 2.00 m	Caisson en bois végétalisé	3	-	3	2	-	1	3	2	3
		Paroi végétalisée avec éléments en béton	3	-	3	2	-	1	3	2	3
		Pavement en blocs végétalisé	3	-	3	2	-	1	3	2	3
		Gabions végétalisés	3	-	3	2	-	1	3	2	3
		Terre armée	3	-	3	2	-	1	3	2	3
		Construction de lit de plants	3	-	3	2	-	2	3	2	2

Matrices de décision - Mesures du génie biologique visant à la récupération des ravins d'erosion

Ordre	Méthode de construction	Fonction de protection de la surface	Protection contre l'érosion en profondeur	Fonction de drainage biologique	Fonction de drainage technique	Début de l'effet	Durée de l'effet	Déploiement de l'effet	Coûts
Ouvrage transversal	Arbres en épi	1	2	-	-	1	2	2	1
	Embossaillement de ravins	1	2	2	-	2	2	2	1
	Canal à lit grossier végétalisé	1	2	1	3	1	3	2	2
	Cunettes en pierre végétalisée	1	3	1	3	1	3	2	3
	Cunettes en bois végétalisées	1	3	1	3	1	2	2	3
Ouvrage longitudinal	Palissade vivante	1	2	2	-	3	2	1	1
	Seuil végétalisé	1	2	2	-	3	2	1	1
	Seuil en bois végétalisé	1	3	2	-	1	3	1	3
	Seuil en gabions végétalisés	1	3	2	-	1	3	1	3
	Seuil en blocs végétalisés	1	3	2	-	1	3	1	3

Légendes			
Degré de réalisation de la fonction :	1 = faible	2 = moyen	3 = élevé
Début de l'effet :	1 = immédiat	2 = après plusieurs semaines	3 = après plusieurs mois
Durée de l'effet :	1 = court terme 1-5 ans	2 = moyen terme 5-10 ans	3 = long terme plus de 10 ans
Déploiement de l'effet :	1 = ponctuel	2 = linéaire	3 = à plat
Coûts :	1 = restreints	2 = modérés	3 = élevés

Matrice di scelta per le tecniche d'ingegneria naturalistica su pendio e versante

Impiego	tecniche	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	
		AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	
semina e metodi di rinverdimento	semina	3	1		1		2	2	3	1
	idrosemina	3	1		1		2	2	3	1
	idrosemina con spessore	3	1		1		1	2	3	2
	materassini preseminati	3	1		1		2	2	3	3
	zolle	3	1		1		1	2	3	2
	impianto superficiale??	2	1		1		3	2	3	2
	impianto a buche	2	1		1		2	3	1	2
	impianto su pendio	2	1		1		2	3	1	2
	impianto su terrapieno	2	1		1		2	3	1	2
	cordonata cordon pflanzung	2	1		1		2	3	2	2
impianto a file	2	1		1		2	3	2	2	
corsi d'acqua con pendenza	astoni di drenagigo	1	2			3	1	1	2	1
	fascine drenanti	1	2		3	2	2	3	2	1
	pozzi perdenti	1	2			3	1	3	2	2
	canali di drenaggio	1	2			3	1	3	2	3
	fascina su pendio	2	3		2		2	3	2	1
sicurezza dei versanti instabili . Strati di terreno da a	impianto su piloti ???	2	3		1		1	3	2	2
	: grata viva	3	3		1		1	3	3	3
	palificata viva di sostegno in legno	3		3	2		1	3	2	3
	palificata viva di sostegno in cemento	3		3	2		1	3	2	3
	muri a secco vegetati	3		3	2		1	3	2	3
	gabbioni rinverditi	3		3	2		1	3	2	3
	terra rinforzata	3		3	2		1	3	2	3
: costruzione di impianti	3		3	2		2	3	2	2	
opere longitudinali	alberi	1	2			1	1	2	2	1
	runsenausbuschung	1	2	2		2	2	2	2	1
	rete di sgrondo rinverdita	1	2	1	3	1	1	3	2	2
	cunetta in pietra rinverdita	1	3	1	3	1	1	3	2	3
	cunette in legno rinverdite	1	3	1	3	1	1	2	2	3
opere trasversali	Palizzata viva	1	2	2	3	3	3	2	1	1
	soglie vive	1	2	2		3	3	2	1	1
	sbarramenti in legno rinverditi	1	3	2		1	1	3	1	3
	sbarramenti in ghiaia	1	3	2		1	1	3	1	3
	sbarramenti in blocchi di pietra	1	3	2		1	1	3	1	3

Legenda			
gradi di funzionalità	1=basso	2=medio	3=alto
inizio dell'efficacia	1= subito	2=dopo alcune settimane	3=dopo molti mesi
durata dell'efficacia	1=breve periodo 1-5 anni	2=medio termine 5-10 anni	3=a lungo periodo più di 10 anni
efficacia spaziale	1=puntuale	2=lineare	3=areale
costi	1=bassi	2=medio	3=alto

