Einführung in die Ingenieurbiologie

Skriptum

Silvia Tobias
Eidg. Forschungsanstalt WSL

März 2003

Inhalt

KAP. I: Die Pflanze als Baustoff 3

Empfohlene Literatur 4

KAP. II: Grundlagen der Ökosystemlehre 5

II.1 Grundbegriffe 5

II.2 Bautechnisch nutzbare Eigenschaften der Pflanzen 6

II.3 Natürliche Ökosysteme als Vorbilder für die Ingenieurbiologie 7

KAP. III: Erdbauliche (bodenmechanische) Grundlagen 10

III.1 Das Festigkeitsverhalten des Bodens 10

III.2 Die Standsicherheit von Böschungen 10

III.3 Die festigende Wirkung der Pflanzen 13

III.4 Die Bedeutung der Pflanzenzusammensetzung für die Scherfestigkeit des Bodens 16

KAP. IV: Wasserbauliche Grundlagen 18

IV.1 Das Gewässer als Ökosystem 18

IV.2 Grundsätze für die naturnahe Gewässerregulierung 18

IV.3 Uferstabilisierung und Erosionsschutz 24

IV.4 Querwerke 25

IV.5 Bepflanzung von Dämmen 26

KAP. V: Ingenieurbiologische Bauweisen 28

Kap. VI: Bautechnische Details, Unterhalt, Kosten 29

VI.1 Allgemeine bautechnische Details 29

VI.2 Dauerhaftigkeit von Holz in Verbauungen 30

VI.3 Grundsätze für Unterhaltsarbeiten an Gewässern 31

Anhang: Zitierte und Weitergehende Literatur 35

Kap. I: Die Pflanze als Baustoff

Die Verwendung lebender Pflanzen als Baustoff gehört zu den ältesten Bauweisen des Erd- und Wasserbaus. Der Ausdruck „Ingenieurbiologie“ wurde von Von Krüdener 1951 eingeführt. Er bezeichnete damit eine Ingenieurtechnik unter Beachtung biologischer und ökologischer Zusammenhänge.

Zum ersten Mal wird die Verwendung von lebenden Pflanzen im Wasserbau 1591 nach Christus von Pan, dem Minister für Hochwasserschutz der chinesischen Ming-Dynastie schriftlich erwähnt. Seit dem 18. Jahrhundert liegen auch aus Mitteleuropa schriftliche Zeugnisse vor. In der Wirtschaftskrise der Dreissiger-Jahre wurden in Mitteleuropa ingenieurbiologische Techniken stark weiterentwickelt. Es boten sich billige Verfahren für den nötigen Schutzwasserbau und zudem eine gute Beschäftigungsmöglichkeit der vielen Arbeitslosen. Ab 1950 nahmen die Veröffentlichungen zu diesem Thema sowie die Anwendung ingenieurbiologischer Verfahren in Österreich, Deutschland und der Schweiz sprunghaft zu.

Aufgrund empirischer Erfahrungen haben sich ingenieurbiologische Bauweisen in verschiedenen Fachbereichen entwickelt:

- Wildbach- und Lawinenverbauung
- Wasserbau im Flachland und Gebirge
- Landgewinnung an Meeresküsten
- Dünenfixierung
- Landwirtschaft (Windschutzpflanzungen)
- Strassenbau

Je nach der Zielsetzung der Bauvorhaben und den standörtlichen Randbedingungen werden krautige Pflanzen oder Gehölze, lebende Pflanzen allein oder in Kombination mit toten Baustoffen eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil des durchwurzelten Bodens ist seine grosse Verformbarkeit. Daher bleiben ingenieurbiologische Bauwerke auch nach starken Deformationen belastbar. Im Unterschied zu den meisten Konstruktionen aus toten Baustoffen erhöhen Bauwerke mit lebenden Pflanzen ihre Widerstandskraft mit dem Bestandesalter, weil sich die Vegetation nach dem Einbau erst etablieren muss, bevor sie den technischen Anforderungen gerecht werden kann.

Die stabilisierende Wirkung der Vegetation ist das Resultat der Anpassung an ihren Standort. An Standorten, die von Erosion oder Massenbewegungen geprägt sind, können sich nur solche Pflanzen halten, die sich durch eine hohe Regenerationsfähigkeit und Anpassung an die mechanischen Belastungen auszeichnen. Doch auch die Vegetation solcher extremer Lebensräume gedeiht erst nach der Beruhigung der Bodenbewegungen, weil das ihre Lebensbedingungen erleichtert. Daher tragen Pflanzengesellschaften mechanisch stark belasteter Standorte in besonderem Mass zur Fixierung der bewegten Massen bei.

Lebende Pflanzen können ihrer bautechnischen Aufgabe nur gerecht werden, wenn ihre Ansprüche an den Standort und die Lebensgemeinschaft erfüllt sind. Das schränkt den Einsatz gewisser Arten auf spezielle Klimaräume ein. Dabei ist für jeden konkreten Fall das Kleinklima, bedingt durch Höhenlage und Exposition, entscheidend. Besonders wichtig ist auch, dass natürliche Konkurrenzverhältnisse herrschen. Durch das Überhandnehmen einzelner weniger Arten wird eine Lebensgemeinschaft sehr störungsanfällig, was auch den technischen Zielen ingenieurbiologischer Bauwerke nicht entspricht.

Empfohlene Literatur

Begemann, W., H. M. Schiechtl, 1994: Ingenieurbiologie. 2. Aufl. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin. 203 S.

Lange, G., K. Lecher, 1986: Gewässerregelung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fliessgewässern. Paul Parey, Hamburg und Berin. 288 S.

Morgan, R. P. C. und R. J. Rickson: Slope Stabilization and Erosion Control. A Bioengineering Approach. E & FN Spon, London, Glasgow, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras. 274 S.

Oplatka, M., Ch. Diez, Y. Leuzinger, F. Palmeri, L. Dibona, P.-A. Frossard, 1996: Dictionary of Soil Bioengineering. Wörterbuch Ingenieurbiologie. Hochschulverlag ETH Zürich, Zürich u. Teubner, Stuttgart. 249 S.

Schiechtl, H. M., 1973: Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Callwey, München. 244 S.

Schiechtl, H. M., R. Stern, 1992: Handbuch für naturnahen Erdbau. Österr. Agrarverlag, Wien. 153 S.

Schlüter, U., 1986: Pflanze als Baustoff. Ingenieurbiologie in Praxis und Umwelt. Patzer, Berlin. 328 S.

Schlüter, U., 1990: Laubgehölze. Eigenschaften, standörtliche und bautechnische Verwendbarkeit von Laubgehölzen. Patzer, Berlin u. Hannover. 164 S.

Tobias, S., 1991: Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel. Diss. 9483 Eidg. Techn. Hochsch. Zürich: 135 S.

Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), 1993: Handbuch Wasserbau. Naturgemässe Bauweisen. Ufer- und Böschungssicherungen. Heft 5. 101 S.

Verein für Ingenieurbiologie (Hrsg.) seit 1991: Mitteilungsblätter

Von Krüdener, A., 1951: Ingenieurbiologie. Reinhardt, München. 172 S.

Zeh, H., H. Roth, R. Mosimann, 1988: Ingenieurbiologische Uferverbauungen. Bauweisen und Beispiele im Kanton Bern. Baudir. des Kantons Bern, Tiefbauamt (Hrsg.). 48 S.

Zeh, H., 1993: Ingenieurbiologische Bauweisen. Eidg. Verkehrs- u. Energiewirtschaftsdep., Bundesamt f. Wasserwirtschaft, Studienbericht 4. 60 S.

Kap. II: Grundlagen der Ökosystemlehre für die Ingenieurbiologie

II.1 Grundbegriffe

Ein **Ökosystem** wird als **Lebensgemeinschaft verschiedener Organismenarten** bezeichnet. Die Zusammensetzung der Artengemeinschaften hängt von verschiedenen unbelebten und belebten Faktoren ab. Die unbelebten Faktoren bilden die Standortfaktoren wie das Sonnenlicht als Energiequelle, das Wasser, die Nährstoffe und der Boden als Behausung. Ebenso wichtig wie die Standortfaktoren ist aber auch die Konkurrenz unter den einzelnen Arten (belebter Faktor). Unter Konkurrenz ist der Wettbewerb um die physiologischen Lebensbedingungen zu verstehen. Es können nur Artengemeinschaften zusammenleben, die sich nicht konkurrieren, d. h. die sich in ihren physiologischen Ansprüchen ergänzen.

Hieraus ergeben sich zwei wesentliche Gruppen von Arten: **Euryöke** und **stenöke Arten**. Euryöke Arten sind physiologisch anspruchslos, d. h. sie können an fast allen Standorten vorkommen. Man nennt sie auch Generalisten. Allerdings sind sie in der Regel sehr konkurrenzschwach, insbesondere im Kampf um das Licht. Diese Arten sind für die ingenieurbiologische Verwendung in der Regel gut geeignet. Demgegenüber stehen stenöke Arten, die hohe spezifische Ansprüche an ihren Standort stellen (Spezialisten). Sind ihre Standortanforderungen einmal erfüllt, wachsen sie oft viel schneller als euryöke Arten, womit sie diesen im Konkurrenzkampf überlegen sind. Diese Arten können weniger gut in ingenieurbiologischen Bauwerken verwendet werden, können aber als Zeigerpflanzen dennoch von hoher Bedeutung sein.

Ökosysteme sind natürlicherweise dynamisch und entwickeln sich ständig weiter. Man unterscheidet verschiedene Stadien der Ökosystementwicklung, die sich in der Regel aufgrund der Bodenentwicklung und der Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften charakterisieren lassen:

- **Pionierökosysteme** weisen oft Rohböden und Pionierpflanzen auf
- **Übergangsökosysteme** kennzeichnen sich durch Sukzessionsgesellschaften
- **Klimaxökosysteme** haben in der Regel tiefgründig entwickelte Böden und Klimaxgesellschaften

Man unterscheidet zwei Arten von **Rückkoppelung**:

- **Positive** Rückkopplung bedeutet Aufschaukelung des Systems, die zu starken Veränderungen führt (Zerstörung, Rückzug oder aber Sukzession, d. h. Weiterentwicklung). Pionier- und Übergangsökosysteme zeichnen sich in der Regel durch die positive Rückkopplung aus.
- **Negative** Rückkopplung, auch Fliessgleichgewicht gennant, bedeutet das Abpuffern von Störungen infolge einer grossen Artenvielfalt. In Klimaxökosystemen herrscht das Fliessgleichgewicht vor.

In der Ingenieurbiologie gilt es meistens, Erosionsstellen zu sanieren. Dort herrschen in der Regel die Bedingungen von Pionier- und Übergangsökosystemen. Das bedeutet auch, dass ingenieurbiologische Bauwerke von der positiven Rückkopplung geprägt sind. Einerseits sollen sie sich über Sukzessionsgesellschaften zu Klimaxökosystemen entwickeln. Andererseits können aber auch immer wieder Rückschläge auftreten. Dabei ist zu beachten, das viele Pionierarten einen Schaden durch Überdauerung regenerieren können. Das heisst, sie verbleiben als Samen, Keimling oder Pflanzenteil in der Erde und schlagen nach einer Beruhigung der Standortverhältnisse wieder aus.

Diese Erkenntnis ist wichtig im Hinblick auf eine Erfolgskontrolle ingenieurbiologischer Massnahmen. Um die langfristige Entwicklung ingenieurbiologischer Bauwerke überprüfen zu können, müssen Erfolgskontrollen regelmässig und über mehrere Jahrzehnte durchgeführt werden.

II.2 Bautechnisch nutzbare Eigenschaften der Pflanzen

Die wesentlichsten Vorteile lebender Pflanzen gegenüber toten Baustoffen sind ihre **Regenerationsfähigkeit** und die Anpassung an mechanische Belastungen, was zur Variation der Festigkeit führt. Viele Pionierpflanzen sind in der Lage, mechanische Schäden zu überdauern, indem sie ihre Wuchsformen an die Belastungen anpassen. Solche Anpassungen nennt man **Mechanomorphosen**. Der Säbelwuchs der Baumstämme verrät bereits Bewegungen eines Hanges. An Rutschhängen werden zudem häufig verdickte Stützwurzeln sowie lange Zugankerwurzeln ausgebildet. Andere Verformungen deuten auf den Schneedruck hin.

Von grosser Bedeutung ist die **Resistenz gegen Überschüttung** und Erosion. Überschüttungsresistente Gehölze bilden Adventivwurzeln am Stamm. Solche Leistungen werden von der Himbeere (Rubus idaeus), dem Wachholder (Juniperus communis), Schlehdorn (Prunus spinosa) und der Hasel (Corylus avellana) vollbracht. Doch die Weiden übertreffen alle übrigen Arten, darunter sind die am häufigsten verwendeten Salices Salix pupurea (Purpurweide), S. eleagnos (Lavendelweide) und S. nigricans (Schwarzweide). Auch viele Pionierkräuter können Verschüttungen schadlos überdauern. Sie bilden sogenannte „Schopftriebe“, woraus die neuen Triebe hervorkommen. Oft werden die Triebe auseinandergerissen, woraus sich sogar zwei Individuen entwickeln können, sofern die Pflanzen zur vegetativen Verbreitung fähig sind.

Ebenso wichtig wie die Verschüttungsresistenz ist die **Resistenz gegen Erosion**, das heisst gegen das Freilegen der Wurzeln. Überlebende Pflanzen stehen auf den Wurzeln wie auf Stelzen oder hängen in ihnen. Entlang der

Stützwurzeln bilden sich wieder Adventivwurzeln. Bereits überschotterte Pflanzen ertragen nachträgliche Erosion nur, wenn die tiefergelegenen Wurzelhorizonte noch intakt sind.

Die **vegetative Vermehrbarkeit** ist für die Ingenieurbiologie eine ganz wesentliche Eigenschaft, die es überhaupt ermöglicht, lebende Baustoffe in ausreichenden Mengen zur Verfügung zu haben. Bei Gehölzen werden hauptsächlich Triebstecklinge für Buschlagen, Flechtzäune, Faschinen, Spreitlagen oder zur Bodenvernagelung mit Steckhölzern verwendet. Ebenso gut können auch Wurzelstecklinge oder Rhizomstecklinge anwurzeln.

II.3 Natürliche Ökosysteme als Vorbilder für die Ingenieurbiologie

Wichtige Hinweise für die Ingenieurbiologie lassen sich aus dem Studium natürlicher Ökosysteme an Standorten, die von Erosion oder Massenbewegungen geprägt sind, gewinnen. Dabei geht es nicht um die Analyse der Pflanzengesellschaften allein, ebenso wichtig ist auch die Auseinandersetzung mit ihren Lebensbedingungen, d. h. mit den belebten und unbelebten Faktoren der Ökosysteme. Denn, wie bereits gesagt, ergibt sich die stabilisierende Wirkung der Vegetation als Resultat der Anpassung an die Standortverhältnisse. Für den Erfolg ingenieurbiologischer Verbauungen ist nicht nur die Wahl der Pflanzenzusammensetzung massgebend, sondern auch die Einrichtung adäquater Lebensbedingungen.

Alpine Schutthalden sind klassische Beispiele von Standorten mit häufigen Massenbewegungen. Der einschränkendste Standortfaktor ist jedoch die kurze Vegetationsperiode in den Alpen, bedingt durch die tiefen Temperaturen, lange liegenbleibenden Schnee oder manglendes Licht, weil der Himmel in den Bergen häufiger bedeckt ist als im Flachland. Des weiteren behindert die Trockenheit auf durchlässigen Böden sowie die Nährstoffarmut auf Rohböden das Wachstum. Hinzu kommen nun die mechanischen Belastungen durch Lawinen und Schneerutsche, Solifluktion (Bodenfliessen), Schuttrutsche und Steinschlag.

Die **vegetative Vermehrbarkeit** spielt für das Überleben alpiner Arten eine ganz wesentliche Rolle. Infolge der kurzen Vegetationsperiode wird einerseits die Blütenbildung z. T. über zwei Jahre ausgedehnt. Andererseits werden die Individuen bei Bodenbewegungen oft auseinandergerissen. Daher sind Spross und Wurzeln häufig auch von grosser **Zähigkeit**. Hinzu kommt aber die Tatsache, dass sich die Charakterarten alpiner Pflanzengesellschaften in ihren **Wuchsformen ergänzen**. Dies ist in erster Linie ein Resultat aus der Anpassung an die Konkurrenzverhältnisse, dadurch wird in der Regel aber auch die höchstmögliche Festigkeit des Bodens erreicht.

Die alpine Rasen-Vegetation wehrt sich folgendermassen gegen die Massenbewegungen:

- **Horste stauen** herabkollernden Schutt
- Ein dichtes **Netz von Wurzeln und Rhizomen** bindet die oberflächennahe Feinerde
- Einzelne **Pfahlwurzeln verankern** die Vegetation in die Tiefe.

Um die Bodenbewegungen möglichst rasch und wirkungsvoll einzudämmen, ist eine dichte Bodenbedeckung nötig. Viele Arten sind daher fähig, dichte Rasen zu bilden (s. auch Ausführungen in Kap. III.4).

Das Beispiel der **Hochstaudenfluren** macht die Selbstregulierung der Natur deutlich. Sobald der Boden tiefgründiger ist, siedeln sich nährstoffliebende Pflanzen mit grossem Triebvolumen (z. B. Grauer Alpendost, Blauer Alpenlattich, Wald-Storchenschnabel) an. Im Gebirge ist aber die Gefahr von Rutschen oder Erosion infolge Starkniederschlägen oder Schneeschurf sehr gross. Daher gehören die **Gebüscharten** (insb. Grünerle und Legföhre) notwendigerweise in die Gesellschaften der Hochstaudenfluren. Mit ihrem kräftigen Wurzelwerk stellen sie die nötige Bodenfestigung her.

Gestörte Ökosysteme wirken sich auf die Hangstabilität negativ aus. Beispiele dafür sind **Bergmähder und -weiden**, die an Orten, wo natürlicherweise Grünerlengebüsche und Waldgesellschaften vorkommen, eingerichtet worden sind, aber **nicht mehr unterhalten** werden. Die Böden sind in der Regel tiefgründig und feinkörnig und können an steilen Hängen durch die wenig tiefreichenden Wurzeln der Gräser und Kräuter nicht genügend fixiert werden. Aus der Tiefgründigkeit der Böden ergibt sich die Vorherrschaft nährstoffliebender, schnellwüchsiger und konkurrenzstarker Arten, die in der Regel aber ein relativ grosses Triebvolumen und eine geringe Wurzelmasse aufweisen. **Überbeweidung** verstärkt diesen Effekt dadurch, dass einige wenige Arten, die trittunempfindlich und nicht schmackhaft sind, begünstigt werden. Dadurch hören die meisten Wurzeln in derselben Tiefe auf. Das **Vorherrschen einzelner weniger Arten** fördert die Bildung von **Schwächezonen** (vgl. Kap. III). Es bilden sich Auswaschungshorizonte unter der scharf abgegrenzten Wurzelschicht, entlang derer der Boden mitsamt der Grasnarbe abrutscht (Blaiken). Ist der Boden nach einem Rutsch noch tiefgründig, nährstoffreich und gut durchlüftet, laufen die konkurrenzstärksten Arten der vorangegangenen Gesellschaft als erste wieder auf. Die Degradierung schreitet fort bis die Nährstoffe ausgewaschen sind und die Humusschicht abgetragen ist. Erst wenn wieder ein Rohboden vorherrscht, wenn das Ökosystem in ein frühes Pionierstadium zurückgeworfen ist, siedeln sich Pflanzen der alpinen Rasen an, die die Bodenfestigung in diesem Stadium fördern.

Typische **Übergangsgesellschaften** kann man auch an Waldlichtungen beobachten. Kahlschlagböden sind in der Regel nährstoffreich und häufig feuchter als die umliegenden Waldböden, da die wasserziehenden Bäume

entfernt wurden. Diese Voraussetzungen begünstigen die lichtbedürftigen Waldlichtungsfluren zusätzlich, die ungemein schnell aufkommen. Es wird vermutet, dass viele ihrer Samen stets im Waldboden lagern und auf günstige Keimungsbedingungen warten. Viele typische Lichtungspflanzen bilden aber auch Ausläufer wie etwa Calamagrostis epigeios (Landschilf), Epilobium angustifolium (Schmalblättriges Weidenröschen) und Rubus idaeus (Himbeere). Durch das schnelle Auflaufen entziehen Kahlschlagpflanzen den Baumkeimlingen das Licht. Hinzu kommt aber auch eine starke Wurzelkonkurrenz, Wurzelausscheidungen der Kahlschlagvegetation lassen die Baumkeimlinge absterben.

Kahlschlagfluren treten auch auf, wenn man bei **ingenieurbiologischen Verbauungen** natürlichen Humus zur Bodenbedeckung verwendet. Schon nach kurzer Zei tritt eine üppige Vegetation auf, die auf den ersten Blick den spontanen Erfolg einer ingenieurbiologischen Massnahme vortäuscht. Sie entsprechen aber keineswegs den ingenieurbiologischen Zielsetzungen. Diese nährstoffliebenden Pflanzen wurzeln nicht tiefer als die Humusauflage. Solche Unkrautfluren wuchern nur während weniger Jahre, solange die Nährstoffe noch nicht aufgebraucht oder ausgewaschen sind. Wenn die Humusschicht ausgelaugt ist, wenn also die Lebensbedingungen dieses Ökosystems mehr an Pionierverhältnisse erinnern, werden die Weidenröschen-Fluren natürlicherweise von Brombeerarten verdrängt (Lonicon-Rubion sylvatici). Es treten langlebigere Kräuter und Waldlichtungsbüsche auf. Gemäss diesen Ausführungen ist in der Regel vom Aufbringen einer **Humusauflage** bei ingenieurbiologischen Bauvorhaben **abzusehen**. Nährstoffliebende Arten verhindern das Aufkommen geeigneter Bodenfestiger, wodurch die positive Wirkung ingenieurbiologischer Massnahmen lange hinausgezögert wird.

Kap. III: Erdbauliche (bodenmechanische) Grundlagen

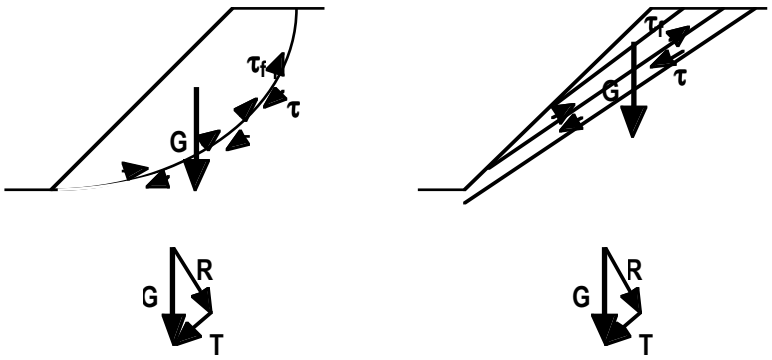
III.1 Das Festigkeitsverhalten des Bodens

Die Festigkeit eines Bodens wird mit dem Parameter **Scherfestigkeit** τ_f beschrieben. Die Scherfestigkeit ist der Maximalwert der Schubspannungen in der Bruchfläche. Physikalisch setzt sich die Scherfestigkeit aus der **Reibung** zwischen den einzelnen Bodenpartikeln und der Haftfestigkeit des Materials, welche als **Kohäsion** bezeichnet wird, zusammen. Von Kohäsion kann streng genommen nur bei bindigen (d. h. tonhaltigen) Böden gesprochen werden. Diese ist eine reine Funktion des Wassergehalts. Der Effekt einer Kohäsion kann aber auch andere Ursachen haben, die auch in rolligen (nicht tonhaltigen) Böden auftreten können:

- Verzahnung der Körner (Strukturkohäsion)
- Kapillare Saugspannung (Kapillarkohäsion)
- Armierung.

III.2 Die Standsicherheit von Böschungen

Der Bemessung von Stützbauwerken liegt eine Abschätzung der Standsicherheit des Hanges zugrunde. Der erste und wichtigste Schritt einer Standsicherheitsabschätzung ist die Annahme der **Gleitfläche**, entlang derer der Boden abrutscht. Bei homogenen Böden (z. B. reinen Sanden) haben die Gleitflächen eine kreiszylindrische Form, bei hangparallel geschichteten Böden verlaufen sie entlang den Schichten (vgl. Abb. III.1).



homogener Boden: kreiszylindrische Gleitfläche

geschichteter Boden: ebene Gleitfläche

Abb. III.1 Form der Gleitflächen in homogenen und geschichteten Böden

Für eine realistische Annahme der potentiellen Gleitfläche ist eine detaillierte Analyse des Bodenprofils und der Morphologie des Hangs im Einzelfall unerlässlich. Zum Böschungsbruch kommt es, wenn die durch äussere Kräfte verursachten Schubspannungen in der Gleitfläche die Scherfestigkeit an diesem Ort überschreiten. Hieraus ergibt sich die Tatsache, dass der Bruch in einem Hang jeweils in der Zone der geringsten Scherfestigkeit stattfindet. Derartige Schwächezonen kommen in der Natur häufig als Schichtwechsel im Bodenprofil vor:

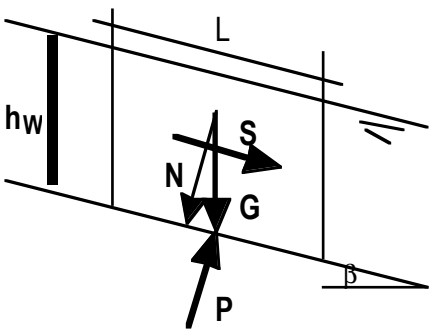
- Horizontwechsel (insb. Wechsel zwischen Boden und Fels)
- Wasserleitende Stauschichten („Tonlinsen“)
- Scharfe Grenzen des Wurzelhorizonts
- Abrupte Wechsel in der Bodendichte (z. B. bei Dammschüttungen)

Der nächste Schritt einer Standsicherheitsabschätzung ist die Annahme der auftretenden **Kräfte** im Belastungsfall. Diese werden durch das Gewicht des Bruchkeils sowie einer allfälligen Auflast bestimmt. Im Kräfteparallelogramm werden die Kräfte in eine Komponente tangential zur Gleitfläche und eine Komponente senkrecht zur Gleitfläche zerlegt. Die tangentiale Komponente wirkt in Richtung der Rutschung und wird daher als **treibende Kraft** bezeichnet. Die senkrechte Komponente wirkt der Rutschbewegung entgegen und wird als **rückhaltende Kraft** definiert. Die **Scherfestigkeit** des Bodens in der Gleitfläche ist die rückhaltende Spannung. Die Schubspannungen, verursacht durch die äusseren Kräfte, d. h. das Gewicht des Bruchkeils und eine allfällige Auflast, bilden die treibenden Spannungen. Die Standsicherheit einer Böschung entspricht nun dem Quotienten aus Scherfestigkeit in der Gleitfläche und Schubspannungen aus äusseren Kräften in der Gleitfläche. Mit anderen Worten, sie entspricht dem Verhältnis zwischen rückhaltenden und treibenden Kräften. Die **Standsicherheit** einer Böschung bzw. eines Hanges ist gewährleistet, wenn dieses Sicherheitsverhältnis grösser als eins ist. Der kritische Zustand trifft bei einem Sicherheitsverhältnis von eins ein, d. h., wenn die rückhaltenden und die treibenden Kräfte gleich gross sind, kommt es zum Bruch. Ein Verhältnis kleiner als eins ist nicht möglich.

$$F = \tau_f / \tau = (c + \sigma tg\varphi) / \tau = \Sigma[R] / \Sigma[T] > 1$$

τ_f: Scherfestigkeit in der Gleitfläche
τ: Schubspannungen aus äusseren Kräften
σ: Normalspannungen aus äusseren Kräften
c: Kohäsion
φ: Reibungswinkel
$\Sigma[R]$: Summe der rückhaltenden Kräfte
$\Sigma[T]$: Summe der treibenden Kräfte
F: Sicherheitsfaktor

Besonders kritische Situationen entstehen bei gesättigten Böden, wenn nicht die Saugspannung, sondern **Porenwasserüberdrücke** wirken (Abb. III.2). Der hydrostatische Druck des Wassers wirkt der rückhaltenden Komponente des Bodengewichts entgegen, d. h. sie wird durch den Auftrieb reduziert. Der Strömungsdruck hingegen wirkt in Fliessrichtung des Wassers, welche mit der Richtung der Rutschung übereinstimmt. Die treibenden Kräfte werden dadurch erhöht.



Hydrostatischer Druck
$P = g_W * h_W * L$

Strömungsdruck
$S = g_W * h_W * L * tgb$

Die treibende Wirkung des Porenwasserüberdrucks

Abb. III.2 Die treibende Wirkung des Porenwasserüberdrucks

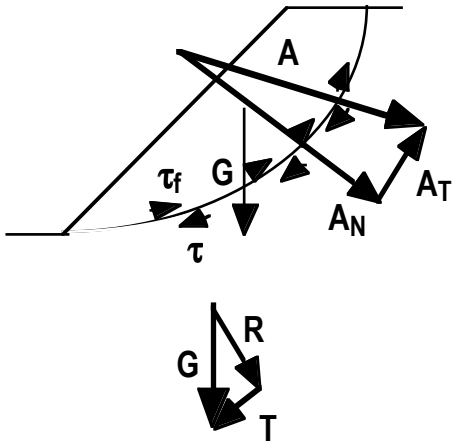


Abb. III.3 Die rückhaltende Wirkung von Bodenankern

Ingenieurbiologische Stützbauwerke sollen mit ihrem Wurzelwerk oder mit eingebauten Steckhölzern wie **Bodenanker** wirken. Wirkungsvoll ist ein Anker jedoch nur, wenn er die **Gleitfläche durchbricht**. Andernfalls rutscht er mitsamt dem Bodenmaterial im Bruchkeil ab. Abb. III.3 erläutert die Wirkung von Ankern: Zerlegt man die Ankerkraft wiederum in eine Komponente senkrecht zur Gleitfläche und eine Komponente tangential zur Gleitfläche, erkennt man, dass auch die tangentiale Komponente der Ankerkraft rückhaltend wirkt, weil sie der

Bewegung entgegen wirkt (d. h. eine „negative treibende“ Kraft darstellt). Somit erhöht die Ankerkraft die Scherfestigkeit des Bodens in der Gleitfläche.

III.3 Die festigende Wirkung der Pflanzen

Die wesentliche Grundvoraussetzung für die stabilisierende Wirkung der Vegetation ist, dass die Pflanzen ihren Einfluss innerhalb des räumlichen Wirkungsbereichs der mechanischen Prozesse ausüben können. In bezug auf die Massenbewegungen heisst das im wesentlichen, die Pflanzen müssen in der Lage sein, mit ihren **Wurzeln die Gleitflächen zu durchbrechen**. Hierfür muss einerseits das Substrat durchwurzelbar sein, andererseits darf die Gleitfläche nicht tiefer als der Wurzelhorizont liegen. Ansonsten muss die Stabilität mit anderen technischen Massnahmen, aber nicht mit lebenden Pflanzen, hergestellt werden (vgl. Tab.III.1).

Bewegungsart	Phänomen	Erscheinungsformen	Substrat	Tiefe
Massenselbstbewegungen	Stürze	Abbröckeln, Abgrusung Felssturz Bergsturz	Fels	Oberflächennah bis mehrere Meter tief
	Rutschungen	Rotationsrutsche Translationsrutsche	Lockergestein Fels/Lockergestein	Oberflächennah bis mehrere Meter tief
	Fliessbewegungen	Massenkriechen Mantelkriechen, Mantelfliessen	Lockergestein, z. T. grosse Blöcke mittransportiert	Oberflächennah bis mehrere Meter tief
Abtrag, Erosion	Oberflächenerosion	Flächenabtrag Rillenerosion	Feinkörniges Lockergestein Fels (chem. Lös.), Lockergestein	An Bodenoberfläche
	Unterirdische Erosion		Lockergestein	Oberflächennah bis mehrere Meter tief
Transport	Verlagerung von Bodenpartikeln		Fels (Klüfte), Lockergestein	Oberflächennah bis mehrere Meter tief

Tab. III.1 Übersicht über die Massenbewegungen an Hängen

Am wirkungsvollsten ist die Vegetation für den Schutz vor **Oberflächenerosion** durch fliessendes Wasser. Dabei beschränkt sich ihre Wirkung nicht nur auf den Wurzelbereich:

- **Interzeption**: Ein geschlossenes Blätterdach kann 10 - 20% des Jahresniederschlags zurückhalten, die wieder verdunsten. Bei zunehmender Regendauer lässt die Interzeption zwar nach, aber die grossen, schweren Tropfen werden immer noch abgebremst, so dass sie den Boden nicht mehr schädigen.
- **Aufhalten des Oberflächenabflusses**: Die Unebenheiten an der Bodenoberfläche durch Wurzeln und Sprosse erhöhen die Rauhigkeit und verringern somit die Fliessgeschwindigkeit des Oberflächenwassers.
- **Sedimentrückhalt**: Die Wurzeln halten den Boden zusammen, was ihn schwerer erodierbar macht. Zudem werden in den Nischen der Wurzelstöcke abgeschwemmte Bodenpartikel zurückgehalten.
- **Förderung der Infiltration**: Die Vegetation trägt durch Wurzelausscheidungen wesentlich zur Aggregatbildung im Boden bei. Dadurch wird eine schnelle Infiltration ermöglicht.
- **Transpiration**: durch die Transpiration der Pflanzen wird dem Boden ständig Wasser entzogen, was einer Bodensättigung und dem daraus folgenden Oberflächenabfluss entgegenwirkt.

Die festigende Wirkung der Pflanzen bei **Hangrutschen** liegt in der **Erhöhung der Scherfestigkeit**. Dabei spielt die **Erhöhung der Saugspannung** durch den **Wasserentzug** die wichtigste Rolle. Dadurch wird in erster Linie die Häufigkeit der Wassersättigung des Bodens vermindert. In zweiter Linie erhöht die Vegetation die Scherfestigkeit des Bodens durch die **armierende Wirkung der Wurzeln**. Diese Wirkungsweise kommt allerdings erst bei gesättigtem Boden zum Tragen, d. h. wenn aus bodenmechanischer Sicht der schlimmste Fall eingetreten ist.

In der Literatur wird verschiedentlich versucht, die bewehrende Wirkung der Pflanzenwurzeln analytisch zu beschreiben, um die Bemessung lebender Stützbauwerke zu erleichtern. Abb. III.4 zeigt ein Beispiel. In der Regel gehen die Modelle davon aus, dass in der Scherzone (Bruchzone) die Zugfestigkeit der Wurzeln überschritten wird und es dadurch zum Bruch kommt. Die stabilisierende Wirkung der Wurzeln wird als reine Erhöhung der Kohäsion des Bodens infolge der Zugfestigkeit der Wurzeln interpretiert. Daraufhin wurde von verschiedenen Autoren die Zugfestigkeit der Wureln an einzelnen kurzen Stücken im Labor gemessen. Es ist der Autorin allerdings kein Fall bekannt, wo diese Ergebnisse als Bemessungsgrundlage beigezogen wurden.

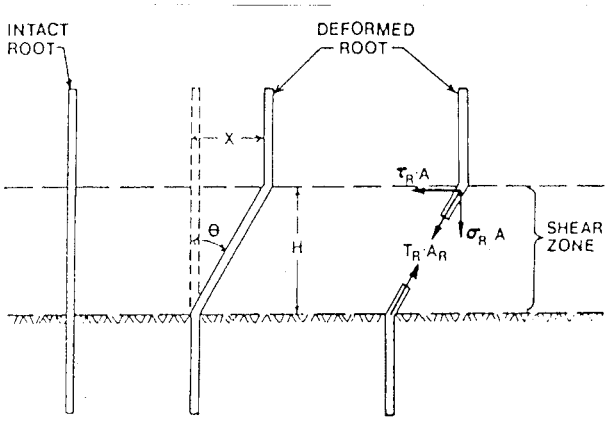


Fig 4 *The Wu* et al *root reinforcement model*

Ivan W.Y. Lee
A review of vegetative slope stabilisation
The Journal of the Hong Kong Institution of Engineers July 1985 11

Abb. III.4 Das Modell der armierenden Wirkung der Pflanzenwurzel nach Wu et al. 1985

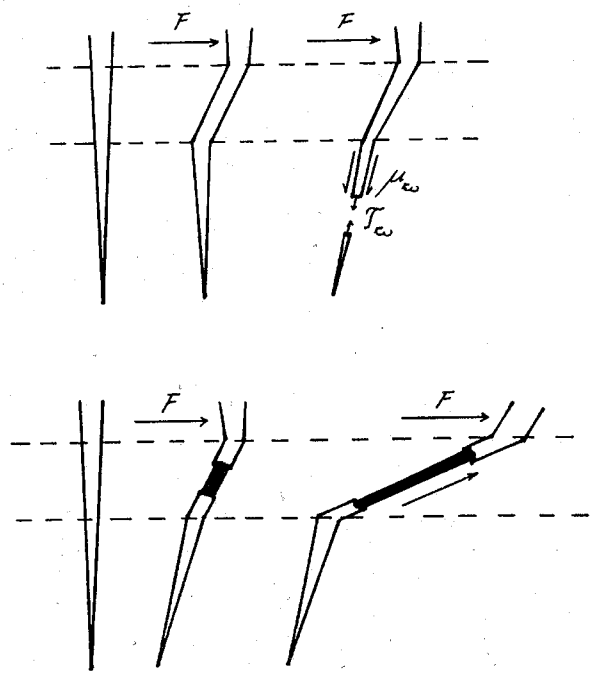


Abb. III.5 Das Versagen der Wurzeln (nach Tobias 1991):
Oben: Ausreissen der Wurzeln aus dem Boden nach dem Brechen im schwächsten Querschnitt
Unten: Brechen der Wurzelhaut in der Scherzone und Ausgleiten des Wurzelkerns

Eigene Untersuchungen der Autorin mit Rahmenscherversuchen an Gräsern im Feld haben andere Resultate gezeigt (Abb. III.5). Es haben zwei Bruchmechanismen stattgefunden. Einerseits brachen die Wurzeln in der Regel unterhalb der Scherzone, wo ihr Querschintt die auftretenden Zugkräfte nicht mehr aufnehmen konnte. Anschliessend wurden sie aufgrund mangelnder **Mantelreibung** zwischen Boden und Wurzel (d. h. weil die Reibungsfläche durch den Wurzelbruch verkleinert wurde) aus dem Boden ausgerissen. Andererseits brach die Wurzelhaut in der Scherzone und der Kern der Wurzel glitt dann aus.

Somit kann die Zugfestigkeit nicht als die einzige massgebende Grösse für die Erhöhung der Scherfestigkeit des Bodens betrachtet werden. Die Mantelreibung zwischen Boden und Wurzel ist mindestens ebenso wichtig. Die Messergebnisse zeigten denn auch in erster Linie eine **Erhöhung des Reibungswinkels**, in zweiter Linie eine **Erhöhung der Kohäsion**.

III.4 Die Bedeutung der Pflanzenzusammensetzung für die Scherfestigkeit des Bodens

Aus den an Gräsern durchgeführten Rahmenscherversuchen zieht die Autorin folgende Schlüsse bezüglich der Bedeutung der Pflanzenzusammensetzung für die Scherfestigkeit des Bodens:

- Bei **altbekannten Bodenfestigern** wurden höhere Scherfestigkeiten gemessen (Poa pratensis, Festuca rubra, Festuca pratensis, Agrostis stolonifera). Qulitative Erfahrungen aus Naturbeobachtungen sind durch einen in der Ingenieurtechnik gebräuchlichen Parameter nachweisbar und quantifizierbar.
- Merkmale festigkeitsfördernder Gräser:
  - Fähigkeit, **dichte Rasen** zu bilden (oft ausläufertreibende Gräser)
  - Anfänglich **langsames Aufkommen**, dann aber mehrere Jahre **überdauernd**
  - Meistens Untergräser (grüne Triebe bleiben kurz, d. h. < 20 cm)
  - **Trittfestigkeit**
- Zu besonderer Erhöhung der Scherfestigkeit führen vor allem Grassorten, die natürlicherweise an **Standorten mit häufigen Bodenbewegungen** vorkommen. Eine natürliche Selektion findet auch nach der mechanischen Belastbarkeit statt.
- Am wirkungsvollsten erscheint nicht die Vorherrschaft einer Grassorte allein, sondern eine **Mischung** aus Horst- und Ausläufergräsern, Flach und Tiefwurzlern. Die natürliche Befestigungsstrategie ist das Prinzip des **vernagelten Netzes** und bewährt sich am besten.

Die Befestigungsstrategie natürlicher Pflanzengesellschaften ist in Abb. III.6 am Beispiel der Täschelkrautflur (Thlaspion rotundifolii) abgebildet. Die Charakterarten bilden ein Netz aus Flachwurzlern und Stolonen, das durch einzelne Pfahlwurzler verankert ist. Der Wurzelhorizont zeigt keine scharfe Grenze und reicht bis in den ruhenden Schutt, d. h. er durchbricht die Gleitfläche (Grenze zwischen beweglichem und ruhendem Schutt). Hieraus lässt sich für die Ingenieurbiologie ein weiterer wichtiger Schluss ziehen: Auch beim Einlegen von Busch- und Heckenlagen (vgl. Kap. V) ist darauf zu achten, dass keine scharfen Grenzen des Wurzelhorizontes provoziert werden. Mit anderen Worten, die eingelegten Steckhölzer sollen einerseits nicht von einheitlicher Länge sein, andererseits sollen sie möglichst von Pflanzen mit ergänzenden Wurzeltiefen stammen.

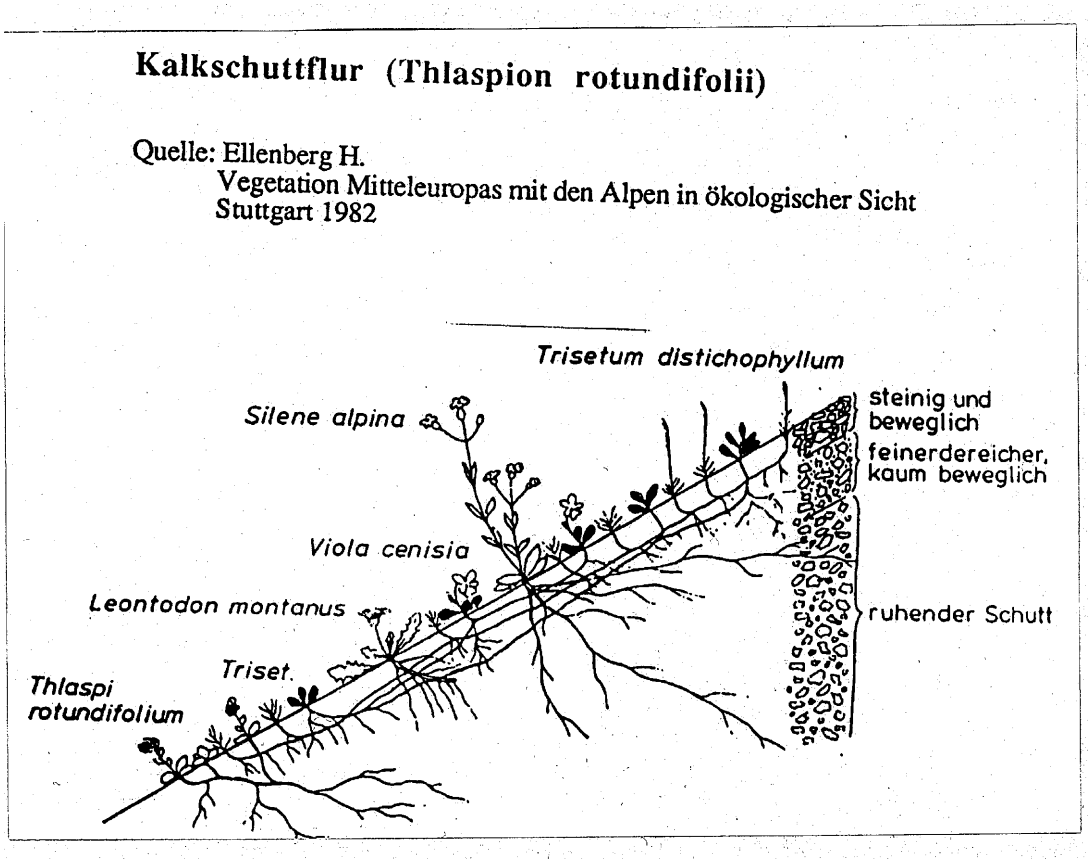


Abb. III.6 Die Befestigungsstrategie natürlicher Pflanzengesellschaften am Beispiel der Täschelkrautflur (Thlaspion rotundifolii)

Kap. IV: Wasserbauliche Grundlagen

IV.1 Das Gewässer als Ökosystem

Die Anwendung naturnaher Bauweisen im Wasserbau hat nur Erfolg, wenn das Gewässer als natürliches Ökosystem verstanden wird. Als solches steht es aber in starken hydraulischen und ökologischen Wechselbeziehungen mit seinem **Umland**. Es genügt daher nicht, den Blickwinkel auf das Gewässer bzw. das Gerinne allein einzuschränken, im naturnahen Wasserbau muss die Perspektive auf den gesamten Einflussbereich des Gewässers im Umland ausgedehnt werden. Ein offenes Gewässer beeinflusst in der Regel den Grundwasserstand und damit den Wasserhaushalt in den angrenzenden Böden über weite Flächen hinaus. Dies hat wiederum einen direkten Einfluss auf das Vorkommen bestimmter Ökosysteme in der Gewässerumgebung.

Von ökologischer Bedeutung kann ein Gewässer nur sein, wenn es für die **Gewässerorganismen** sowohl in radialer (in Richtung des Querschnitts) als auch in longitudinaler (in Richtung des Längsschnitts) Richtung **durchgängig** ist. Mit anderen Worten, es muss ein reger Austausch mit der Atmosphäre (am Wasserspiegel), dem Untergrund (an der Sohle) und im Uferbereich stattfinden können. Daher sollten Ufer und Sohlen auch stets von durchlässigem Material sein, es sei denn, diese Bereiche sind natürlicherweise dicht (Fels, kolmatierte Sohle). Ebenso wichtig (und oft vernachlässigt) ist die Durchgängigkeit des Gewässers in Längsrichtung. Am wichtigsten ist diese Eigenschaft für die Fische, da diese oft über weite Strecken die Gewässer hinaufwandern. Steile Abstürze und Wehre machen ein Gewässer in bezug auf die Fischdurchgängigkeit „dicht". Heutzutage werden daher viele Querwerke durch Rampen ersetzt, die von den Fischen gemeistert werden können.

Eine weitere Grundvoraussetzung für den naturnahen Wasserbau ist die Beachtung der natürlichen **Dynamik** der Gewässer. Natürliche Wasserläufe ändern ihren Fliessquerschnitt und ihre Linienführung jeweils mit dem Wasserstand. Ein naturnah verbautes Gewässer wird daher sein Aussehen immer wieder verändern. Es wird dabei ev. auch Erosionsstellen hervorrufen, die aber in der Regel keine Katastrophe darstellen, sofern dem Gewässer genügend Raum im Uferbereich belassen wird.

IV.2 Grundsätze für die naturnahe Gewässerregulierung

Die naturnächste Gewässerregulierung ist die „Nullbauweise", das heisst, wenn das Gewässer sich selbst überlassen wird. Hierfür muss in erster Linie der Raumbedarf des Gewässers in der Uferzone gewährleistet sein. Im Prinzip heisst das, dem Gewässer ist sein **ursprüngliches, natürliches Gerinne** zu überlassen bzw. zurückzugeben. Bei der heutigen Nutzungsdichte der zur Verfügung stehenden Fläche ist die Nullverbauung kaum entlang eines ganzen

Gewässerlaufs zu realisieren. Es ist aber anzustreben, dies an möglichst langen, zusammenhängenden Streckenabschnitten zu tun. In vielen Fällen, insbesondere bei kleineren Gewässern, reicht es, an wenigen, heiklen Stellen (z. B. bei Brücken, Grundwasserfassungen, Siedlungen) den Querschnitt zu stabilisieren und im übrigen dem Gewässer freien Lauf zu geben. Die Verbauungsweise zur **Befestigung der kritischen Querschnitte** soll dem Schutzgut bzw. dem möglichen Schaden angepasst werden.

Ausschlaggebend für die Anwendung lebender Baustoffe sind die **Wasserstände** im Profil. Abb. IV.1 zeigt die ingenieurbiologische **Uferzonierung**. Ingenieurbiologische Verbauungen mit lebenden Pflanzen können nicht weit unter die Mittelwasserlinie angebracht werden, da die Pflanzen ansonsten ersticken.

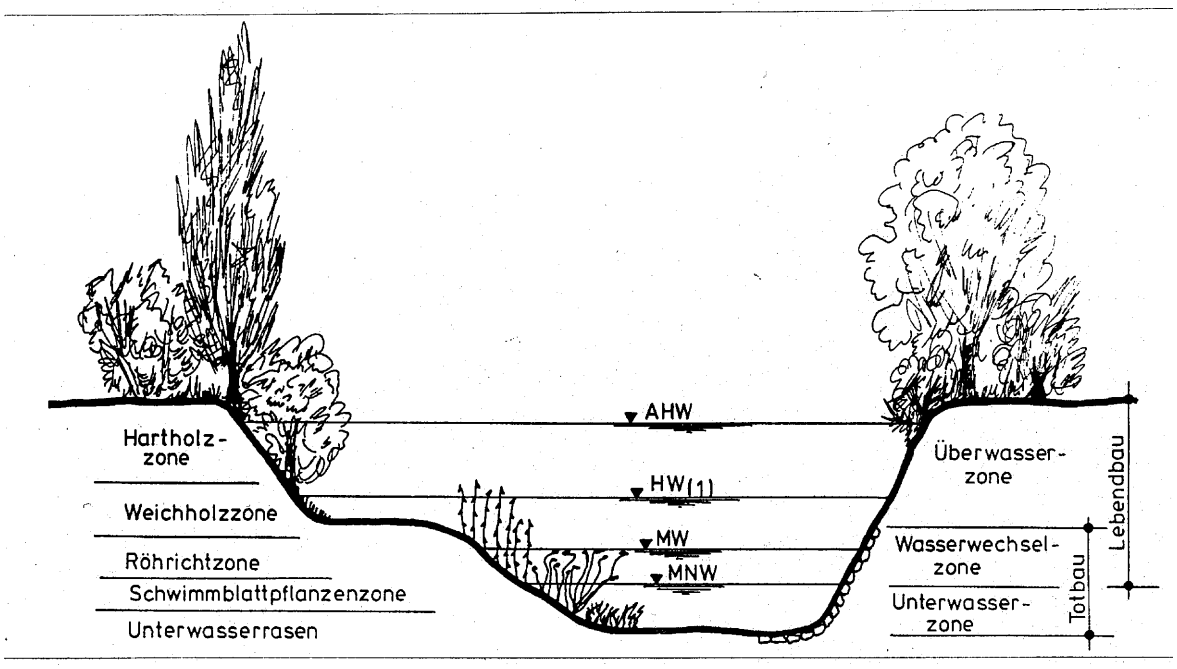


Abb. IV.1 Die ingenieurbiologische Uferzonierung: Einteilung des Gewässers in Belastungs- und Vegetationszonen
(MNW: Mittleres Niedrigwasser, MW: Mittelwasser, HW(1): Einjährliches Hochwasser, AHW: Bemessungshochwasser)
Quelle: Lange, G., K. Lecher, 1986: Gewässerregelung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fliessgewässern. Paul Parey, Hamburg und Berin. S. 113

Über den Einsatz von Wasserpflanzen (Laichkrautarten, Wasserhahnenfuss, See- oder Teichrosen) zur Sohlenstabilisierung ist sehr wenig bekannt. Gerade bei kleinen Gewässern, die zudem häufig als Vorflut landwirtschaftlicher Drainagen dienen, ist das üppige Auftreten von Wasserpflanzen unerwünscht. Denn die Verkrautung schränkt die Leistungsfähigkeit des Gerinnes stark ein.

Ähnliche Probleme stellen sich auch für die Röhrichtzone. Während Schilf (Phragmites australis) und Rohrkolben (Typha latifolia) an Seen und breiten Flüssen oder Kanälen die Ufer ausgezeichnet vor Wellenschlag durch Schiffe zu schützen vermögen, sind sie für kleine Gewässer eine grosse Gefahr, da sie die Verlandung einleiten. Einzig das Rohrglanzgras (Phalaris arundinacea) begünstigt die Verlandung nicht und kommt auch in verschmutzten Gewässern vor. Da es in der Regel nur in Wassertiefen von maximal 30 cm vorkommt, ist die Gefahr der Vorherrschaft über den gesamten Uferbereich eingeschränkt.

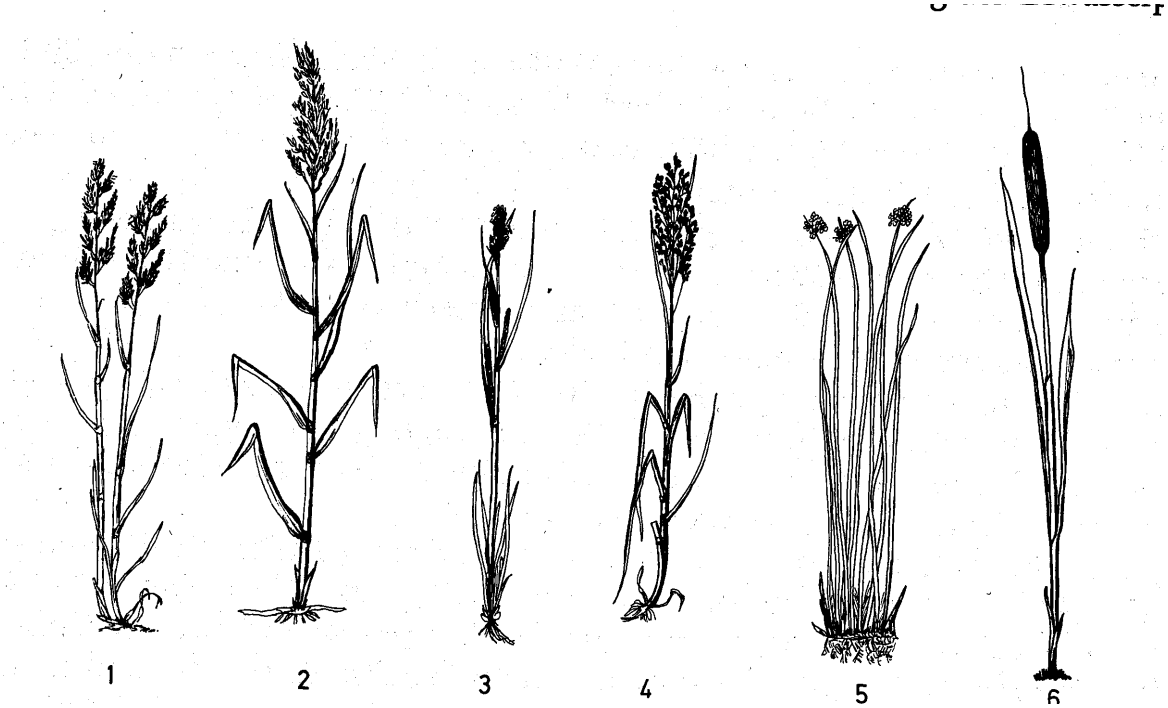


Abb. IV.2 Pflanzen der Röhrichtzone: 1 Rohrglanzgras, 2 Schilf, 3 Schlanksegge, 4 Wasserschwaden, 5 Flechtbinse, 6 Rohrkolben.
Quelle: Lange, G., K. Lecher, 1986: Gewässerregelung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fliessgewässern. Paul Parey, Hamburg und Berin. S. 124

Für die Ingenieurbiologie am wirkungsvollsten ist eine Bepflanzung mit Gehölzen. Diese stabilisieren mit ihren Wurzeln die Ufer in tieferen Bodenschichten. Bei kleineren Gewässern reichen die Gehölzwurzeln häufig bis unter die Sohle und tragen so auch zur Sohlenstabilisierung bei. Ausserdem können Gehölze durch Schattenwurf der Verkrautung von Gewässern entgegenwirken. In intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten mit eutrophierten Gewässern ist die Beschattung oft die einzige langfristig wirksame Massnahme gegen die Verkrautung. Die örtlichen Lichtverhältnisse sind jedoch vorgängig genau abzuklären, da ein dichter Bestand hoher Bäume unter

Umständen auch das angrenzende Landwirtschaftsland nachteilig beschatten kann. Die Tabellen IV.1 bis IV.4 geben einen Überblick über gewässerbegleitende Gehölze (Quelle jeweils: Lange, G., K. Lecher, 1986: Gewässerregelung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fliessgewässern. Paul Parey, Hamburg und Berin. S. 129-131).

Art	Höhe [m]	Wuchsmerkmal	Standortansprüche, Eignung
Mandelweide (Salix triandra)	4	Strauchweide, Herzwurzler	Kiesgruben, Kiesbänke
Grauweide (Salix cinerea)	4	Strauchweide, Herzwurzler, schnellwüchsig	Alle Bodenarten, zur schnellen Schadensbehebung
Purpurweide (Salix purpurea)	3	Strauchweide	Sehr gut für Kalkböden und Spreitlagen
Schwarzweide (Salix myrsinifolia)	2	Strauchweide, Blätter fast kreisrund	Für Flachmoor, sand-, kies- oder kalkhaltige Rohböden
Korbweide (Salix viminalis)	10	Strauch, Baum	Nicht für saure Böden
Hartriegel (Cornus alba)	4	Breitwüchsig, schnellwüchsig, Stockausschlag	Feuchte Standorte, mittlere Böden
Hasel (Corylus avellana)	8	Starker Stockausschlag	Geringe Wasseransprüche
Weissdorn (Crataegus monogyna)	4	Tiefe, weitverzweigte Wurzeln, verträgt Schnitt	Schutzgehölz auch auf trockenen Böden, nicht in Obstbaugebieten, da Brutstätte für obstbaumschädliche Gespinstmotten
Pfaffenhütchen (Euonymus europäus)	4	Stockausschlag	Pionierpflanze für mässig feuchte Standorte, Brutstätte für Rübenblattlaus

Tab. IV.1 Sträucher der Weichholzzone

Art	Höhe [m]	Wuchsmerkmal	Standortansprüche, Eignung
Hartriegel (Cornus alba)	4	Breitwüchsig, schnellwüchsig, Stockausschlag	Feuchte Standorte, mittlere Böden
Hasel (Corylus avellana)	8	Starker Stockausschlag	Geringe Wasseransprüche
Weissdorn (Crataegus monogyna)	4	Tiefe, weitverzweigte Wurzeln, verträgt Schnitt	Schutzgehölz auch auf trockenen Böden, nicht in Obstbaugebieten, da Brutstätte für obstbaumschädliche Gespinstmotten
Pfaffenhütchen (Euonymus europäus)	4	Stockausschlag	Pionierpflanze für mässig feuchte Standorte, Brutstätte für Rübenblattlaus
Sanddorn (Hippophae rhamnoides)	4	Weitstreifendes tiefes Wurzelwerk, starke Wurzelbrut	Pionierpflanze auf leichten Sand-, Kiesböden, geringe Feuchtigkeitsansprüche
Liguster (Ligustrum vulgare)	3	Kräftiges Wurzelwerk, verträgt Schnitt	Liebt kalkhaltige Böden, verträgt Schatten und Gewässernähe
Heckenkirsche (Lonicera xylosteum)	2	Flachwurzelnd, breit- und schnellwüchsig	Bevorzugt kalkigen mittleren Boden, Brutstätte für Kirschenfruchtfliege
Faulbaum (Rhamnus frangula)	4	Stockausschlag, Wurzelbrut	Frischer, feuchter, sumpfiger bis mooriger Boden, schatten- und frostverträglich
Kratzbeere (Rubus caesius)	3	Ausläuferbildend	Festigt Rohböden und Unterholz in Auewäldern
Schwarzer Holunder (Sambucus nigra)	4	Flachwurzelnd, kräftiger Ausschlag, breit- und schnellwüchsig	Verträgt stagnierendes Wasser, schwere bis mittlere Böden
Gewöhnlicher Schneeball (Viburnum opulus)	4	Breitwüchsig, Stockausschlag	Unterholz in Unterpflanzungen, hohe Wasseransprücke, vertgrägt Staunässe, nährstoffreiche Böden

Tab. IV.2 Sträucher der Hartholzzone

Art	Höhe [m]	Wuchsmerkmal	Standortansprüche, Eignung
Bergahorn (Acer pseudoplatanus)	30	Schnellwüchsig, Stockausschlag, Herzwurzel, sturmfest	Mittlere bis schwere feuchte Böden, im Alter lichtbedürftig
Spitzahorn (Acer platanoides)	30	Schnellwüchsig, flache Herzwurzel	Alle Böden, geringe Feuchtigkeitsansprüche, wildbverbissgefährdet (Hasen, Rehe)
Feldahorn (Acer campestre)	15	Bis 8 m Höhe als Strauch, Stockausschlag	Alle Böden, stauwasserempfindlich, verträgt Halbschatten, bescheidene Ansprüche
Graupappel (Populus cescens)	30	Schlank- und schnellwüchsig, flache Herzwurzel	Mässig feuchte Böden, Pioniergehölz, nährstoffreicher Boden
Stieleiche (Quercus robur)	30	Langsam- und breitwüchsig, Stockausschlag, sturmfest	Auf saurem und kalkigem Boden, geringe Wasseransprüche, verträgt Überflutung
Feldulme (Ulmus carpinifolia)	35	Tiefwurzler, Wurzelbrut, Stockausschlag	Mineralkräftige, tiefgründige Aueböden, verträgt Halbschatten, Überflutung und nährstoffarme Böden
Hainbuche (Carpinus betulus)	20	Dichter Herzwurzler, Stockausschlag, frosthart, wertvoll für Schutzbestockung	Mittlere Ansprüche, verträgt Staunässe, Schnitt und Halbschatten
Buche (Fagus sylvatica)	15	Schwaches Ausschlagvermögen, glatter Stamm	Nicht auf überfluteten Auewald- und Moorböden, stauwasserempfindlich
Rosskastanie (Aesculus hippocastanum)	20	Breitkronig, raschwüchsig	Hohe Bodenansprüche, Vorsicht wegen Bruchgefahr der Äste

Tab. IV.3 Bäume der Hartholzzone

Art	Höhe [m]	Wuchsmerkmal	Standortansprüche, Eignung
Schwarzerle (Alnus glutinosa)	20	Tiefwurzler, Stockausschlag, schlankwüchsig	Dringt als einziger Baum in den vernässten Untergrund ein, Wuchsort unmittelbar am Wasser
Grauerle (Alnus incana)	15	Flachwurzler, Stockausschlag, weitreichender Wurzelausschlag	Pionierpflanze für Rohböden, besonders für Kalkschotter
Weissbirke (Betula verrucosa)	20	Flachwurzler, schnellwüchsig	Pionierpflanze, saurer Boden
Moorbirke (Betula pubescens)	10	Breite Wurzel, mitteltief	Saure Sand- und Torfböden, unempfindlich gegen Staunässe
Silberweide (Salix alba)	20	Breitwüchsig, Herzwurzler	Alle Böden, direkt am Wasser als Faschinen geeignet
Lorbeerweide (Salix pentandra)	10	Blätter lorbeerblattähnlich	Für Flachmoore und kalkarme Seen

Tab. IV.4 Bäume der Weichholzzone

IV.3 Uferstabilisierung und Erosionsschutz

Die wesentliche Wirkung von Massnahmen gegen Ufer- und Sohlenerosion ist der Widerstand gegenüber der auftretenden **Schleppspannung** (Schubspannung) des Wassers. Diese hängt in erster Linie von der **Fliessgeschwindigkeit** ab, welche wiederum eine Funktion des Gefälles und der Rauhigkeit des Gerinnes ist. Die Ufervegetation erhöht die Rauhigkeit des Gerinnes, wodurch die Geschwindigkeit des Wassers in Ufernähe gebremst wird. Dadurch wird auch die Schleppspannung herabgesetzt, so dass die Pflanzen Widerstand leisten können. Ist die Schleppkraft des Wassers immer noch zu hoch, werden die Pflanzen ausgerissen, obwohl sie die Fliessgeschwindigkeit herabgesetzt haben.

Besonders problematisch sind **Übergänge** verschiedener Bauweisen, weil es dort zu abrupten Wechseln in der Gerinnerauhigkeit kommt. Dadurch können **Spannungsspitzen** auftreten, die zu örtlichen Uferanrissen oder Kolken führen. Diese **kleinräumigen Anrissstellen** sind häufig Ausgangspunkte für grossflächige Erosionen. Eine wirkungsvolle ingenieurbiologische Gewässerverbauung setzt daher eine sorgfältige, detaillierte Kartierung der heiklen Stellen bzw. Schäden voraus.

IV.4 Querwerke

Die geläufigste Massnahme zur Reduktion der Fliessgeschwindigkeit ist der Einbau von Schwellen (Querwerken) zur **Verringerung des Gefälles** (Abb. IV.3). Auch kleine Gewässer im Flachland werden häufig mit niedrigen Schwellen versehen, weil sich dadurch eine Sohlenstabilisierung erübrigt. Doch auch bei kleinen Schwellen wird die kinetische Energie unter relativ starken Turbulenzen gebrochen. Diese führen im Unterwasser der Schwelle zu einer Eintiefung der Sohle und Erosion an beiden Ufern (**Kolkbildung**) (Abb. IV.4).

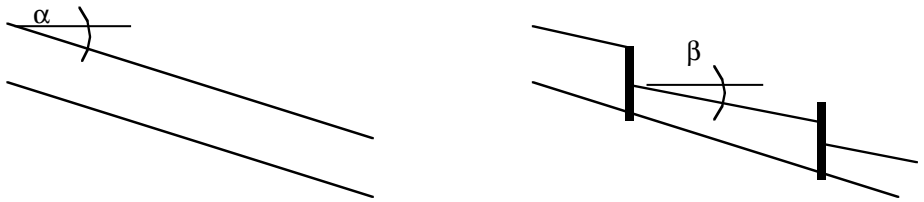


Abb. IV.3 Die Wirkung von Querwerken: Ursprüngliches erosionswirksames Gefälle: $I_\alpha=tg\alpha$; Erosionswirksames Gefälle nach Einbau der Querwerke: $I_\beta=tg\beta$

Während unterhalb hoher Abstürze und in grossen Gewässern ein stabilisiertes Tosbecken eingerichtet werden muss, ist dies bei niedrigen Schwellen in kleinen Gewässern in der Regel nicht nötig. Allerdings werden infolge der Kolke die Schwellen oft unterspült und/oder seitlich umspült (Abb. IV.5). Dadurch verliert die Schwelle ihre Wirkung vollends. Die Schwellen sind deshalb seitlich und in der Tiefe weit genug zu **verankern**. Häufig reicht es aus, anstelle von einem (kürzeren) zwei lange Rundhölzer übereinander zu legen.

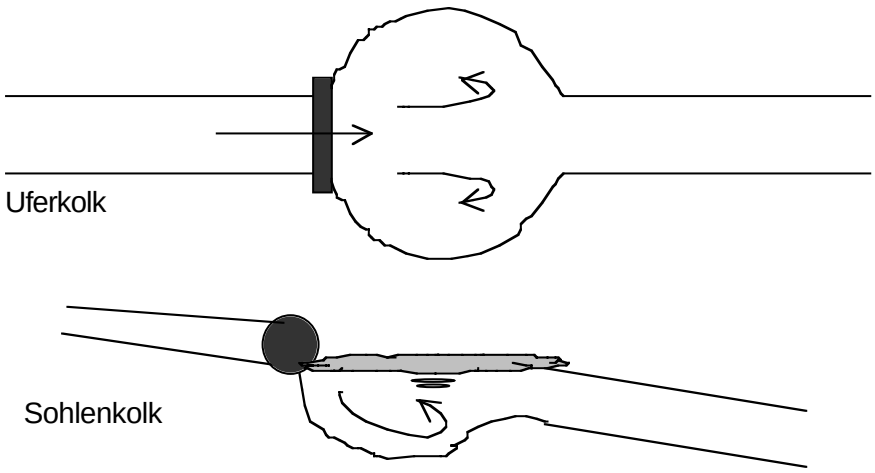


Abb. IV.4 Die Ausbildung von Kolken im Unterwasser von Schwellen

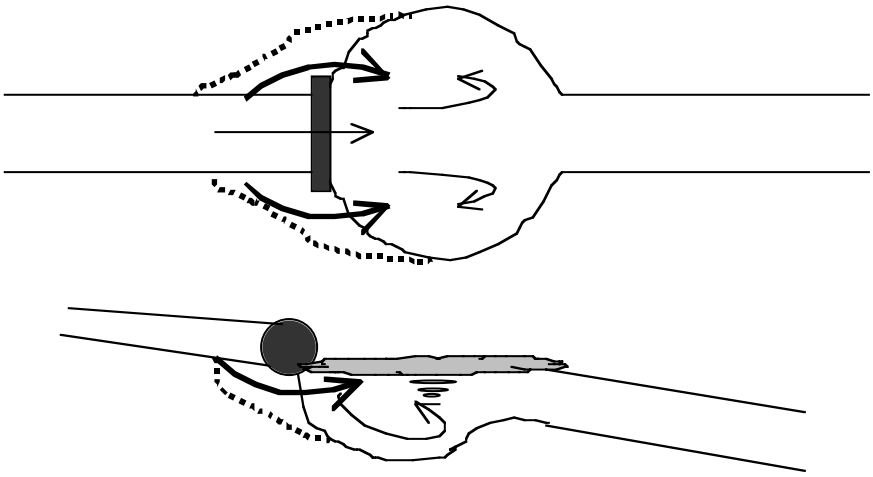


Abb. IV.5 Umspülte Schwellen

IV.5 Bepflanzung von Dämmen

Stark umstritten ist die Bepflanzung von Hochwasserschutzdämmen, insbesondere mit Gehölzen. Von technischer Seite wird eine Auflockerung des Dammaterials befürchtet. Gänge abgestorbener Wurzeln können bevorzugte Sickerwege darstellen. Insbesondere wird befürchtet, dass die Wurzeln die Dichtungsschicht der Dämme schädigen und so Dammbrüche herbeirufen können.

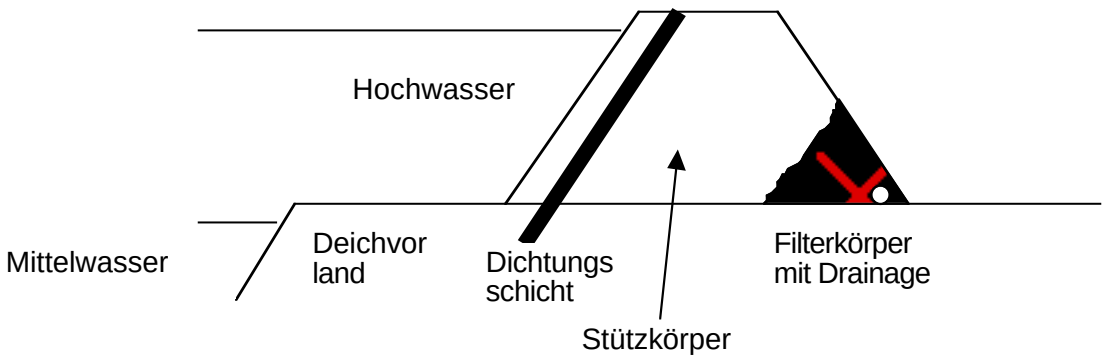


Abb. IV.6 Idealer Dammquerschnitt

Tatsächliche Wurzelausgrabungen (Hähne 1999)[1] geben allerdings ein sehr differenziertes Bild. Solange die **Dichtungsschicht** den **technischen Anforderungen genügt** (hochverdichtete, stark tonhaltige Gesteinsmischung mit extrem tiefer Wasserdurchlässigkeit), bietet sie auch für **Pflanzenwurzeln** zu **ungünstige Lebensbedingungen** (Sauerstoffmangel, zu hoher Eindringwiderstand). So bildeten über funktionierenden Dichtungsschichten auch Gehölzarten extrem flache Wurzeln aus und drangen nicht in die Dichtung ein. An alten Dämmen reichten in Einzelfällen Wurzeln bis in die Dichtung hinein. Eine genauere Untersuchung des Dichtungsmaterials ergab jedoch, dass dieses bereits aufgrund seiner Körnung und Wasserdurchlässigkeit nicht den technischen Anforderungen genügte (Hähne 1999). Dennoch ist von einer Bepflanzung der Dammböschungen mit Bäumen (insbesondere auf der Wasserseite) abzusehen, da diese aufgrund ihres allgemein flachen Wurzeltellers stark Windwurf gefährdet sind. Das Ausbrechen der Wurzelteller führt zu Schwachstellen im Damm, wo schliesslich der Bruch stattfinden kann. Mit Gebüscharten, die regelmässig auf den Stock geschnitten würden, liesse sich dieses Risiko vermeiden. Auch der Lebensraum der Wühltiere, die durch die Gehölze begünstigt werden, wird durch eine intakte Dichtungsschicht nachhaltig eingeschränkt.

[1] Hähne, K., 1999: Wurzeluntersuchungen an einem neuen Damm und zwei alten Deichen der Donau bei Regensburg. Jahrbuch 4 der Gesellschaft Ingenieurbiologie e. V., Aachen: 233-290

Kap. V: Ingenieurbiologische Bauweisen

Nachstehend werden typische Beispiele ingenieurbiologischer Bauweisen aufgezeigt. Die Angaben entstammen folgender Quelle:

Zeh, H., 1993: Ingenieurbiologische Bauweisen. Eidg. Verkehrs- u. Energiewirtschaftsdep., Bundesamt f. Wasserwirtschaft, Studienbericht 4. 60 S.

Die Beispiele sind systematisch geordnet:

Erdbau

Erosionsschutz, Bodenfixierung

- Ansaat, Begrünung
- Flechtzaun
- Hangrost

Hangsicherung

- Vernagelung mit Steckhölzern
- Busch-, Hecken-, Heckenbuschlagen

Böschungsfussicherung

- Holzkästen, Holzgrünschwellen
- Blockwurf, Blocksatz
- Drahtschotterkörbe (Gabbions)

Wasserbau

Längswerke

- Uferfaschinen
- Holzkästen, Holzgrünschwellen
- Blocksatz, -wurf, Drahtschotterkörbe
- Lebende Buhnen

Querwerke

- Lebende Bürsten, Palisaden
- Holzschwellen
- Blockrampen

Ufersicherung

- Rasensaaten
- Rauhbäume
- Spreitlagen
- Faschinen
- Gewebewalzen
- Flechtwerke, Gitterbuschbau

Kap. VI: Bautechnische Details, Unterhalt, Kosten

VI.1 Allgemeine bautechnische Details

Zeit des Pflanzeneinbaus:
- Rasensaaten Frühling bis Herbst
- Gehölzpflanzung im laubfreien Zustand Frühling und Herbst (in Ausmahmefällen Pflanzen aus Kühlhaus bis Frühsommer)

Einbaurichtung der Steckhölzer:
- „Fussende“ im Boden
- „Kopfende“ über der Erde

Überdeckung der Stecklinge:
- Nur gut übererdete Pflanzenteile wurzeln an
- Vermutung: Eindeckung der „Fussenden“ fördert Anwuchserfolg bei Flechtzäunen, Spreitlagen, Faschinen

Schutz der einzubauenden Pflanzen vor Austrocknung:
- Höchstens „Tagesration“ ernten
- Wässerung oder Übererdung der Pflanzen auf Baustelle

Exakte Übergänge zwischen verschiedenen Bauweisen:
- Kontinuität im Abfluss, keine Wirbel
- Ufersicherung bei jeder Schwelle
- Böschungsfussicherung mind. 1 m tiefer als Böschungsgrund

Weitere Details:
- Schwerboden bei Holzkästen
- Drahtschotterkörbe an Wegrändern mit Holzleiste schützen
- Knoten in Holzkästen: Obere Rundhölzer einkerben

Verkrautung der Gewässer:
- Ursache: Überdüngung; Gegenmassnahme: Beschattung
- Unterhalt: Räumung Okt. - Feb. (Vorsicht Tiere!)

Wildverbiss:
- Im Gebirge z. T. hohe, stabile (teure!) Zäune unentberlich
- Köderpflanzen in Glücksfällen wirksam

Eignung einheimischer Gehölze:
Eine Liste über die Bedeutung und Verwendung heimischer Gehölzarten (nicht nur für ingenieurbiologische Zwecke) wurde von der WSL im Rahmen des Landesforstinventars (LFI) zusammengestellt und ist im Internet verfügbar (http://www.gehoelze.ch/verwendung_detail.pdf).

VI.2 Dauerhaftigkeit von Holz in Verbauungen

Der Befall mit Pilzen führt zur biologischen Zersetzung des Holzes (Fäule). Grundsätzlich setzt der Pilzbefall mit dem Schlagen des Holzes ein. Einige Arten besiedeln auch lebendes Holz. Die Pilzinfektion lässt sich praktisch nur durch Verschlechterung der Lebensbedingungen der Pilze eindämmen: Durch Sauerstoffentzug (dauernd wassergesättigtes Holz) oder durch Wassermangel (starke Austrocknung des Holzes). Letzteres ist in mitteleuropäischen Klimabereichen selten möglich. Wechselfeuchte Verhältnisse sowie der direkte Kontakt zwischen Holz und Erdreich begünstigen die Pilze. Zudem sind Verletzungen des Holzes bei der Bearbeitung unbedingt zu vermeiden, da sich dort bevorzugt Infektionsherde für Pilzerkrankungen bilden.

Weniger als 5 Jahre	Erle, Buche, Hagebuche, Birke, Ahorn, Weide
5 bis 10 Jahre	Fichte, Tanne, Esche, Ulme, Pappel
15 bis 25 Jahre	Lärche, Douglasie, Föhre
Mehr als 25 Jahre	Eibe

Tab. VI.1 Eckdaten zur Dauerhaftigkeit einheimischer Holzarten
(Quelle: Böll, A., W. Gerber, F. Graf, Ch. Rickli, 1999: Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Hrsg.: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. S. 20)

VI.3 Grundsätze für Unterhaltsarbeiten an Gewässern

Mähen von Bachböschungen
- Bei jedem Arbeitsgang ein Drittel der Fläche stehen lassen (Nahrung und Deckung für Tiere)
- Möglichst spät im Sommer beginnen (Versamung)
- Keine Schlegel- oder Saugmäher verwenden (lebensfeindlich für Kleinlebewesen)
- Mähgut abtransportieren (Vermeiden von Aufdüngung)

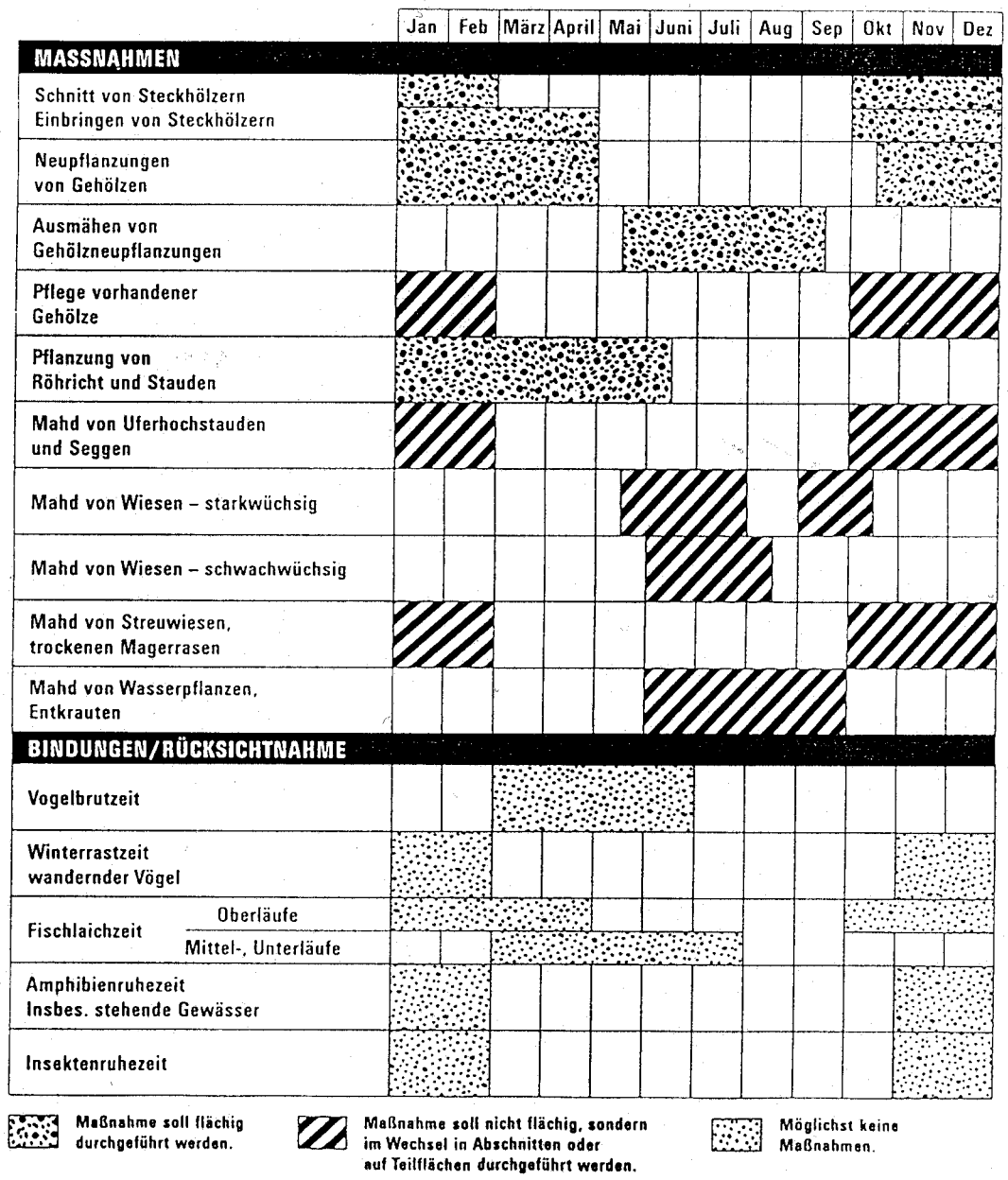
Durchforsten von Ufergehölzen
- Kein durchgehender Kahlschlag (Deckung, Lebensraum)
- Abschnittweise und über die Jahre gestaffelt durchforsten (Altersabstufung)
- Hochstämme nicht aufasten (Unterstände)
- Fallholz und Äste im Wasser nicht vollständig entfernen (Fischunterstände)
- Nur standortgerechte Arten fördern

Ausmähen von Wasserpflanzen
- Den Bach nie vollständig ausräumen (Deckung, Lebensraum für Tiere)
- Den Wasserpflanzenbewuchs abschnittweise stehenlassen
- Mit den Fischereibehörden Massnahmen vorbesprechen

Entfernen von Auflandungen und Leeren von Kiesfängen
- Wassertrübungen vermeiden
- Kiesfänge nicht vollständig ausräumen (Lebensraum von Larven usw.)
- Auflandungen abschnittweise und zeitlich gestaffelt entfernen
- Fischereischonzeiten beachten
- Mit den Fischereibehörden Massnahmen vorbesprechen

Orientierungsrahmen für Arbeiten am und im Gewässer

Der Zeitplan von Pflege- und Unterhaltungsmaßnahmen ist auf die verschiedenen Anforderungen von Wasserwirtschaft und Ökologie abzustimmen.



Quelle: Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), 1993: Handbuch Wasserbau. Naturgemässe Bauweisen. Ufer- und Böschungssicherungen. Heft 5. S. 24

VI.4 Kostenfaktoren bei ingenieurbiologischen Bauwerken

Allgemeine Kostenfaktoren
- Landerwerb
- Planung, Projektierung, Bauleitung
- Baustelleneinrichtung (Erdarbeiten, Gewässerumleitungen)
- Einzelbauwerke (Sohlenstufen, Erdanker, Brücken etc.)
- Pflegekosten (mind. 2 Jahre)
- Entschädigungen (z. B. Flurschäden)

Kostenfaktoren einzelner Bauweisen
- Materialgewinnung (Kauf, Arbeitseinsatz für Ernte)
- Materialtransport
- Einbaukosten

Anhaltspunkte für Preise ingenieurbiologischer Bauweisen
- Siehe Tabelle auf der folgenden Seite

1.	**Bauweisen mit Gräsern und Kräutern**				
1.1	Normalsaat	m²	0.70	bis	1.50 Fr.
1.2	Mulchsaat	m²	3.–	bis	5.– Fr.
1.3	Heublumensaat	m²	5.–	bis	8.– Fr.
1.4	Anspritzsaat	m²	1.50	bis	3.– Fr.
1.5	Schotterrasen, nur Saat	m²	1.–	bis	3.– Fr.
1.6	Rasenverlegung, mit Lieferung	m²	20.–	bis	40.– Fr.
1.7	Transplantation, Röhrichtballen	Stk.	5.–	bis	20.– Fr.
1.8	Krautige Pflanzung	Stk.	10.–	bis	15.– Fr.
1.9	Schilfhalmpflanzung	m²	5.–	bis	8.– Fr.
1.10	Ballen- und Topfpflanzung	m²	10.–	bis	30.– Fr.
2	**Bauweisen mit lebenden Gehölzen, inkl. Lieferung**				
2.1	Gehölzsaat	m²	10.–	bis	30.– Fr.
2.2	Steckhölzer, l = 30 bis 50 cm	Stk.	3.–	bis	5.– Fr.
2.3	Palisaden, Bürsten oder Kämme	Stk.	20.–	bis	200.– Fr.
2.4	Flechtzaun, h = 30 cm	m¹	50.–	bis	90.– Fr.
2.5	Spreitlage	m²	50.–	bis	150.– Fr.
2.6	Buschlage, l = 60 cm	m¹	10.–	bis	25.– Fr.
2.7	Heckenlage, 5 Stck./ ml	m¹	20.–	bis	40.– Fr.
2.8	Heckenbuschlage	m¹	15.–	bis	40.– Fr.
2.9	Cordonbau	m¹	10.–	bis	40.– Fr.
2.10	Hangfaschine, d = 30 cm	m¹	40.–	bis	60.– Fr.
2.11	Uferfaschine, d = 30 cm	m¹	30.–	bis	60.– Fr.
2.12	Weidenwippe, 2 Lagen	m¹	80.–	bis	120.– Fr.
2.13	Gitterbuschbau	m²	10.–	bis	30.– Fr.
2.14	Packwerk (Freiwillige), ohne Liefg.	m²	15.–	bis	25.– Fr.
2.15	Gehölzpflanzung	Stk.	2.–	bis	6.– Fr.
2.16	Pionierpflanzung	Stk.	1.–	bis	3.– Fr.
2.17	Riefenpflanzung, ohne Furchen	m¹	10.–	bis	20.– Fr.
2.18	Aufforstung	m²	5.–	bis	12.– Fr.
3	**Kombinierte Bauweisen, mit Material**				
3.1	Begrünte Steinschüttung	m²	120.–	bis	180.– Fr.
3.2	Begrünter Blockwurf / Satz	m²	150.–	bis	230.– Fr.
3.3	Begrünte Trockenmauer	m²	200.–	bis	300.– Fr.
3.4	Begrünte Betonfertigteile	m²	200.–	bis	400.– Fr.
3.5	Senkfaschine, d = 80 cm	m¹	100.–	bis	200.– Fr.
3.6	Buschbautraverse	m¹	30.–	bis	50.– Fr.
3.7	Runsenausbuschung, bis 3 m breit	m¹l	30.–	bis	50.– Fr.
3.8	Reisiglage	m²	3.–	bis	6.– Fr.
3.9	Rauhbaum	m¹	1.–	bis	10.– Fr.
3.10	Lebendbau-Buhnen, je nach Grösse		100.–	bis	3000.– Fr.
3.11	Lahnung	m¹			300.– Fr.
3.12	Holzgrünschwelle, 1 m hoch	m²	150.–	bis	300.– Fr.
3.13	Hangrost	m²	100.–	bis	300.– Fr.
3.14	Boden- und Felsvernagelung	m²	100.–	bis	200.– Fr.
3.15	Drahtnetz	m²	20.–	bis	30.– Fr.
3.16	Begrünte Drahtschotterkörper	m²	250.–	bis	320.– Fr.
3.17	Gitterschiechteln	m²	180.–	bis	200.– Fr.
3.18	Böschungsschutzmatte	m²	5.–	bis	15.– Fr.
3.19	Geotextilwalzen	m²	150.–	bis	280.– Fr.
3.20	Geotextiluferfaschine, d = 50 cm	m¹	80.–	bis	120.– Fr.
3.21	Vegetationswalze	m¹	50.–	bis	70.– Fr.

Quelle: H. Zeh, 1997: Bemessung und Kosten ingenieurbiologischer Baumethoden an Fliessgewässern und Hängen (Baumassnahmen ausgeführt von Firmen in der Schweiz). Mitt.bl. Verein f. Ing.biologie 3/97, S. 25

Anhang: Zitierte und weitergehende Literatur