

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 148 (1997)

Heft: 11

Artikel: Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur und deren Bedeutung für den Lebendverbau

Autor: Graf, Frank / Gerber, Werner

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-765493>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur und deren Bedeutung für den Lebendverbau

Von *Frank Graf* und *Werner Gerber*

Keywords: Soil bioengineering; mycorrhiza; soil structure; germ patch assembly.

FDK 114: 116: 181.3: 384

1. Einleitung

Der Lebendverbau oder, wie man heute zu sagen pflegt, die Ingenieurbio-logie, hat sich seit Mitte dieses Jahrhunderts als Verbautechnik immer stärker etablieren können. Zur Renaissance dieser über hundert Jahre alten «biologi-schen Verbaupradition» hat wohl in entscheidendem Masse *von Kruedeners* Werk aus dem Jahre 1951 beigetragen. Seither wurden insbesondere im Anwendungsbereich die Methoden und Techniken stetig weiterentwickelt. Entsprechend erschienen in regelmässigen Abständen Lehrbücher mit aktu-ellen Erkenntnissen, aber auch neuen Aspekten zum Handwerk des Lebend-verbaus (*Kirwald*, 1964; *Schiechtl*, 1973; *Begemann* und *Schiechtl*, 1986; *Mor-gan* und *Rickson*, 1995). Ausgangs des 20. Jahrhunderts prägen nun vor allem Bemessungsmodelle sowie Fragen des Natur- und Landschaftsschutzes die Ingenieurbio-logie.

Mit wachsendem Engagement wird im Zusammenhang mit Stabilität und Sicherheit versucht, die verschiedenen Verbauungstypen sowie deren Wir-kungen numerisch zu erfassen und Simulationsmodelle zu erstellen (*Wu*, 1984; 1995). Da es sich beim eigentlichen Baustoff um lebende Pflanzen handelt und das Fundament von einem sich entwickelnden Boden gebildet wird, sind die Verknüpfungen und Abläufe sehr komplex und dynamisch. Entsprechend schwierig ist es, für Modellierungszwecke geeignete und exakt definierbare Parameter zu finden. Damit dennoch Berechnungen durchführbar sind, wer-den unter anderem die Rahmenbedingungen der ingenieurbio-logischen Anwendung stark eingeschränkt und vereinfacht (*Schuppener*, 1994; *Hoff-*

mann, 1995). Gleichzeitig sind es aber gerade die Komplexität und die zu Grunde liegende Vielfalt und Dynamik, welche die entscheidende Basis für die natürliche Entwicklung von Lebensgemeinschaften bilden und somit im Zusammenhang mit Natur- und Landschaftsschutzdiskussionen von zentraler Bedeutung sind (*Leuzinger und Lachat, 1995; Hacker et al., 1996*).

Ungeachtet der differenzierten Ansätze bezüglich Systemparameter postulieren sowohl die «Modellierung» als auch der «Natur- und Landschaftsschutz» Keimung, Wachstum und Etablierung des verwendeten Pflanzenmaterials, ohne die dafür notwendigen bodenspezifischen Voraussetzungen angemessen zu berücksichtigen. Wie entscheidend diese bodenvorbereitenden Prozesse im Hinblick auf die Pflanzenentwicklung sind, hat jedoch schon *von Kruedener* (1950) in seinem Aufsatz «Der unterirdische Wald» angedeutet. Damit Pflanzen überhaupt gedeihen können, ist ein funktionstüchtiges Keimbeet essentiell, was ein gewisses Mass an pedologischer Entwicklung voraussetzt. Erst ein intaktes Keimbeet kann die Verankerungsfunktion der Wurzeln sowie die Wasser- und Nährstoffversorgung garantieren. An extremen Standorten resultiert somit nicht selten eine Diskrepanz zwischen den Anforderungen der Pflanzen an das Substrat und der aktuellen Situation zum Zeitpunkt des ingenieurbiologischen Eingriffes. Neuentstandene, oberflächennahe Bereiche rezenter Rutschungen, stark erosiver Böden sowie neuangelegter geschütteter Böschungen entsprechen im Sinne der klassischen Pedologie dem «Zeitpunkt Null» für die Entwicklung des Bodens (*Hartge, 1985*) und dessen Lebewelt. Bevor Pflanzenwachstum möglich wird, sind bodenbildende Vorgänge und der damit verbundene Aufbau eines intakten Nährstoffkreislaufes notwendig. Als eine logische Konsequenz muss also das Hauptanliegen des Lebendverbbaus zuerst darin bestehen, die Entwicklung einer Bodenmatrix sowie deren Stabilisierung zu fördern, damit ein funktionstüchtiges Keimbeet entstehen kann.

Die Verantwortung dafür liegt grösstenteils bei den Bodenmikroorganismen, welche als Baumeister stabiler Bodengrundlagen wirken und gleichzeitig wichtige Prozesse im Nährstoffkreislauf steuern. Für den Lebendverbau bilden diese versteckten Winzlinge sozusagen die Lebensversicherung (*Lynch und Bragg, 1985; Miller und Jastrow, 1990*), denn ohne deren Wirken sind Wachstum und Etablierung der Pflanzen langfristig nicht gewährleistet. Basierend auf geotechnischen Bodenanalysen und experimentellen Ansätzen bezüglich Bodenbildung und Erosionsverhalten werden nachfolgend Aggregation, Nährstoffakkumulation und Keimbeetentwicklung aus der Optik von Mikroorganismen und insbesondere der Mykorrhizapilze betrachtet.

2. Rahmenbedingungen am Renaturierungsstandort

Die physiologischen Möglichkeiten und die Konkurrenz anderer Lebewesen gestatten es den meisten Pflanzen, in der Natur nur unter ganz bestimm-

ten Umweltbedingungen zu gedeihen (*Landolt, 1977*). Die Einsatzgebiete für Pflanzen in der Ingenieurbiologie entsprechen häufig natürlichen Initialphasen von Sukzessionsreihen, welche unter anderem den Beginn der Besiedlung von Fels, Gesteinsschutt oder rezenter Gletschervorfelder markieren. Unter diesen Voraussetzungen spielen weniger Konkurrenzen innerhalb von Pflanzengemeinschaften eine Rolle als viel mehr die Bodenverhältnisse und insbesondere der pedologische Entwicklungsgrad, welche massgebend für Zeitpunkt und Erfolg pflanzlicher Besiedlung sind. Obwohl es sich bei den im Lebendverbau verwendeten Pflanzen grösstenteils um Pionierarten handelt, ist es ihnen kaum möglich, im pedologischen Sinne unentwickelte Böden längerfristig erfolgreich zu besiedeln. Analysiert man zum Beispiel die Zeigerwerte einiger in der Ingenieurbiologie häufig verwendeter Weidenarten (*Tabelle 1*), erkennt man unschwer, dass diese trotz Pioniercharakter bezüglich Nährstoffangebot (N), Humusanteil (H) und Bodenstruktur (D) gewisse Ansprüche stellen.

Die aktuellen Verhältnisse am Ort ingenieurbilogischer Eingriffe können je nach Intensität der vorausgegangenen Ereignisse oder je nach Art der bautechnischen Vorarbeiten mehr oder weniger stark von den pflanzlichen Minimalansprüchen abweichen. Solche neuentstandenen Oberflächen entsprechen demnach nicht einem für Pflanzenwachstum und -etablierung geeigneten Boden, sondern bilden lediglich das Rohmaterial für einen solchen.

Tabelle 1. Zeigerwerte bezüglich Nährstoffe (N), Humus (H) und Dispersität (D) nach *Landolt (1977)* sowie die Höhenverbreitungsstufen einiger in der Ingenieurbiologie verwendeter Gehölze.

	Nährstoffe (N)	Humus (H)	Dispersität (D)	Höhenstufe
<i>Salix</i>				
– <i>alba</i>	4	2	3	kollin
– <i>appendiculata</i>	3	4	5	montan-subalpin
– <i>aurita</i>	2	5	5	kollin-subalpin
– <i>cinerea</i>	2	4	5	kollin-montan
– <i>daphnoides</i>	2	2	3	montan
– <i>elaeagnos</i>	2	2	3	kollin-montan
– <i>fragilis</i>	3	4	4	kollin
– <i>hastata</i>	3	3	3	montan-subalpin
– <i>herbacea</i>	2	4	4	alpin
– <i>nigricans</i>	3	3	4	kollin-subalpin
– <i>pentandra</i>	3	4	3	subalpin
– <i>purpurea</i>	3	2	3	kollin-subalpin
– <i>viminialis</i>	3	3	4	kollin-montan
<i>Alnus</i>				
– <i>incana</i>	4	3	4	kollin-montan
– <i>glutinosa</i>	4	4	5	kollin-montan
– <i>viridis</i>	4	3	5	subalpin
<i>Ligustrum</i>				
– <i>vulgare</i>	2	3	4	kollin

2.1 Geotechnische Grundlagen

Für eine längerfristig erfolgreiche Bodenentwicklung muss also das Ausgangsmaterial gewisse Stabilitätsanforderungen erfüllen. So soll beispielsweise die Neigung der Oberfläche nicht höher sein, als es die oft zeitabhängige Böschungstabilität zulässt (Böll, 1997). Mit Hilfe geotechnischer Methoden können die Festigkeitseigenschaften respektive das Spannungs-Deformationsverhalten von Böden für verschiedene Klassen analysiert werden. Die Klassierung der Rohböden basiert auf der Korngrößenverteilung sowie den Plastizitätseigenschaften der Feinanteile (Korngrösse < 0,5 mm). Die Verteilung der Korngrößen wird mit Hilfe von Sieb- (> 1 mm) und Aräometeranalyse (< 1 mm) bestimmt. Aus den entsprechenden Resultaten wird ersichtlich, ob es sich beim untersuchten Rohboden um Kies, Sand, Silt oder Ton handelt (Tabelle 2). Auf Grund der Plastizitätseigenschaften der Feinanteile werden weitere Differenzierungen vorgenommen (Casagrande, 1947). Die Auswertung der Korngrößenanalyse – dargestellt als sogenannte Kornverteilungskurve – erlaubt eine erste Schätzung des Scherwinkels (Winkel der inneren Reibung), welcher zu einem grossen Teil die Scherfestigkeit des Bodens bestimmt (Lang und Huder, 1990). Zusätzlich wird dieser Stabilitätsparameter auch durch die Dichte des Bodenmaterials beeinflusst. Je dichter ein Boden gelagert ist, desto höher ist seine Scherfestigkeit.

In seinem natürlichen Zustand besitzt ein Bodenteilchen ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Masse. Mit diesen Angaben wird die sogenannte Feuchtdichte berechnet. Unter Berücksichtigung des Wassergehaltes lässt sich daraus die Trockendichte und, bei bekannter Dichte der Festsubstanz, die Porosität ermitteln (Tabelle 2). Rohböden mit einem hohen Anteil an groben Komponenten sind wenig porös und weisen entsprechend eine hohe Trockendichte auf. Derartiges Material bildet nicht selten das Ausgangssubstrat für den Lebendverbau. Neuentstandene Oberflächen, sei es durch Rutschungen oder Erosionsprozesse, weisen vergleichsweise eine höhere Dichte auf, da tiefere Bodenschichten, welche zuvor unter der Last des ursprünglichen Ober-

Tabelle 2. Charakteristische Kennziffern von Rohböden in ihrem natürlichen Zustand nach SNV 670010a (1993).

	<i>Kiese</i>	<i>Sande</i>	<i>Silte</i>	<i>Tone</i>
60–2 mm	40–70%	15–20%	1–3%	0–1%
2,0–0,06 mm	25–30%	40–75%	15–30%	15–20%
0,06–0,002 mm	2–20%	2–30%	60–65%	60–70%
<0,002 mm	0–10%	0–10%	5–15%	20–25%
Feuchtdichte	1,90–2,15 t/m ³	1,85–2,10 t/m ³	1,75–2,05 t/m ³	1,65–1,75 t/m ³
Wassergehalt	5–15%	10–20%	20–30%	40–60%
Porosität	28–32%	32–40%	35–45%	55–65%
Trockendichte	1,85–1,95 t/m ³	1,65–1,85 t/m ³	1,50–1,75 t/m ³	0,95–1,25 t/m ³
Scherwinkel	35–40°	30–38°	25–33°	22–27°

bodens lagen, die neue Oberfläche bilden. Ähnlich verhält es sich mit neuangelegten Böschungen (Hartge, 1985). Um deren Standfestigkeit zu erhöhen, wird die geschüttete Oberfläche künstlich verdichtet. Diese erhöhte Dichte erweist sich jedoch im Zusammenhang mit Wurzelbildung und -wachstum als massgeblicher Nachteil und wirkt sich negativ auf das Etablieren von Pflanzen aus (Böll und Gerber, 1986). Die einzelnen Bodenteilchen solcher Bodengefüge stehen zudem in einer weitgehend strukturlosen und labilen Lage zueinander, weil die Prozesse für den Aufbau einer stabilen Bodenmatrix nicht fortgeschritten genug sind oder mangels der dafür notwendigen Voraussetzungen gar nicht einsetzen können. Die entsprechenden Standorteigenschaften werden deshalb den Anforderungen der für Stabilisierungszwecke einzusetzenden Pflanzen nicht zwingend gerecht. Das Fehlen einer widerstandsfähigen Bodenstruktur vermindert nicht nur die Verankerungsmöglichkeiten der Wurzeln, sondern auch die Akkumulation von Nährstoffen, welche fortwährend Auswaschungsprozessen unterworfen sind. Somit fehlen für ein funktionelles Keimbeet zwei essentielle Voraussetzungen – Stabilität und Nährstoffe –, welche längerfristig erfolgreiches Pflanzenwachstum garantieren können.

2.2 Korngrößenverteilungen einer planierten Skipiste

Für die geotechnische Bodenanalyse einer alpinen Skipistenplanie wurden im Sommer 1996 vier Proben innerhalb eines gleichmässig geneigten Sektors (rund 1000 m²) der «Dorftälli-Piste» im Skigebiet Parsenn (Davos, GR) auf einer Höhe von 2535 m ü.M. entnommen. Die Vegetation über den jeweiligen Entnahmestellen (1 m²) wurde vorgängig nach *Braun-Blanquet* (1964) registriert (Tabelle 3). Auf Grund der Laboranalysen können alle vier Bodenpro-

Tabelle 3. Kenndaten der Bodenproben aus der «Dorftälli-Piste» (2535 m ü.M.) des Skigebietes Parsenn (Davos, GR).

	Probe A	Probe B	Probe C	Probe D
Entnahmetiefe	0–30 cm	0–10 cm *	0–20 cm	0–20 cm
Feuchtgewicht	15 kg	23 kg	16 kg	27 kg
Vegetation der Entnahmestelle (1 m ²)	keine	keine	punktuell	flächig
– Pflanzenarten	—	—	<i>Poa alpina</i> <i>Cerastium uniflorum</i> <i>Hutchinsia alpina</i>	<i>Juncus jacquinii</i> <i>Luzula spadicea</i> <i>Agrostis rupestris</i> <i>Poa alpina</i> <i>Salix herbacea</i> <i>Silene exscapa</i> <i>Veronica alpina</i>
– Deckungsgrad	—	—	1 (ca. 5%)	3 (ca. 30%)

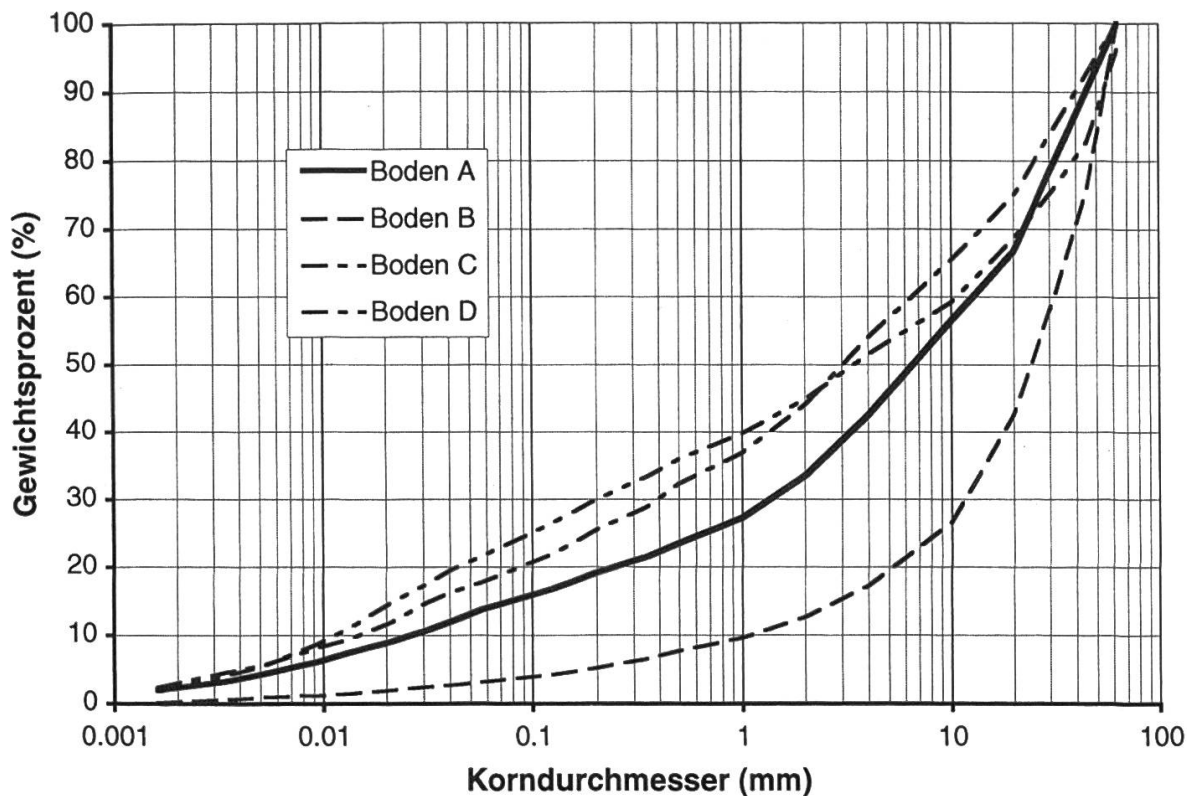


Abbildung 1. Korngrößenverteilung der vier Bodenproben (A, B, C, D) aus der «Dorftälli-Piste» (2535 m ü.M.) des Skigebietes Parsenn (Davos, GR).

ben als Kiese klassiert werden (Abbildung 1). Mit Ausnahme der Probe B, welche zu den sauberen Kiesen (GP) gezählt werden kann, entspricht der untersuchte Skipistenboden einem siltigen Kies (GM).

Gestützt auf zusätzliche Daten von Proben des gleichen Standortes vom Sommer 1995 (Gerber, unveröffentlicht) kann die Probe A als repräsentativ für den ganzen planierten Skipistenabschnitt bezeichnet werden. Setzt man die entsprechende Korngrößenverteilung dem Ausgangszustand der Bodensituation nach Planierungsarbeiten gleich, lassen sich Entwicklungstendenzen der Kornfraktionen im Zusammenhang mit der Vegetation aufzeigen (Abbildung 2, Tabelle 3). In Abbildung 2 sind die Massen der einzelnen Kornfraktionen der Proben B, C und D durch jene der Probe A (Referenz) dividiert und als Quotienten dargestellt. Die oberflächennahe Probe B weist einen drastischen Verlust an Feianteilen auf. Von den Fraktionen kleiner als 0,1 mm sind nur noch gerade 20% der Referenzmenge vorhanden, respektive 80% durch Erosions- und Auswaschungsprozesse verfrachtet worden. Betrachtet man den gesamten Bereich der Feinerde (< 2 mm), summiert sich der Abtrag immer noch auf 60%. Im Zusammenhang mit dieser erheblichen Degradation der Bodenstruktur des ohnehin für Pflanzenwachstum ungeeigneten Ausgangszustandes erstaunt es kaum, dass sich keine Vegetation entwickeln konnte.

Im Gegensatz dazu ist bei den Proben C und D eine beträchtliche Akkumulation feinkörniger Komponenten zu beobachten. In beiden Fällen ist eine

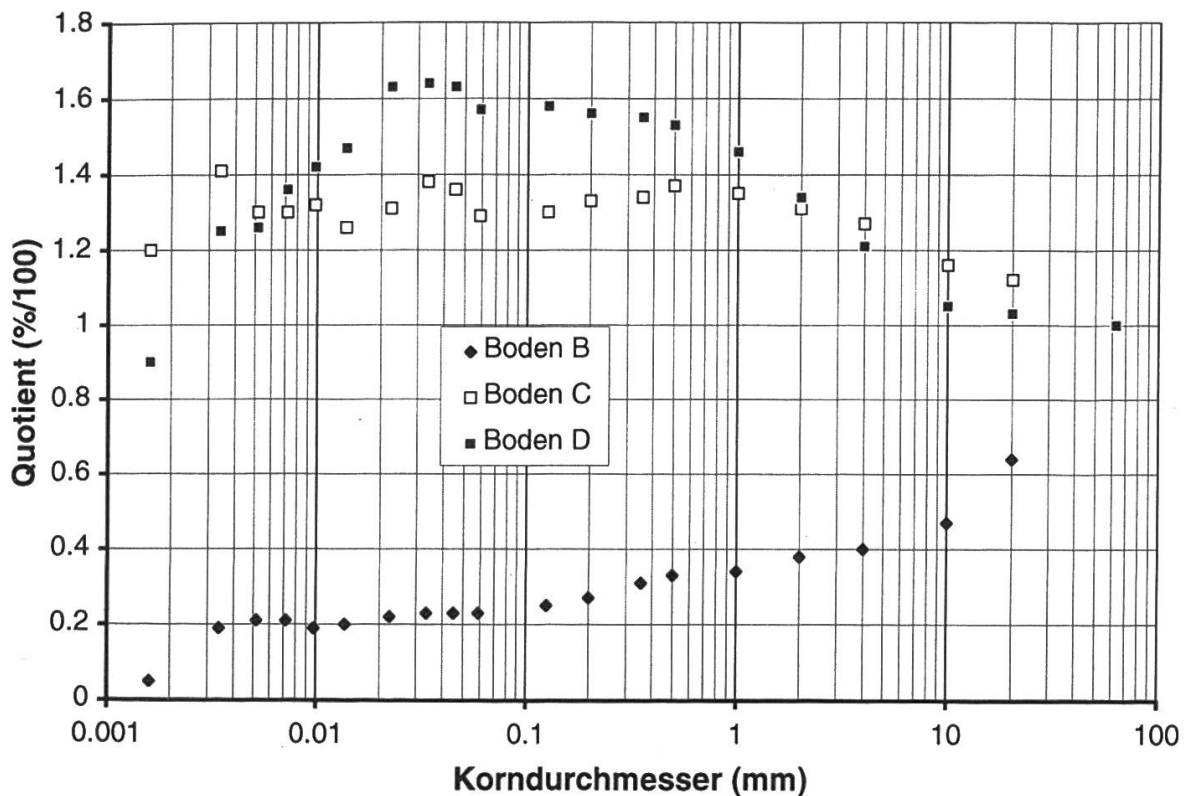


Abbildung 2. Vergleich der Korngrößen der vier Bodenproben (A, B, C, D) dargestellt als Quotienten der einzelnen Korndurchmesser, wobei die Probe A als Referenz dient (A/A , B/A , C/A , D/A).

Zunahme der Feinerde von über 30% festzustellen. In Probe D beläuft sich die Anhäufung im Bereich der Kornfraktion 0,1mm sogar auf 60%. Erosion und Auswaschung sind also unter diesen Bedingungen stark reduziert, was eine Erhöhung der Rückhaltekapazität zur Folge hat. Entsprechend ist an beiden Probeentnahmestellen eine Vegetation ausgebildet. Im Bereich der Probe C handelt es sich um eine noch sehr punktuelle Ansammlung einzelner Individuen von *Poa alpina* L., *Cerastium uniflorum* Clariv. und *Hutchinsia alpina* (L.) R. Br. mit einem Deckungsgrad von 1. Die Vegetation über der Probe D kann mit einem Deckungsgrad von 3 als teilweise deckend eingestuft werden. Neben einem kleinen Teppich von *Salix herbacea* L., der den Hauptanteil ausmacht, sind weitere Vertreter: *Juncus jacquinii* L., *Luzula spadicea* (All.) DC., *Agrostis rupestris* All., *Poa alpina* L., *Silene exscapa* All. und *Veronica alpina* L. (Tabelle 3).

3. Ansprüche erfolgreichen Pflanzenwachstums

Für eine erfolgreiche Vegetationsentwicklung im Rahmen von ingenieurb biologischen Massnahmen zur Stabilitätserhöhung und zum Schutz vor Erosion fehlen demnach gewisse Entwicklungsschritte, welche die initialen und strukturlosen Bodenverhältnisse in ein für Pflanzenwachstum und -etablie-

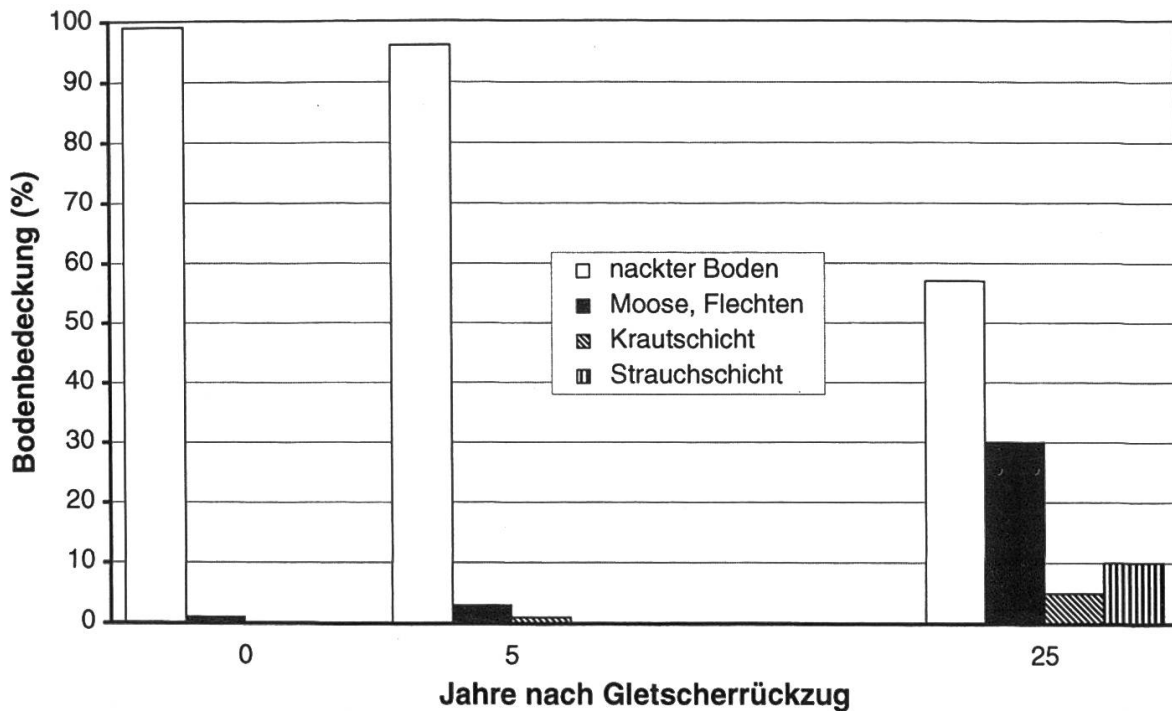


Abbildung 3. Chronologische Änderung der Bodenbedeckung durch die Besiedlung eines rezenten Gletschervorfeldes (Daten aus Lüdi, 1958, verändert).

nung geeignetes Substrat überführen. Unter natürlichen Bedingungen und in Abhängigkeit von Standortparametern kann es, wie zum Beispiel Untersuchungen auf rezenten Gletschervorfeldern (Lüdi 1958, Ugolini 1968) verdeutlichen, Jahrzehnte dauern, bis sich erste Inseln von Pionierpflanzen erfolgreich etablieren (Abbildung 3). In der Zeitspanne davor handelt es sich, bei den von Auge sichtbaren Einwanderern, vor allem um Flechten und Moose, deren Beitrag zur Bodenverbesserung nicht unwesentlich ist. Die wahren Baumeister funktionstüchtiger Keimbeete für Pflanzen sind jedoch die meist unsichtbaren Mikroorganismen; Bakterien und insbesondere Pilze sind an vielen im Boden ablaufenden Prozessen beteiligt und beeinflussen in entscheidendem Masse Intensität und Richtung der Bodenentwicklung und somit die Eigenschaften der Böden als Pflanzenstandort.

3.1 Entwicklung der Bodenstruktur

Ein funktionelles Keimbeet muss je nach den verwendeten Arten verschiedenen Ansprüchen genügen (Tabelle 1). In erster Linie wichtig sind in den meisten Fällen eine ausreichende Anzahl von Grobporen für eine effiziente Belüftung sowie ein angemessener Anteil von Mittelporen, um die Erhaltung des Wasser- und Nährstoffvorrates garantieren zu können. Entscheidende Voraussetzung dafür sind stabile Sekundärporen. Diese werden vor allem durch Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge sowie Bioturbation gebildet

und zeichnen sich, im Gegensatz zu den körnungsbedingten Primärporen, oft durch ausgeprägte Kontinuität und bedeutende Grösse aus (Scheffer und Schachtschabel, 1992). Das Sekundärporensystem bildet die Hohlformmatrix zu den Aggregaten und ist entsprechend von deren Art und Entwicklung abhängig.

Die Aggregatbildung ihrerseits ist in der Regel ebenfalls eine Folge der Bodenentwicklung. Im Wechselspiel von abbauenden (Verwitterung, Erosion) und aufbauenden (Aggregation) Prozessen entstehen verschiedenste Grundbausteine, welche für den Aufbau eines Keimbeetes weiterverwendet werden (Tisdall und Oades, 1982, Sollins *et al.*, 1996). Die Formen der Aggregate sind je nach Entstehungsart sehr verschieden, ebenso der Grad ihrer Ausbildung. Die Aggregation kann so ausgeprägt werden, dass geotechnisch betrachtet feinkörnige Böden die Eigenschaften grobkörniger annehmen, was insbesondere für die Dränung und Erodierbarkeit von Bedeutung ist.

Die Stabilität des Bodengefüges und damit vor allem jene der Sekundärporen wird durch verschiedene Stoffe mit verklebender Wirkung gefördert, wie zum Beispiel Aluminium- und Eisenoxide, CaCO_3 oder organische Substanzen. Letztere haben einen sehr starken Einfluss auf die Stabilität von Aggregaten, was sich meist in einem höheren C-Gehalt stabiler Teilchen widerspiegelt. Zwischenstufen beim mikrobiellen Abbau und als Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen auftretende Verbindungen haben teilweise die Eigenschaft, anorganische Teilchen zu verkleben.

3.2 Mikroorganismen als Baumeister des Keimbeetes

Neben den Bakterien sind es vor allem die mycelbildenden Pilze, welche für die Aggregation verantwortlich sind. Durch die grosse Ausbreitung der Hyphennetzwerke werden Mineralpartikel umgarnt und somit rein mechanisch stabilisiert. Zusätzlich fördern Pilze die chemische Zementierung, indem sie einerseits «Kittsubstanzen» (Polysaccharide, Polyuronide) ausscheiden und andererseits als Vektoren weiterer Mikroorganismen dienen, insbesondere für Bakterien, welche ihrerseits die Aggregatbildung und somit ein stabiles Bodengefüge fördern (Burns, 1995).

Die Bildung von Aggregaten und deren Stabilisierung dient nicht nur alleine der mechanischen Festigkeit, sondern ist gleichzeitig zwingende Voraussetzung für die Etablierung eines funktionellen Wasser- und Nährstoffkreislaufes. Wasser kann nur dann im Boden zurückgehalten werden, wenn die dazu notwendigen Poren vorhanden und stabil genug sind. Ähnlich verhält es sich mit den Nährstoffen. Damit diese nicht der fortlaufenden Auswaschung unterliegen, müssen sie in die Aggregate einer soliden Matrix eingebaut oder im Porenwasser der Hohlräume in gelöster Form gespeichert werden können. Nur so werden für das Pflanzenwachstum unentbehrliche Nährstoffreserven

angelegt. Die Mikroorganismen sind aber nicht nur für die Fixierung von Nährelementen zuständig. Schwerlösliche Stoffe werden teilweise überhaupt erst durch Bakterien und Pilze in eine pflanzenverfügbare Form umgewandelt (Elgala et al., 1995, Marschner, 1995).

Die Abhängigkeit der Pflanzen von Mikroorganismen beschränkt sich nicht nur auf eine indirekte wie im Falle des Aufbaues eines funktionstüchtigen Keimbeetes. Fast alle höheren Pflanzen, so auch die in der Ingenieurbiologie verwendeten Arten, leben natürlicherweise in Symbiose mit sogenannten Mykorrhizapilzen (Harley und Harley, 1987). In einigen Fällen, wie zum Beispiel bei den Leguminosen und Erlen, werden zusätzlich Gemeinschaften mit stickstofffixierenden Bakterien gebildet. Im Falle der Mykorrhiza sind die Pilzpartner in erster Linie für die Wasser- und Nährstoffversorgung ihrer Wirtspflanzen verantwortlich. Das Pilzmycel, das einerseits die Kurzwurzeln der Wirtspflanzen besiedelt, durchdringt andererseits mit unzähligen feinen Hyphen den Bodenkörper. Der Durchmesser dieser Pilzfäden (2–5 µm) ist verglichen mit jenen von Wurzelhaaren (15–20 µm) um ein Vielfaches kleiner, was Pilzen teilweise auch den Zugriff auf die Wasser- und Nährstoffreserven

Tabelle 4. Mykorrhizatypen (A = arbuskulär, E = Ektomykorrhiza) sowie Anzahl bekannter Pilzpartner (k.A. = keine Angaben) der häufigsten Weiden in der Schweiz (aus: Favre, 1955; Fontana, 1962; Trappe, 1962; Watling, 1981, 1992; Harley und Harley 1987; Dhillion, 1994; Graf, 1994 und unveröff.).

	Mykorrhizatyp	Arbuskuläre Pilzarten	Ektomykorrhiza- Pilzarten
<i>Salix</i>			
– <i>alba</i>	E	—	k.A.
– <i>appendiculata</i>	E	—	2
– <i>aurita</i>	E	—	19
– <i>bicolor</i>	A, E	4	5
– <i>breviserrata</i>	A, E	3	4
– <i>caprea</i>	A, E	k.A.	3
– <i>cinerea</i>	A, E	k.A.	13
– <i>daphnoides</i>	A, E	k.A.	1
– <i>elaeagnos</i>	E	—	1
– <i>fragilis</i>	E	—	k.A.
– <i>glauco-sericea</i>	A, E	4	4
– <i>hastata</i>	A, E	3	4
– <i>hegetschweileri</i>	A, E	k.A.	k.A.
– <i>helvetica</i>	E	—	k.A.
– <i>herbacea</i>	A, E	5	60
– <i>nigricans</i>	A, E	5	5
– <i>pentandra</i>	E	—	1
– <i>purpurea</i>	A, E	k.A.	2
– <i>repens</i>	A, E	k.A.	41
– <i>reticulata</i>	A, E	4	4
– <i>retusa</i>	E	—	k.A.
– <i>serpyllifolia</i>	E	—	k.A.
– <i>triandra</i>	E	—	k.A.
– <i>viminialis</i>	A, E	k.A.	k.A.
– <i>waldsteiniana</i>	A, E	k.A.	k.A.

in den Mittelporen (0,2–10 µm) erlaubt. Zudem ist die Absorptionsfläche mykorrhizierter Wurzeln um bis zu fünfzigmal grösser als jene nicht mykorrhizierter (*Jansen, 1992*). Ohne ihre relevanten Pilzpartner sind die Wirtspflanzen unter Konkurrenzbedingungen, wie sie in der Natur herrschen, deshalb auf lange Sicht nicht überlebensfähig.

Bis heute weiss man jedoch erst von wenigen Pflanzen einigermaßen Bescheid über die gegenseitigen spezifischen Beziehungen mit ihren Pilzpartnern. Insbesondere im Bereich der Pilzökologie und -soziologie ist die Mehrheit der mykorrhizierten Pflanzen noch unbearbeitet. Betrachtet man die in der Ingenieurbiologie häufig verwendeten Weiden, treten diese Wissenslücken offenkundig zutage (*Tabelle 4*). Bei der Bepflanzung von extremen Standorten, wie dies im Zusammenhang mit Lebendverbau häufig der Fall ist, wären aber gerade solche Informationen von entscheidender Bedeutung. Im Gegensatz zu natürlichen (Wieder-)Besiedlungen kann man nämlich bei anthropogenen Renaturierungseingriffen nicht davon ausgehen, dass die Mykorrhizierung innerhalb nützlicher Frist spontan stattfindet (*Graf, 1997*).

4. Die Sonderstellung der Mykorrhiza

Der Aufbau und die Erhaltung eines funktionstüchtigen Keimbeetes ist eine unabdingbare Voraussetzung für den Erfolg im Lebendverbau. Innerhalb der grossen Vielfalt von Mikroorganismen, welche an den dafür verantwortlichen Prozessen beteiligt sind, nehmen die Mykorrhizapilze nicht nur für den Lebendverbau eine besondere Stellung ein. In einer ersten Phase beeinflussen sie die Bodenaggregation und gehören mit zum Kreis der wichtigen Baumeister von funktionellen Keimbeeten (*Tisdall und Oades, 1982; Miller und Jastrow, 1992*). In einem nächsten Schritt nehmen sie als Symbiosepartner von Pflanzen direkten Einfluss auf deren Wachstum und Etablierung und sind somit auch massgeblich an der strukturellen Entwicklung von ganzen Gemeinschaften beteiligt (*St. John und Coleman, 1983*). Die entscheidende Rolle spielen Mykorrhizapilze jedoch bei der Verknüpfung von Prozessen der Bodenaggregation und Nährstoffakkumulation mit jenen der Pflanzenernährung. Wie die Vielzahl anderer mycelbildenden Bodenpilze umgarnen sie mit ihren Pilzfäden kleinste Bodenpartikel und fügen diese zu stabilen Aggregaten zusammen, welche wiederum die Bausteine der Bodenmatrix und der entsprechenden Porenstruktur bilden. Die Nährstoffe, welche in diesen stabilen Gefügen gespeichert werden, stehen so mittels der Hyphennetzwerke den Wirtspflanzen direkt zur Verfügung. Während der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf Wachstum (*Abbildung 4*) und Überleben von Pflanzen seit langem bekannt und vielfach untersucht ist (*Grime et al., 1987; Marx, 1991*), sind bis heute verhältnismässig wenig Informationen zur Wirkung dieser Symbionten auf die Bodenstruktur erhältlich. Was die Ektomykorrhizapilze betrifft, welche im

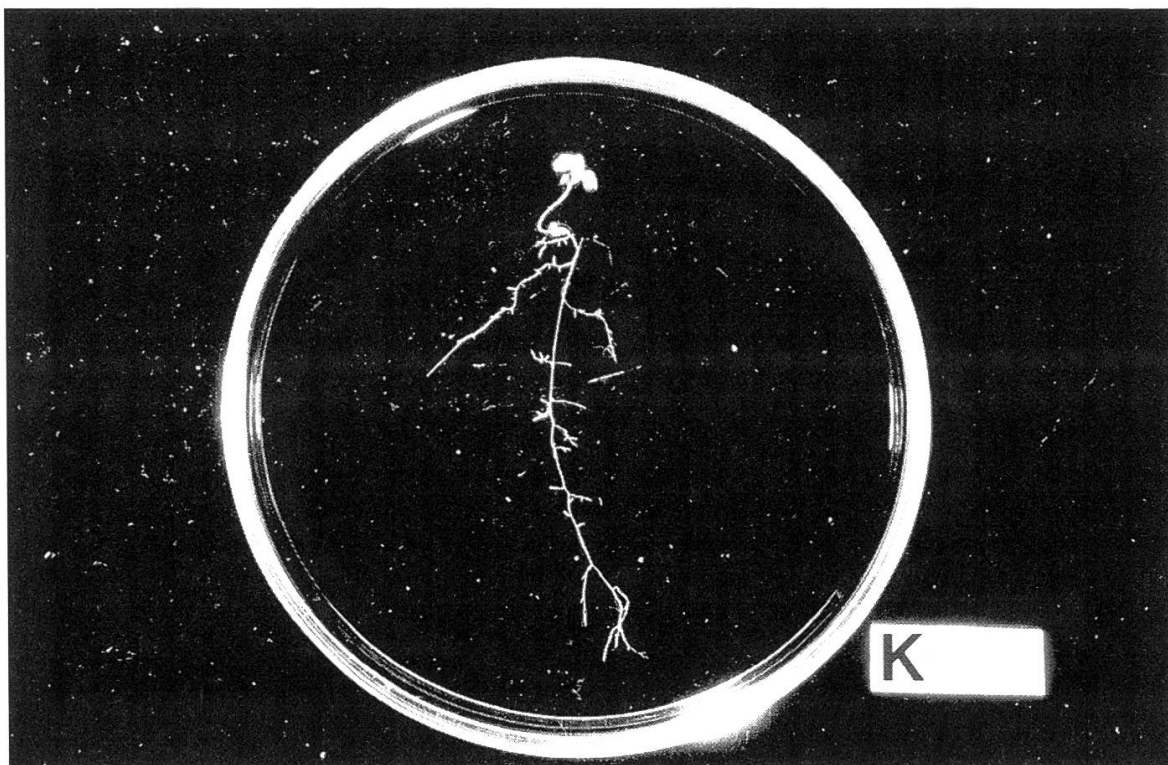
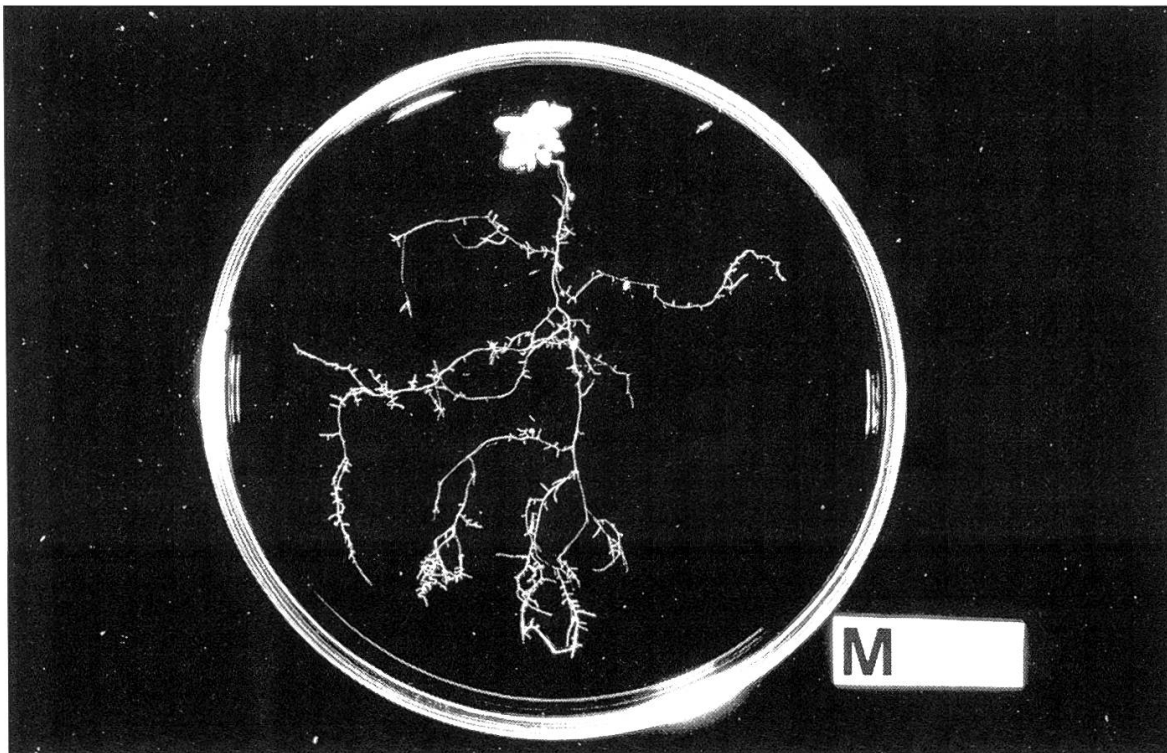


Abbildung 4. Unterschiede von oberirdischer Biomasse und Wurzelwachstum zwischen einer mit *Laccaria bicolor* mykorrhizierten (M) Silberwurzpflanze (*Dryas octopetala*) und einer nicht mykorrhizierten (K) Kontrollpflanze nach fünf Monaten Wachstum in Roottrainern im Gewächshaus (Graf, unveröff.).

Zusammenhang mit den meisten in der Ingenieurbiologie eingesetzten Gehölzpflanzen (Tabelle 4) von Bedeutung sind, weiss man bis heute noch sehr wenig.

4.1 Aggregationsvermögen von Ektomykorrhizapilzen

Im Zusammenhang mit alpinen Renaturierungsanstrengungen wurden an der WSL für *Laccaria bicolor* (Maire) P.D. Orton und *L. montana* Singer, zwei Ektomykorrhizapilzpartner der Krautweide (*Salix herbacea* L.), Aggregationstests durchgeführt. Künstliche Substratgemische aus 80 g Quarzsand (Durchmesser < 2 mm), 25 g Sirankügelchen (Koch und Flühler, 1993), 14 g Torf (Durchmesser < 1 mm) und 20 ml destilliertem Wasser wurden unter sterilen Bedingungen in Bechergläser (150 ml) gefüllt und mit 20 ml Flüssigkultur des entsprechenden Pilzes (Graf und Brunner, 1996) beimpft, respektive als Kontrolle mit 20 ml «modified Melin Norkrans» (MMN) Flüssignährmedium (Marx und Bryan, 1975) versehen. Der pH der Proben lag bei 5,5. Nach einer Inkubationszeit von drei Monaten bei Dunkelheit und 18°C wurden die Proben den Bechergläsern entnommen und in einem Wasserbad während 24 Stunden vollständig untergetaucht. Anschliessend wurden das abgebröckelte Feinmaterial und der stehengebliebene Restkörper getrennt bei 105°C

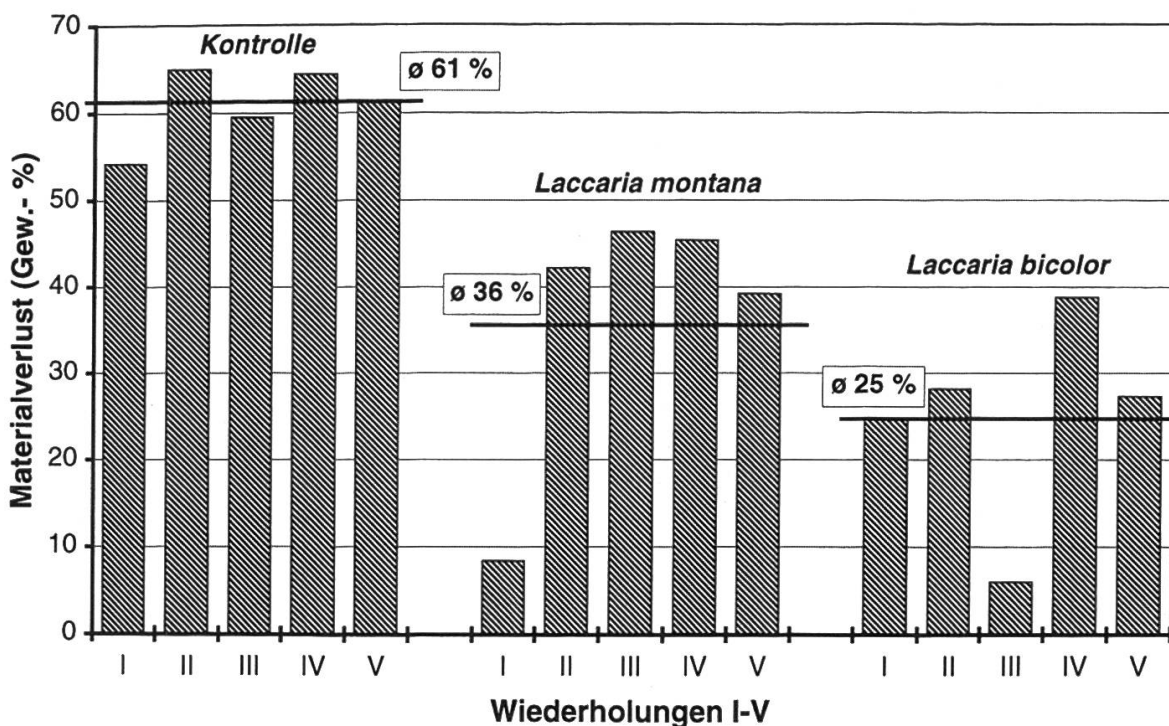


Abbildung 5. Unterschiedlicher Materialverlust von Körpern künstlicher Substratgemische durch Abbröckeln nach 24 h Wassersättigung von unbehandelten Kontrollen (ø 61% Gewichtsverlust des Ausgangskörpers) und beimpften Proben mit den Ektomykorrhizapilzen *Laccaria montana* (ø 36% Verlust) und *Laccaria bicolor* (ø 25% Verlust).

während 24 Stunden getrocknet und dann gewogen. Für jede Behandlung (Kontrolle, *L. montana*, *L. bicolor*) wurden fünf Wiederholungen durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Versuche (*Abbildung 5*) zeigen signifikante Unterschiede ($\alpha = 2,5\%$) zwischen den mit Pilzen beimpften Proben und der Kontrolle. Während der Materialverlust durch Abbröckeln der Kontrollen im Durchschnitt bei 61% des Gesamtgewichtes der Proben lag, konnte dieser mit der Beimpfung von *L. montana* auf 36%, mit jener von *L. bicolor* sogar auf 25% reduziert werden. Weniger deutlich (nicht signifikant), jedoch immer noch beachtlich, ist die durchschnittliche Differenz von 11% zwischen den beiden verwendeten Pilzarten. Der Unterschied bezüglich des Aggregationspotentials zwischen zwei sehr nahe verwandten Mykorrhizapilzen, die natürlicherweise mit der gleichen Wirtspflanze in Symbiose leben, bekräftigt die Annahme, dass verschiedene Pilzpartner unter verschiedenen Voraussetzungen zu verschiedenen Zeitpunkten verschiedene Funktionen ausüben (*Perry et al.*, 1987).

4.2 Erosionsverminderung durch Ektomykorrhizapilze

Der Aggregationseffekt des Mykorrhizapilzmycels wirkt sich nicht nur unter statischer Belastung von losen und sterilen Substratgemischen positiv auf die Festigkeit von Bodenkörpern aus. Beregnungsexperimente haben gezeigt, dass die Symbiosepilze auch in nicht sterilisierten Böden unter dynamischen Belastungen, wie zum Beispiel Starkniederschlägen, entscheidend zur Stabilität (Erosionsverminderung) beitragen. Für diesen Nachweis wurden 4 Kisten (150x75x15 cm) mit je 350 kg Moränenerde (*Beyer Portner*, 1997) mit einem Grösstkorn von 64 mm gefüllt. Eine Kiste wurde als Kontrolle so belassen, die zweite wurde mit 1000 ml Flüssigkultur des Ektomykorrhizapilzes *Laccaria bicolor* beimpft (*Graf und Brunner*, 1996), die dritte wurde mit 2,5 g Samen der Silberwurz (*Dryas octopetala* L.) bestückt und die vierte erhielt sowohl 1000 ml *L. bicolor*-Inoculum als auch 2,5 g Silberwurzsaamen. Die Kisten wurden in einer Klimakammer bei 20°C und 60% Luftfeuchtigkeit sowie einem Tag-Nacht-Rhythmus von 16 zu 8 Stunden gelagert. Wöchentlich wurden sie je einmal mit 3 l destilliertem Wasser begossen sowie einmal pro Monat mit je 3 l MMN-Flüssignährmedium. Nach einer Inkubationszeit von drei Monaten wurde die erste von drei Beregnungsserien auf dem Regensimulator der WSL durchgeführt (*Beyer Portner*, 1997). Die Kisten waren 40% geneigt und die Regenintensität betrug 90 mm/h. Auf eine 60minütige Regenperiode folgten 30 Minuten Pause mit anschliessend einer weiteren 30minütigen Regenperiode. Vor der zweiten und dritten Serie wurden die vier Kisten jeweils wieder für einen Monat bei oben beschriebenen Bedingungen gelagert.

Die Resultate der drei Beregnungsserien (*Abbildung 6*) zeigen eine deutliche Abnahme der Erosion in der Reihenfolge: Kontrolle > Pilzmycel > Pflanzen > Pilzmycel mit Pflanzen. Diese Unterschiede waren in allen drei Serien mehr oder weniger ausgeprägt. Betrachtet man die durchschnittliche Erosionsverminderung der drei behandelten Varianten im Vergleich zur Kontrolle (K), deren Materialverlust als 100% vorgegeben wird, ergibt sich für die Behandlung mit Pilzmycel (M) eine Reduktion um 19,7% ($\pm 5,3$), für jene mit Pflanzen (P) um 35,9% ($\pm 8,3$) und für jene mit Pilzmycel und Pflanzen (MP) um 49,3% ($\pm 1,8$). Werden die Materialverluste der drei Beregnungsserien für die einzelnen Kisten addiert, beträgt der Gesamtverlust für die Kontrolle 8,07 kg, für die Variante mit Pilzmycel 6,39 kg, für die mit Pflanzen 5,08 kg und für die Kombination von Pilzmycel mit Pflanzen (mykorrhiziert) 4,05 kg. Die entsprechenden Prozentzahlen für den gesamten Materialverlust bezüglich des Totalgewichtes der Proben (350 kg) sind 2,31% (K), 1,82% (M), 1,45% (P) und 1,16% (MP).

Schon drei Monate nach Ausbringen des Saatgutes respektive Beimpfung mit Ektomykorrhizamycel werden beträchtliche Erosionsvermindierungen erzielt. Die alleinige Zugabe von Mykorrhizamycel verminderte in diesem Versuch die Erosion um einen Fünftel, was wohl grösstenteils auf eine besse-

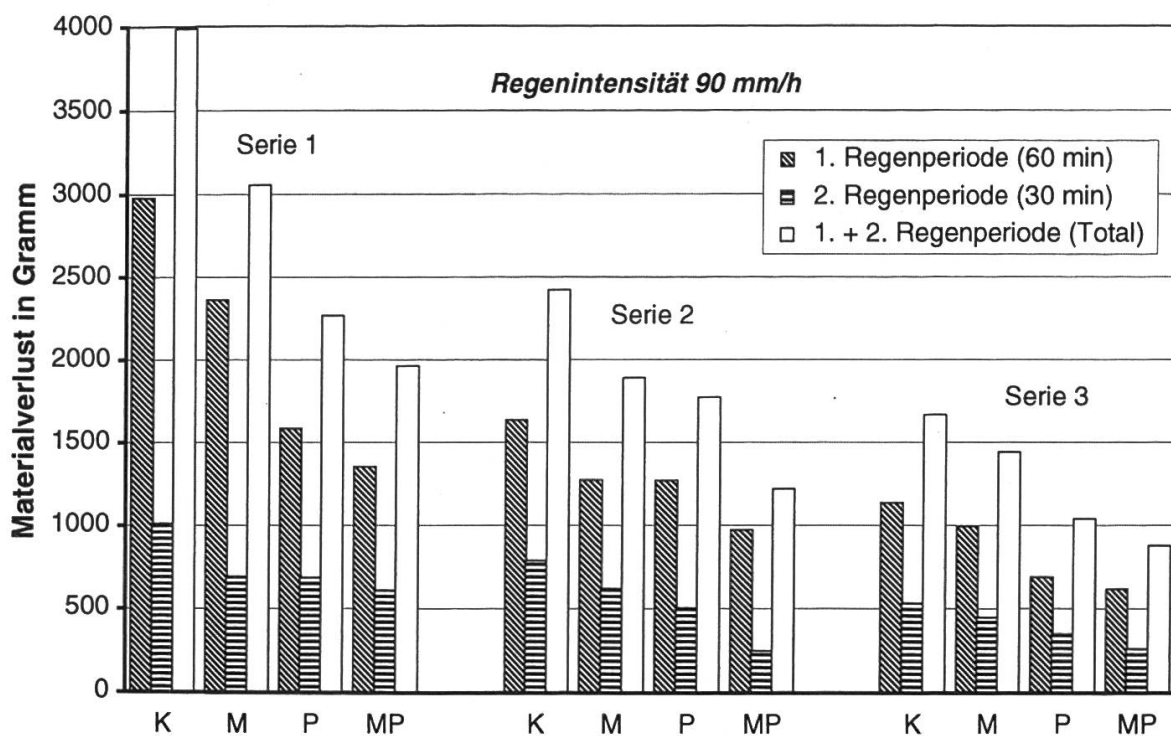


Abbildung 6. Materialverlust von vier Moränenbodenproben (Volumen: 150x75x15 cm; Gewicht: 350 kg) mit unterschiedlicher Behandlung (K: Kontrolle, M: beimpft mit *Laccaria bicolor*, P: bepflanzt mit *Dryas octopetala*, MP: beimpft mit *L. bicolor* und bepflanzt mit *D. octopetala*) durch Beregnungen (Intensität: 90 mm/h, Regenregime: 60 min Regen, 30 min Pause, 30 min Regen) nach drei Monaten (Serie 1), vier Monaten (Serie 2) und fünf Monaten (Serie 3) Inkubationszeit. Für die drei Beregnungsserien wurden jeweils die gleichen vier Kisten wiederverwendet.

re Aggregation des Oberbodens zurückzuführen ist. Die Differenz von Pflanzen allein zu Pflanzen mit Mycel ist zusätzlich im höheren Bodenbedeckungsgrad durch die Silberwurz in der mykorrhizierten Variante begründet. Sowohl die oberirdische Biomasse als auch das Wurzelwerk waren hier besser ausgebildet (*Abbildung 4*), was auf eine effizientere Wasser- und Nährstoffversorgung durch den Pilzpartner schliessen lässt. Die Resultate verdeutlichen den Einfluss des Mykorrhizapilzes einerseits auf die Bodenbildung (Aggregation) und andererseits auf die Pflanzenernährung und zeigen somit die Relevanz dieser Symbiose im Zusammenhang mit der Erosionsverminderung und entsprechend der Bodenstabilisierung.

5. Diskussion, Folgerungen

Es ist eine unbestrittene Tatsache, dass jede Pflanze spezifische Ansprüche an ihre Umwelt stellt (*Landolt, 1977; Begemann und Schiechl, 1986; Schiechl, 1992*), ohne deren minimale Erfüllung sie an einem gegebenen Standort nicht überleben kann. Will man mit Methoden des Lebendverbaus die Bodenstabilität umweltrelevant erhöhen und die Erosion dauerhaft reduzieren, müssen die entsprechenden Voraussetzungen geschaffen werden, welche Pflanzenwachstum und folglich die natürliche Entwicklung der Sukzession gewährleisten. Entsprechend sind also im Zusammenhang mit der Ingenieurbilogie Vorarbeiten zu leisten, welche einen erfolversprechenden Pflanzeneinsatz überhaupt erst ermöglichen. Diese erweisen sich selten als trivial, denn die Einsatzgebiete sind meist durch stark einschränkende Rahmenbedingungen charakterisiert. Dabei sind es häufig die aktuellen Bodenverhältnisse, welche limitierend wirken. Ausschlaggebend sind insbesondere die Strukturverhältnisse des zu stabilisierenden Baugrundes, respektive der Entwicklungsgrad des Keimbeetes. Selbst wenn standortangepasste Vertreter der natürlichen Vegetation verwendet werden – eine für erfolgreiche Ingenieurbilogie notwendige Bedingung, die auch heute nicht immer erfüllt ist – treten Situationen auf, welche den minimalen pflanzlichen Anforderungen nicht *a priori* genügen. Im herkömmlichen Lebendverbau wird nun versucht, die entsprechenden Lücken zwischen dem tatsächlich vorhandenen Keimbeetzustand und den effektiven Ansprüchen der Pflanzen durch die Zugabe von Hilfsstoffen zu schliessen. Zur Stabilisierung der Bodenstruktur werden Festiger appliziert, der Mangel an verfügbaren Nährstoffen wird mit Düngemitteln wettgemacht.

Im Hinblick auf Naturnähe und Dauerhaftigkeit ist die Anwendung synthetischer Zusatzstoffe stärker denn je umstritten. Vor allem der Gebrauch von Düngern ist eine heikle und kontroverse Angelegenheit, nicht zuletzt aufgrund des Einsatzes von teilweise fragwürdigen Produkten. Im Zusammenhang mit Lebendverbau kann künstliche Düngung in verschiedener Hinsicht negative Auswirkungen auf die Vegetation, den Boden und dessen Lebewelt

haben. Auf die Pflanzen bezogen, wird dadurch in erster Linie das oberirdische Wachstum gefördert. Dieser Biomassezuwachs ist jedoch gekoppelt mit einer Reduktion der Wurzelbildung (*Grabherr, 1978, Cernusca, 1986*), was entsprechend eine unerwünschte Verminderung der Bodenstabilität mit sich bringt. Ein weiteres Problem stellt die Begünstigung von natürlicherweise standortfremden und unter den gegebenen Rahmenbedingungen eigentlich konkurrenzschwachen Arten dar. Damit einhergehend kann es zu einer Verdrängung der autochthonen Vegetation kommen, respektive wird das Einwandern dieser erschwert oder gar verhindert. Durch den kurzfristig grossen Nährstoffinput kann zudem die Bodenorganismenwelt tiefgreifend verändert werden (*Insam und Haselwandter, 1985; Luftenegger et al., 1986*). So werden zum Beispiel lebensnotwendige Symbiosepartner von Pflanzen, insbesondere Mykorrhizapilze verdrängt (*Horak und Röllin, 1988; Ohenoja, 1988; Arnolds, 1989*), während es bei saproben Organismen zu einer Massenvermehrung kommt. Werden die Düngergaben eingestellt, fehlen den nun bedürftigen Pflanzen mit ihren rudimentären Wurzelwerken die relevanten Partner, welche unter den plötzlich wieder kargen Bedingungen lebensnotwendig sind. Eine vielversprechende Alternative, um im Bereich des Nährstoffdefizites degradierter Böden solche Lücken zu schliessen, ist die Förderung der Symbiosebildung der verwendeten Pflanzen. Diese unter natürlichen Voraussetzungen spontan einsetzende Verknüpfung ist an gestörten Standorten stark eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich (*Schwab und Reeves, 1981; Biondini et al., 1985; Graf, 1997*). Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass das natürliche Infektionspotential von Mykorrhizapilzen einerseits in Abhängigkeit der Intensität des vorausgegangenen Schadensereignisses sehr schnell abnimmt (*Powell, 1980; Doerr et al., 1984; Amaranthus und Trappe, 1993*) und andererseits auch mit der Zeitspanne, während der ein Standort ohne die nötigen Wirtspflanzen belassen wird (*Parke et al., 1984; Ferrier und Alexander, 1985*). Es gibt also keine Gewissheit, im Oberbodenbereich rezenter Rutschungen, stark erosiver Böden oder geschütteter Böschungen spezifische Symbiosepartner der eingesetzten Pflanzen vorzufinden. Ebenso ist es nicht zwingend, dass sich intakte Gebiete ähnlicher Vegetation mit geeignetem Inokulumpotential in der Nähe befinden, von wo ausreichender Sporeneintrag stattfinden könnte. Für eine erfolgreiche Symbiosebildung ist es im Lebendverbau deshalb notwendig, dem verwendeten Pflanzenmaterial die adäquaten Organismen mitzugeben (*Grime et al., 1987; Graf und Brunner, 1995*). Durch die Zugabe von geeigneten Mykorrhizapilzen wird beispielsweise nicht nur die Effizienz der Pflanzenernährung gesteigert, sondern auch die Wurzelbildung angeregt (*Abbildung 4*). Die Vorteile mykorrhizierter Pflanzen bezüglich Nährstoffversorgung und Wachstum (*Abbildung 4; Langlois und Fortin, 1984; Alexander und Fairley, 1986*), Krankheitsresistenz (*Marx, 1973; Perrin, 1985*) und kleinerer Empfindlichkeit gegenüber toxischen Stoffen (*Jones und Hutchinson, 1988; Colpaert und Van Assche, 1992*) sind vielfach dokumentiert.

Zusätzlich sind die Pilzpartner im Vorfeld der pflanzenspezifischen Funktionen an einem weiteren essentiellen Prozess beteiligt. Sie fördern neben anderen Mikroorganismen in entscheidender Masse die Entwicklung des Bodens (*Miller und Jastrow, 1992; Burns, 1995*) und somit die Stabilisierung und Funktionalität des Keimbeetes. Die von Bakterien und Pilzen ausgeschiedenen Polyuronide und Polysaccharide vermögen Mineralteilchen in ähnlicher Weise zu verkleben, wie dies für Derivate der Polyacrylsäure und der Polyvinylsäure bekannt ist, welche im Zusammenhang mit der Ingenieurbiologie als Bodenfestiger eingesetzt werden (*Scheffer und Schachtschabel, 1992*). Die daraus resultierende Meinung, dass entscheidende Bausteine und Prozesse für die natürliche Festigung der Bodenstruktur mikrobieller Herkunft sind, konnte mit Aggregations- und Erosionsversuchen für die getesteten Ektomykorrhizapilze in eindrucklicher Art und Weise bestätigt werden (*Abbildungen 5, 6*).

Mit Hilfe dieser Erkenntnisse bezüglich der Keimbeetfunktionen von Mykorrhizabildnern sowie deren Funktionen in der Pflanzenernährung können natürlich auftretende Phänomene der Vegetationsetablierung auf degradierten Bodenstrukturen aus einer neuen Optik erklärt werden. Betrachtet man die Bodenprobe D des natürlich wiederbesiedelten Skipistenabschnittes, müsste diese aufgrund der Korngrößenverteilung (*Abbildungen 1, 2*) als am stärksten erosionsgefährdet eingestuft werden. Unter den Bodeneigenschaften fördern nämlich ein hoher Silt- und Feinsandgehalt (0,002 – 0,1 mm) und eine geringe Durchlässigkeit die Erodierbarkeit. Von zusätzlicher Bedeutung ist im Zusammenhang mit der Erosion auch der Schutz der Oberfläche gegen die aufprallenden Regentropfen. Permanente Bedeckung verringert die Flächenerosion sehr stark. In dem Masse, wie die Flächen offen liegen und auf ihnen leicht verschlammbares und transportierbares Material erzeugt wird, steigt dagegen der Abtrag. In der alpinen Stufe bedingt es für einen wirksamen Erosionsschutz eine Bedeckung von 70% (*Mosimann, 1981; Cernusca, 1984*). Diese Forderung ist am Standort der Probe D jedoch bei weitem nicht erfüllt (*Tabelle 3*). Die in diesem Sektor trotzdem dichtere Bodenbedeckung kann also nicht der Hauptgrund für die geringere Erosion respektive das bessere Pflanzenwachstum sein. Weitere Faktoren, welche die Erodierbarkeit reduzieren, sind höherer Humusgehalt, gesteigerte Durchlässigkeit sowie grössere Stabilität des Bodengefüges, insbesondere im oberflächennahen Bereich. Letztere wiederum bildet eine Voraussetzung für die anderen Parameter. Die Vegetationsaufnahme zeigt, dass der Probeentnahmeort D von der Krautweide (*Salix herbacea*) dominiert wird. Dieser Spalier weist ein weites Spektrum an Symbiosepilzen auf (*Graf, 1994*). Der Schluss liegt nun nahe, dass aufgrund der im Boden anwesenden Mycelien die Aggregatstabilität stark erhöht ist (*Tisdall und Oades, 1980*) und somit die Voraussetzungen für eine erosionsresistente Bodenmatrix gegeben sind. Der höhere Anteil an Feinmaterial, welcher in der geotechnischen Analyse zum Vorschein kommt (*Abbildung 1*), bildet in diesem Falle das Ausgangssubstrat für die Aggregation, welche wieder-

um Voraussetzung für die Nährstoffakkumulation und eine bessere Wasserrückhaltekapazität ist. Diese Prozesse dürften im Zusammenhang mit der Funktionalität des Keimbeetes ausschlaggebend für die erfolgreiche Wiederbesiedlung in diesem Skipistenabschnitt gewesen sein. Die weitgehend vegetationslose Situation und die erhöhte Auswaschung von Feinanteilen im Bereich der Proben A und B hingegen kann zu einem bedeutenden Teil auf das Fehlen von geeigneten Mikroorganismen zurückgeführt werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen aus natürlichen Abläufen sowie Untersuchungen und Experimenten im Labor scheint es möglich, sowohl im Hinblick auf die Nährstoffversorgung als auch bezüglich der Stabilisierung von Bodenstrukturen, die immensen Düngergaben und den Einsatz synthetischer Bodenfestiger durch die Zugabe geeigneter Mikroorganismen weitgehend zu ersetzen.

Sucht man in diesem Zusammenhang in der immensen Vielfalt dieser Kleinstlebewesen nach möglichen Anwärtern, sind es die Mykorrhizabildner, welche spezielle Aufmerksamkeit erregen. Sie nehmen in der Prozesskaskade der Bodenentwicklung aufgrund ihrer Funktionen und Lebensweise eine besondere Stellung ein. So gehören sie einerseits zu den massgebenden Baumeistern des für Pflanzen lebensnotwendigen Keimbeetes. Es erstaunt kaum, dass Aggregatstabilität direkt proportional zur Länge der Pilzhyphen im Boden ist (*Tisdall und Oades, 1980*). Als Symbiosepartner ihrer Wirtspflanzen übernehmen sie andererseits deren Wasser- und Nährstoffversorgung und üben so unmittelbaren Einfluss auf die Entwicklung von Pflanzengemeinschaften aus (*St. John und Coleman, 1983*). Auf Grund dieser Funktionen empfehlen sich die Mykorrhizapilze als potentielle Kandidaten für den Einsatz im Vorfeld ingenieurbilogischer Arbeiten. Im Lebendverbau wie auch bei der natürlichen Besiedlung neuentstandener Bodenoberflächen bedeutet der Aufbau eines intakten und soliden Mykorrhizafundamentes einen ersten und entscheidenden Schritt, um die Lücke zwischen den tatsächlich vorhandenen Bodenbedingungen und den effektiven Anforderungen der Pflanzen zu schliessen. Erst wenn dieser Grundpfeiler steht, sind die Voraussetzungen für erfolgreiches Wachstum und Etablieren der Pflanzen aus der Perspektive des Bodens erfüllt.

Wie beim Pflanzenmaterial ist auch bei der Auswahl der relevanten Pilzpartner darauf zu achten, dass nur standortangepasste Arten verwendet werden, welche natürlicherweise mit den entsprechenden Pflanzen in Gemeinschaft leben. Die Grundlage für die Selektion der Mykorrhizapilze, insbesondere der Ektomykorrhizapilze, bilden ökosozilogische Studien (*Griesser, 1992; Graf, 1994*). Es ist zudem bekannt, dass bei der Ektomykorrhiza mit fortschreitendem Alter der Wirtspflanze eine Sukzession der Pilzpartner stattfindet (*Last et al., 1983; Mason et al. 1983*). Sowohl für die Mykorrhizierung von Ingenieurbilogiepflanzen als auch für die Prozesse der Keimbeetentwicklung sind jene Pilzpartner entscheidend, welche in der Juvenilphase der Pflanzen für die Symbiose verantwortlich sind, sogenannte «early stage»-Pilze. Inner-

halb dieser Gruppe gilt es, entsprechend den Anforderungen an den Lebendverbau, die jeweils geeigneten Arten zu selektionieren. Dabei sollte neben den ökosozioologischen Kriterien insbesondere auch das «Verbaupotential» der Pilze in Betracht gezogen werden (*Abbildung 5*). In beiden Bereichen sind heute noch viele Fragen offen, und es bedarf weiterhin grosser Anstrengungen, um eine solide Basis für dauerhafte und umweltgerechte Renaturierungskonzepte bereitstellen zu können.

Das Fehlen relevanter Voraussetzungen für wirksame Ingenieurbiologie, namentlich die Absenz lebenswichtiger mikrobieller Aktivitäten, respektive die Vernachlässigung dieser Prozesse, ist wohl nach wie vor entscheidend für Misserfolge bei Wachstum und Weiterentwicklung der verwendeten Pflanzen.

Zusammenfassung

Wachsen und Etablieren von Pflanzen und somit der Erfolg von Ingenieurbiologie sind massgeblich von Prozessen der Bodenentwicklung abhängig, wobei insbesondere Bodenaggregation und Nährstoffakkumulation entscheidend sind. Die natürliche Verantwortung für den Aufbau des sogenannten Keimbeetes liegt grösstenteils bei Bodenmikroorganismen. Die Mykorrhizapilze nehmen dabei eine besondere Stellung ein. Als Symbiosepartner von Pflanzen sind sie für deren Ernährung verantwortlich. Versuche mit mykorrhizierten Silberwurzpflanzen (*Dryas octopetala* L.) ergaben sowohl unter- wie oberirdisch mehr Biomasse als nicht mykorrhizierte. Zudem gehören die Symbiosepilze zu den Baumeistern von Aggregaten und fördern dadurch die Entwicklung stabiler Bodenstrukturen. Experimente haben gezeigt, dass die Stabilität strukturloser Substratgemische durch die Zugabe von Mykorrhizapilzmycel beinahe verdoppelt wird. Beregnungsversuche im Bereich eines Starkniederschlages haben zudem eine deutlich höhere Erosionsresistenz der mit Mykorrhizapilzen behandelten Bodenproben ergeben. Geotechnische Bodenanalysen natürlich gewachsener Standorte konnten diese Ergebnisse bestätigen. Ein funktionstüchtiges Mykorrhizafundament ist in jeder natürlichen Entwicklungsphase für Pflanzen, und entsprechend für den Lebendverbau, eine notwendige Voraussetzung.

Summary

Influence of Mycorrhizal Fungi on Soil Structure and Consequences for Soil Bioengineering

Growth and establishment of plants and, therefore, the success of soil bioengineering, depend decisively on soil development, particularly on soil aggregation and nutrient accumulation. The natural responsibility of the germ patch assembly is mainly borne by soil micro-organisms. Within them, mycorrhizal fungi are playing a particular role. As symbiotic partners, these fungi provide the nutrition of the plants. Tests

with mycorrhizal *Dryas octopetala* L. yielded in higher biomass above ground as well as subterranean compared with non-mycorrhizal plants. Furthermore, symbiotic fungi belong to the architects of aggregates and, therefore, perform the development of stable soil structures. The addition of mycelia of mycorrhizal fungi nearly doubled the stability of a structureless substrate mixture. Furthermore, rain experiments demonstrated that soil added with mycorrhizal fungi is more resistant against erosion processes. Results obtained by geotechnical analyses of naturally developed soil confirmed the data of the laboratory experiments. A functional mycorrhizal foundation is a necessary requirement in every step of plant development and, therefore, for soil bioengineering.

Résumé

L'influence des champignons mycorrhiziens sur la structure du sol et les conséquences pour le génie biologique

La croissance et l'établissement de plantes, donc le succès du génie biologique, dépendent du développement du sol, dont l'agrégation et l'accumulation de substances nutritives représentent des facteurs décisifs. Les micro-organismes du sol sont les garants naturels de la constitution du réceptacle fonctionnel. Les champignons mycorrhiziens y jouent un rôle important. Ils sont responsables de la nutrition des plantes avec lesquelles ils ont une relation symbiotique. Des tests ont mis en évidence une biomasse plus grande des pousses et des racines sur des *Dryas octopetala* L. mycorrhizées que sur des plantes non mycorrhizées. En outre, les champignons symbiotiques construisent des agrégats et favorisent ainsi le développement de structures de sol stables. Des expériences ont montré que la stabilité de substrats hétérogènes a pu être quasiment doublée grâce à l'adjonction de mycelium de champignons mycorrhiziens. Lors de simulations de précipitations extrêmes, une très nette résistance à l'érosion a été observée sur les échantillons de sol inoculés avec des champignons mycorrhiziens. Ces observations ont pu être confirmées par des analyses de sol géotechniques sur des sites naturels. Une base de mycorrhizes fonctionnelle est donc une condition nécessaire à chaque phase de développement naturel des plantes et, par conséquent, dans le génie biologique.

Literatur

- Alexander, I.J., Fairley, R.I. 1986: Growth and nitrogen uptake rates of ectomycorrhizal spruce seedlings. In: Gianinazzi-Pearson, V. und Gianinazzi, S. (Hg.): Physiological and genetical aspects of mycorrhizae: Proc. 1st ESM, Dijon, 377–382.
- 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.
- Arnolds, E. 1989: The influence of increased fertilisation on the macrofungi of a sheep meadow in Drenthe, the Netherlands. *Opera Botanica* 100: 7–21.
- Begemann, W., Schiechl, H.M. 1986: Ingenieurbiologie. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 216 S.
- Beyer Portner, N. 1997: Erosion de surface en région alpines. *Ingenieurbiologie* 2: 22–25.

- 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* 39, 8: 43–50.
- Braun-Blanquet, J. 1964: Pflanzensoziologie; Grundzüge der Vegetationskunde 3. Aufl. Springer, Wien, 865 S.
- 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. (Hg.): Environmental impact of soil component interactions, Vol. III. Lewis Publishers, London, 145–164.
- Casagrande, A. 1947: Classification and Identification of Soils. *Proc. ASCE*, 783–810.
- Cernusca, A. 1984: Ökologische Auswirkungen des Baues und Betriebes von Schipisten. *Internat. Symp. Interpraevent, Villach*, Band 3, 57–77.
- Cernusca, A. 1986: Probleme von Wintersportkonzentrationen für den Naturschutz. *Jb. Naturschutz u. Landschaftspflege*, Bonn 38: 33–48.
- Colpaert, J.V., Van Assche, J.A. 1992: Zinc toxicity in ectomycorrhizal *Pinus sylvestris*. *Plant and Soil* 143: 201–211.
- Dhillion, S.S. 1994: Ectomycorrhizae, arbuscular mycorrhizae, and *Rhizoctonia* sp. of alpine and boreal *Salix* spp. in Norway. *Arctic and Alpine Res.* 26, 3: 304–307.
- Doerr, T.B., Redente, E.F., Reeves, F.B. 1984: Effects of soil disturbance on plant succession and levels of mycorrhizal fungi in a sagebrush-grassland community. *J. Range Manage.* 37: 135–139.
- Elgala, A.M., Ishac, Y.Z., Abdel Monem, M., El-Ghandour, I.A.I. 1995: Effect of single and combined inoculation with *Azotobacter* and VA mycorrhizal fungi on growth and mineral nutrient contents on maize and wheat plants. In: Huang, P.M., Berthelin, J., Bollag, J.-M., McCill, W.B., Page, A.L. (Hg.): Environmental impact of soil component interactions, Vol. III. Lewis Publishers, London, 109–116.
- Favre, J. 1955: Les champignons de la zone alpine du Parc National Suisse. *Ergebn. Wiss. Untersuch. Schweiz. Nationalparks* 5: 1–212.
- Ferrier, R.C., Alexander, I.J. 1985: Persistence under field conditions of excised fine roots and mycorrhizas of spruce. In: Fitter, A.H. (Hg.): Ecological interactions in soil. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 175–179.
- Fontana, A. 1962: Ricerche sulle micorrize del genere *Salix*. *Allionia* 8: 67–85.
- Grabherr, G. 1978: Schädigung der natürlichen Vegetation über der Waldgrenze durch die Anlage von Schipisten und deren Fähigkeit zur Renaturierung. *Akad. f. Naturschutz u. Landschaftspflege. Tagungsbericht* 2: 45–50.
- Graf, F. 1994: Ecology and sociology of macromycetes in snow-beds with *Salix herbacea* L. in the alpine Valley of Radönt (Grisons, Switzerland). *Diss. Bot.* 235: 1–242.
- Graf, F. 1997: Mykorrhizapilze im Einsatz auf alpinen Erosionsflächen. *Ingenieurbiologie* 2: 26–28.
- Graf, F., Brunner, I. 1995: Alpine dwarf willow and its ectomycorrhizal partners: A system for alpine ski slope renaturation?! *Proc. 11th HAR Workshop*, Fort Collins, 214–223.
- Graf, F., Brunner, I. 1996: Natural and synthesized ectomycorrhizas of the alpine dwarf willow *Salix herbacea*. *Mycorrhiza* 6: 227–235.
- Griesser, B. 1992: Mykosoziologie der Grauerlen- und Sanddorn-Auen (*Alnetum incanae*, Hippophaëtum) am Hinterrhein (Domleschg, Graubünden, Schweiz). *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Rübel* 109: 1–235.
- Grime, J.P., Mackey, J.M.L., Hillier, S.H., Read, D.J. 1987: Floristic diversity in a model system using experimental microcosms. *Nature* 328: 420–422.
- Hacker, E., Pflug, W., Schippers, B. 1996: Ingenieurbiologie im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Ingenieurbautechnik. *Jahrbuch 6 der Ges. f. Ingenieurbiologie*. Selbstverlag, Aachen, 330 S.
- 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. (Hg.): Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Sepia Verlag, Aachen, 23–34.
- Hoffmann, J. 1995: Lebend bewehrte Erde – neue Methoden der Böschungssicherung im Verkehrswegbau. Das Gartenamt 2: 115–118.
- Horak, E., Rölli, O. 1988: Der Einfluss von Klärschlamm auf die Makromycetenflora eines Eichen-Hainbuchen-Waldes bei Genf, Schweiz. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswesen 64: 21–147.
- 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. (Hg.): Response of forest ecosystems to environmental changes. Elsevier Applied Science, London, New York, 456–461.
- Jones, M.D., Hutchinson, T.C. 1988: Nickel toxicity in mycorrhizal birch seedlings infected with *Lactarius rufus* or *Scleroderma flavidum*. II. Effects on growth, photosynthesis, respiration and transpiration. New Phytologist 108: 451–459.
- Kirwald, E. 1964: Gewässerpflege. Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München, 167 S.
- Koch, S., Flühler, H. 1993: Solute transport in aggregated porous media: comparing model independent and dependent parameter estimation. Water, Air and Soil Pollution 68: 275–289.
- Kruedener, A. von, 1950: Der unterirdische Wald. Allg. Forst- u. J. Ztg. 122: 226–233.
- Kruedener, A. von, 1951: Ingenieurbiologie. Ernst Reinhardt Verlag, München, Basel, 172 S.
- Landolt, E. 1977: Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich 64: 1–208.
- Lang, H.-J., Huder, J. 1990: Bodenmechanik und Grundbau 4. Aufl. Springer, Berlin, 262 S.
- Langlois, C.-G., Fortin, J.A. 1984: Seasonal variation in the uptake of (³²P) phosphate ions by excised ectomycorrhizae and lateral roots of *Abies balsamea*. Can. J. For. Res. 14: 412–415.
- Last, F.T., Mason, P.A., Wilson, J., Deacon, J.W. 1983: Fine roots and sheathing mycorrhizas: their formation, function and dynamics. Plant and Soil 71: 9–21.
- Leuzinger, Y., Lachat, B. 1995: Ingenieurbiologie kritisch beleuchtet. Ingenieurbiologie 3: 3–7.
- Lüdi, W. 1958: Beobachtungen über die Besiedlung von Gletschervorfeldern in den Schweizalpen. Flora 146: 386–407.
- Luftenegger, G., Foissner, W., Adam, H. 1986: Der Einfluss organischer und mineralischer Dünger auf die Bodenfauna einer planierten, begrünten Schipiste oberhalb der Waldgrenze. Z. Vegetationst. 9: 149–153.
- Lynch, J.M., Bragg, E. 1985: Microorganisms and soil aggregate stability. In: Stewart, B.A. (Hg.): Advances in soil science, Vol. II. Springer Verlag, New York und Berlin, 133–169.
- Marschner, H. 1995: Mineral nutrition of higher plants 2nd edn. Academic Press, London, 889 S.
- Marx, D.H. 1973: Mycorrhizae and feeder root diseases. In: Marks, C.G., Kozłowski, T.T. (Hg.): Ectomycorrhizae: their ecology and physiology. Academic Press, New York, 351–382.
- Marx, D.H. 1991: The practical significance of ectomycorrhizae in forest establishment. In: Eco-physiology of ectomycorrhizae of forest trees. Proc. Vol. 7, Marcus Wallenberg Foundation Symposia, Stockholm, Sweden, 54–90.
- Marx, D.H., Bryan, W.C. 1975: Growth and ectomycorrhizal development of loblolly pine seedlings in fumigated soil infected with the fungal symbiont *Pisolithus tinctorius*. For. Sci. 21: 245–254.
- Mason, P.A., Wilson, J., Last, F.T. 1983: The concept of succession in relation to the spread of sheathing mycorrhizal fungi on inoculated tree seedlings growing in unsterile soils. Plant and Soil 71: 247–256.
- Miller, R.M., Jastrow, J.D. 1990: Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. Soil Biol. Biochem. 22, 5: 579–584.
- Miller, R.M., Jastrow, J.D. 1992: The application of VA mycorrhizae to ecosystem restoration and reclamation. In: Allen, M.J. (Hg.): Mycorrhizal functioning. Chapman and Hall, New York und London, 438–467.
- Morgan, R.P.C., Rickson, R.J. 1995: Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. Spon, London, 274 S.

- Mosimann, T. 1981: Geoökologische Standortsindikatoren für die Erosionsanfälligkeit alpiner Hänge nach Geländeingriffen für Pistenanlagen. *Geomethodica* 6:143–174.
- Ohenoja, E. 1988: Behaviour of mycorrhizal fungi in fertilized forests. *Karstenia* 28: 27–30.
- Parke, J.L., Lindermann, R.G., Trappe, J.M. 1984: Inoculum potential of ectomycorrhizal fungi in forest soil from southwest Oregon and northern California. *For. Sci.* 30: 300–304.
- Perrin, R. 1985: L'aptitude des mycorrhizes à protéger les plantes contre les maladies: panacée ou chimère? *Ann. Sci. For.* 42: 453–470.
- Perry, D.A., Molina, R., Amaranthus, M.P. 1987: Mycorrhizae, mycorrhizospheres, and reforestation: current knowledge and research needs. *Can. J. For. Res.* 17: 929–940.
- Powell, C.L. 1980: Mycorrhizal infectivity of eroded soils. *Soil Biol. Biochem.* 12: 247–250.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. 1992: Lehrbuch der Bodenkunde 13. Aufl. Enke, Stuttgart, 442 S.
- Schiechtl, H.M. 1973: Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Callwey, München, 244 S.
- Schiechtl, H.M. 1992: Weiden in der Praxis. Patzer, Berlin, 130 S.
- Schuppener, B. 1994: Die statische Berechnung der Bauweise Lebend Bewehrte Erde. *Geotechnik* 4: 204–213.
- Schwab, S., Reeves, F.B. 1981: The role of endomycorrhizae in revegetation practices in the semi-arid west. III. Vertical distribution of vesicular-arbuscular (VA) mycorrhiza inoculum potential. *American J. of Botany* 68: 1293–1297.
- SNV 670010a, 1993: Bodenkennziffern. In: VSS Normen, Band 8, Böden und mineralische Baustoffe, VSS, Zürich.
- Sollins, P., Homann, P., Caldwell, B.A. 1996: Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma* 74: 65–105.
- 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. 1980: The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. *Austr. J. Soil Res.* 18: 423–434.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982: Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141–163.
- Trappe, J.M. 1962: Fungus associates of ectotrophic mycorrhizae. *Bot. Rev.* 28: 538–606.
- Ugolini, F.C. 1968: Soil development and alder invasion in a recently deglaciated area of Glacier Bay, Alaska. *Proc. Northwest Scientific Assoc. Meeting, U.S. Forest Service Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon*, 115–140.
- Watling, R. 1981: Relationships between macromycetes and the development of higher plant communities. In: Wicklow, D.T., Carroll, G.C. (Hg.): *The fungal community*. Dekker, New York, Basel, 427–458.
- Watling, R. 1992: Macrofungi associated with British willows. *Proc. Roy. Soc. Edinburgh* 98 B: 135–147.
- Wu, T.H. 1984: Effect of vegetation on slope stability. *Transport. Res. Rec.* 965: 37–46.
- Wu, T.H. 1995: Slope stabilization. In: Morgan, R.P.C., Rickson, R.J. (Hg.): *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Spon, London, 221–264.

Abbildungen gedruckt mit Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

Verfasser:

Dr. Frank Graf und Werner Gerber, dipl. Bauing. HTL, Sektion Verbauwesen und Forsttechnik, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.