

# Organismen im Lebendverbau: Voraussetzungen und Funktionen



Frank Graf  
Erd- und Felsbewegungen  
Bereich Naturgefahren, WSL

## 1. Einleitung

Die Stabilisierung und Renaturierung erosions- und rutschgefährdeter Gebiete ist insbesondere im Hinblick auf den Schutz vor Naturereignissen von äusserster Wichtigkeit (Florineth 1995). Neben technischen Massnahmen, welche häufig unumgänglich sind (Böll et al. 1999), spielt die Wiederherstellung einer standortgerechten Vegetationsdecke eine entscheidende Rolle für entwicklungsfähige und langfristig stabile Natursysteme. Das Etablieren einer funktionstüchtigen Pflanzendecke wird jedoch durch die problematischen Boden- sowie Wasser- und Nährstoffverhältnisse auf Erosions- und Rutschflächen stark erschwert (Bunza 1984, Mosimann 1983). Unter solch widrigen Bedingungen können sich selbst Pioniergehölze wie Weiden und Erlen, welche im Lebendverbau bevorzugt eingesetzt werden, kaum durchsetzen. Damit Pflanzen überhaupt gedeihen können, ist ein funktionstüchtiges Keimbeet essentiell. Ein solches wiederum setzt ein gewisses Mass an pedologischer Entwicklung voraus. Erst ein intaktes Keimbeet kann die Verankerungsfunktion der Wurzeln sowie die Wasser- und Nährstoffversorgung garantieren. An extremen Standorten resultiert somit eine Diskrepanz zwischen den Anforderungen der Pflanzen an das Substrat und der aktuellen Situation zum Zeitpunkt des ingenieurbiologischen Eingriffes. Neu entstandene, oberflächennahe Bereiche rezenter Rutschungen, stark erosiver Böden sowie neu angelegter geschütteter Böschungen entsprechen im Sinne der klassischen Pedologie dem "Zeitpunkt Null" für die Entwicklung des Bodens (Hartge 1985) und dessen Lebewelt. Als logische Konsequenz muss also ein Hauptanliegen des Lebendverbaus die Entwicklung der Bodenmatrix und deren Stabilisierung sein sowie die Akkumulation von Wasser und Nährstoffen. Naturgemäss liegt die Verantwortung dafür grösstenteils bei den Bodenmikroorganismen, insbesondere bei Bakterien und Pilzen, welche als Baumeister stabiler Bodenaggregate die Bodenstruktur mitentwickeln und gleichzeitig wichtige Prozesse im Wasser- und Nährstoffkreislauf steuern. Für den Lebendverbau bilden diese versteckten Winzlinge sozusagen Voraussetzung und Lebensversicherung

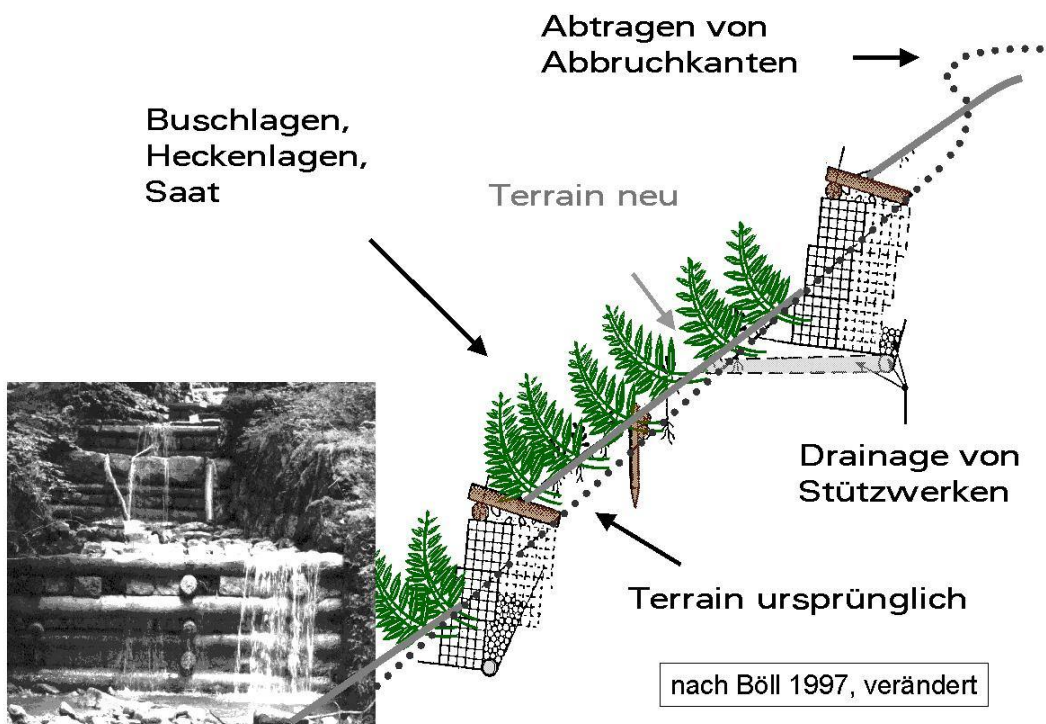
zugleich (Lynch & Bragg 1985, Miller & Jastrow 1990). Innerhalb der enormen Vielfalt an bodenbildenden Mikroorganismen spielen die Mykorrhizapilze eine Schlüsselrolle (Graf & Gerber 1997). Als symbiotische Partner fast aller Pflanzen übernehmen sie essentielle Funktionen, sowohl in Bezug auf die Pflanzenernährung als auch im Bereiche der Bodenentwicklung (Miller & Jastrow 1992, Smith & Read 1997, Tisdall et al. 1997). Sie sind somit Bindeglieder zwischen Boden und Pflanzen und massgeblich an der Entwicklung beider beteiligt. Ein intaktes „Mykorrhizafundament“ gehört deshalb zur Voraussetzung für langfristig erfolgreiche Ingenieurbiologie (Graf 1998).

## 2. Rutschungsmechanismen und Massnahmen

Rutschungen an Hängen und Böschungen können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Anthropogene Eingriffe in natürliche Bodensysteme spielen dabei eine wesentliche Rolle. Grossflächige Rodungen, Änderung oder Intensivierung der Bewirtschaftungsform sowie Hoch- und Tiefbauaktivitäten können die Stabilität eines Hanges oder einer Böschung massgeblich reduzieren. Andererseits kann es auch ohne offensichtlichen äusseren Anlass zu Rutschungen kommen, in Gebieten, welche während vieler Jahre stabil waren. Solche Ereignisse sind entweder auf ein zeitweiliges Anwachsen des Porenwasserdruckes zurückzuführen oder auf eine kontinuierlich fortschreitende Verminderung der Bodenfestigkeit (Böll 1997). Im letzteren Fall sind Erosions-Rutschvorgänge von besonderer Bedeutung. Die Prozesse der Erosion lassen sich grob in zwei Schritte unterteilen. Im ersten werden die Bodenaggregate durch die kinetische Energie der Regentropfen zerschlagen. Es bildet sich hierdurch transportierbares Feinmaterial, das im zweiten Schritt mit dem Oberflächenwasser zusammen mit bereits vorhandenem Lockermaterial hangabwärts fliesst. Dabei kann das strömende Wasser weitere Teilchen abscheren. Los-

gelöste Ton- und Silteilchen können zudem die Poren in den obersten Millimetern des Bodens verstopfen. Diese Versiegelung senkt die Infiltrationsrate und erhöht den Oberflächenabfluss, was dessen Erosionskraft zusätzlich fördert. Im Laufe der Zeit (Jahre, Jahrzehnte) nimmt so die Festigkeit des Bodens von der Oberfläche her kontinuierlich ab. Nachfolgend auftretende Bodenbewegungen (Abgleiten oberflächennaher Schichten), legen neue Partien hoher Festigkeit frei, welche dann wiederum den Einflüssen von Verwitterung und Erosion ausgesetzt werden. Solche Mechanismen spielen sich häufig in an sich standfesten, nichtbindigen Böden ab und die angesprochenen Prozesse schreiten fort, bis sich eine Neigung eingestellt hat, welche der neuen Festigkeit entspricht (Böll 1997). Erosions- und Verwitterungsprozesse im Oberflächenbereich spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung und Entwicklung von Rutschhängen und Runsen. Der Oberflächenschutz ist entsprechend ein äusserst wichtiger Bestandteil der Stabilisierungsmassnahmen. Ein vordringliches Ziel besteht deshalb in der dauerhaften Wiederbepflanzung kahler Erosionsflächen. Dafür stehen verschiedene Methoden des Lebendverbau zur Verfügung, welche je nach Schadenereignis, Geländeform und Pflanzenwahl zum Einsatz kommen (Morgan & Rickson 1995, Schiechl 1973). Die wohl am häufigsten angewendeten Ver-

baustypen sind der Buschlagenbau, bei dem nur ausschlagfähige Gehölze (z.B. Weiden) verwendet werden und der Heckenbuschlagenbau, wo zusätzlich bewurzelte Arten (z.B. Erlen) eingesetzt werden. Alle technischen Massnahmen zur Stabilisierung (Hangfuss-Sicherung, Reduktion der Hangneigung, Entwässerungsmassnahmen, etc.) sind von Beginn weg auf die nachhaltige Wiederbestockung hin auszurichten und haben der Verbesserung der Standortbedingungen zu dienen (Abb. 1). Die Schutzwirkung der Pflanzen wird erst möglich, wenn während der Etablierungsphase der Vegetation, insbesondere der Ausbildung des Wurzelwerkes, keine (oder nur geringe) Bodenbewegungen stattfinden sowie die Beanspruchung durch Wasser, Geschiebe, Steinschlag oder Schnee gering ist (Böll 1997). Die technischen Massnahmen bilden bei der Stabilisierung von Rutschhängen und Runsen oft die Voraussetzung zur erfolgreichen Wiederbepflanzung. Der ausserordentlich wichtige und dauerhafte Oberflächenschutz ist jedoch den Pflanzen vorbehalten. Zudem ist die Wirkungsweise der Bauwerke punktweise oder linear und zeitlich begrenzt. Für eine langfristige Stabilisierung ist deshalb eine intakte Vegetation mit entsprechend gut ausgebildetem Wurzelwerk entscheidend.

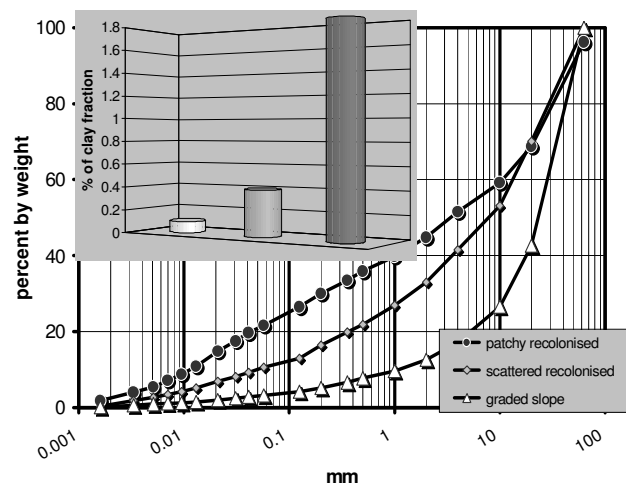


**Abbildung 1:** Verbauter Vorfluter zur Hangfuss-sicherung. Die Stützwerke im Hang dienen der Neigungsreduktion. Solche technischen Massnahmen zur Hangstabilisierung sind eine wichtige Voraussetzung für erfolgreichen Lebendverbau; beispielsweise mit Hecken- / Buschlagen (aus Böll 1997).

### 3. Der Boden nach Erosion und Rutschungen

Nach Erosions- und Rutschungsereignissen bleiben sehr einseitige Substratverhältnisse zurück, welche sich äusserst lebensfeindlich präsentieren (Cernusca 1984, Graf & Gerber 1997). Aufgrund der Zerstörung von Pflanzendecke und Oberboden sind die davon betroffenen Gebiete massiven Auswaschungsprozessen sowie fortschreitenden Bodenbewegungen ausgesetzt (Bunza 1984). Der erhöhte Wasserabfluss sowie zusätzliche Erosionsprozesse führen zu markanter Auswaschung von Sporen und Überdauerungsorganen der Mikroorganismen und somit zu weiteren Verlusten an Biomasse und insbesondere mikrobiellem Rekolonisierungspotential (Amaranthus & Trappe 1993, Kropp & Langlois 1990). Folglich fehlen die obligaten Symbiosepartner, insbesondere die Mykorrhizapilze, die für fast alle Pflanzen essentiell sind und ohne die sich in den meisten Fällen eine neue Vegetationsschicht nur spärlich und langsam entwickelt.

Die resultierenden neuen Bodenoberflächen weisen im Vergleich zum Ursprungsmaterial häufig eine höhere Dichte auf, da sie zuvor unter der Last der darüberliegenden Schichten lagen. Diese Situation ist im Zusammenhang mit Wurzelbildung und Pflanzenwachstum ein entscheidender Nachteil und verzögert die Etablierung einer Vegetationsdecke in beträchtlicher Masse (Böll & Gerber 1986). Zudem wird die Geschwindigkeit der Bodendurchlüftung verringert und somit die Zersetzung organischer Substanz gehemmt, was sich negativ auf die Nährstoffbilanz auswirkt (Moser et al. 1987). Neben der Durchwurzelbarkeit und Bodenbelüftung sind weitere für das Pflanzenwachstum wichtige Faktoren, wie Wasser- und Nährstoffangebot, entscheidend von der Körnung des Bodens abhängig. Der erhöhte Wasserabfluss und Materialabtransport bewirkt einen massiven Verlust der Sand- und Siltanteile sowie der Tonfraktion (Abb. 2). Die Folge ist eine Abnahme der Aggregatstabilität (Graf & Gerber 1997) und damit verbunden eine beträchtliche Reduktion der Rückhaltekapazität für Wasser und Nährstoffe (Mosimann 1983).



**Abbildung 2:** Korngrössenverteilungen einer Skipistenplanierung (2535 m) mit unterschiedlichem Grad an natürlicher Wiederbesiedlung (Daten aus Graf & Gerber 1997).

### 4. Pflanzen im Lebendverbau

Für die verschiedenen Anwendungen im Lebendverbau sind vorwiegend Pionierpflanzen gefragt, insbesondere ausschlagfähige Gehölze (Tab. 1). Dazu gehören beispielsweise viele Weidenarten (*Salix* spp.), Goldregen (*Laburnum anagyroides* Med., *L. alpinum* (Miller) Presl.) oder der Liguster (*Ligustrum vulgare* L.). Bei der Auswahl des Pflanzenmaterials gebührt den Standortverhältnissen der jeweiligen Baustelle grösste Aufmerksamkeit. Grundsätzlich sollte nur lebendes Material aus ökologisch gleichartigen Naturbeständen verwendet werden (Schiechl 1992).

Einige ingenieurbiologische Bauweisen blicken auf eine lange Tradition zurück und insbesondere im Uferverbau war man in früheren Jahren mit der fast ausschliesslichen Verwendung von lebendem Baumaterial häufig erfolgreicher als in der darauffolgenden Periode des Hartverbaus. Nach der Wiederentdeckung des Lebendverbaus, wurden einige Methoden modifiziert und weiterentwickelt. Die im Erdbau am häufigsten angewandte, weil am vielseitigsten und wirtschaftlichsten einsetzbare Methode ist der Buschlagenbau. Er wird entweder ausschliesslich mit ausschlagfähigen Weidenästen oder zusammen mit bewurzelten Gehölzen (z.B. Erlen) als sogenannte Heckenbuschlage gebaut. In diesen Bauwerken übernehmen die Pflanzen für die Stabilisie-

zung des Erdmaterials wichtige Funktionen. Sie vermindern die Aufprallenergie bei Niederschlägen und somit die Oberflächenerosion, fördern die Entwässerung, und festigen das Bodenmaterial durch ihre Wurzeln.

**Tabelle 1:** In der Ingenieurbiologie häufig verwendete Gehölze mit einigen Angaben zum Verwendungsbereich (Höhenstufen) und bezüglich ihrer Anwendung: vegetative Vermehrbarkeit (aus: Schiechl 1992); Symbioseformen : A = arbuskuläre Mykorrhiza, E = Ektomykorrhiza, N: Stickstoff-Fixation (aus: Graf & Gerber 1997).

	vegetative Vermehrbarkeit (%)	Symbiose Formen	Höhenstufe
<b>Salix</b>			
<i>daphnoides</i>	~100	A, E	montan
<i>purpurea</i>	~100	A, E	collin-subalpin
<i>fragilis</i>	95	E	collin
<i>pentandra</i>	90	E	subalpin
<i>viminalis</i>	90	A, E	collin-montan
<i>nigricans</i>	80	A, E	collin-subalpin
<i>alba</i>	75	E	collin-montan
<i>aurita</i>	75	E	collin-subalpin
<i>elaeagnos</i>	75	E	collin-montan
<i>cinerea</i>	70	A, E	collin-montan
<b>Populus</b>			
<i>nigra</i>	70-100	A, E	collin-montan
<b>Laburnum</b>			
<i>alpinum</i>	70-100	A, N	collin-montan
<i>anagyroides</i>	70	A, N	collin-montan
<b>Ligustrum</b>			
<i>vulgare</i>	70-100	A	collin
<b>Alnus</b>			
<i>glutinosa</i>	--	A, E, N	collin-montan
<i>incana</i>	--	A, E, N	collin-montan
<i>viridis</i>	--	A, E, N	subalpin

Das Wurzelsystem hat im Normalfall eine doppelte Funktion zu erfüllen. Es ist einerseits verantwortlich für die Verankerung im Boden und andererseits für die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen. Für beide Funktionen ist ein ausge dehntes Wurzelwerk von grosser Bedeutung, da einerseits ein grösseres Bodenvolumen stabilisiert werden kann und andererseits in diesem ein umfangreicheres Reservoir an Wasser und Nährstoffen zugänglich ist. Eine ausgewachsene Roggenpflanze beispielsweise besitzt in etwa eine Wurzeloberfläche, welche einem Quadrat von 20m Seitenlänge entspricht. Die Gesamtlänge dieses Systems beträgt etwa 10'000km. Mit Hilfe solcher ausgedehnter Wurzelsysteme vermögen Pflanzen dem Boden durch Transpiration beträchtliche Mengen an Wasser zu entziehen. Eine Sonnenblume beispielsweise vermag an einem

Sonntag leicht einen Liter Wasser zu verdunsten. Eine Birke mit etwa 200'000 Blättern kann 60-70 Liter, an besonders heissen und trockenen Tagen bis zu 400 Liter Wasser verdunsten. In einem Buchenwald wird ungefähr 60% der gesamten jährlich anfallenden Niederschlagsmenge durch Transpiration als Wasserdampf wieder an die Atmosphäre abgegeben (Sitte et al. 1991).

Bei lang anhaltenden intensiven Niederschlägen hat sich jedoch gezeigt, dass der Einfluss der Pflanzen auf den Wasserentzug im Boden periodisch ausgeschaltet werden kann. Die an sich günstige Wirkung der Vegetation kann in solchen Fällen nicht (oder nur kurzfristig) verhindern, dass sich eine kritische Situation des Grundwasserspiegels einstellt (Böll 1997, Borer 1982).

## 5. Mikrobielle Ingenieurbiologie

Mikroorganismen reagieren meist sehr schnell und empfindlich auf Veränderungen ihrer Umwelt. Die mit Erosion und Rutschungen einhergehende Zerstörung der Vegetationsdecke bedeutet eine drastische Reduktion an organischem Material und somit der Lebensgrundlage vieler Bodenorganismen. Durch den Ausfall der Pflanzen werden unter anderem die symbiotischen Bakterien und Pilze ihrer lebensnotwendigen Wirte beraubt, was zu einem zusätzlichen Verlust der mikrobiellen Artenvielfalt führt (Allen et al. 1987, Biondini et al. 1985). Diese Verarmung hat einschneidende Konsequenzen bezüglich den Erfolgsaussichten von Lebendverbaumassnahmen. Damit Pflanzen allgemein und insbesondere die ausgewählten Arten der Ingenieurbiologie überhaupt wachsen und sich längerfristig eine neue Vegetationsdecke etablieren kann, ist ein funktionstüchtiges Keimbeet notwendig. Zu dessen Minimalanforderungen gehören eine gewisse Stabilität der Bodenmatrix und Porenstruktur, genügend Wasser und Nährstoffe in verfügbarer Form, eine ausreichende Belüftung, sowie eine intakte Bodenlebewelt, sowohl faunistisch als auch floristisch. Die Ausgangssituation, wie sie sich nach Erosions- und Rutschungsprozessen präsentiert, entspricht jedoch bei weitem nicht einem funktionstüchtigen Keimbeet für Pflanzen. Vielmehr stellt sie im Sinne der klassischen Pedologie den „Zeitpunkt Null“ für die Entwick-

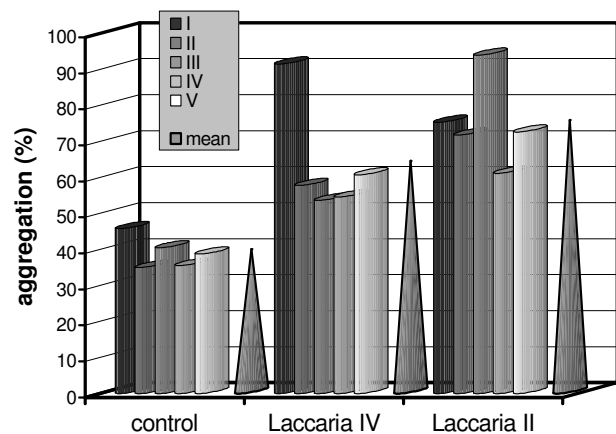
lung des Bodens und dessen Lebewelt dar (Hartge 1985, Insam & Haselwandter 1985). Bis sich aus diesem "Rohmaterial" natürlicherweise ein für Pflanzenwachstum geeigneter Boden entwickelt, können Jahrzehnte vergehen (Grabherr et al. 1978). Im Hinblick auf effiziente und erfolgreiche Ingenieurbiologie-Massnahmen sollte daher die Bodengenese sowie die bodenbiologische Entwicklung beschleunigt und so Rahmenbedingungen geschaffen werden, welche die langfristige Wiederbesiedlung mit (autochthonen) Pflanzen ermöglicht.

Entscheidende Voraussetzung für die Begründung eines solchen, sich selbst erhaltenden Ökosystems ist in erster Linie ein stabiler und organismenreicher Boden. Den Mikroorganismen kommt dabei eine entscheidende Rolle zu. Einerseits sind sie die Baumeister von Bodenaggregaten und mitverantwortlich für eine stabile Bodenmatrix und Porenstruktur (Lynch & Bragg 1985, Miller & Jastrow 1990). Andererseits übernehmen sie wichtige Funktionen im Nährstoffkreislauf (Marschner 1995, Smith & Read 1997).

Innerhalb der Mikroorganismen sind es neben Bakterien insbesondere die mycelbildenden Pilze, welche für die Bildung von Bodenaggregaten zuständig sind. Durch die grossräumige Ausbreitung der Hyphennetzwerke werden Feinanteile im Boden umgarnt und mechanisch stabilisiert (Oades 1990, Tisdall & Oades 1982). Zusätzlich werden von den Pilzen spezifische Stoffwechselprodukte (Exo-Polysaccharide) ausgeschieden, welche als Kittsubstanzen lose Bodenpartikel chemisch zusammenhalten. Dadurch erhöht sich die Stabilität der Bodenmatrix und somit jene der Sekundärporen (Lynch & Bragg 1985). Die Pilzhyphen dienen zudem anderen Mikroorganismen als Verbreitungsvektoren, und fördern so insbesondere die bakterielle Stabilisierung des Bodengefüges (Burns 1995). Die mikrobiellen Exo-Polysaccharide erhöhen durch den Einfluss auf die Aggregatstabilität auch die Wasserhaltekapazität im Boden. Zudem wird die "Aktivität" der Tonminerale gesteigert, was wiederum die Bodenplastizität und -stabilität fördert, und die Verfügbarkeit von Nährstoffen begünstigt (Chenu 1993, Dorioz et al. 1993).

Innerhalb der immensen Vielfalt an Bodenmikroorganismen nehmen die Mykorrhizapilze eine Sonderstellung ein. Fast alle Pflanzen leben unter natürlichen Bedingungen mit solchen Pilzpart-

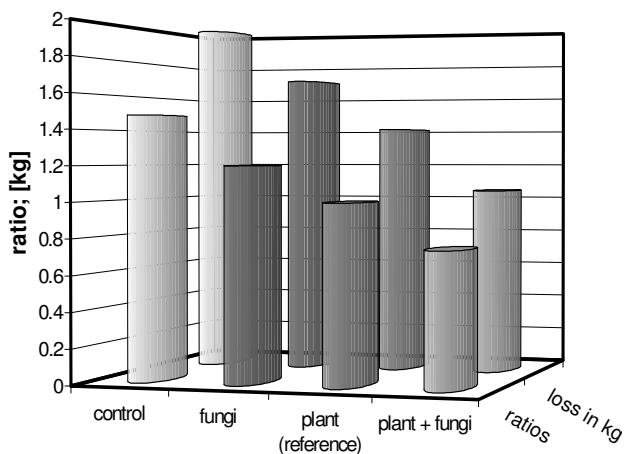
nern in Symbiose (Harley & Harley 1987). In dieser Lebensgemeinschaft übernimmt der Pilz unter anderem die Wasser- und Nährstoffversorgung der Wirtspflanze und erhält im Austausch, als C-heterotropher Organismus (Pilze können keine Photosynthese durchführen), von der Pflanze synthetisierte Zuckerverbindungen. Das Pilzmycel durchdringt den Boden viel intensiver als die Pflanzenwurzeln. Der Durchmesser der Pilzfäden (2-5  $\mu\text{m}$ ) ist verglichen mit jenen von Wurzelhaaren (15-20  $\mu\text{m}$ ) um ein Vielfaches geringer, was Pilzen teilweise auch den Zugriff auf die Wasser- und Nährstoffreserven in den Mittelporen (0.2-10  $\mu\text{m}$ ) erlaubt. Zudem wird die Absorptionsfläche mykorrhizierter Wurzeln durch die Pilzhyphen um bis zu fünfzigmal grösser als jene nicht mykorrhizierter Wurzeln (Janzen 1992). Neben den ernährungsphysiologischen Aspekten nehmen die Mykorrhizapilze weitere wichtige Aufgaben in den von ihnen besiedelten Ökosystemen wahr. So sind auch sie an der Bildung von Bodenaggregaten beteiligt (Graf & Gerber 1997, Tisdall et al. 1997) und erhöhen dadurch die Bodenstabilität und Erosionsbeständigkeit (Abb. 3).



**Abbildung 3:** Restkörper (in %) nach 24-stündiger Wassersättigung von unterschiedlich behandelten Bodenzylindern nach 3-monatiger Inkubationszeit (Daten aus Graf & Gerber 1997). control: unbehandelt; Laccaria IV: beimpft mit dem Mykorrhizapilz *Laccaria montana*; Laccaria II: beimpft mit dem Mykorrhizapilz *Laccaria bicolor*.

Wasser und Nährstoffe, welche sich in den von den Pilzhyphen mitgebildeten Aggregaten und Poren befinden, können den mykorrhizierten Wirtspflanzen direkt zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere auf wenig entwickelten, kargen Böden, ist dies von grosser Bedeutung.

Durch ihre Doppelfunktion als "Bodenbauer" und "Pflanzenernährer" üben die Mykorrhizapilze auch unmittelbaren Einfluss auf die Entwicklung von Pflanzengemeinschaften aus (Herrmann 1998, St. John & Coleman 1983). Resultate von Labor- und Feldversuchen mit Mykorrhizapilzen und ihren Wirtspflanzen bekräftigen die Wichtigkeit der Symbiosepilze sowohl im Hinblick auf Bodenbildung (Abb. 3, 4) als auch auf die Pflanzenetablierung (Graf 1998). Aggregationsversuche nach Graf und Gerber (1997) mit ausgewählten Mykorrhizapilzen zeigen beträchtliche Unterschiede zwischen den inokulierten und nicht behandelten Proben, wie auch zwischen den einzelnen Pilzarten (Abb. 3). Beregnungsexperimente unter Starkniederschlagsbedingungen (Graf & Gerber 1997) verdeutlichen zudem, dass mit Mykorrhizapilzen durchwachsene Erde erosionsstabiler ist als unbehandelte (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Materialverluste (hintere Reihe) von vier Monate alten Proben mit 350 kg Moränenerde verschiedener Behandlung (Vol: 150x75x15 cm) durch eine Beregnung mit einer Intensität von 90 mm/h während 90 min. bei einer Neigung von 40% (Daten aus Graf & Gerber 1997). Materialverlust-Verhältnis mit der Behandlung "plant" als Referenz 1 (vordere Reihe). control: unbehandelt; fungi: Erde mit Mykorrhizapilz; plant: Erde mit Pflanzen; plant + fungi: Erde mit Pflanze und Mykorrhizapilz.

Man kann vermuten, dass in einer ersten Phase für das Überleben der Pflanzen weniger die ernährungsphysiologischen Funktionen der Pilz-

partner eine Rolle spielen, sondern vielmehr deren Potential stabile Bodenaggregate zu formen. Dieses ist eine Voraussetzung, um Wasser- und Nährstoffe zu binden. Durch die Funktionen in der Bodenbildung und Pflanzenernährung sind Mykorrhizapilze prädestiniert, die Lücken zwischen den tatsächlich vorhandenen Bodenbedingungen und den effektiven Anforderungen der Pflanzen zu schliessen.

Zu den Grundpfeilern, welche von den Symbiosepilzen mitgebaut werden, gehören demnach die "Aktivierung" von Tonmineralen (Chenu 1993), die Bildung stabiler Aggregate und somit der Aufbau sowie die Festigung der Bodenmatrix und Porenstruktur (Tisdall & Oades 1982). Dies wiederum ermöglicht die Akkumulation von Wasser- und Nährstoffen. Innerhalb des Nährstoffkreislaufes unterstützen die Mykorrhizapilze die Mobilisierung schwerlöslicher Stoffe und übernehmen die Ernährung ihrer Wirtspflanzen (Smith & Read 1997). Zudem funktionieren sie einerseits als Verbreitungsvektoren weiterer Mikroorganismen und bilden andererseits die Nahrungsgrundlage verschiedenster Bodenorganismen, welche ihrerseits im Hinblick auf ein funktionstaugliches und sich selbst erhaltendes Ökosystem wichtige Aufgaben übernehmen (Lüftenerger et al. 1986). Ein solides "Mykorrhizafundament" ist demnach wichtige Voraussetzung nicht nur im Hinblick auf erfolgreichen Lebendverbau, sondern ganz allgemein für die Entwicklung dynamischer und stabiler Lebensgemeinschaften.

Da nach Erosions- und Rutschungsereignissen der natürliche Vorrat an Mykorrhizapilzen häufig stark reduziert ist (Biondini et al. 1985, Kropp & Langlois 1990), müssen bei Lebendverbaumassnahmen geeignete Symbiosepilze zugegeben werden. Wie bei den Pflanzen ist auch bei der Auswahl der Pilze darauf zu achten, dass nur standortgerechte Arten eingesetzt werden. Zusätzlich sollten die verwendeten Kulturen auf ihr Synthese- und Aggregationspotential untersucht werden (Graf & Gerber 1997). Nach diesen Kriterien ausgewählte Pflanze-Pilz-Gemeinschaften sind auf lange Sicht eine natürliche Alternative zu den heute üblicherweise eingesetzten Düngern und Substanzen für die Bodenstabilisierung.

## Literaturverzeichnis

- Allen, E.B., Chambers, J.C., Connor, K.F., Allen, M.F. & Brown, R.W. 1987. Natural reestablishment of mycorrhizae in disturbed alpine ecosystems. *Arctic and Alpine Research* 1: 11-20.
- Amaranthus, M.P. & Trappe, J.M. 1993. Effects of erosion on ecto- and VA-mycorrhizal inoculum potential of soil following forest fire in southwest Oregon. *Plant and Soil* 150: 41-49.
- Biondini, M.E., Bonham, C.D. & Redente, E.F. 1985. Secondary successional patterns in a sagebrush (*Artemisia tridentata*) community as they relate to soil disturbance and soil biological activity. *Vegetatio* 60: 25-36.
- Böll, A. 1997. Wildbach- und Hangverbau. Ber. Eidg. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch., 343: 1-123.
- Böll, A. & Gerber, W. 1986. Massgebende Gesichtspunkte im Lebendverbau. *Bündner Wald* 8: 43-50.
- Böll, A., Gerber, W., Graf, F. & Rickli, Ch. 1999. Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Birmensdorf, Eidg. Forsch.anst. WSL, 60 pp.
- Borer, F. 1982. Zum Wasserhaushalt einer dominierenden Douglasie in einem Waldbestand. *Mitt. Eidg. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.*, 58: 1-162.
- Bunza, G. 1984. Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in alpinen Grasland-Ökosystemen. *Verh. Ges. Ökologie, Bern*, XII: 101-109.
- Burns, R.G. 1995. Enumeration, survival, and beneficial activities of microorganisms introduced into soil. In: Huang, P.M., Berthelin, J., Bollag, J.-M., McCill, W.B. & Page, A.L. (Hrsg.): *Environmental impact of soil component interactions*, Vol. III. Lewis Publishers, London, 145-164.
- Cernusca, A. 1984. Ökologische Auswirkungen des Baues und Betriebes von Schipisten. *Internat. Symp. Interpraevent, Villach*, Band 3, 57-77.
- Chenu, C. 1993. Clay- or sand-polysaccharide associations as models for the interface between microorganisms and soil: water related properties and microstructure. *Geoderma* 56: 143-156.
- Dorizio, J.M., Robert, M. & Chenu, C. 1993. The role of root, fungi and bacteria on clay particle organisation. An experimental approach. *Geoderma* 56: 179-194.
- Florineth, F. 1995. Begrünung von Erosionszonen über der Waldgrenze in Südtirol. *Forstl. Schrift. Univ. Boku Wien* 9: 159-175.
- Grabherr, G., Mähr, E. & Reisigl, H. 1978. Nettoprimärproduktion und Reproduktion in einem Krummseggenrasen (*Caricetum curvulae*) der Ötztaler Alpen, Tirol. *Oecologia plantarum* 13: 227-251.
- Graf, F. 1998. Anforderungen an den Boden bei Renaturierungen oberhalb der Waldgrenze. *Ingenieurbiologie* 4: 12-18.
- Graf, F. & Gerber, W. 1997. Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur und deren Bedeutung für den Lebendverbau. *Schweiz. Z. Forstwes.* 11: 863-886.
- Harley, J.L. & Harley, E.L. 1987. A check-list of mycorrhizae in the British Flora. *New Phytol. (Suppl.)* 105: 1-102.
- Hartge, K.-H. 1985. Wechselbeziehung zwischen Pflanze und Boden bzw. Lockergestein unter besonderer Berücksichtigung der Standortverhältnisse auf neu entstandenen Böschungen. In: Boeminghaus, D., Limpert, K. & Pflug, W. (Hrsg.): *Wurzelwerk und Standortsicherheit von Böschungen und Hängen*. Sepia Verlag, Aachen, 23-34.
- Herrman, E. 1998. Die heimlichen Drahtzieher im Boden. *Tages Anzeiger* 11.9.1998.
- Insam, H. & Haselwandter, K. 1985. Die Wirkung verschiedener Begrünungsmassnahmen auf die mikrobielle Biomasse im Boden planierter Skipisten oberhalb der Waldgrenze. *Z. Vegetationst.* 8: 23-28.
- Jansen, A.E. 1992. Importance of ectomycorrhiza for forest ecosystems. In: Teller, A., Mathy, P., Jeffers, J.N.R. (Hrsg.): *Response of forest ecosystems to environmental changes*. Elsevier Applied Science, London, 456-461.
- Kropp, B.R. & Langlois, C.-G. 1990. Ectomycorrhizae in reforestation. *Can. J. For. Res.* 20: 438-451.
- Lüftenegger, G., Foissner, W. & Adam, H. 1986. Der Einfluss organischer und mineralischer Dünger auf die Bodenfauna einer planierten, begrünenden Schipiste oberhalb der Waldgrenze. *Z. Vegetationst.* 9: 149-153.
- Lynch, J.M. & Bragg, E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. In: Stewart, B.A. (Hrsg.): *Advances in soil science*, Vol. II. Springer Verlag, New York & Berlin, 133-169.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants* 2<sup>nd</sup> edn. Academic Press, London, 889 S.
- Miller, R.M. & Jastrow, J.D. 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biol. Biochem.* 5: 579-584.
- Miller, R.M. & Jastrow, J.D. 1992. The application of VA mycorrhizae to ecosystem restoration and reclamation. In: Allen, M.J. (Hrsg.): *Mycorrhizal functioning*. Chapman & Hall, New York & London, 438-467.
- Morgan, R.P.C. & Rickson, R.J. 1995. Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. *Spon, London*, 274 pp.
- Moser, M., Hofmann, J., Pfitscher, A., Ridl, W. & Wieser, R. 1987. Mikrobielle Parameter als Indikatoren für die anthropogene Beeinflussung alpiner Böden, besonders durch Massentourismus. *Veröff. Österr. MaB-Programm* 10: 257-279.
- Mosimann, T. 1983. Landschaftsökologischer Einfluss von Anlagen für den Massenskiport. *Mat. Physio-geogr.* 3: 1-72.
- Oades, J.M. 1990. Associations of colloids in soil aggregates. In: De Boodt, M.F., Hayes, M.H.B. & Herbillon, A. (Hrsg.): *Soil colloids and their associations in aggregates*. Plenum Press, New York, 463-483.
- Schiechtl, H.M. 1973. *Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau*. Callwey, München, 244 pp.
- Schiechtl, H.M. 1992. *Weiden in der Praxis*. Patzer Verlag, Berlin, 130 pp.
- Sitte, P., Ziegler, H., Ehrendorfer, F. & Bresinsky, A. 1991. *Strasburger Lehrbuch der Botanik* (33. Aufl.). Gustav Fischer, Stuttgart, 1031 pp.
- Smith, S.E. & Read, D.J. 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London, 600 pp.
- St. John, T.V. & Coleman, D.C. 1983. The role of mycorrhizae in plant ecology. *Can. J. Bot.* 61: 1005-1014.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Tisdall, J.M., Smith, S.E. & Rengasamy, P. 1997. Aggregation of soil by fungal hyphae. *Aust. J. Soil Res.* 35: 55-60.