

Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch Bewuchs



Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
katzenbach@geotechnik.
tu-darmstadt.de



Dipl.-Ing. Anke Werner
werner@geotechnik.
tu-darmstadt.de

Technische Universität Darmstadt
Institut für Geotechnik
Petersenstraße 13
64287 Darmstadt
Tel.: +49-6151-16-2149; Fax: +49-6151-16-6683

1 Einleitung

Der Einsatz von lebenden Pflanzen als Erosionsschutz bzw. zur Erhöhung der Standsicherheit stellt Anforderungen an die verwendeten Pflanzen, i. e. Bäume, Sträucher, Gräser, Stauden und Äste, d. h. an deren Ausbildung ihres Wurzelwerkes. Der Lebendverbau muss an die Standortbedingungen der Böschungen, i. e. an die klimatischen Verhältnisse (Licht, Niederschlag und Temperatur) und die Baugrundverhältnisse angepasst sein. Die Wirksamkeit des Lebendverbaus wird auch durch die Wasserdurchlässigkeit und die Wasserspeicherfähigkeit beeinflusst. Im folgenden Beitrag werden Untersuchungen zur mechanischen und hydromechanischen Wirkung der Vegetation als Bewehrungselemente vorgestellt.

1.1 Ingenieurbiologie

Die Aufgabe der lebenden Baustoffe sind vor allem der Erosionsschutz, die Stabilisierung von Böschungen im Verkehrswegebau sowie der Uferschutz an Gewässern. Die Pflanzen reduzieren durch Blätter den Eintrag an Niederschlägen, entwässern den Boden durch Transpiration der Blätter und wirken durch die Wurzeln und die eingelegten Äste als Bewehrungselemente. Sie wirken ähnlich wie Bewehrungsstahl im Beton (*Schiechtl* 1985) bzw. wie Geokunststoffe in der Geotechnik.

Die ingenieurbiologische Bauweise im Erdbau wird entsprechend ihrer Wirkungsweise unterteilt in die Stabil-, Deck- und kombinierte Bauweise (*Florineth* 2004) bzw. die auf Dämmen im Bereich des Verkehrswegebaus i. w. natürlich gewachsene Vegetation.

Die Form und die Größe des durchwurzelten Bodenkörpers, die darin enthaltene Wurzelmasse sowie die Verteilung der Wurzeln sind wesentliche Kenngrößen für die bautechnische Beurteilung. Je nach Länge und Biege-

steifigkeit können die Wurzeln als Zuganker, wenn sie lang und biegeweich sind, oder als Dübel, wenn sie kurz und biegesteif sind, wirken (*Schuppener* 1994).

2 Versuchstechnische Parameterermittlung der Boden-Wurzel-Interaktion

Die Pflanzenwurzeln, als lebende Bodenarmierung, nehmen Zug- und Scherspannungen auf. Zur Untersuchung der festigkeitserhöhenden Wirkung von Wurzeln sind sowohl Labor- als auch Feldversuche unerlässlich.

Zur Beurteilung des Einflusses der Wurzeln auf die Standsicherheit von Böschungen ist die Kenntnis folgender Parameter erforderlich, die versuchstechnisch bzw. phänomenologisch zu ermitteln sind:

- die Zugfestigkeit der Wurzeln,
- die Verbundfestigkeit (Auszugkraft) zwischen Wurzel und Boden,
- die Scherfestigkeit zwischen Wurzel und Boden und
- die Länge und die Verzweigung der Wurzeln.

2.1 Zugfestigkeit – Zugversuch

Die Zugfestigkeit ist ein vom Wurzeldurchmesser, Wassergehalt, Alter und Art der Pflanze abhängiger Parameter (*Hiller* 1985).

Die ersten Zugfestigkeitsmessungen an Pflanzenwurzeln sind von *Stiny* (1947) an gleichlangen Wurzelstücken krautiger Pflanzen vorgenommen worden; sie wurde zwischen 0,7 kN/cm² und 2,9 kN/cm² ermittelt. Die von *Schiechtl* (1973) durchgeführten Versuche an rd. 20 cm langen und 3 mm dicken Wurzelstücken aus Luzernen ergeben Zugfestigkeiten von 2,5 kN/cm² bis 6,7 kN/cm². *Hiller* (1966) prüfte Weidenarten mit einem Durchmesser kleiner 2 mm. Die gezogenen Wurzelstücke besaßen eine Einspannlänge von 10 cm. Die Zugfestigkeit wurde zwi-

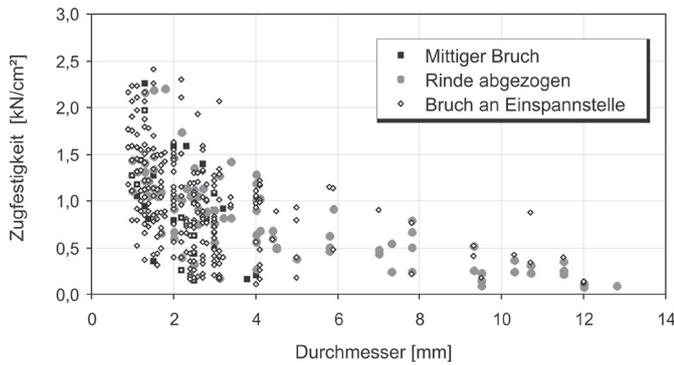


Bild 1: Zugfestigkeitsmessungen an Birkenwurzeln

schen 0,7 kN/cm² und 2,6 kN/cm² ermittelt. *Commandeur* und *Pyles* (1991) untersuchten die Zugfestigkeit an 5–10jährigen Douglasientannen mit einem Durchmesser von 2,5–12 mm. Die gemessene Zugfestigkeit schwankt zwischen 0,95 kN/cm² und 2,9 kN/cm².

In *Polomski* und *Kuhn* (1998) sind folgende Durchschnittswerte für die Zugfestigkeit einiger Pflanzengruppen angegeben:

- Gräser 0,5–1 kN/cm²
- Kräuter 0,3–6 kN/cm²
- Gehölze 1–7 kN/cm²

Auch die eigenen Untersuchungen an dreijährigen Birkenwurzeln bestätigen den o.g. Zugfestigkeitsbereich für Gehölze und zeigen eine Abnahme der Zugfestigkeit mit zunehmendem Durchmesser (Bild 1). Bei Durchführung der Zugversuche zeigten die Wurzeln drei Versagensarten: Mittiger Bruch der Wurzel, Abziehen der Rinde und Abreißen an der Einspannstelle. In diesem Fall ist die

Wurzel beim Einspannen in die Messapparatur stark gequetscht und somit an den Einspannstellen geschwächt worden. Es ist davon auszugehen, dass die gemessenen Zugfestigkeiten geringer sind als die tatsächliche in-situ vorhandene Zugfestigkeit des Wurzelmaterials.

2.2 Scherfestigkeit – Scherversuche

Der Versagensmechanismus „Abscheren der Wurzel“ wird in Scherversuchen untersucht (Bild 2). Für die Scherversuche sind am Institut für Geotechnik jeweils 2–4 einjährige Sandbirken- (*Betula pendula*) und Spitzahornpflanzen (*Acer platanoides*) in 25×25 cm große Versuchskästen in schwach schluffigen Sand eingepflanzt worden. Beim Einbau der einjährigen Pflanzen und nach dem Abscheren, d.h. nach ein- oder zwei Vegetationsperioden wurde der Durchmesser der Hauptwurzel in der Scherfuge gemessen. Die Zunahme des Wurzeldurchmessers betrug bis zu 80 %. Die Festigkeitsparameter werden mit dem Großrahmenschergerät mit einer Scherfläche von 625 cm² und einem maximalen möglichen Scherweg von 100 mm ermittelt.

Die Scherversuche wurden mit Normalspannungen σ im Bereich von 25 kN/m² bis 75 kN/m² durchgeführt. Diese niedrigen Spannungsbereiche wurden gewählt, da in-situ die Überlagerungsspannung im Böschungsbereich maximal in diesem Spannungsniveau liegt. Die Referenzversuche ohne Wurzeln wurden mit einem Wassergehalt zwischen 0 % und 18 % durchgeführt. Die Versuche mit Pflanzen wurden mit dem in-situ vorhandenen Wassergehalt zwischen 11 % und 19 % abgeschert.

In Bild 3 sind die ersten Ergebnisse der Versuche im τ - σ -Diagramm dargestellt. Der Reibungswinkel φ' des nicht durchwurzelten Bodens wurde zwischen 32° und 34,7° ermittelt und die Kohäsion c' schwankt zwischen 0 kN/m² und 2,4 kN/m² in Abhängigkeit des Wassergehaltes und

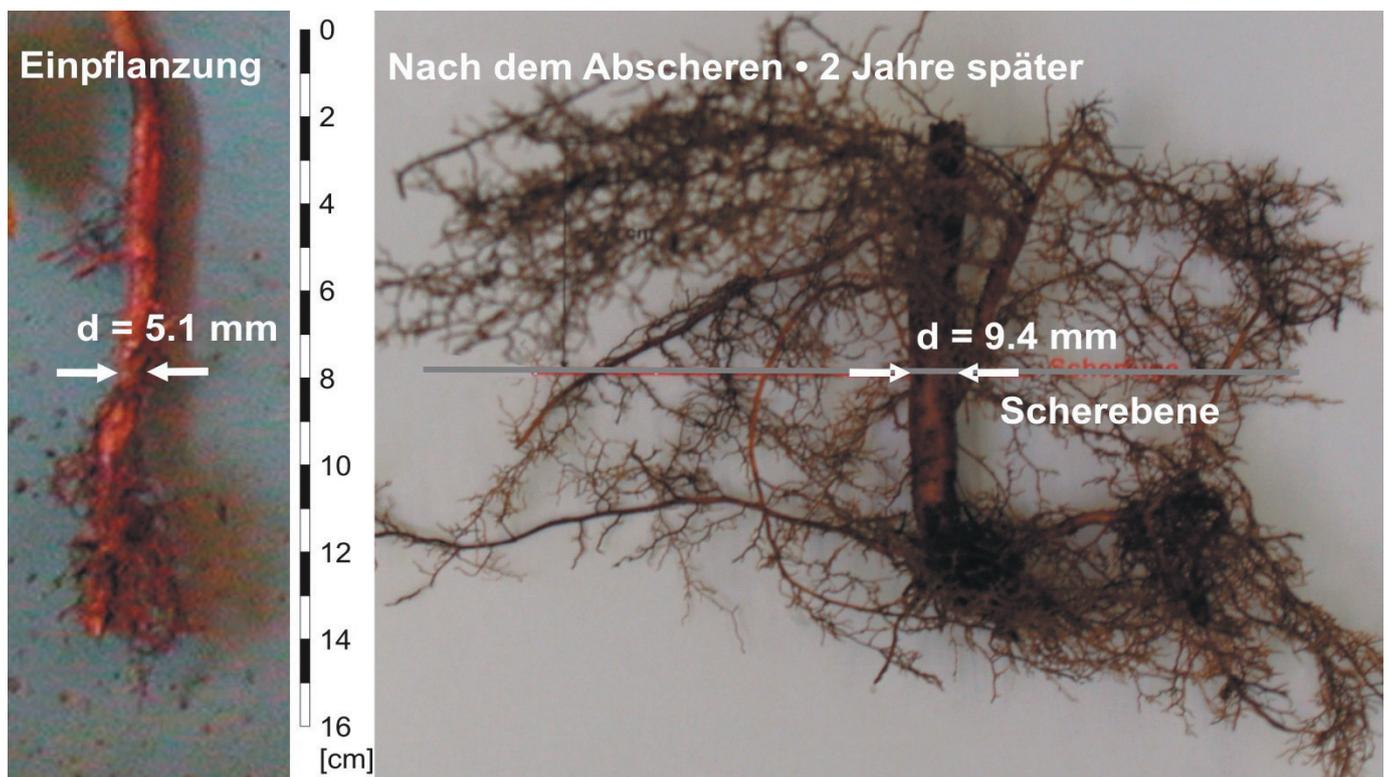


Bild 2: Wurzelwachstum – Zeitpunkt der Einpflanzung und nach dem Abscheren

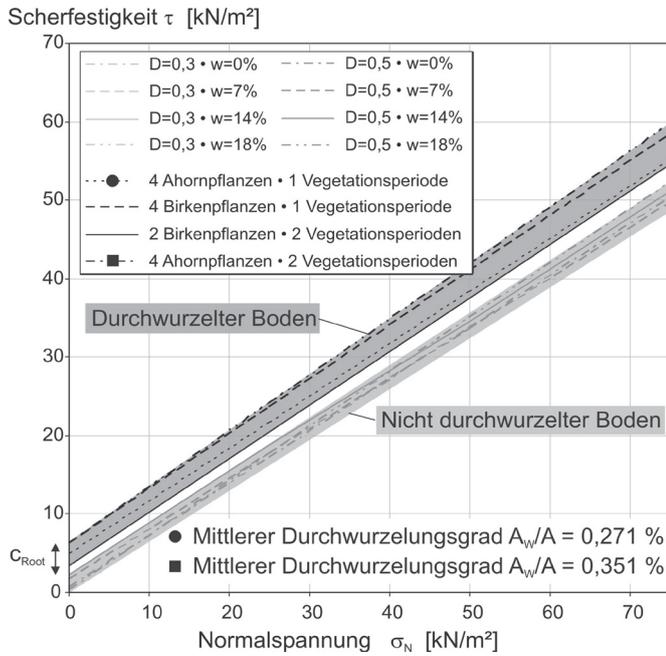


Bild 3: Ergebnisse der Scherfestigkeitsversuche an Ahorn- und Birkenpflanzen nach 1 und 2 Vegetationsperioden

der Dichte. Die mechanische Verfestigung durch die Wurzeln ist erkennbar. Der Reibungswinkel φ' bleibt nahezu konstant und liegt zwischen $33,7^\circ$ und $35,4^\circ$; die Kohäsion liegt zwischen $3,5 \text{ kN/m}^2$ und $6,3 \text{ kN/m}^2$.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Scherfestigkeitsparameter, und hier vor allem der Kohäsionsanteil c_R infolge Wurzeln, von der Durchwurzelungsintensität A_w/A , d.h. der Querschnittsfläche der Wurzeln bezogen auf die Gesamtscherfläche abhängig ist. Die Durchwurzelungsintensität beträgt A_w/A beträgt $0,351 \%$ für 4 Ahornpflanzen nach 2 Vegetationsperioden und $0,271 \%$ für 4 Ahornpflanzen nach einer Vegetationsperiode.

2.3 Länge und Verzweigung der Wurzeln

Bei Einsatz von ingenieurbioologischen Bauweisen wie z. B. der Stabilbauweise ist bei Herstellung die Länge bzw. die Verzweigung der Pflanzen bekannt. Beim Nachweis der Standsicherheit von Dämmen mit natürlich gewachsener Vegetation kann nur auf Erfahrungswerte vom Ausgra-

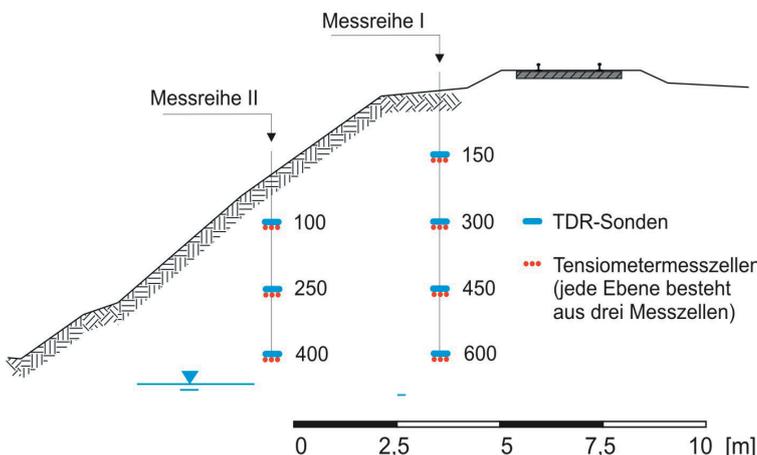


Bild 4: Installierte Messtechnik im Dammkörper

ben von Sträuchern und Bäumen zurückgegriffen werden bzw. auf die Wurzelmorphologie. In ähnlicher Weise kann auf die Wurzelichte geschlossen werden. Über indirekte Messverfahren, wie z. B. Saugspannungsmessungen durch Tensiometer oder Georadaruntersuchungen können nahezu zerstörungsfreie Aussagen zur Durchwurzelungstiefe in Böschungen gemacht werden.

3 Wasserhaushalt

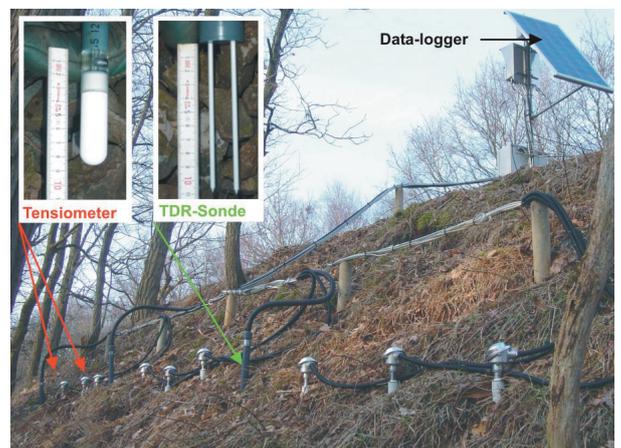
Es ist allgemein bekannt, dass die Saugspannungen im ungesättigten Boden, die letztlich als Kapillarkohäsion in die Standsicherheitsbeurteilung eingehen, die Standsicherheit von natürlichen Böschungen positiv beeinflussen. Der Wasserhaushalt in der teilgesättigten Bodenzone wird durch die Klimaelemente Niederschlag und Verdunstung beeinflusst.

Der Vorgang der Infiltration ist komplex und wird von den Bodeneigenschaften und der Topologie des Erdkörpers, der Dauer und Intensität des Niederschlags und der Vegetation beeinflusst. Vor allem der Bewuchs ist für die Infiltration von großer Bedeutung (Gray 1978). Die Verdunstung gliedert sich auf in die Oberflächenverdunstung (Evaporation) und die Verdunstung aus der Vegetation (Transpiration). Diese beiden Verdunstungserscheinungen werden unter dem Begriff Evapotranspiration subsumiert und sind i.W. von der Ausbildung der Bodenoberfläche und deren Exposition (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit) abhängig. Die mittlere jährliche Verdunstung beträgt in Deutschland ca. 550 mm , wobei der größte Teil von etwa 72% der Pflanzenverdunstung (über die Wurzelaufnahme) zugeordnet wird (Scheuermann 2005).

3.1 Messung des Wassergehaltes und der Saugspannung im Dammkörper

Die TDR-Technik (Time Domain Reflectometry) bietet die Möglichkeit, den volumetrischen Wassergehalt Θ im Boden kontinuierlich und zerstörungsfrei zu messen (Stacheder 1996). Zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes θ im Damm wurden 7 TDR-Sonden installiert (Katzenbach & Werner 2003).

Zur Messung der im Dammkörper wirkenden Saugspannungen ($u_a - u_w$) wurden in verschiedenen Tiefen sowohl im Böschungsbereich als auch in Dammmitte



insgesamt 21 Tensiometer, jeweils 3 in einer Messebene, eingebaut (Bild 4). Mit der Anordnung der Messgeber werden der Einfluss des Niederschlags und des vorhandenen Bewuchs auf die Änderungen des Feuchteregimes untersucht. Die Messwerterfassung erfolgt stündlich über einen Datenlogger mit Solarstromversorgung.

Die Auswertungen der Saugspannungs-Sättigungsmessungen im Dammkörper zeigen in den oberflächennahen Bereichen, d. h. bis in rd. 1,5 m Tiefe Abhängigkeiten bezüglich auftretender Niederschlagsereignisse. Anhaltende Niederschläge von mehreren Tagen führen zu einem um wenige Tage verzögerten, geringen Anstieg der Sättigungen.

Die durchwurzelte Bodenzone kann bis in rd. 3 m Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche und der Dammkrone identifiziert werden. Bis in diese Tiefen erreichen die Saugspannungen in der Vegetationsphase Saugspannungen bis 80 kN/m², die durch den Wasserentzug der Wurzeln erzeugt werden. In den nicht durchwurzeltten Bodenzonen, d. h. in Dammmitte, liegen die Saugspannungen in den Messebenen in 3 m, 4,5 m und 6 m unter der Dammkrone jahreszeitlich unabhängig zwischen 3 kN/m² und 10 kN/m².

Extremniederschlagsereignisse zeigen keine relevanten Auswirkungen auf die Saugspannungen und haben damit bei bewachsenen Böschungen keine baupraktische Bedeutung.

4 Fazit

Die Standsicherheit und damit die Gebrauchstauglichkeit von mit lebenden Baustoffen bewehrten Erdbauwerken werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Anhand von quantitativen Untersuchungen der Parameter der Boden-Wurzel-Interaktion unter Berücksichtigung von Erfahrungsgrößen und eigenen Untersuchungen kann die Festigkeitserhöhung durch Pflanzen nachgewiesen werden.

Literatur

- Commandeur, P.R., Pyles, M.R.* (1991): Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas-fir roots. Canadian journal of forest research, 21, 48–52.
- Florineth, F.* (2004): Pflanzen statt Beton. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- Gray, D.H.* (1970): Effects of forest clear-cutting on the Stability of Natural slopes. Association of Engineering Geologists, Bulletin of the Association of Engineering Geologists. No.1, 45–66.
- Hiller, H.* (1985): Zur Ausbildung des Wurzelwerks von Strauchweiden und ihr Beitrag zur Böschungssicherung. Ingenieurbiologie – Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Pflug, W. (Herausgeber), Jahrbuch 2, Sepia Verlag Aachen.
- Katzenbach, R., Werner, A.* (2005): Experimental studies for the increase of slope stability of historical embankments due to the effects of capillarity and vegetation. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka.
- Polomski, J., Kuhn, N.* (1998): Wurzelsysteme. Verlag Paul Haupt, Berlin • Stuttgart • Wien
- Scheuermann, A.* (2005): Durchfeuchtung quasihomogener Erddeiche. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericia Karlsruhe, Heft 164
- Schichtl, H.M.* (1985): Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. Ingenieurbiologie, Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie, SEPiA Verlag Aachen.
- Schuppener, B.* (1994): Die statische Berechnung der Bauweise Lebend Bewehrte Erde. Geotechnik, 18, 204–213.
- Stacheder, M.* (1996): Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, Band 4.