

Beanspruchung von Weiden durch die Strömung

Bericht über den Ausreisswiderstand von Weiden; Versuche in Neuseeland

Sollicitation des saules par l'écoulement

**Rapport sur la résistance à l'arrachement des saules;
Essais réalisés en Nouvelle-Zélande**

**Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich
Matthias Oplatka**

**Forschungsauftrag 65/92 auf Antrag des
Bundesamtes für Strassenbau (ASB)**

April 1995

Zusammenfassung

Für den Erosionsschutz von Ufern an Fliessgewässern können Weiden verwendet werden. Die Planung und Ausführung solcher Uferschutzmassnahmen basiert noch vorwiegend auf Erfahrungswerten. Breit abgestützte Dimensionierungsgrundlagen fehlen nämlich weitgehend. Ziel dieser Forschungsarbeit ist, Kriterien für die Dimensionierung von Uferverbauungen mit Weiden zu erarbeiten.

Wird eine Weide über- oder umströmt, so wirkt auf sie eine Strömungskraft. Dieser Kraft wird, nach dem Prinzip Aktio gleich Reaktio, ein Widerstand durch die unter dem Boden liegenden Pflanzenteile entgegengesetzt. Übertrifft die Strömungskraft den Widerstand, so kommt es zum Versagen der Weide. Einen wesentlichen Einfluss kann dabei die Erosion haben, welche den Widerstand stark vermindern und so zu einem Versagen führen kann.

Im vorliegenden Bericht wird ausschliesslich auf den Widerstand von Weiden eingegangen. Anhand von Ausreissversuchen an Steckholzpflanzen, von Beobachtungen im Felde, von Messungen der Materialeigenschaften von Wurzeln und deren Verteilung im Boden werden Zusammenhänge und Prozesse aufgezeigt, die für die Bestimmung des Widerstandes von Bedeutung sind. Dabei spielen Bodenaufbau und Pflanzenalter eine wichtige Rolle, hingegen sind die Unterschiede innerhalb der für den Uferverbau geeigneten Weidenarten eher unwesentlich.

Bei den Weiden kann es zu einem Versagen der Tragfähigkeit (Querschnittsversagen) oder der Stabilität (Grundbruch) kommen. Messungen zeigten, dass der Widerstand der Weiden im ungestörten Boden recht hoch ist. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse dürfte ein Versagen der Stabilität jedoch selten der massgebende Fall sein. Auch ein Versagen der Tragfähigkeit dürfte nur möglich sein, falls vorgängig ein Teil des die unterirdischen Pflanzenteile umgebenden Erdreichs ausgespült wurde.

Résumé

Les berges des cours d'eau peuvent être protégées contre l'érosion à l'aide de saules. La planification et la réalisation de telles mesures de protection sont encore essentiellement basées sur les expériences faites en pratique. Des critères de dimensionnement fondés et exhaustifs manquent encore. Le but du présent travail de recherche est ainsi de définir les critères nécessaires pour procéder au renforcement des talus par la plantation de saules.

Lorsqu'un saule se trouve dans l'écoulement ou est submergé par celui-ci, il subit une force à laquelle s'oppose, selon le principe d'action et réaction, une résistance provenant des parties souterraines de la plante. Si la force due à l'écoulement surpasse cette résistance, le saule est détruit ou perd sa fonction de protection. L'érosion locale du terrain exerce une influence prépondérante sur la résistance en question qui peut subir une forte diminution entraînant la destruction de la plante.

Ce rapport traite uniquement de la résistance des saules. Les processus et les facteurs qui influencent celle-ci sont montrés sur la base d'observations faites in situ, d'essais d'arrachement réalisés sur des boutures et de mesures portant sur les propriétés du matériau constituant les racines. La composition et la consistance du sol, ainsi que l'âge des plantes, jouent un rôle important. Par contre, les différences relevées entre les diverses variétés de saules utilisées pour la protection des berges sont insignifiantes.

Les saules peuvent être détruits soit par rupture, lorsque la résistance propre de leur section est dépassée, soit par déracinement, lorsque leur stabilité dans le sol n'est plus suffisante (glissement). Les mesures faites ont montré que la résistance des saules est relativement élevée en terrain compact, non perturbé. Il a été constaté que la perte de stabilité est rarement déterminante dans la destruction de la plante. De plus, la perte de résistance par rupture ne semble possible, que si une partie de la terre dans laquelle sont enfouies les racines a été préalablement délavée et que la plante en soit ainsi affaiblie.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
Verzeichnis der Abbildungen.....	3
1 Einführung.....	4
1.1 Allgemein	4
1.2 Beanspruchung von Weiden	5
1.2.1 Systemabgrenzung.....	5
1.2.2 Strömungsbelastung.....	6
1.2.3 Widerstand	6
1.2.4 Sicherheitsnachweis	7
1.3 Berichterstattung und zukünftige Untersuchungen.....	8
1.4 Literatur.....	8
2 Feldversuche.....	9
2.1 Vorbemerkungen.....	9
2.2 Uferverbauungen am Waimakariri River in Neuseeland.....	10
2.3 Boden und Wurzeln	11
2.3.1 Bodenaufbau.....	11
2.3.2 Wurzeln an Steckholzpflanzen.....	12
2.3.3 Wurzelwachstum in Kies	13
2.3.4 Wurzelwachstum im Kies mit überlagertem Silt.....	14
2.4 Einfluss der Erosion	14
2.4.1 Grundsätzliches.....	14
2.4.2 Oberflächenerosion und Kolk im Kies	15
2.4.3 Oberflächenerosion und Kolk im Kies mit überlagertem Silt....	15
2.4.4 Seitenerosion im Kies	15
2.4.5 Seitenerosion im Kies mit überlagertem Silt.....	15
2.5 Ausreissversuche.....	17
2.5.1 Testanordnung	17
2.5.2 Resultate.....	18
3 Tests Im Labor.....	23
3.1 Vorbemerkungen.....	23
3.2 Wurzeldurchmesser	23
3.3 Materialeigenschaften von Wurzeln.....	23
3.3.1 Testserien.....	23
3.3.2 Versuchsanordnung und -durchführung.....	24
3.3.3 Wurzeldehnung.....	26
3.3.4 Versagensmechanismus der Wurzeln.....	27
3.3.5 Vergleiche der Testserien 1 bis 3.....	30
3.4 Zunahme der Wurzeloberfläche nach Verzweigungen	31
3.5 Wurzelverteilung	33
3.6 E-Modul und Bruchspannung σ_r des Steckholzes.....	33
4 Folgerungen.....	34
5 Verdankungen.....	37
6 Literaturverzeichnis.....	38
7 Verwendete Zeichen und Symbole.....	40
8 Anhang.....	41

Verzeichnis der Abbildungen

Tabelle 1	Resultatübersicht der Ausreissversuche an Weiden.....	18
Bild 1	Schematisch dargestellte Pflanze, welche durch ein Steckholz vermehrt wurde (im folgenden als Steckholzpflanze beschrieben), mit Begriffsdefinitionen.....	5
Bild 2	Idealisierte Darstellung von Widerständen und möglichen Versagensformen einer Steckholzpflanze mit den entsprechenden Kräften. Versagen der Tragfähigkeit (links) und Versagen der Stabilität (rechts).....	6
Bild 3	Typische einjährige Weidenpflanzung in einem Bühnenzwischenfeld des Waimakariri Rivers in Neuseeland.....	11
Bild 4	Querschnitt durch ein Steckholz mit Adventivwurzel.....	12
Bild 5	Weidenwurzel aus einem Kiesboden (links) und aus einem Siltboden (rechts).....	13
Bild 6	Weidenpflanzen, die in einem reinen Kiesboden (links) und in einem Kiesboden, der mit einer etwa 25 cm dicken Siltschicht überlagert ist (rechts), aufwuchsen.....	13
Bild 7	Einfluss von Bodenaufbau und Wurzeln auf die Oberflächenerosion, den Kolk und die Seitenerosion.....	16
Bild 8	Zeit-Kraftdiagramm des Ausreissversuchs Nr. 18 an einer Steckholzpflanze im Kies. Unter Hauptwurzel wird die beim Zug am stärksten belastete Wurzel verstanden.....	18
Bild 9	Schematisch dargestellte Steckhölzer mit Wurzeln in Kies- und in Siltböden.....	24
Bild 10	Versuchsanordnung der drei verschiedenen Testserien.....	25
Bild 11	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Wurzeln verschiedener Durchmesser d [mm].....	27
Bild 12	Versagen von Wurzeln unter Zug a) im Kies und b) im Silt.	28
Bild 13	Versagen von Wurzelverzweigungen a) reiner Zugbruch und b) Kombination von Zug- und Scherbruch.....	28
Bild 14	Bruch einer Adventivwurzel beim Steckholz.....	29
Bild 15	Zugfestigkeit σ_{Br} von Weidenwurzeln in Kies und Silt.....	29
Bild 16	Zunahme der Wurzeloberfläche bei Verzweigungen.....	32
Bild 17	Schematische Darstellung der Zunahme der aufsummierten Wurzeloberfläche und somit des Reibungswiderstandes.....	32
Bild 18	Schematische Darstellung der Wurzelverteilung eines Steckholzes (a) im Kies und (b) im Kies, mit 30 cm Silt überlagert.	33

1 Einführung

1.1 Allgemein

Flussufer können durch verschiedene Verbauungsmethoden, wie zum Beispiel den Blockwurf, den Blocksatz, die Ufermauer oder auch mit Pflanzen gesichert werden. Für die Bemessung solcher Ufersicherungen sind ausser für die Verbauungen mit Pflanzen wissenschaftlich abgestützte Dimensionierungsregeln vorhanden. Einzig in der Wegleitung 1982 zum Hochwasserschutz an Fliessgewässern sind Belastungsgrenzwerte für Gräser und Weiden aufgeführt, welche aber nicht auf systematischen Untersuchungen basieren. Heute werden wieder vermehrt Pflanzen, vorwiegend Weiden, aber auch Erlen und andere eingesetzt. Die bekanntesten Verbauungsmethoden für Weiden sind das Setzen von Steckhölzern und bewurzelten Pflanzen (Setzlinge), der Faschinenbau und die Spreitlage (Schiechtl, 1994). Erlen werden vorwiegend als Setzlinge gepflanzt. Gründe, die für solche Verbauungsarten sprechen, können der ökologische Wert und - vor allem in ärmeren Ländern - die Kosten sein. Wegen mangelnder Bemessungskriterien bevorzugen die einen eher harte Verbauungsweisen, andere vertrauen hingegen vollständig auf die Pflanzen und gehen dabei bewusst oder unbewusst ein hohes Risiko ein.

Untersuchungen über die Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern wurden bis heute nur vereinzelt durchgeführt (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau, 1973; Florineth, 1982). Einer der Gründe dürfte sein, dass sich die Ingenieurbiologie aus den verschiedensten Fachgebieten, wie der Bodenmechanik, -physik, -chemie, der Botanik, der Statik, der Hydraulik und den verschiedenen Verbauungstechniken zusammensetzt, was die Forschung sehr aufwendig macht. Es ist deshalb sinnvoll, sich bei Untersuchungen auf die in der Praxis häufig anzutreffenden Situationen und die für die Sicherheit kritische Anwuchsphase zu beschränken.

Das Bundesamt für Strassenbau in Bern beauftragte am 4.11.1992 die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Grundlagen für Dimensionierungsregeln zu erarbeiten, die es dem Ingenieur erlauben, die Grenzen und Einsatzmöglichkeiten von ingenieurbiologischen Verbauungen an Flussufern abzuschätzen. Diese Grundlagen umfassten Naturversuche zur Bestimmung kritischer Ausreisskräfte von Uferschutzpflanzen. Der Auftrag wurde vom Autor in Neuseeland durchgeführt.

1.2 Beanspruchung von Weiden

1.2.1 Systemabgrenzung

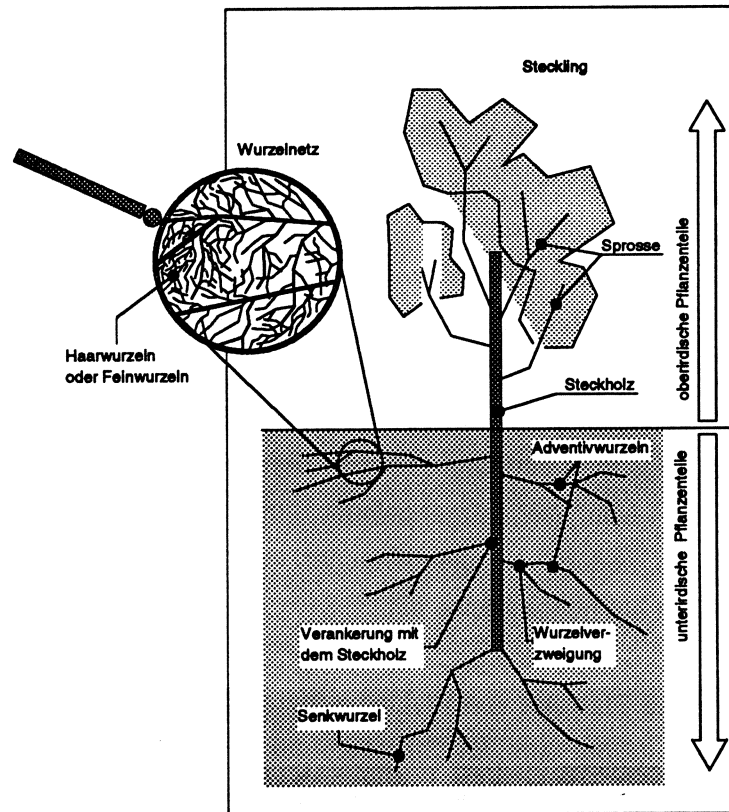


Bild 1 Schematisch dargestellte Pflanze, welche durch ein Steckholz vermehrt wurde (im folgenden als Steckholzpflanze beschrieben), mit Begriffsdefinitionen.

Wird eine Weide ganz oder teilweise überströmt, so wirkt auf sie eine Kraft. Die unterirdischen Pflanzenteile müssen nach dem Prinzip 'Aktio gleich Reaktio' dieser angreifenden Kraft einen Widerstand entgegensetzen. Kann die Pflanze den entsprechenden Widerstand nicht aufbringen, so wird sie ausgerissen, oder es kommt zum Bruch infolge Querschnittsversagens (Bild 2). Welcher dieser beiden Versagensprozesse massgebend ist, ist kaum bekannt, da die Prozesse in der Natur nur schwer beobachtbar sind. Es ist durchaus auch eine Kombination denkbar.

Es wird von einem Modell mit zwei voneinander unabhängigen Teilsystemen ausgegangen. Die Strömung und somit die angreifende Kraft wirkt nur auf die oberirdischen Pflanzenteile. Die unterirdischen Pflanzenteile bilden mit der Bodenmatrix den Widerstand. Die Grösse der beiden Teilsysteme kann sich aber infolge von Erosion oder Auflandung ändern, wobei die Erosion der kritischere Fall sein wird. Es stellen sich nun für die Arbeit die folgenden drei Hauptfragen:

1. Wie gross ist die auf die Pflanze wirkende Kraft infolge der Strömung (Anströmkraft)?
2. Welche Prozesse führen zum Versagen, und wie gross sind die entsprechenden Widerstände von Pflanze und Boden?
3. Wie gross ist die Reduktion des Widerstandes infolge Erosion?

1.2.2 Strömungsbelastung

Durch die Strömung erfährt die Pflanze eine angreifende Belastung, welche als resultierende Kraft F im Angriffsschwerpunkt zusammengefasst und durch das Newtonsche Widerstandsgesetz beschrieben werden kann:

$$F = C_D \rho A \frac{v^2}{2} . \quad (1)$$

Für Baumstämme, welche als starr betrachtet werden können, und Brückenpfeiler existieren Untersuchungen (DFG, 1987), in welchen der Koeffizient C_D bestimmt wurde. Im Gegensatz zu diesen starren Körpern verhalten sich junge Weiden jedoch in hohem Masse flexibel. Deshalb dürften der Fließwiderstandskoeffizient C_D und die angeströmte Fläche A von der Fließgeschwindigkeit v abhängig sein. Ansätze für deren Berechnung gibt es erst an sehr kleinen Modellbäumen und an Ästen (Lindner, 1982), Getreidehalmen (Schulz, 1987) und beim Schilf (Binz, 1989). An Büschen fehlen solche jedoch noch vollständig.

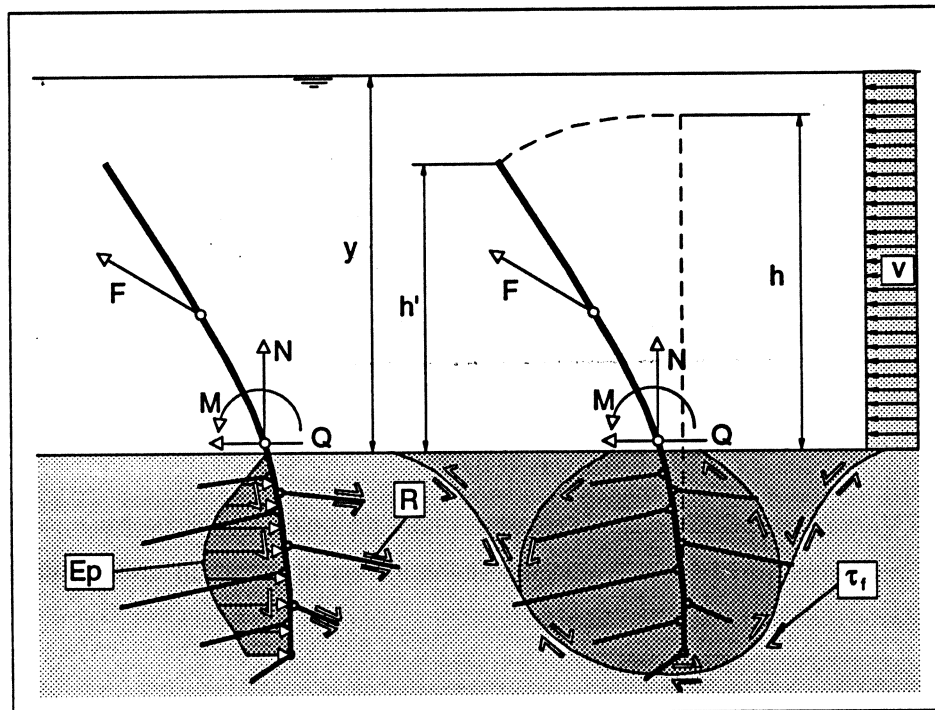


Bild 2 Idealisierte Darstellung von Widerständen und möglichen Versagensformen einer Steckholzpflanze mit den entsprechenden Kräften. Versagen der Tragfähigkeit (links) und Versagen der Stabilität (rechts).

1.2.3 Widerstand

Die unterirdischen Pflanzenteile setzen sich aus einem Teil des Steckholzes und den Adventivwurzeln zusammen. Die Wurzelverteilung und das Zusammenspiel von Wurzeln und Steckholz mit dem Boden sind derart kompliziert, dass vereinfachte Modellannahmen zwingend sind. Die Modellvorstellungen gehen davon aus, dass die Wurzeln nur auf Zug beansprucht sind und somit keine

Momente und Querkräfte übertragen können. Hingegen kann das Steckholz Quer- und Normalkräfte sowie ein Moment aufnehmen.

Die Abtragung der Kräfte in den Boden kann nun weiter aufgeteilt werden. Durch die Belastung und die daraus resultierende Deformation des Steckholzes wird ein passiver Erddruck E_p induziert. Ferner werden Reibungskräfte R zwischen dem Boden und den Pflanzenteilen, den Wurzeln und dem Steckholz mobilisiert.

Wurzeln beeinflussen die Scherfestigkeit τ_f des Bodens massgebend. In durchwurzelten Böden wird die Scherfestigkeit durch eine scheinbare Kohäsion c'_w , welche wie die Kohäsion c' wirkt, erhöht (Gray and Leiser, 1982). Der Betrag von c'_w ist abhängig vom Grad der Durchwurzlung.

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg}(\varphi') + c' + c'_w \quad (2)$$

Ist der Boden bei Hochwasser vollständig gesättigt, so wird die Scherfestigkeit reduziert.

Die Kohäsion kann bei Steckhölzern, welche eine kurze Länge t im Verhältnis zur Dicke D_s aufweisen, einen erheblichen Einfluss auf den passiven Erddruck haben. Für einen starren Pfeiler kann er wie folgt abgeschätzt werden (Lang/Huder, 1985):

$$E_p \approx 3 D_s \left(\gamma' \frac{(0.6t)^2}{2} K_p + 2(c' + c'_w) \sqrt{K_p 0.6t} + \gamma \gamma_w K_p 0.6t \right) \quad (3)$$

wobei:

$3 D_s$ die mitwirkende Breite und

$0.6 t$ die mitwirkende Tiefe ist.

1.2.4 Sicherheitsnachweis

Da zwei Versagensprozesse denkbar sind, muss für beide ein Sicherheitsnachweis erfolgen. Für das Querschnittsversagen ist ein Tragfähigkeitsnachweis erforderlich und für das Versagen infolge Ausreissens ein Stabilitätsnachweis.

Im Tragfähigkeitsnachweis muss nachgewiesen werden, dass der Widerstand der einzelnen Elemente der Pflanze, wie der Wurzeln und des Steckholzes, grösser ist als die Belastung. Dazu müssen Vorstellungen über die mitwirkenden Wurzeln und über die Wechselwirkung von Pflanze und Boden entwickelt werden. Ferner werden Angaben zu den Festigkeitseigenschaften der Wurzeln und des Steckholzes benötigt.

Im Stabilitätsnachweis wird aufgezeigt, dass das System Wurzeln und Boden genügend stabil ist, um den angreifenden Kräften widerstehen zu können. Im Falle des Versagens wird es zur Ausbildung eines Gleitkreises mit Schubspannungen τ kommen, welche grösser als die Scherfestigkeit τ_f des Bodens sind (Bild 2).

Damit es nicht zum Versagen kommt, müssen die beiden untenstehenden Gleichungen erfüllt, respektive die zwei Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Stabilität}}$ und $S_{\text{Tragfähigkeit}}$ grösser oder gleich als 1.0 sein.

$$1 \leq S_{\text{Tragfähigkeit}} = \frac{\sigma_f}{\sigma} = \frac{\text{Festigkeit im massgebenden Querschnitt}}{\text{vorhandene Spannung}} \quad (4)$$

$$1 \leq S_{\text{Stabilität}} = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\text{Scherfestigkeit des Bodens}}{\text{vorhandene Schubspannung}} \quad (5)$$

1.3 Berichterstattung und zukünftige Untersuchungen

Die Untersuchungen können auf die angreifenden Kräfte (Strömungskraft) und den Widerstand aufgeteilt werden. Versuche zu letzterem wurden vorwiegend in Neuseeland durchgeführt und sind Gegenstand des vorliegenden Berichtes. Es wurden dazu sowohl Feld- als auch Laborversuche unternommen. Sämtliche Tests wurden in Neuseeland an der University of Canterbury in Christchurch und dem Waimakariri River durchgeführt. Die dortigen Verhältnisse lassen sich grösstenteils auch auf die mitteleuropäischen übertragen. Bei den Feldversuchen wurden an 42 drei- bis sechsjährigen Weiden, welche als Stechhölzer gepflanzt wurden, die Ausreisskräfte in Strömungsrichtung gemessen. Daneben lieferten Feldbeobachtungen weitere wertvolle qualitative Angaben. Parallel dazu wurden im Labor Wurzelkräfte, Wurzelverteilungen und weitere pflanzen- und bodenspezifische Parameter bestimmt.

Um das Produkt von $A \cdot C_D$ und somit die Anströmkräfte bestimmen zu können, sind Versuche mit Weiden in einem Schleppkanal vorgesehen. Aus dem Vergleich dieser Kräfte mit dem Widerstand sollen Dimensionierungskriterien abgeleitet werden.

1.4 Literatur

Da quantitative Untersuchungen im Bereich von Lebendverbauungen mit viel Aufwand verbunden sind, wurden systematische Versuche bis jetzt selten durchgeführt, und entsprechend ist auch nur wenig Literatur dazu vorhanden. Dennoch konnten für die Planung der Versuche in Neuseeland einige wertvolle Literaturhinweise gefunden werden. Die meisten Untersuchungen (Hiller, 1966; Hathaway, 1973; Hähne, 1991) wurden jedoch in einem Pflanzgarten durchgeführt. Dort herrschen für die Pflanzen optimale Wachstumsbedingungen im Gegensatz zu den Verhältnissen an Flussufern. Untersuchungen von Pflanzen an Böschungen konnten ebenfalls nur bedingt verwendet werden, da auch dort die Verhältnisse zu verschieden sind. Die von Hiller (1966) und Hathaway (1973) untersuchten Weiden waren nicht älter als ein Jahr. Von Interesse müssten aber auch die nachfolgenden Jahre sein, weil die Nährstoff- und Wasseraufnahme dann nur noch via die Wurzeln erfolgt und die Reserven aus dem Steckholz dazu nicht mehr ausreichen. Solche Randbedingungen sollten unbedingt bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden.

Aus den Arbeiten von Schiechtl (z.B.1992) geht hervor, dass sich für Weidenverbauungen in der Weichholzzone an geschiebeführenden Flüssen vorwiegend die Arten *Salix purpurea* (Purpurweide) und *Salix elaeagnos* (Lavendelweide) eignen. Sie sind relativ anspruchslos in bezug auf die Standortbedingungen, überstehen längere Überflutungszeiten, sind sehr überschotterungsresistent und weisen einen hohen Anwuchserfolg auf. Hathaway (1973) empfiehlt zusätzlich, die in Europa weniger bekannte Weidenart *Salix Matsudana* zu verwenden.

Hähnes Ausreissversuche (1982) an Böschungen ergaben eine Grössenordnung der zu erwartenden Kräfte von 3.5 bis 5.5 kN. Aufgrund seiner Resultate und der Beschreibung der Messausrüstung konnte die eigene Messapparatur dimensioniert werden.

Hathaway (1973) führte Untersuchungen zum Thema "Factors affecting the soil binding capacity of the root systems of some populus and salix clones" durch. Sein Versuchsprogramm beinhaltete vertikale Ausziehversuche an einjährigen Weiden, sowie Messungen der Wurzelzugfestigkeiten und weiterer wurzel- und bodenspezifischer Parameter. Das Ziel seiner Arbeit war unter anderem, die gemessenen Ausziehkräfte an den einjährigen Weiden durch Berechnung der Widerstandskraft der unterirdischen Pflanzenteile nachvollziehen zu können. Für die vorliegende Arbeit konnten teilweise die Versuchsanordnung für die Wurzelzugversuche und die Daten zur Weidenart *Salix purpurea* Booth und *Salix Matsudana* übernommen werden. Hathaway führte sämtliche Versuche an Weiden aus dem Pflanzgarten durch und nicht unter Naturbedingungen, so dass seine Werte, was zum Beispiel die Wurzelzugversuche anbelangt, eher zu günstig sind (Anhang Bild A4).

2 Feldversuche

2.1 Vorbemerkungen

Die Felduntersuchungen beinhalteten Ausreissversuche an Steckholzpflanzen sowie Beobachtungen mit dem Ziel, Informationen über den Boden zu gewinnen und Zusammenhänge zwischen Wurzelform, Wurzelverteilung und dem Boden zu erhalten. Ein Teil dieser Untersuchungen erfolgte auch im Labor.

Im weiteren wurde das Verhalten der Pflanzen im Hochwasserfall und die dabei entstandenen Schäden studiert. Interessiert hatte hierbei die Frage, wie es zu Erosionsschäden in den Pflanzungen kommt und welche Rolle die Wurzeln dabei spielen. Diese Beobachtungen lieferten wiederum zusätzliche Informationen für die Planung der Ausreissversuche.

In den Ausreissversuchen wurden Steckholzpflanzen mit einem Traktor in Strömungsrichtung ausgerissen. Gemessen wurden dabei die Kräfte, die zum Versagen der Pflanze führten. Aus den

Feldbeobachtungen ging hervor, dass Fälle mit verschiedenem Bodenaufbau und unterschiedlichen Erosionsformen im Hinblick auf deren Beeinflussung des Widerstandes der Pflanze untersucht werden mussten. Weiter waren spezielle Versuche notwendig, um zu bestimmen, welcher Anteil der angreifenden Kraft über das Steckholz und welcher über die Wurzeln in den Boden abgegeben wird. Die Untersuchungen wurden auf die drei häufig verwendeten Weidenarten *Salix purpurea*, *Salix elaeagnos* und *Salix matsudana x alba* beschränkt, wobei sämtliche Pflanzen jünger als sechs Jahre waren.

2.2 Uferverbauungen am Waimakariri River in Neuseeland

Der Waimakariri River entspringt in den neuseeländischen Südalpen und fließt auf den letzten fünfzig Kilometern als breiter, sich stark verzweigender Fluss mit einem Gefälle von etwa 0.5% durch die Canterbury Plains dem Meer entgegen. Die Ufer, sofern nötig, sind mit Dämmen und langen, rechtwinklig zur Flussachse angeordneten Buhnen gesichert. Der Abstand der Dämme beträgt etwa einen Kilometer. Die Buhnenzwischenfelder sind flächig mit Steckholzpflanzen (Bild 3) und an den Ufern mit grossen Faschinen stabilisiert (Achesson, 1968). Der Waimakariri River führt mehrmals jährlich Hochwasser, während denen es zur Überströmung der Pflanzungen kommt. Diese Steckholzpflanzen eigneten sich dann auch wegen den häufig vorkommenden Hochwasserbedingungen zur Durchführung der Ausziehversuche und der Beobachtungen. Die Weiden auf den etwas höher gelegenen Vorländern waren durch periodische Trockenheiten geprägt und wurden praktisch nie von der Strömung beansprucht. Da sie deshalb ein anderes Wuchsverhalten aufwiesen als solche nahe der Wasserlinie, wurden keine Versuche mit Weiden auf den Vorländern durchgeführt.

In Neuseeland werden schon seit der Besiedelung im letzten Jahrhundert die Ufer häufig mit aus Europa importierten Weiden gesichert. Die Unterhaltsequipen entwickelten im Laufe der Jahre eine effiziente Pflanztechnik, welche laufend verbessert wurde. Das Canterbury Regional Council, das für den Waimakariri zuständig ist, pflanzt 1.3 bis 2 Meter lange und 20-75 mm dicke Steckhölzer in die vorher von Konkurrenzpflanzen geräumten Buhnenzwischenfelder. Die Pflanzung erfolgt mit Hilfe eines Raupenbaggers, hinter dem eine V-förmige Pflugschar gezogen wird, welche es ermöglicht, Steckhölzer bis in eine Tiefe von 75 cm schonend zu setzen. Die Steckholzpflanzen werden in Reihen parallel zur Strömung und in Abständen von etwa 3 Metern gepflanzt (Bild 3). Der Anwuchserfolg liegt im Durchschnitt bei etwa 50-60%, was verglichen mit etwa 80% in Europa als gering gilt. Hauptgründe dieser schlechten Erfolgsquote sind der Verbiss durch Tiere und die Trockenheit ausserhalb der häufig überfluteten Gebiete. Hinzu kommen Schäden während des Hochwassers durch Erosion, Auflandung und Abrasion infolge von Geschiebetrieb.



Bild 3 Typische einjährige Weidenpflanzung in einem Bühnenzwischenfeld des Waimakariri Rivers in Neuseeland.

2.3 Boden und Wurzeln

2.3.1 Bodenaufbau

Der Waimakariri River weist eine starke Dynamik auf und führt bei Hochwasser in der Regel grössere Mengen an Geschiebe und Schwebstoffen mit sich. In diesen stark verzweigten Flüssen lösen sich Auflandungen und Erosionen ab, wobei die zeitliche und räumliche Ausdehnung der Prozesse sehr unterschiedlich sein kann. Dieses häufig ändernde Fließmuster hinterlässt einen unregelmässigen Bodenaufbau. An den Versuchsorten konnten reine Kiesböden mit einem kleinen Feinanteil und solche, welche noch von einer Sand/Siltschicht überlagert wurden, unterschieden werden (Anhang Bild A1). Der Siltanteil war jeweils höher als der Sandanteil, so dass im vorliegenden Text nur noch von Siltböden, respektive vom Silt die Rede sein wird. Mischungen von Kies- und Siltschichten kamen selten vor, respektive ihr bodenmechanisches Verhalten konnte immer einer der zwei Bodenarten zugeordnet werden. Der Tonanteil in den Feinböden war klein und somit auch die Kohäsion dieser Schichten. Tiefgründige Siltböden konnten keine beobachtet werden, sondern immer nur Schichten von 20-30 cm Stärke. In bezug auf Erosion sind die Kiesböden wesentlich resistenter als die Siltböden. Der Grundwasserspiegel ist grossen Schwankungen unterworfen, welche vor allem von der momentanen Wasserführung und der Lage der einzelnen Flussäste abhängig sind.

Der Aufbau und die Korngrößenverteilung der Böden ist entscheidend für das Wachstum der Pflanzen und die Ausbildung der Wurzelsysteme (Köstler et al., 1968). Hinzu kommt, dass die Wurzeln mit ihrer bodenfestigenden Wirkung auch zu einer Bodenverbesserung im Sinne einer Stabilitätserhöhung beitragen können.

2.3.2 Wurzeln an Steckholzpflanzen

Nach dem Einschlagen eines Steckholzes treiben, sofern die Bedingungen günstig sind, schon nach wenigen Tagen im Boden die Adventivwurzeln und oberhalb der Bodenoberfläche die Sprosse aus (Bild 1). Da für diesen Bericht nur Steckholzpflanzen untersucht wurden, sind, wenn von Wurzeln die Rede ist, immer Adventivwurzeln gemeint. Der Ursprung dieser Adventivwurzeln liegt in undifferenziertem Gewebe in der Nähe des vaskularen Kambiums, welches die Wachstumschicht zwischen dem sekundären Xylem und dem sekundären Phloem bildet (Bild 4). Zusätzlich findet aber auch eine intensive Wurzelbildung im Wundgewebe der Schnittstellen des Steckholzes statt. Im folgenden wird das sekundäre Xylem als 'Holz' und das sekundäre Phloem zusammen mit dem Rhytidom als 'Rinde' bezeichnet. Eine Adventivwurzel wird nie bis in den Kern des Steckholzes reichen, sondern nur gerade bis in die Region des vaskularen Kambiums zum Zeitpunkt ihres Wachstumsbeginnes. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den aus Samen gewachsenen Weiden, deren allererste Wurzeln bis in den Kern des Holzes hineinreichen (Sieber, 1994). Wachsen bei diesen Pflanzen zu einem späteren Zeitpunkt weitere Wurzeln, so weisen sie ähnliche Verankerungseigenschaften, wie Adventivwurzeln bei einem Steckholz, auf. Nimmt nun der Durchmesser des Steckholzes mit zunehmendem Wachstumsalter zu, so werden die Adventivwurzeln immer besser im ehemaligen Steckholz eingebunden. Deshalb weisen auch Wurzeln mit gleichem Alter, aber unterschiedlichem Durchmesser d eine ähnliche Verankerungslänge p im Steckholz auf. Vermutlich hängt das Verhältnis von d/p von der Zahl der Wurzeln sowie von den Bodenverhältnissen ab. Über die Veränderung dieses Verhältnisses mit zunehmendem Alter ist jedoch kaum etwas bekannt.

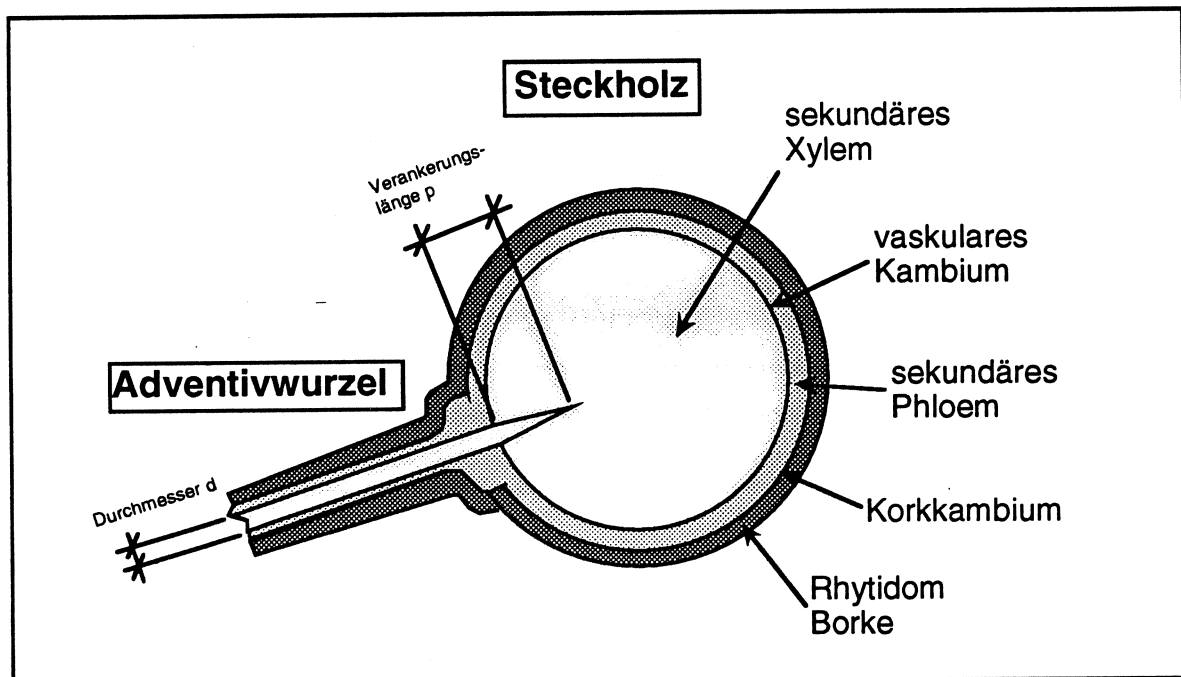


Bild 4 Querschnitt durch ein Steckholz mit einer entwickelten Adventivwurzel.

2.3.3 Wurzelwachstum in Kies

Die beobachteten reinen Kiesböden weisen einen Wassergehalt oberhalb des Grundwasserspiegels von 4-5% auf, was für die Pflanze eine starke Einschränkung bei der Aufnahme von Nährstoffen und Wasser bedeutet. Zusätzlich trocknen etwa die obersten 10 cm regelmässig aus, so dass ein Wurzelwachstum dort nochmals eingeschränkt, wenn nicht sogar verunmöglicht wird. Die Wachstumsbedingungen müssen deshalb als schwierig bezeichnet werden.

Die Wurzelverteilung ist sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung gleichmässig, mit Ausnahme dicker Senkwurzeln, welche am Ende des Steckholzes in die Tiefe wachsen (Bild 1). Alle anderen Wurzeln wachsen horizontal bis leicht abwärts geneigt, radial vom Steckholz weg. Die Einzelwurzel selbst (Bild 5) weist einen ständig wechselnden Querschnitt auf. Die Wurzel muss bei ihrem Vordringen durch die Bodenmatrix um die Kieselsteine herumwachsen, was ihr dann auch die Form aufzwingt. Der Anteil der Feinwurzeln an der Gesamtwurzelmasse ist klein. Der Boden wird darum nur schlecht gebunden, weshalb denn auch die Erhöhung der Scherfestigkeit τ des Bodens vernachlässigbar ist. Aufgrund des beschränkten Nährstoff- und Wasserangebots dürften die Wurzeln jedoch länger sein als in Feinböden.

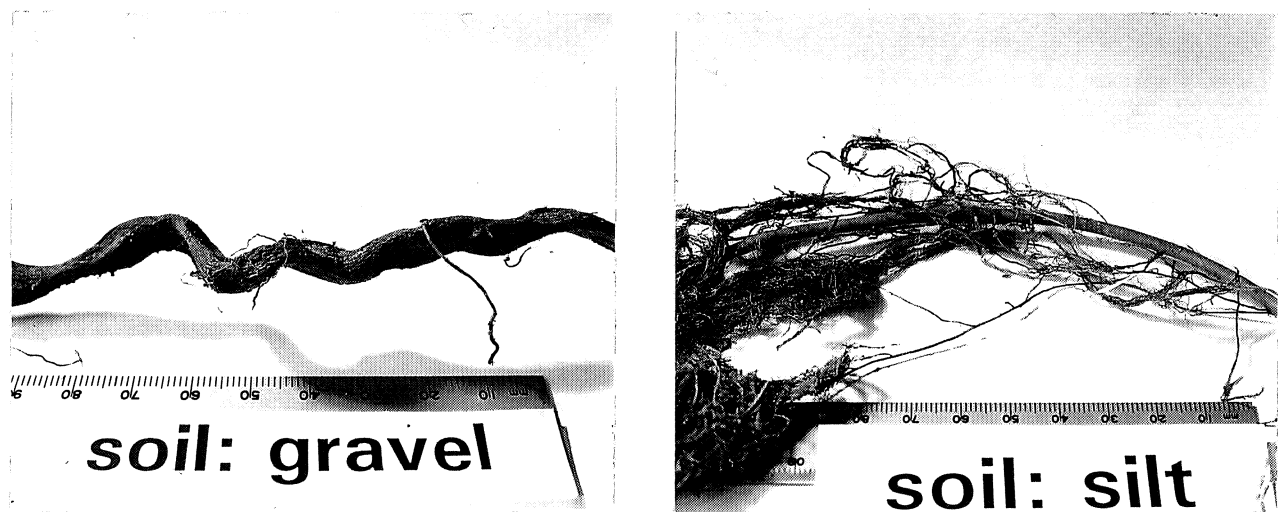


Bild 5 Weidenwurzel aus einem Kiesboden (links) und aus einem Siltboden (rechts).

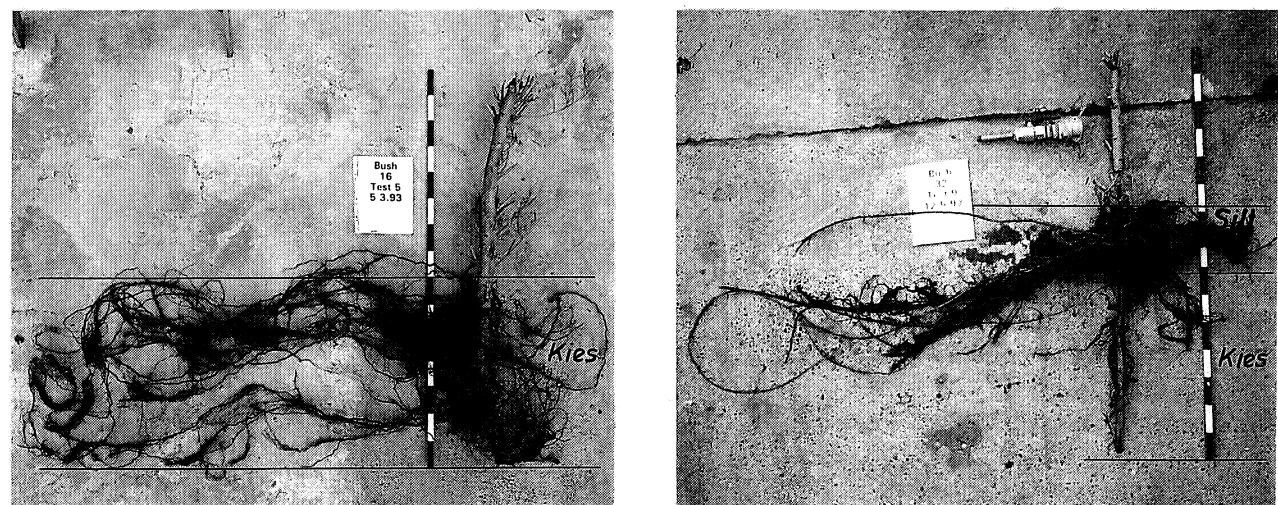


Bild 6 Weidenpflanzen, die in einem reinen Kiesboden (links) und in einem Kiesboden, der mit einer etwa 25 cm dicken Siltschicht überlagert ist (rechts), aufwuchsen.

2.3.4 Wurzelwachstum im Kies mit überlagertem Silt

Im Gegensatz zu den 4-5% Wassergehalt der Kiesschicht weist die Siltschicht einen solchen von 30-35% auf und damit auch eine hohe Verfügbarkeit von Nährstoffen. Deshalb wird von den Wurzeln der Silt gegenüber dem Kies bevorzugt (Bild 6 und 6a). Es besteht hier auch kaum die Gefahr des Austrocknens, so dass die ersten Wurzeln gleich unter der Oberfläche wachsen. Schon kurze Zeit nach der Pflanzung beginnt sich ein eng vernetztes Wurzelsystem zu bilden, welches den Boden äusserst gut zu binden vermag. Demzufolge nimmt auch die Scherfestigkeit des Bodens, respektive die scheinbare Kohäsion c'_w mit steigendem Durchwurzelungsgrad zu. In der darunter liegenden Kiesschicht wachsen nur noch wenige, verkümmerte Wurzeln.

In der Siltschicht wachsen die Wurzeln radial in horizontaler Richtung vom Steckholz weg. Die Bodenmatrix behindert die Wurzeln in ihrem Wachstum nicht, so dass diese durchgehend kreisförmige Querschnitte aufweisen (Bild 5).

2.4 Einfluss der Erosion

2.4.1 Grundsätzliches

Es können am Fluss drei verschiedene Erosionsformen, die Oberflächenerosion, der Kolk und die Seitenerosion, unterschieden werden. Die ersten zwei unterscheiden sich durch ihre räumliche Ausdehnung. Der Kolk ist lokal beschränkt und entsteht infolge einer lokalen Ablenkung der Strömung durch ein Objekt, in diesem Falle einer Weide. Die Oberflächenerosion findet dagegen grossflächig an der Sohle und an den Ufern statt. Bei der Betrachtung wird zusätzlich zu den Erosionsarten auch nach den unterschiedlichen Bodenarten differenziert. Demzufolge wird zwischen sechs Fällen unterschieden. Da aber der Kolk und die Oberflächenerosion einen ähnlichen Einfluss auf den Widerstand der Weide bewirken, kann die Untersuchung auf vier Fälle beschränkt werden. Zudem handelt es sich bei den in der Natur vorkommenden Erosionen oftmals um Kombinationen der verschiedenen Erosionsformen.

Werden nun Teile des Wurzelsystems durch Erosion freigelegt, so führt dies zwangsläufig zu einer Reduktion des Widerstandes und gleichzeitig zu einer Zunahme der angeströmten Fläche und somit auch der Belastung. Die Erosionsprozesse können für die Stabilität der Pflanze demnach von entscheidender Bedeutung sein (Bild 7 und Anhang Tabellen A1 und A2).

Im Prinzip müsste neben der Erosion auch die Auflandung betrachtet werden. Sie ist aber in bezug auf das Versagen einer Weide nicht der massgebende Fall. Ein Problem kann allerdings entstehen, wenn eine Weide mehr als 10 cm von Geschiebe überdeckt wird, so dass sie nicht mehr ausschlagen kann und abstirbt. Wird jedoch eine Weide nur teilweise mit Geschiebe überdeckt, so bilden sich an den im Boden liegenden Teilen neue, zusätzliche Adventivwurzeln. Bei solchen Weiden dürfte der Widerstand zunehmen, vorausgesetzt es handelt sich dabei um eine überschotterungsresistente Art. Abrasionsschäden an den Ästen durch das Geschiebe können die Weide nur so lange schwächen, bis neue Sprosse nachgewachsen sind.

2.4.2 Oberflächenerosion und Kolk im Kies

Da die Wurzeln der jungen Pflanzen den Kies nicht zu binden vermögen und somit auch die Scherfestigkeit nicht erhöht wird, hängt das Ausmass der Oberflächenerosion und des Kolkes unter anderem vom Korndurchmesser ab. Ein Kolk oder Anzeichen von Oberflächenerosion waren bei den meisten untersuchten Weiden beobachtbar. Eine Destabilisierung der Weide dürfte deswegen aber kaum erfolgen, da in diesem Bereich nur wenige Wurzeln wachsen (Bild 7d). Einen Einfluss hingegen haben die oberirdischen Pflanzenteile auf die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit und somit auf die Schubspannung an der Bodenoberfläche (DFG, 1987; Beffa, 1994).

2.4.3 Oberflächenerosion und Kolk im Kies mit überlagertem Silt

Solange sich kein durchgehendes Wurzelsystem zwischen den einzelnen Weiden gebildet hat, ist der Siltboden sehr leicht erodierbar. Während des Hochwassers werden dann die noch unbewurzelten Zwischenräume bis auf die Kiesschicht ausgewaschen, und das Wurzelsystem wird stromabwärts gespült (Bild 7c). Zurück bleibt ein stromabwärts gerichteter und lose aufliegender Wurzelteppich mit viel gebundenem Sand und Silt, der jedoch keine Verbindung zur darunter liegenden Kiesschicht hat. Die der Strömung ausgesetzte Fläche nimmt somit zu, und die verbleibende Verankerung im Kies ist nur noch schwach. Beobachtungen zeigten dann auch, dass bei solchen Verhältnissen die Pflanzungen erstaunlich viele Lücken aufwiesen und der Widerstand der verbleibenden Weiden sichtbar reduziert war.

Hat sich aber einmal ein durchgehender Wurzelteppich gebildet, so nimmt die scheinbare Kohäsion c'_w und somit auch der Widerstand zu. In solchen Fällen konnten denn auch kaum noch Schäden infolge Kolkung oder Oberflächenerosion beobachtet werden.

2.4.4 Seitenerosion im Kies

Kommt es zur Seitenerosion im Kies, so kann beobachtet werden, dass die Pflanze die Erosion kaum zu reduzieren vermag. Der Grund dürfte sein, dass die untersuchten jungen Pflanzen, wie schon im Kapitel 2.3.2 erwähnt, die Scherfestigkeit des Bodens nicht zu erhöhen vermögen und somit den Prozess der Seitenerosion nicht beeinflussen können. Zusätzlich durchgeführte qualitative Tests an mit einem Wasserstrahl simulierten Seitenerosionen scheinen diese Beobachtungen zu bestätigen. Für die Stabilität der Böschung war wiederum die Korngrößenverteilung und somit der innere Reibungswinkel φ' entscheidend (Bild 7f).

2.4.5 Seitenerosion im Kies mit überlagertem Silt

Es müssen verschiedene Fälle unterschieden werden. Bei Seitenerosionen sehr tief unterhalb der Siltschicht konnte ein ähnliches Verhalten vorgefunden werden, wie es unter 2.4.4 beschrieben ist. Ein häufig beobachteter Fall war jedoch, dass der Hochwasserspiegel auf der Höhe des Silts lag

und die Seitenerosion kleiner als im Kies ausfiel. Der Grund dürfte darin liegen, dass das eng vernetzte Wurzelsystem zusammen mit dem gebundenem Silt über die Böschung hing und somit lokal die Strömungsgeschwindigkeit zu reduzieren vermochte. Büsche, welche in die Strömung kippten, wirkten wie kleine Buhnen. Nach dem Abklingen des Hochwassers vermochten die Weidenwurzeln, sofern Bodenkontakt bestand und genügend Zeit bis zum nächsten Hochwasser bestand, wieder anzuwachsen und die Böschung zu festigen (Bild 7e). Hatte sich aber noch kein durchgehender Wurzelteppich gebildet, so konnten die Büsche relativ leicht fortgeschwemmt werden.

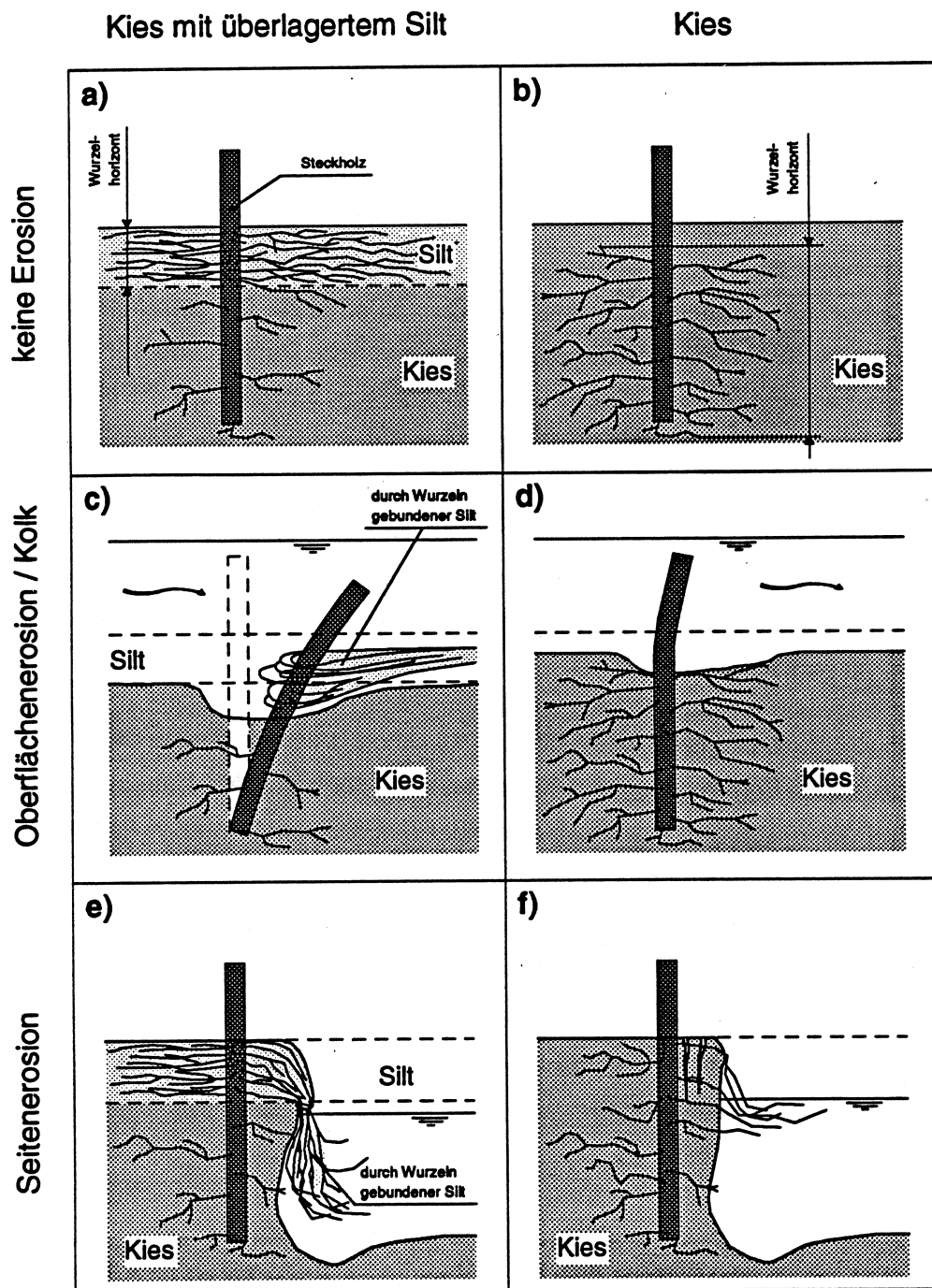


Bild 7

Einfluss von Bodenaufbau und Wurzeln auf die Oberflächenerosion, den Kolk und die Seitenerosion.

2.5 Ausreissversuche

2.5.1 Testanordnung

Zwischen Dezember 1992 und Juni 1993 wurden 42 drei- bis sechsjährige Weiden, welche als Steckholz gepflanzt wurden, horizontal in Richtung der auf die Pflanze wirkenden Strömungskraft ausgerissen. Die Testpflanzen wuchsen entweder in den Bunnenzwischenfeldern oder direkt im Flussbett. Es wurde nicht zwischen den drei verschiedenen Spezies unterschieden, da angenommen wurde, dass die getesteten Weidenarten alle für Flussumsicherungen geeignet sind und dass Klima, Bodenart, Pflanzenalter und -geometrie die artenbedingten Unterschiede bei weitem überwiegen.

Zu Beginn einer Testserie wurden die Geometrie der Pflanzen (Steckholzdurchmesser, Höhe, Breite, Tiefe der Pflanze, längster Spross, Anzahl und Volumen der Sprosse) ausgemessen und Bodenparameter erhoben. Anschliessend wurde der Boden während einer Stunde bewässert, um möglichst hochwasserähnliche Testbedingungen zu erhalten. Bei einzelnen Versuchen wurde anschliessend die Seitenerosion oder die Kolkung simuliert. Dann wurde auf etwa 20 cm Höhe über der Bodenoberfläche an der Pflanze eine Bandschlinge befestigt, an die eine torsionsfrei gelagerte, mit Dehnmessstreifen bestückte Kraftmesssonde fixiert wurde. Die Messzelle konnte Kräfte bis 20 kN aufnehmen und war zusätzlich mit einer Sicherung gegen Überlastfälle ausgerüstet. Sämtliche weiteren Komponenten der Messkette wiesen höhere Lastgrenzen auf. Die Zugkraft wurde durch einen Traktor mit hydraulischer Ladeschaufel horizontal bis maximal 20° steigend so langsam und konstant als möglich aufgebracht. Das eigentliche Ausreissen der Pflanze dauerte zwischen 20 und 70 Sekunden.

Gezogen wurde so lange, bis entweder das Steckholz brach (Versagen der Tragfähigkeit) oder die Pflanze aus dem Boden gezogen wurde (Versagen der Stabilität). Dabei wurden Verlauf und maximale Kraft gemessen und auf einem Schreiber aufgezeichnet. In allen Fällen stieg die Kraft monoton bis zu einem Maximum an. Von dann an mussten verschiedene Fälle unterschieden werden. Beispielsweise brach oder knickte das Steckholz, eine oder mehrere Hauptwurzeln brachen, oder im Falle der Seitenerosion kam es erst zum Grundbruch (= teilweises Versagen der Stabilität) und anschliessend zum Brechen der Wurzeln (= Versagen der Tragfähigkeit). Die aufgebrachte Zugkraft nahm in der Regel schlagartig ab, konnte noch kleinere lokale Maxima erreichen, aber nie mehr den Maximalwert (Bild 8).

Anschliessend an die Versuche wurden die Wurzelstruktur im Labor ausgemessen und das Steckholz und die Wurzeln noch für weitere Tests im Labor verwendet.

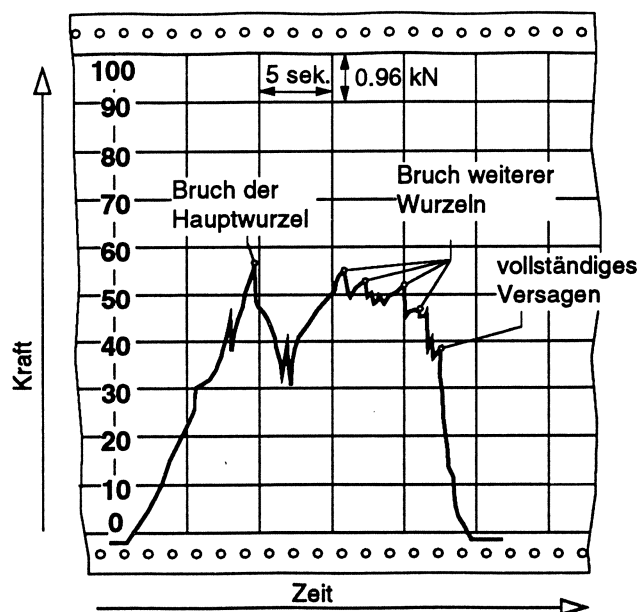


Bild 8 Zeit-Kraftdiagramm des Ausreissversuchs Nr. 18 an einer Steckholzpflanze im Kies. Unter Hauptwurzel wird die beim Zug am stärksten belastete Wurzel verstanden.

2.5.2 Resultate

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Testanordnungen und die Resultate, detailliertere Ergebnisse sind in der Tabelle A2 im Anhang aufgeführt.

Se- rie	Steckholz- nummer	Testtyp	Kräfte [kN]	Bemerkungen
0	1	Überprüfung der Messanordnung		
1	2,8,11	Wurzeln im Kies mit überlagertem Silt	8.54-10.37	Siltschicht etwa 30 cm dick; keine Erosionsspuren; Wurzelsystem sehr dicht; viele Feinwurzeln
2	17,18,20,25	Wurzeln in ungestörten, reinen Kiesböden	4.82-6.88 Nr. 20: 10.0	reiner Kies; Hochwasserspuren, doch keine Anzeichen von Erosion
3	4-6,36-38	Oberflächenerosion im Silt	3.04-4.63	Siltschicht und einige Pflanzen waren durch letztes Hochwasser fortgespült worden; übrig blieb ein fast reiner Kiesboden; alle Wurzeln im ehemaligen Silt sind stromabwärts gerichtet
4	12-15	Kolk um die Pflanze im Silt	3.31-6.13	Kolk um Pflanze in der Siltschicht wurde verstärkt
5	19,21-24	Seitenerosion im Kies	1.07-6.40	künstliche Seitenerosion auf der gesamten Wurzellänge; Variation zwischen Erosionskante und Steckholz von 0-30 cm
6	26-35	nur Wurzeln sind wirksam	0.14-0.34 (Kies) 0.27-1.74 (Silt)	Entfernung des Erdreichs 30 cm um das Steckholz
7	40-45 9	Steckholz ohne Wurzeln im Kies; Steckholz mit abgeschnittenen Wurzeln im Silt	1.17-3.62 7.34	1/2 Jahr alte Steckhölzer, welche noch keine relevante Wurzeln ausbildeten; Bei Nr. 9 wurden vorgängig die Wurzeln abgeschnitten, Alter von Nr. 9: 3 Jahre
8	10	vertikaler Zug im Siltboden	5.17	gleiche Testbedingungen wie Hathaway (1973) und Hähne (1982)
9	3,16,39	ausgegrabene Steckholzpflanzen		Untersuchung der Wurzelverteilung

Tabelle 1 Resultatübersicht der Ausreissversuche an Weiden.

Detaillierte Beschreibung und Interpretation der Resultate

Serie Bemerkungen

- 1 Wurzeln in ungestörtem Kiesboden mit überlagerter Siltschicht, Steckholzpflanze Nr.: 2, 8, 11 (Bild 7a). Bei diesen dreijährigen Steckholzpflanzen wurden mit Werten von 8.54 bis 10.37 kN die höchsten Ausziehkräfte gemessen. Es kam in allen drei Fällen zu einem Versagen der Tragfähigkeit. Zwei der Stechkölzer brachen. Diese Versagensart dürfte in der Natur unrealistisch sein, da bei Verhältnissen mit Strömungskräften in dieser Grössenordnung vermutlich der Widerstand in der Siltschicht durch Erosionen reduziert würde. Dieser Fall wurde in der Serie 3 untersucht.

- 2 Wurzeln im ungestörten reinen Kiesboden, Steckholzpflanze Nr.: 17, 18, 20, 25 (Bild 7b). Mit Ausnahme von Steckholzpflanze Nr. 20 variierten die Ausziehkräfte zwischen 4.82 und 6.88 kN. Dies war deutlich tiefer als die Werte der Serie 1, was mit dem nun kohäsionslosen Material infolge der fehlenden Bodenbindung der Wurzeln erklärt werden kann. Der Versagensprozess war aber der gleiche wie im Silt.

Die Steckholzpflanze Nr. 20 mit einer maximalen Kraft von 10 kN reichte zwar in den Bereich der Messwerte der Serie 1, wies aber gegenüber den anderen Stechkölzern einen markant grösseren Durchmesser D_s auf.

Die Resultate können nur teilweise mit denen der Serie 1 verglichen werden, da die Weiden hier mit 6.5 Jahren doppelt so alt waren. Demnach ist zu vermuten, dass die Unterschiede bei Pflanzen mit gleichem Alter bei Kiesböden und solchen mit überlagerter Siltschicht noch grösser sein werden, als die hier aufgezeigten.

- 3 Oberflächenerosion im Silt, Steckholzpflanze Nr.: 4, 5, 6, 36, 37, 38 (Bild 7c). Diese Stechkölzer waren durch eine 30 cm dicke Siltschicht in den Kies gepflanzt worden, was einer ähnlichen Situation wie bei der Serie 1 entsprach. Ein kürzliches Hochwasser hatte die Siltschicht wegerodiert und die freigespülten Wurzeln stromabwärts geschwemmt. Im Hochwasserfall wird dieser Wurzelwulst die angeströmte Fläche und somit die Strömungskraft noch erhöhen. Der stromabwärts liegende noch intakte Wurzelteppich hatte grosse Mengen an Silt gebunden, lag aber ohne Wurzelverbindung auf der Kiesschicht auf. Einige Pflanzen fehlten und waren vermutlich durch das Hochwasser fortgeschwemmt worden.

Die Ausziehkräfte variierten von 3.04 kN bis zu 4.63 kN, wovon das Gewicht der durch die Wurzeln gebundenen Bodenmasse etwa 1-2 kN betrug. Selbst unter Einbezug des Eigengewichts betrug die gemessene Kraft im Vergleich mit einem ungestörten, mit Silt überlagerten Kiesboden weniger als die Hälfte (Serie 1).

Auch im Vergleich mit der Serie 2 lagen die Werte tiefer, da fast alle Wurzeln in der bevor-

zugten Siltschicht wuchsen und diejenigen im Kies klein und verkrüppelt waren und nur einen kleinen Beitrag zum Widerstand leisten konnten. Im weiteren fehlte nach dem Erodieren des Siltes der Widerstand dieser Schicht auf das Steckholz, und zusätzlich veränderte sich das Verhältnis zwischen oberirdischem und unterirdischem Teil des Steckholzes. In diesem Fall kam es zum Versagen der Tragfähigkeit.

Oberflächenerosionen im Kies wurden nicht untersucht, sind aber wegen der regelmässigen Wurzelverteilung der Pflanzen über die Tiefe weniger problematisch. Erosionen auf den ersten nur wenig bewurzelten 10 cm bewirken eine Vergrösserung der Angriffsfläche für die Strömung, doch wird der Anteil der Wurzeln, welcher zum Widerstand beiträgt, nur unwesentlich reduziert.

- 4 Kolkung um die Pflanze im Silt. Steckholzpflanze Nr.: 12, 13, 14, 15 (Bild 7c). Die Untersuchungen über den Einfluss des Kolkes wurden nur im Silt durchgeführt. Gründe dafür sind die leichtere Erodierbarkeit des Siltes gegenüber dem Kies und die hohe Wurzelkonzentration in der oberflächennahen Siltschicht.

Bei den getesteten Steckholzpflanzen wurde mit Hilfe eines starken Wasserstrahls ein künstlicher Kolk geschaffen. Die Ausmasse betrugen in der Tiefe etwa 20 cm und in der Breite etwa 1 m. Diese Werte stammten einerseits aus Kolkbeobachtungen an Pflanzen an vergleichbaren Standorten und andererseits aus Kolkrechnungen. Dazu wurden Formeln verwendet, welche üblicherweise für die Bestimmung von Pfeilerkolken eingesetzt werden, wobei das Steckholz dem Pfeiler gleichgesetzt wurde. Als Durchmesser wurden 8-10 cm eingesetzt, was dem Steckholzdurchmesser mit etwas Geschwemmssel entsprach. Bei der Bildung des Kolkes wurden Teile des Wurzelwerkes freigelegt.

Die Ausreisskraft reichte von 3.31 bis 6.13 kN, was im und etwas über dem Bereich der Serie 3 (Oberflächenerosion) lag. Der Pflanzenwiderstand wurde überschritten, sobald die stromaufwärts gelegene Hauptwurzel brach. Das Steckholz wurde aus dem Boden gezogen, und die stromabwärts gelegenen Wurzeln schälten die mit Feinwurzeln stark durchzogene Siltschicht von der Kiesschicht ab. Bei Steckholzpflanze Nr. 14 mit einer gemessenen Kraft von 6.13 kN wuchs eine äusserst kräftige Wurzel unmittelbar unterhalb des Silts. Diese Beobachtung unterstreicht die Tatsache, dass im Falle von Oberflächenerosion oder Kolkung Wurzeln in den tieferliegenden Bodenschichten entscheidend für einen ausreichenden Widerstand sein können.

- 5 Seitenerosion im Kies. Steckholzpflanze Nr.: 19, 21, 22, 23, 24 (Bild 7f). Es wurden nur Steckholzpflanzen im reinen Kies getestet. Für die Simulation der Seitenerosion wurde mit Hilfe eines Baggers ein Graben, der tiefer und länger als das Wurzelwerk war, etwa 1.5 m seitlich der Pflanze ausgehoben. Das verbleibende Erdreich bis zur Pflanze wurde mit einem

Wasserstrahl abgespült. Der Abstand der Erosionskante bis zum Steckholz betrug 10, 20 oder 30 cm. Mit diesem Verfahren konnte eine Erosion simuliert werden.

Es kam in allen Fällen zu einem Grundbruch, wobei mit zunehmendem seitlichen Abstand zur Erosionskante der Widerstand durch die Wurzeln und das Steckholz zunahm und somit auch die Ausreisskraft. Nach erfolgtem Grundbruch (teilweises Versagen der Stabilität) hing die Pflanze in der Erosionswand, fixiert durch die wenigen verbleibenden Wurzeln. Dieser Restwiderstand war aber im Vergleich zum Widerstand vor dem Grundbruch klein. Auch hing er davon ab, zu welchem Anteil grössere Wurzeln noch im Erdreich verblieben und nicht durch die Seitenerosion schon freigespült worden waren.

Bei einem seitlichen Abstand von 10 cm vom Steckholz bis zur Erosionskante erfolgte der Grundbruch und somit das Versagen der Stabilität, bevor es zum Versagen der Tragfähigkeit kam. Die gemessene Kraft an Steckholzpflanze Nr. 19 war mit 1.07 kN entsprechend klein. Auch bei einem Abstand von 20 cm kam es zum Versagen der Stabilität. Dabei handelt es sich mit Steckholzpflanze Nr. 21 mit einer gemessenen Ausreisskraft von 1.5 kN um eine schwache Pflanze. Die Steckholzpflanze Nr. 22, welche mit Nr. 19 vergleichbar ist, wies mit 5.11 kN einen deutlich höheren Wert auf. Bei einem Abstand von 30 cm kam es etwa gleichzeitig zu einem Versagen der Stabilität und der Tragfähigkeit. Die gemessenen Auszieh-widerstände von 4.6 und 6.4 kN liegen dann auch im Bereich der Serie 2. Es scheint, dass die Distanz von 30 cm etwa einer Grenze entspricht, bei der die Seitenerosion den Widerstand nicht mehr beeinflusst.

- 6 Nur Wurzeln im Kies und Silt. Steckholzpflanze Nr.: 26-35, davon waren Nr. 26, 27, 28 in reinem Kies, die restlichen in mit Silt überlagerten Kiesböden. Bei sämtlichen Steckholz-pflanzen, welche alle drei Jahre alt waren, wurde das Erdreich 30 cm um das Steckholz entfernt, um den Widerstand des Steckholzes zu eliminieren. Ziel war es, den Beitrag der Wurzeln am Gesamtwiderstand zu erfassen. Bei den Zugversuchen riss die Mehrheit der Wurzeln zwischen dem Steckholz und dem Erdreich, die restlichen in den anschliessenden 40 cm im Boden.

Die Pflanzen in den reinen Kiesböden wiesen nur schwach entwickelte Wurzeln auf, welche nach Aufbringung der Zugkraft in schneller Folge, eine nach der anderen rissen. Dement-sprechend waren auch die Kräfte mit Werten zwischen 0.14 und 0.34 kN klein. Im Gegensatz zu den reinen Kiesböden, in denen die Wurzeln einzeln wirkten, waren es im Silt ganze Wurzelsysteme, welche in der Folge auch höhere Widerstände von 0.27 bis zu 1.74 kN ergaben. Die maximale Kraft wurde immer kurz vor dem gleichzeitigen Brechen einer ganzen Anzahl von Wurzeln erreicht.

- 7 Steckhölzer ohne Wurzeln im Kies und Silt. Steckholzpflanze Nr.: 9 und 40-45. Mit dieser Serie sollte nur der Widerstand des Steckholzes ohne den Einfluss der Wurzeln ermittelt werden. Die Steckholzpflanzen Nr. 40-45 waren zu diesem Zwecke sechs Monate zuvor als Steckhölzer in der Flussole im Kies gepflanzt und in der Zwischenzeit mehrmals durch Hochwasser überflutet worden. Die Wurzeln wuchsen in dieser Zeit auf eine Länge von maximal 20 cm an, waren aber noch nicht verholzt und somit für den Widerstand vernachlässigbar. Die maximalen Kräfte lagen zwischen 1.17 und 3.62 kN, wobei mit Ausnahme von Nr. 44 alle Steckhölzer brachen.

Der drei Jahre zuvor und am gleichen Ort wie in Serie 2 gesetzten Steckholzpflanze Nr. 9 waren vorgängig sämtliche Wurzeln mit Hilfe eines scharfen Zylinders abgeschnitten worden. Der Boden bestand aus einer Kiesschicht, welche von einer etwa 30 cm dicken Siltschicht überlagert war. Die maximale Kraft, bei der das Steckholz brach, lag bei 7.34 kN. Die trotzdem recht hohe gemessene Kraft, welche nur wenig unterhalb des Bereichs von Serie 1 lag, konnte mit dem erhöhten Reibungswiderstand durch die noch vorhandenen Wurzelreste (2-4 cm bis zum Schnitt) erklärt werden. Hinzu kam, dass der Boden durch die Feinwurzeln verfestigt war und somit einen erhöhten Widerstand bot.

- 8 Vertikaler Zug. Steckholzpflanze Nr.: 10. Bei den Tests von Hathaway (1973) und Hähne (1982) wurden die Pflanzen immer vertikal ausgezogen, und es wurde immer ein Versagen der Tragfähigkeit beobachtet. Bei einem vertikalen Ausreißen wird ein Widerstand gemessen, welcher sich aus den Wurzelkräften, aus der Reibung zwischen Wurzeln und Steckholz mit dem Boden, dem Gewicht des durch die Wurzeln gebundenen Bodens und der Auflast des Bodens zusammensetzt. Die gesamte Wurzelmasse leistet gleichzeitig einen Beitrag zum Widerstand, im Gegensatz zu den anderen Versuchsanordnungen in diesem Bericht. Es ist eine unrealistische Versagensart, welche in der Natur nie vorkommen wird, da die Strömungskraft eine andere Richtung aufweist. Die Kraft bei diesem Versuch ist mit 5.17 kN ($\varnothing$ 3.4 cm) höher als Hathaways Resultate mit 3.7 kN und Hähnes mit 1.5 bis 3 kN. Bei Hathaway handelt es sich um einjährige *Salix Matsudanas* aus dem Pflanzgarten mit unbekanntem Durchmesser. Hähnes Ausreissversuche wurden an 2.9 bis 4.2 cm dicken *Salix caprea* (Salweide) an Strassenböschungen und Krainerwänden durchgeführt. Die Resultate sind demnach nur bedingt vergleichbar. Der gemessene Wert von 5.17 kN liegt aber deutlich unter den am gleichen Standort gemessenen Werten der Serie 1, aber über den in der Literatur gefundenen Werten.

- 9 Ausgegrabene Steckholzpflanzen. Steckholzpflanze Nr.: 3, 16 und 39. Ziel war es, die Wurzelstruktur in verschiedenen Böden zu studieren. Die Bilder Nr. 5 und 15 zeigen zwei typische Wurzelbilder von Steckholzpflanzen, welche aus einem Kiesboden und aus einem mit einer etwa 30 cm dicken Siltschicht überlagerten Kiesboden stammen.

3 Tests im Labor

3.1 Vorbemerkungen

Parallel zu den Versuchen im Freigelände fanden verschiedene Untersuchungen im Labor statt, mit dem Ziel, die einzelnen Komponenten des Widerstandes zu bestimmen. Dazu wurden statistische Angaben wie die Wurzelverteilung und Festigkeitseigenschaften der Wurzeln und der Steckhölzer erhoben. Zusätzlich wurden auch die Bodenparameter Korngrößenverteilung, Kohäsion und innerer Reibungswinkel bestimmt. Es wurden Standardtests, wie sie im Stahl- und Betonbau sowie in der Bodenmechanik üblich sind, angewendet.

3.2 Wurzeldurchmesser

Bei den Wurzelzugversuchen konnte beobachtet werden, dass die Rinde unabhängig von der Anzahl Seitenwurzeln und der Jahreszeit riss, bevor es zum Bruch der Wurzel kam. Die Haftung beim vaskularen Kambium, der Schicht zwischen Rinde und Holz scheint sehr schlecht zu sein. Es wird deshalb angenommen, dass die Kraft, welche zum Bruch der Wurzel führt nur durch das Holz übertragen wird. Es ist deshalb sinnvoll, für den Wurzeldurchmesser d nur das Holz zu berücksichtigen. Um für die Bestimmung der Durchmesser d nicht sämtliche Wurzeln schälen zu müssen, wurde anhand von 85 Proben eine Beziehung zwischen dem Durchmesser D mit Rinde und demjenigen ohne ermittelt (Anhang Bild A2). Mit einer Polynomfunktion 2. Grades konnte eine Beziehung mit einem Regressionskoeffizienten von 0.998 ermittelt werden, wobei der Gültigkeitsbereich für d zwischen 0.3 mm und 10.5 mm liegt. Die in den weiteren Tests verwendeten Wurzeln wiesen alle Durchmesser innerhalb dieses Bereiches auf.

$$d = - 0.11 + 0.67 \cdot D + 0.01 \cdot D^2 \quad (d, D \text{ in mm}) \quad (6)$$

Bei nicht kreisrunden Wurzeln wurden eine ellipsoide Querschnittsfläche angenommen, die Achsen a und b gemessen und anschliessend ein Kreisdurchmesser errechnet, der einer äquivalenten Fläche entsprach.

3.3 Materialeigenschaften von Wurzeln

3.3.1 Testserien

An den Adventivwurzeln der Steckhölzer waren drei verschiedene Stellen auf ihre Festigkeit hin zu überprüfen. Es handelte sich dabei um unverzweigte Wurzelstücke (1), Verzweigungen (2) und die Verankerung (3) der Wurzel am Steckholz, wie es im Bild 9 schematisch dargestellt ist. Es wurde angenommen, dass diese Elemente unterschiedliche Festigkeiten aufweisen und dadurch eine eigentliche Schwachstelle eruierbar würde. Ferner wurde nach Wurzeln unterschieden, welche

aus dem Silt beziehungsweise aus dem Kies stammen. Bei unverzweigten Wurzeln aus dem Silt wurde zusätzlich das Dehnungsverhalten gemessen.

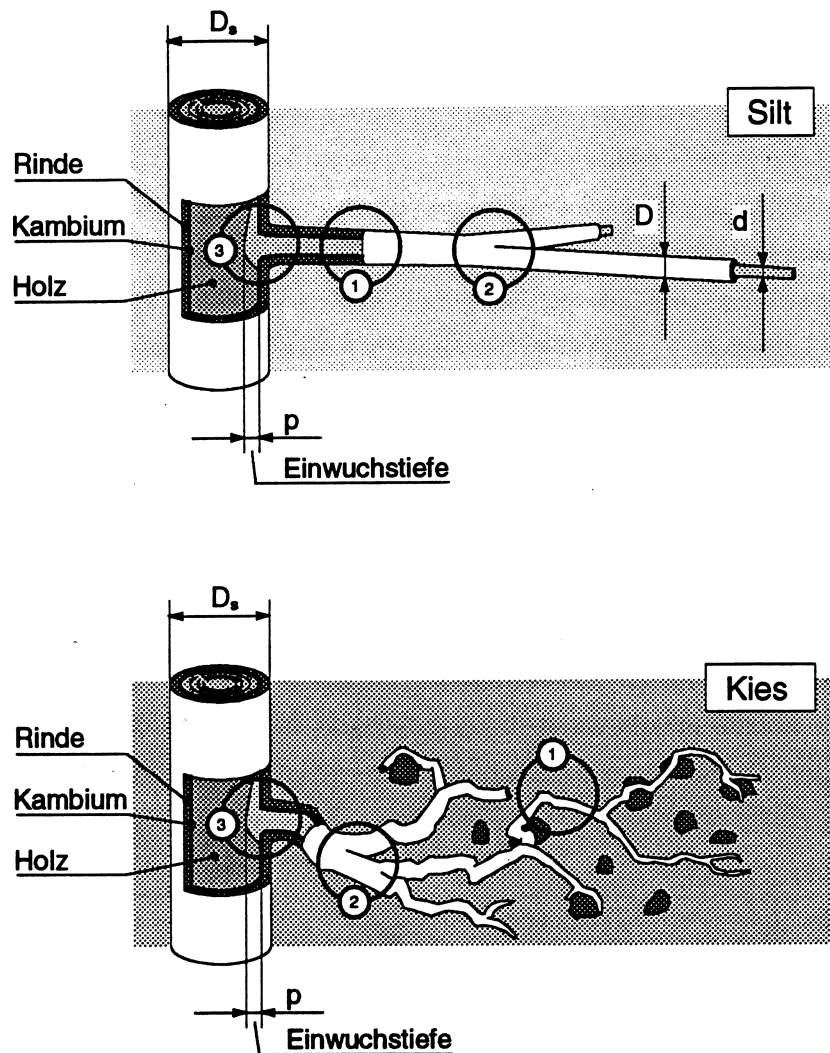


Bild 9 Schematisch dargestellte Steckhölzer mit Wurzeln in Kies- und in Siltböden.

3.3.2 Versuchsanordnung und -durchführung

Die Wurzeln wurden nach deren Gewinnung im Felde in einem dunklen Raum bei 20° C und 100% Luftfeuchtigkeit während maximal drei Wochen gelagert. In diesem Zeitraum fand noch kein biologischer Abbau statt. Die Teststücke wurden erst unmittelbar vor dem Versuch aus dem Wurzelsystem herausgeschnitten und wiesen eine Testlänge von 20 cm auf. An den Enden wurden Klemmen befestigt und diese in eine Zugapparatur eingebaut (Bild 10). Von Bedeutung war die Einstellung der richtigen Klemmkraft, da eine zu grosse Klemmkraft die Wurzel beschädigte und bei einer zu kleinen diese herausrutschte. Deshalb wurden je nach Wurzeldurchmesser drei verschiedene Grössen von Klemmen verwendet, welche inwandig mit einem haftenden Gummi versehen waren. Zur Erhöhung der Reibung zwischen Klemme und Wurzel musste bei Wurzeln über einem Durchmesser von 2.5 mm die Rinde entfernt und die Oberfläche des Holzes mit einem Tuch abgetrocknet werden. Die Zuggeschwindigkeit der Maschine betrug 5 mm/Minute und war während des Versuchs konstant. Gemessen wurde mit zwei verschiedenen Messzellen ($F_{\max}=0.50$ kN und 2.5 kN), welche mit einer Frequenz von einer Messung pro Sekunde vom Computer abgefragt wurden.

Testserie 1 (unverzweigte Wurzelstücke):

Die Wurzeln wurden auf beiden Seiten eingeklemmt und die Zugkraft erhöht, bis die Wurzel versagte (Bild 10a).

Testserie 2 (Wurzelverzweigungen):

An jedem Wurzelast wurde eine Klemme befestigt (Bild 10b). Anschliessend wurden die Klemmen der verzweigten Wurzelenden entsprechend ihrem natürlichen Verzweigungswinkel an einem Querbalken fixiert. Im Zugapparat wurde die Kraft in der Mitte des Querbalkens und an der Klemme der Hauptwurzel eingeleitet und die Zugkraft erhöht, bis einer der zwei Äste brach. Da die beiden Wurzeln sich nicht im selben Masse dehnten, wurde der Querbalken schräg gestellt. Rechnungen zeigten aber, dass die eingetragene Kraft in den Wurzelästen durch die Schrägstellung im Bereich bis maximal 10% voneinander variierte. Nachdem die Bruchstelle untersucht war, wurde der Test mit der verbleibenden Wurzel mit der gleichen Testanordnung wie in der Testserie 1 weitergeführt, wobei die Wurzel bereits einmal belastet war.

Testserie 3 (Befestigung der Adventivwurzel im Steckholz):

Das Steckholz konnte mittels verstellbarer Schlingen so im Zugapparat befestigt werden, dass die Zugkraft an der Wurzel ihrem natürlichen Wuchswinkel entsprechend eingeleitet werden konnte (Bild 10c).

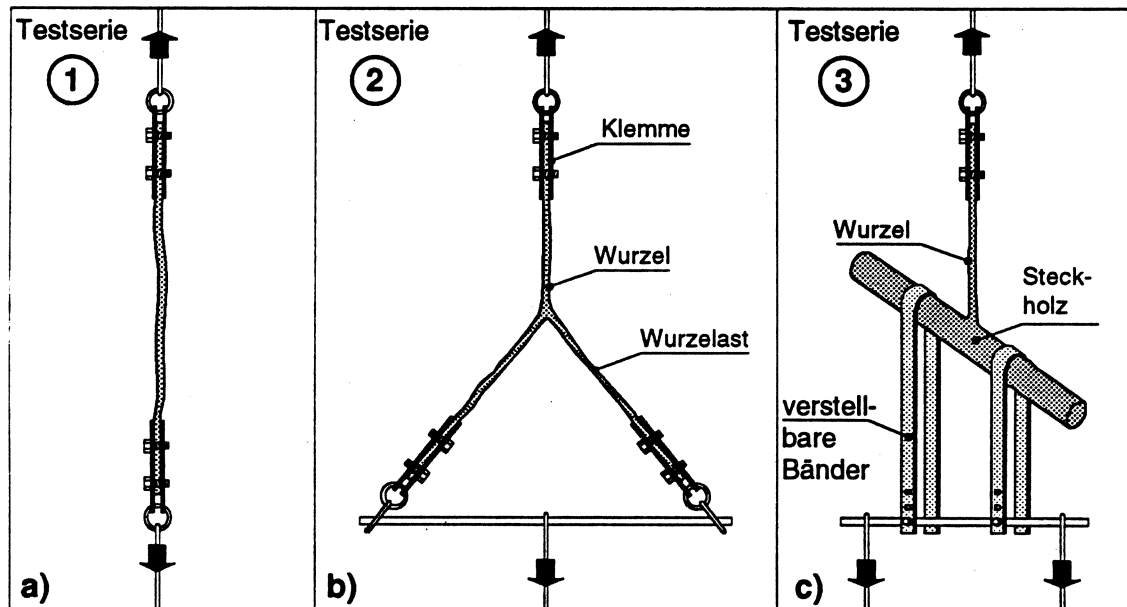


Bild 10 Versuchsanordnung der drei verschiedenen Testserien.

Bei allen Testserien wurden der Wurzeldurchmesser bei der Bruchstelle, die maximale Zugkraft und die Länge der getesteten Wurzel gemessen, die Kornverteilung des Herkunftbodens bestimmt, sowie der Zustand der Wurzel, die Weidenart und der Bruchmechanismus notiert. Bei einigen Wurzeln der Testserie 1 wurde zusätzlich noch das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ermittelt

(siehe Kapitel 3.3.3). Bei der Testserie 2 wurden die Durchmesser der Haupt- und Nebenwurzeln und bei der Testserie 3 noch der natürliche Wuchswinkel sowie die Einwuchstiefe p (Bild 9) der Adventivwurzel in das Steckholz bestimmt.

3.3.3 Wurzeldehnung

Bei der Testserie 1 wurde bei einigen Wurzeln der Spezies *Salix matsudana* und *Salix elaeagnos* das Spannungs-Dehnungsverhalten gemessen. In Bild 11 und im Anhang Bild A3 sind Spannungs-Dehnungskurven von Wurzeln verschiedener Durchmesser dargestellt. Ein Unterschied zwischen den zwei getesteten Spezies kann nicht festgestellt werden, jedoch zwischen Feinwurzeln bis 0.9 mm und solchen darüber. Bis zu einer Dehnung ϵ von etwa 2% weisen alle Wurzeln einen relativ hohen E-Modul (7) von 0.54 bis 3.23 kN/mm² auf und verhalten sich elastisch. Anschliessend werden die dickeren Wurzeln vorwiegend gedehnt und nehmen nur noch wenig zusätzliche Kraft auf. Der E-Modul reduziert sich dabei um einen Faktor 6 - 36 auf 0.09 bis 0.17 kN/mm². Wie weit hier ein plastisches Verhalten vorliegt, wurde nicht untersucht. Kurz vor dem Bruch scheint es nochmals zu einer Erhöhung des E-Moduls auf 0.28 - 0.38 kN/mm² zu kommen. Der Bruch findet typischer Weise bei einer Dehnung von 10 bis 17 % statt, was sich gut mit den Daten von Hathaway (1973) deckt, der 15-18% für die Bruchdehnung angibt. Die Proben der Wurzeln unter 0.9 mm weisen mit zunehmender Dehnung eine allmähliche Abnahme des E-Moduls auf. Warum sich die Wurzeln unterhalb einem Durchmesser von 0.9 mm so verschieden verhalten, ist nicht bekannt.

$$\sigma = \epsilon * \text{E-Modul} \quad (7)$$

Aus diesen Versuchen und denjenigen von Hathaway (1973), welche im Anhang Tabelle A4 aufgeführt sind, kann gefolgert werden, dass die Materialeigenschaften von Wurzeln über 0.9 mm Durchmesser in etwa ähnlich sind und dass auch die Unterschiede unter den Spezies nicht allzu gross sind. Die Materialeigenschaften werden deshalb für die weiteren Betrachtungen als konstant angenommen.

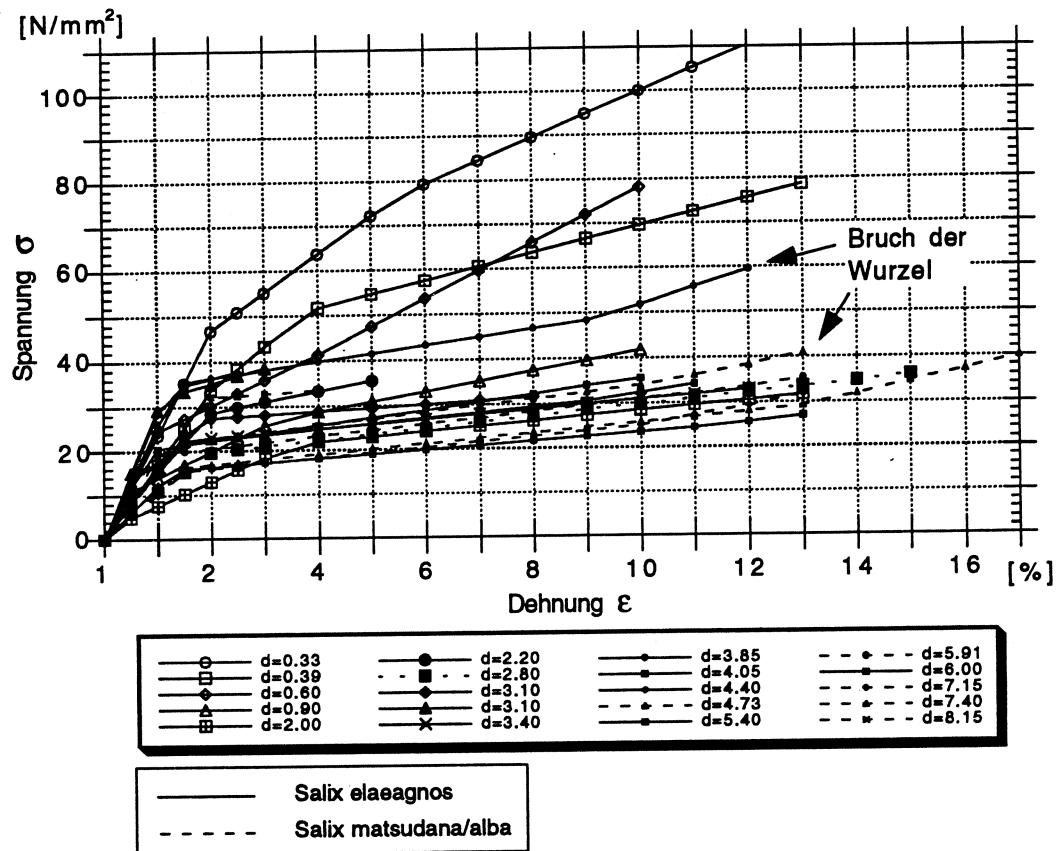


Bild 11 Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Wurzeln verschiedener Durchmesser d [mm].

3.3.4 Versagensmechanismus der Wurzeln

Testserie 1 (unverzweigte Wurzeln)

Wurzeln aus dem Silt und aus dem Kies weisen für Durchmesser über 2 mm unterschiedliche Zugfestigkeiten auf (Bild 15). Der Grund für diesen Unterschied liegt darin, dass bei Wurzeln aus dem Kies die Verkrümmungen eine exzentrische Belastung erfahren (Bild 12a). Deshalb wirkt neben der Zugkraft auch ein Drehmoment als Belastung. Zusätzlich kommt es beim Knick zu Schubspannungen mit einem Maximum in der Achse der Wurzel. Dies führt dort zu einer Längsspaltung der Wurzel, was auch in den Versuchen beobachtbar war. Auf der Innenseite des Knickes ist die Wurzel auf Zug, an der Aussenseite auf Druck belastet. Zum Bruch wird es kommen, sobald auf der Innenseite die Normalspannung grösser als die Bruchfestigkeit σ_{Br} der Wurzel ist. Der Bruch pflanzt sich rasch von innen nach aussen fort. Die Bruchebene verläuft schräg zur Zugachse. Bei Wurzeln aus dem Silt hingegen wirkt kein Moment, und die Normalspannung ist regelmässig über den Querschnitt verteilt (Bild 12b). Schubspannungen quer zur Zugachse treten keine auf. Die zurückbleibende Bruchfläche ist meist eben und senkrecht zur Zugachse. Bei Wurzeln mit kleineren Durchmessern als 2 mm verschwindet der Effekt dieser exzentrischen

Belastung, da sich Verkrümmungen in den Wurzeln dank ihrer hohen Flexibilität strecken können und sie sich den neuen Belastungsverhältnissen anpassen scheinen.

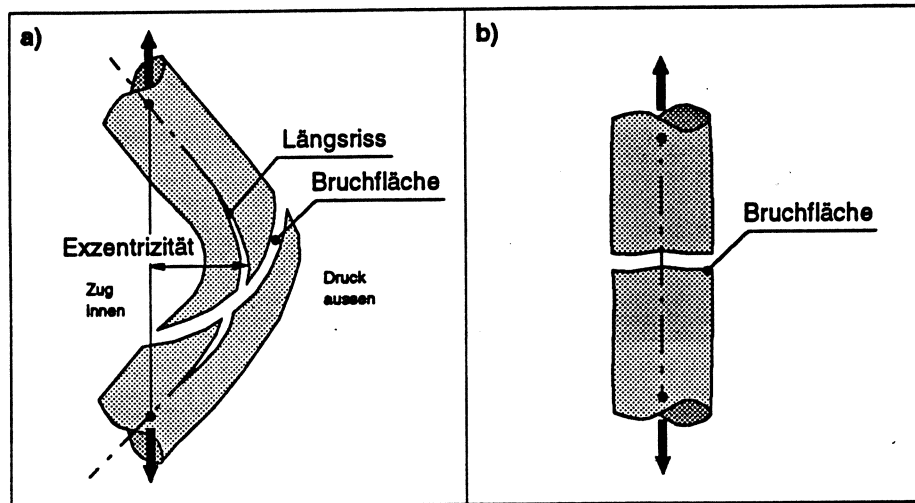


Bild 12 Versagen von Wurzeln unter Zug a) im Kies und b) im Silt.

Testserie 2: (Wurzelverzweigungen)

Der Versagensprozess bei den Wurzelverzweigungen aus den verschiedenen Herkunftsböden ist ähnlich, so dass keine signifikanten Unterschiede bei der Bruchlast ausgemacht werden können. Zweigt eine kleine Wurzel von der Hauptwurzel ab (Bild 13a), so stellt sich ein reiner Zugbruch ein. Sind die sich verzweigenden Wurzeln jedoch etwa gleich gross und handelt es sich dabei um eher dickere Wurzeln, so tritt eine Kombination von Zug- und Scherbruch ein (Bild 13b).

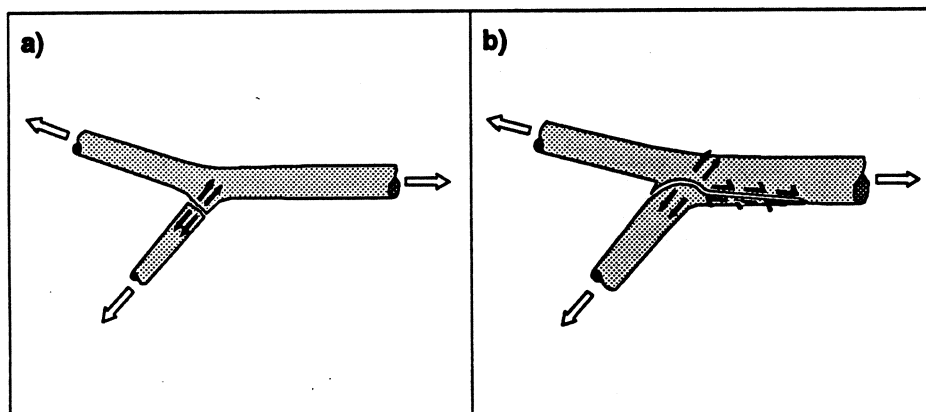


Bild 13 Versagen von Wurzelverzweigungen a) reiner Zugbruch und b) Kombination von Zug- und Scherbruch.

Testserie 3: (Verankerung der Wurzeln)

Kommt es zum Bruch an der Verankerung der Wurzel mit dem Steckholz, so werden neben der Wurzel auch Teile des Steckholzes abgerissen. Es zeigt sich, dass vorwiegend bei dickeren Wurzeln die Verankerung mit dem Steckholz eine Schwachstelle ist. Ein Unterschied zwischen Wurzeln aus dem Kies und solchen aus dem Silt kann nicht festgestellt werden. Es scheint, dass das Verhältnis

zwischen der Verankerungslänge p der Adventivwurzel im Steckholz und dem Durchmesser d der Wurzel entscheidend ist, ob es hier zu einem Bruch kommt oder nicht. In den Versuchen zeigte sich, dass, wenn das Kriterium $d > 0.5 \cdot p$ erfüllt war, es zum Bruch bei der Verankerung kam. Ob dieses generell gilt, müsste noch weiter untersucht werden.

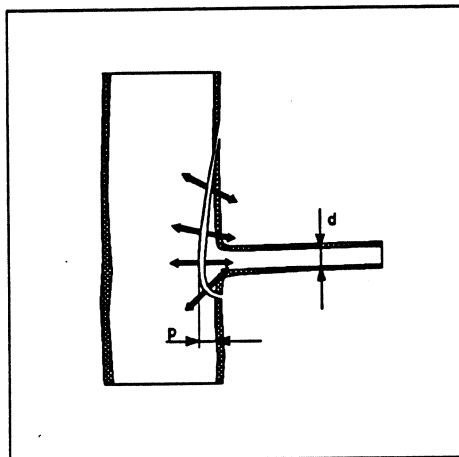


Bild 14 Bruch einer Adventivwurzel beim Steckholz.

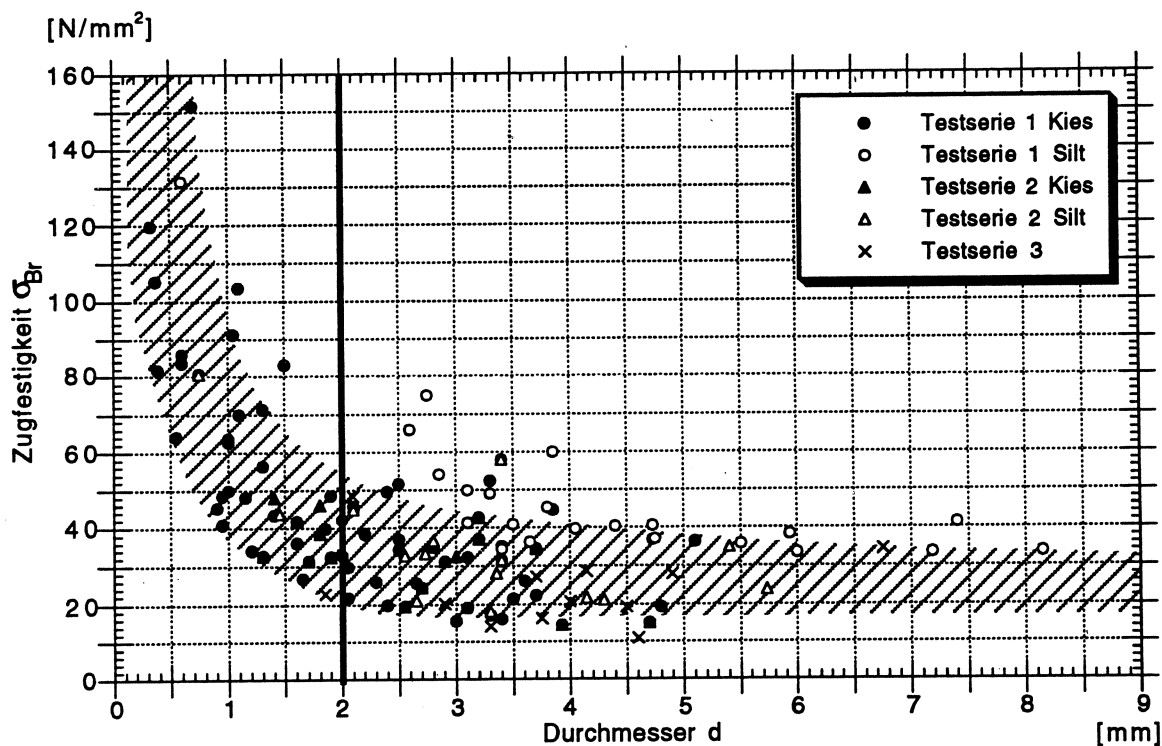


Bild 15 Zugfestigkeit σ_{Br} von Weidenwurzeln in Kies und Silt.

3.3.5 Vergleiche der Testserien 1 bis 3

Aus den drei Testserien können nun die Schwachpunkte entlang einer Wurzel und die Unterschiede zwischen Wurzeln aus dem Silt und solchen aus dem Kies eruiert werden. Bei Wurzeln im Silt zeigt sich, dass Verzweigungen und die Verankerung diejenigen Stellen sind, welche die kleineren Zugfestigkeiten σ_{Br} aufweisen (Bild 15). Erfährt nun eine Wurzel eine Zugkraft, so wird sie nie an einer unverzweigten Stelle brechen. Diese gemessenen Bruchkräfte aus der Testserie 1 sind demnach für die massgebende Versagensart als oberer Grenzwert für Versagen einzustufen. Untere Grenzwerte für Bruchlasten an Wurzeln aus dem Silt müssen deshalb aus den Testserien 2 und 3 resultieren. Wurzeln aus Kiesböden brechen etwa zu gleichen Anteilen an den drei getesteten Stellen. Bei diesen Wurzeln müssen deshalb alle drei Testserien für den unteren Grenzwert mitbezogen werden.

Signifikante Unterschiede zwischen den Wurzeln aus dem Silt und dem Kies können aus der beschränkten Anzahl der Versuche nicht hergeleitet werden, mit Ausnahme der unverzweigten Abschnitte aus dem Silt der Testserie 1. Eindeutig kann jedoch zwischen dünnen und dicken Wurzeln unterschieden werden. Eine Grenze kann etwa bei 2 mm angesetzt werden. Unterhalb davon nimmt die Zugfestigkeit mit abnehmendem Durchmesser rasch zu, währenddem darüber die Festigkeiten mehr oder weniger konstant bleiben. Der schraffierte Bereich im Bild 14 gibt die Bandbreite an, in welchem sich die für ein Versagen massgebenden Werte befinden. Für Dimensionierungsansätze wird man sich jedoch eher an der unteren Umhüllenden des Bereichs orientieren müssen.

Im Kapitel 3.3.3 wurde die Grenze für das unterschiedliche Dehnungsverhalten zwischen den dicken und dünnen Wurzeln bei einem Durchmesser d von 0.9 mm eruiert. Warum dieser nicht deckungsgleich mit demjenigen von 2 mm aus diesem Kapitel ist, kann nicht erklärt werden.

Die im Labor gemachten Beobachtungen in bezug auf das Versagen der Wurzeln stimmten gut mit denjenigen aus dem Felde überein. Um dies auch quantitativ zu überprüfen, wurden neben den Ausreissversuchen auch einige Wurzelzugversuche durchgeführt. An einer aus dem Boden ragenden Wurzel wurde eine Klemme mit einer torsionsfrei gelagerten Kraftmesssonde montiert und über einen Flaschenzug eine Zugkraft aufgebracht. Es zeigte sich, dass die Wurzeln nicht vollständig aus dem Boden gezogen werden konnten und dass sie jeweils an den oben beschriebenen Schwachstellen brachen. Es resultierten dann auch ähnliche Bruchlasten wie im Labor.

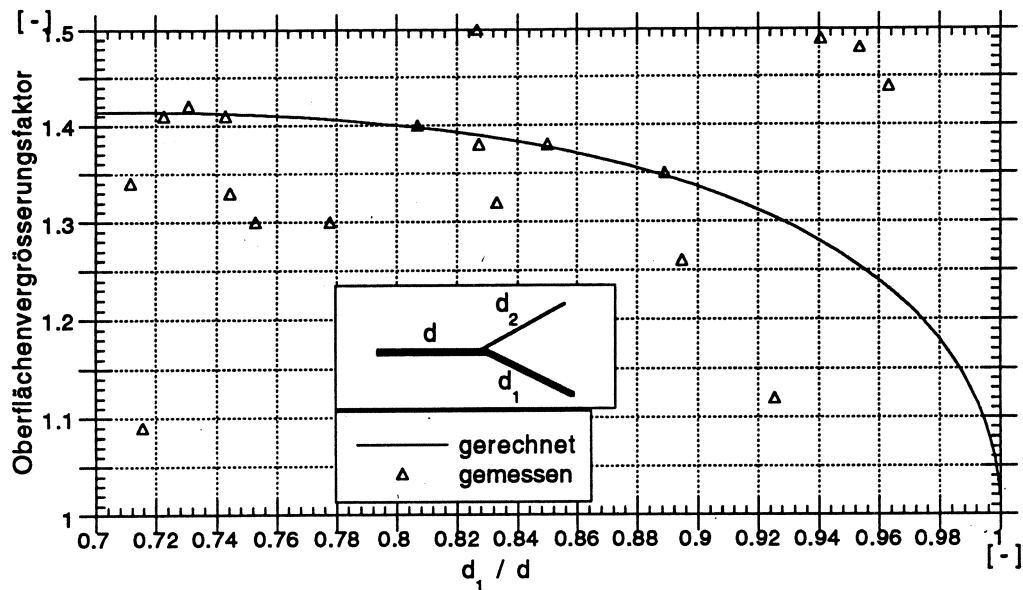
Die zwei in der Literatur gefundenen Untersuchungen von Hiller (1966) und von Hathaway (1973) können nur bedingt mit den hier erfolgten Messungen verglichen werden. Beiden ist gemeinsam, dass ihre Wurzeln aus Feinböden von einem Pflanzgarten stammten. Untersucht wurden auch nur gerade, unverzweigte Abschnitte, welche der Testserie 1 für Silt entsprechen (Anhang Bilder A4 und A5). Hiller untersuchte nur Wurzeln bis 2 mm und beobachtete durchwegs kleinere Zugfestigkeiten als die in dieser Untersuchung aufgeführten. Eine Erklärung für die Unterschiede ist nicht möglich, da die Randbedingungen, wie zum Beispiel der genaue Durch-

messer, nicht bekannt sind. Hathaways Daten hingegen decken sich recht gut mit denjenigen aus der Testserie 1 für Silt. Da auch diese Messungen an Wurzelabschnitten mit möglichst wenig Schwachstellen durchgeführt wurden, soll hier auch nicht weiter auf sie eingegangen werden.

3.4 Zunahme der Wurzeloberfläche nach Verzweigungen

Im Felde konnte bei Wurzelzugversuchen und den Ausreissversuchen beobachtet werden, dass eine Wurzel nie vollständig aus dem Boden gezogen werden konnte und dass typischerweise der Bruch innerhalb der ersten 40 cm stattfand. Die daraus folgende Hypothese ist, dass die Bruchkraft T_{Br} einer Wurzel kleiner ist als die Reibungskraft F_r zwischen dem Wurzelsystem und dem Boden.

Durch Messen der Durchmesser d vor und nach der Verzweigung kann aufgezeigt werden (Bild 15 und Anhang Tabelle A6), dass sich die Querschnittsfläche, welche proportional zur Bruchkraft T_{Br} ist, im Durchschnitt nicht ändert. Die Oberfläche und somit die Reibungskraft F_r nimmt jedoch schon bei kleinen Seitenwurzeln stark zu (8). Bei den gemessenen Fällen beträgt diese im Durchschnitt 35%. Daraus wird ersichtlich, dass der Reibungswiderstand R entlang einer Wurzel mit jeder Verzweigung erheblich zunimmt (Bild 17). Die Zugfestigkeit bleibt σ_{Br} jedoch mehr oder weniger konstant. Die Wurzel wird nun dort brechen, wo die Reibungskraft F_r die Bruchkraft T_{Br} übersteigt.



Die Kurve in Bild 16 lässt sich unter der Annahme, dass die Querschnittsflächen vor und nach der Verzweigung gleich sind und dass die Wurzel vor der Verzweigung den Radius 1 hat, berechnen.

$$\pi r^2 = \pi r_1^2 + \pi r_2^2 \quad (8)$$

$$\text{mit } r = 1 \text{ wird } r_2 = \sqrt{1-r_1^2} \text{ und daraus } \frac{U_1 + U_2}{U} = \sqrt{1-r_1^2} + r_1 \quad (9)$$

r : Radius der Wurzel = $d/2$
 U : Umfang der Wurzel

Indizes: 1 Wurzel vor der Verzweigung
 2 dickere Wurzel nach der Verzweigung
 2 dünnere Wurzel nach der Verzweigung

Bild 16 Zunahme der Wurzeloberfläche bei Verzweigungen.

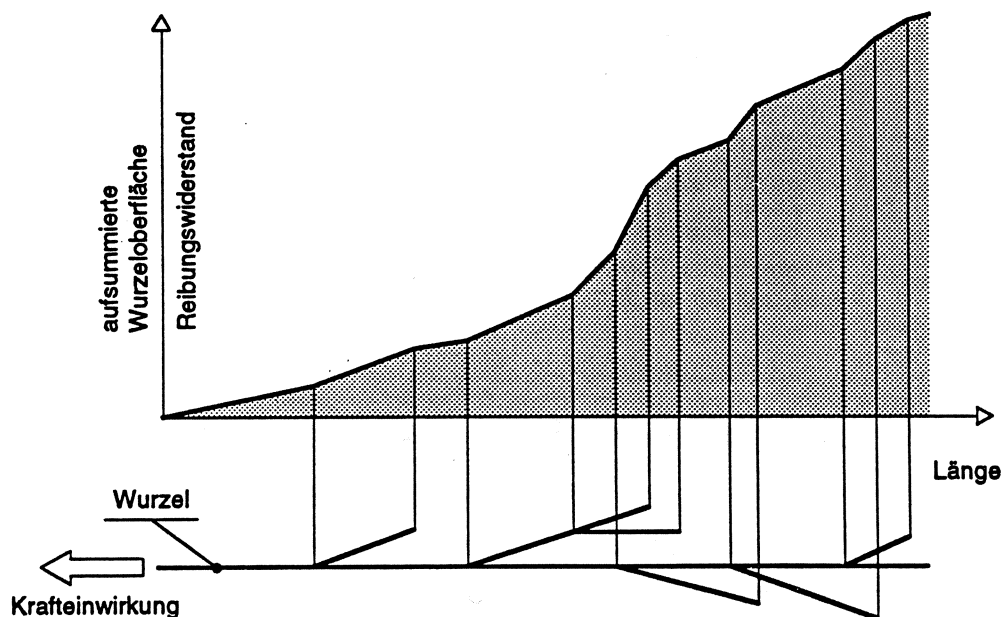


Bild 17 Schematische Darstellung der Zunahme der aufsummierten Wurzeloberfläche und somit des Reibungswiderstandes.

3.5 Wurzelverteilung

Um auch quantitative Aussagen über die Wurzelverteilung machen zu können, wurden an 21 Pflanzen die Wurzelverteilung sowie der Durchmesser der einzelnen Wurzeln entlang des Steckholzes bestimmt (Bild 18 und Anhang Bild A6a-u). Dabei wird angenommen, dass die Wurzeln horizontal gleichmässig um das Steckholz herum verteilt sind und dass der Wurzel-durchmesser D etwa 5 cm vom Steckholz entfernt repräsentativ für die gemessene Wurzel ist. Der Durchmesser ohne Rinde d wurde anhand der Gleichung (6) in Kapitel 3.2 errechnet. Die zwei typischen Wurzelverteilungen für die in Kapitel 2.3 beschriebenen Böden liessen sich somit auch quantitativ bestimmen.

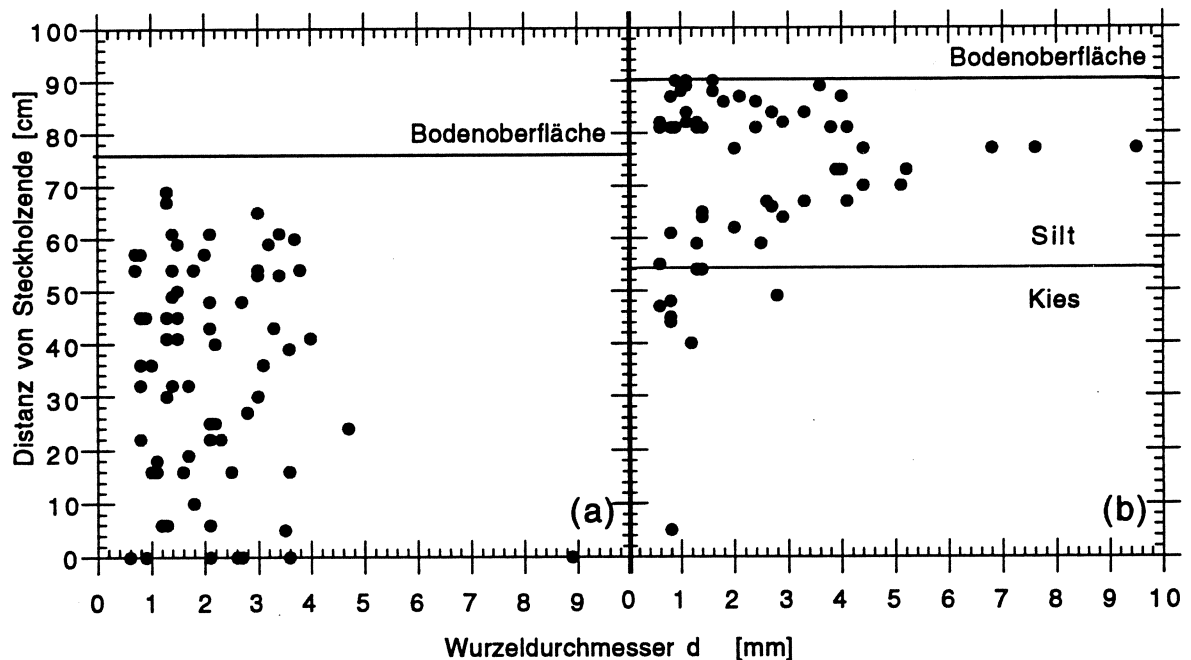


Bild 18 Schematische Darstellung der Wurzelverteilung eines Steckholzes (a) im Kies und (b) im Kies, mit 30 cm Silt überlagert.

3.6 E-Modul und Bruchspannung σ_r des Steckholzes

Zur Bestimmung des E-Moduls und der Bruchspannung σ_r ¹ wurden neun 60 cm lange Steckhölzer beidseitig aufgelagert und in den Drittelpunkten belastet. Die Formeln zur Berechnung sind in Tabelle A7 im Anhang aufgeführt. Gemessen wurde die Durchbiegung und der Kraftverlauf und deren Maxima (Anhang Bild A7 und Tabelle A8). Von den neun Testlingen brach nur gerade einer, bei allen anderen bildete sich nach Erreichen eines maximalen Moments ein Gelenk aus, was zur

¹Streng genommen handelt es sich bei σ_r um die Bruchspannung am Rand

Folge hatte, dass das Steckholz noch weiter deformiert werden konnte, die dazu benötigte Kraft jedoch abnahm. Die Werte für σ_r variierten zwischen 45 und 70 N/mm². Zusätzlich wurde an sechs unbewurzelten Steckhölzern im Felde die Bruchspannung σ_r bestimmt (Anhang Tabelle A9), wobei vier Werte zwischen 60 und 70 N/mm² und je ein Wert bei 30 N/mm² (schwaches Exemplar) und einer bei 130 N/mm² (spezielle Ausreissart) lagen. Im Vergleich zu getrocknetem Nadelholz mit $\sigma_r = 80$ N/mm² und Laubholz von $\sigma_r = 120$ N/mm² liegen die gemessenen Werte etwas tiefer (Schneider 1984, 1985). Dieser Vergleich ist allerdings nur bedingt zulässig, da es sich bei den Weiden um juveniles, nicht getrocknetes Holz handelt.

Der E-Modul variierte zwischen 3.78 und 7.8 kN/mm² mit einem Mittelwert von 5.9 kN/mm², was etwa 60% des E-Moduls von getrocknetem Holz entspricht. Bei den Feldversuchen konnte kein E-Modul bestimmt werden, da die Durchbiegung nicht gemessen werden konnte.

4 Folgerungen

Die Versuche und die Beobachtungen beschränkten sich auf die für Flussverbauungen geeigneten Weidenarten *Salix purpurea*, *Salix elaeagnos* und *Salix matsudana*. Es konnten keine signifikanten Unterschiede, was die unterirdischen Pflanzenteile anbelangt, beobachtet werden. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Bedingungen am Standort die Unterschiede der drei Weidenarten überwiegen und deshalb keine Differenzierung in dieser Hinsicht unternommen werden muss. Diese Hypothese wird auch von Phillips und Watson (1994) vertreten.

Die Bodenart hat durch die Körnigkeit, den Wassergehalt und die Verfügbarkeit von Nährstoffen einen grossen Einfluss auf die Entwicklung des Wurzelsystems. In reinen Kiesböden weisen die Weiden eine regelmässige Wurzelverteilung in der Vertikalen auf, wobei die oberste Schicht wegen periodischer Trockenheit praktisch wurzelfrei ist. In Böden, bei denen auf dem Kies eine Silt-schicht aufliegt, finden die Wurzeln im Silt optimale Wachstumsbedingungen. Die Wurzeln werden deshalb vorwiegend dort wachsen und mit der Zeit ein hochgradig verwobenes Wurzelsystem bilden. Siltböden weisen an und für sich eine kleine Scherfestigkeit und somit auch eine kleine Erosionsresistenz auf. Diese steigt aber mit zunehmendem Durchwurzelungsgrad an. In Kiesböden wird die Scherfestigkeit durch die Durchwurzelung nicht wesentlich verändert und somit vorwiegend durch die Bodenmatrix bestimmt.

Fortgeschwemmte Weiden, welche Brüche am Stamm aufweisen, können in der Natur kaum gefunden werden. Meist kommt es zum Versagen der Tragfähigkeit der Wurzeln. Fälle, bei denen während den Ausreissversuchen das Überschreiten der Tragfähigkeit des Steckholzes zum Versagen führte, sind demnach in der Natur als wenig wahrscheinlich einzustufen. Ein Versagen der Stabilität, das heisst, dass das ganze System Boden-Pflanze aus dem Boden gerissen wurde, trat nie ein. Ferner konnte beobachtet werden, dass dort, wo Weiden durch die Strömung ausgerissen wurden, auch ein Bodenabtrag stattfand. Die Folgerung daraus ist, dass, damit es zum Versagen kommt,

vorgängig immer eine Erosion stattfinden muss, was eine Reduktion des Widerstandes zur Folge hat und schliesslich zu einem Versagen der Tragfähigkeit der Wurzeln führt. Das bedeutet aber auch, dass Weiden an und für sich gut im Boden verankert sind und die Sicherheit gegenüber Versagen unter anderem eine Frage der Erosionsresistenz der Bodenoberfläche und der Reduktion der Fliessgeschwindigkeit durch die Bepflanzung ist. Wird diese kleiner, so bedeutet das wiederum geringere Schubspannungen an der Bodenoberfläche und folglich auch eine geringere Erosionsgefahr. Beobachtungen im Felde bestätigten diese Hypothese, da in Gebieten mit Hochwassern, wo die oberirdischen Teile von Steckholzpflanzen zwar beschädigt waren, der Boden aber keine Zeichen von Erosionen aufwies, auch keine fehlenden Pflanzen festgestellt werden konnten.

Als erosionsgefährdet gelten Orte, bei denen es zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten kommen und der Boden leicht abgetragen werden kann. Die Reduktion der Geschwindigkeit und somit der Erosionsbeginn kann unter anderem durch die Anordnung der Pflanzung beeinflusst werden. Der Bodenabtrag ist aber auch abhängig von der Kornverteilung und der Durchwurzelung. Kiesböden gelten infolge der grösseren Korndurchmesser als weniger erosionsanfällig als Siltböden, sofern der Tonanteil klein ist und keine Kohäsion wirkt. Wegen der gleichmässigen Wurzelverteilung im Kies kann eine teilweise Erosion zwar zu einer Reduktion des Widerstandes führen, doch bringen tiefer liegende Wurzeln immer noch einen beträchtlichen Restwiderstand auf. Im Silt hingegen ist mit der Erosion der Siltschicht der Widerstand erheblich reduziert, da nur wenige Wurzeln im tiefer liegenden Kies vorhanden sind. Diese erosionsanfällige Phase dauert so lange, an bis sich ein durchgehendes Wurzelsystem gebildet hat. Der Silt ist nun derart gut gebunden, dass er kaum mehr erodiert werden kann und ein Versagen unwahrscheinlich wird.

Dieses Verhalten konnte sowohl beobachtet als auch aus den Messungen abgeleitet werden. Die Untersuchungen zeigten, dass Weiden, bei denen die Siltschicht fortgespült war, 2-3 mal kleinere Ausreisswiderstände aufwiesen als solche mit intakter Siltschicht. Wird bei der gemessenen Kraft noch berücksichtigt, dass diese durch den Auftrieb des Wurzelteppichs reduziert und dieser die angeströmte Fläche noch erhöhen wird, so dürfte der Widerstand im Bereich von angreifenden Strömungskräften liegen.

Der Widerstand der Tragfähigkeit wird durch die Materialeigenschaften der Wurzeln und des Steckholzes sowie der Wurzelverteilung beeinflusst. Diese drei Komponenten leisten je nach Bodenart und Alter der Steckholzpflanze einen unterschiedlichen Beitrag am Widerstand.

Bei Messungen von Bruchkräften an Wurzeln ist es sinnvoll, sich auf den Durchmesser des Holzes zu beziehen, da die Schichten ausserhalb des vaskularen Kambiums, hier als Rinde bezeichnet, vernachlässigbar wenig zur Festigkeit der Wurzel beitragen. Wurzeln weisen wegen Inhomogenitäten, wie Wurzelverzweigungen, stark verkrümmten Abschnitten und der Verbindung mit dem Steckholz, keine einheitliche Festigkeit auf. Die Resultate aus den Zugversuchen an Weidenwurzeln zeigen, dass bei Durchmessern zwischen 2 und 8.15 mm die Zugfestigkeiten nur wenig mit zunehmendem Durchmesser abnehmen. Die untere Umhüllende der Messdaten ist für den erwähnten

Bereich mit 18 N/mm^2 konstant. Mit der Abnahme des Durchmessers unter 2 mm steigt die Zugfestigkeit hingegen rasch an. Messungen an unverzweigten Wurzeln im Silt geben tendenziell obere Grenzwerte. Die Tragfähigkeit der Wurzel wird dort durch die Festigkeit in den oben erwähnten Inhomogenitäten bestimmt. An Verzweigungen verändert sich die Querschnittsfläche nicht und somit auch nicht die Bruchkraft. In der Zwischenstrecke, bis zur nächsten Verzweigung, nimmt sie jedoch infolge kleiner werdendem Durchmesser ab. Daraus folgt, dass der Querschnittswiderstand der Einzelwurzel mit zunehmender Distanz vom Steckholz abnimmt.

Die Oberfläche und somit der maximal mobilisierbare Reibungswiderstand nimmt jedoch mit jeder Verzweigung zu. Die Wurzel ist deshalb mit zunehmender Entfernung von der Krafteinleitung besser im Boden verankert. Für die Tragfähigkeit einer Wurzel ist der Widerstand in jedem einzelnen Wurzelquerschnitt massgebend und bei der Reibung die aufsummierte Oberfläche. Wo es nun entlang einer Wurzel zum Bruch kommt, ist eine Frage der Grösse der angreifenden Kraft, der Tragfähigkeit der Wurzel und wie rasch die angreifende Kraft in den Boden abgetragen werden kann. Eigene Beobachtungen zeigten, dass der Bruch der Wurzel häufig bis etwa 40 cm vom Steckholz entfernt stattfand. Ferner ist anzunehmen, dass ein Teil des Wurzelsystems, auch wenn die Pflanze versagt, nie eine Zugkraft erfahren wird, da die Kraft schon vorher ins Erdreich abgetragen wird.

Es wäre nun denkbar, mit dem gewonnenen Prozessverständnis und den gemessenen Daten ein Modell zur Berechnung des Widerstandes von Steckholzpflanzen zu formulieren. Dazu müssten die einzelnen Komponenten bestimmt und superponiert werden. Für den Beitrag des Wurzelwiderstandes müsste die Wurzelverteilung und die Wurzelzugfestigkeit überlagert werden und mit Reduktionsfaktoren der effektiv wirksame Wurzelwiderstand berechnet werden. In diese Reduktionsfaktoren sollten auch Erosionszustände, welche den am Widerstand beteiligten Wurzelanteil nochmals verringern, berücksichtigt werden. Der Widerstand des Steckholzes könnte mit Hilfe von Ansätzen aus der Pfahlstatik angenähert werden.

Nur wenig ist bekannt über die auf Weiden wirkende Strömungskraft. Dazu werden in einer nächsten Phase Versuche an Weiden in einem Schleppkanal durchgeführt. Es sollen Weiden bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Eintauchtiefen durch den Kanal gezogen und die dabei auftretenden Kräfte gemessen werden. Zusätzlich müssen Überlegungen über die Geschwindigkeitsverteilung und die zu erwartenden Schleppspannungen an der Flussole im Bereich der Weidenpflanzungen gemacht werden, um Aussagen über das Erosionsverhalten des Bodens machen zu können. Durch Gegenüberstellung von Strömungskraft und Widerstand unter Berücksichtigung des Einflusses der Erosion sollen Dimensionierungsgrundsätze für den Einsatz von Weiden als Uferschutzmassnahmen abgeleitet werden können.

5 **Verdankungen**

Der vorliegende Teil dieser Forschungsarbeit kam dank der finanziellen Unterstützung des Bundesamtes für Strassenbau zustande, dem hier gedankt sei. An der EMPA wurden die Überlastsicherungen durch Herrn Schindler und Huwiler geprüft. Herzlichen Dank dafür, auch wenn die Sicherungen bis jetzt zum Glück noch nicht ihren Beweis antreten mussten. Ohne die personelle und materielle Unterstützung des Canterbury Regional Councils in Neuseeland hätten die Feldversuche nicht durchgeführt werden können, und dank der grosszügigen Unterstützung durch die University of Canterbury in Christchurch mit Labor-, Computer- und Büroeinrichtungen konnten die Auswertungen und Versuche unkompliziert realisiert werden. Herzlichen Dank auch meinem Betreuer und Gastgeber Dr. Alex Sutherland und seiner Frau Judith. Wertvolle Diskussionen kamen mit Dr. Alex Watson, Dr. Chris Phillips, Dr. John Sheppard, Dr. Allan Wilkinson (Landcare Research), Rob Blakely (Wai-Ora Trust), Dr. Tim Davis (Lincoln University) und Prof. Dr. Michael Quick, Dr. Rob Millar (University of British Columbia, Canada), Prof. Dr. Florin Florineth und Christoph Gerstgraser (Universität für Bodenkultur, Wien), Christa Schmid (Technische Universität Wien), Prof. Dr. Hans Rudolf Heinimann (ETH Zürich, Forstliches Ingenieurwesen), Dr. Markus Sieber (ETH Zürich, Forstschutz und Dendrologie) und Dr. Martin Jäggi zustande, denen für Ihren Beitrag an dieser Arbeit besonders gedankt sei.

Im weiteren möchte ich Professor Dr. Daniel Vischer und Benno Zarn sowie weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich für die Unterstützung bei dieser Forschungsarbeit ganz herzlich danken.

Zürich, im April 1995

Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie

Matthias Oplatka, dipl.Ing.ETH

6 Literaturverzeichnis

- Acheson, A.R. (1968): River control and drainage in New Zealand, Ministry of Works, New Zealand, 296 p.
- Beffa, C. (1994): Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen, [Hrsg]: Prof. Dr.Dr.H.c. D. Vischer, VAW-Mitteilungen Nr. 133, Zürich 1994.
- Binz, H.-R. (1989): Mechanische Belastbarkeit natürlicher Schilfbestände durch Wellen, Wind und Treibzeug, Veröffentlichung des Geobotanischen Instituts der ETH-Zürich, Stiftung Rübel in Zürich, Heft 101.
- Broms, B. B. (1964a): Lateral resistance of piles in cohesive soils, ASCE, Journal of the soil mechanics and foundations division, March 1964, p. 27-63.
- Broms, B. B. (1964b): Lateral resistance of piles in cohesionless soils, ASCE, Journal of the soil mechanics and foundations division, May 1964, p. 123-156.
- DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft (1987): Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Deutschland.
- Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau (1973): Lebendverbauung an fließenden Gewässern, Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau, Bern.
- Florineth, F. (1982): Erfahrungen mit ingenieurb biologischen Massnahmen bei Fliessgewässern im Gebirge. In: Ökologie von Fliessgewässern - Ingenieurb biologische Sicherungsmassnahmen, Technische Universität Wien, p. 243-259.
- Gray, D.H. and Leiser, A.T. (1982): Biotechnical slope protection and erosion control, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Hähne, K. (1982): Messungen des Widerstandes von Gehölzwurzelsystemen gegenüber oberirdisch angreifenden Zugkräften. In: Pflug, W. [Hrsg]: Ingenieurb iologie-Uferschutzwald an Fliessgewässern, Jahrbuch der Gesellschaft für Ingenieurb iologie 1, Verlag Krämer, Stuttgart.
- Hathaway, R.L. (1973): Factors affecting the soil binding capacity of the root systems of some populus and salix clones, Master of Science Thesis, Massey University, New Zealand, 161 p.
- Hiller, H. (1966): Beitrag zur Beurteilung und Verbesserung Biologischer Methoden im Landeskulturbau, Dissertation der Fakultät für Landbau TU Berlin, D 83, Nr. 266, 104 s.
- Lang, H.J. und Huder, J. (1985): Bodenmechanik und Grundbau, Springer Verlag Berlin.

- Lindner, K. (1982): Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen, Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Mitteilungen, Heft 75/1982.
- Köstler, J.N.; Brückner, E. und Bibelriether, H. (1968): Die Wurzeln der Waldbäume, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Oplatka, M. and Sutherland, A. (In Press) (1995): Tests on willow poles used for river bank protection, New Zealand Journal of Hydrology.
- Phillips, C.J. and Watson, A.J. (1994): Structural Tree Root Research in New Zealand, A review, Manaaki Whenua, Landcare Research, Science Series No.7, Ilam, Christchurch.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980): Pile foundation analysis and design, John Wiley and Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, p. 143-158.
- Schiechtl, H.M. (1992): Weiden in der Praxis, Die Weiden Mitteleuropas, ihre Verwendung und ihre Bestimmung, Berlin, Hannover, Patzer Verlag.
- Schiechtl, H.M. und Stern, R. (1994): Handbuch für naturnahen Wasserbau, eine Anleitung für ingenieurbioologische Bauweisen, Österreichischer Agrarverlag, Wien.
- Schneider, J. (1984): Skript zur Vorlesung Baustatik an der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung der ETH Zürich.
- Schneider, J. (1985): Skript zur Vorlesung Holzbau an der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung der ETH Zürich.
- Schulz, A. (1987): Zur Näherungsberechnung des Abflusses in naturnah gestalteten Fliessgewässern, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Berlin, Mitteilung Nr. 107.
- Sieber, M. (1994): Skript zur Vorlesung Dendrologie I und II an der Abteilung VI für Forstwissenschaft, ETH Zürich
- Wegleitung (1982): Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitung 1982, Veröffentlichung des Bundesamt für Wasserwirtschaft, EDMZ, CH-3000 Bern.

7 Verwendete Zeichen und Symbole

A	[m ²]	angeströmte Fläche
C _D	[]	Fliesswiderstandskoeffizient
c'	[kN/m ²]	effektive Kohäsion des Bodens
c' _w	[kN/m ²]	effektive scheinbare Kohäsion infolge Durchwurzelung des Bodens
D	[mm]	Durchmesser der Wurzel (Holz und Rinde)
D _s	[mm]	Durchmesser des Steckholzes
d	[mm]	Durchmesser der Wurzel (nur Holz)
E-Modul	[kN/m ²]	Elastizitätsmodul der Wurzeln und des Steckholzes
E _p	[kN/m ²]	passiver Erddruck
F	[kN]	Strömungskraft
h	[m]	Höhe der Pflanze
h'	[m]	Höhe der durch die Strömung gekrümmten Pflanze
K _p	[]	passiver Erddruckbeiwert $K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{1}{2} \varphi \right)$
M	[kNm]	Moment in einem Querschnitt des Steckholzes
N	[kN]	Normalkraft in einem Querschnitt des Steckholzes
p	[mm]	Einwuchstiefe der Adventivwurzel im Steckholz (Verankerungslänge der Wurzel im Steckholz)
Q	[kN]	Querkraft in einem Querschnitt des Steckholzes
R	[kN/m ²]	Reibungswiderstand zwischen Wurzel und Boden
T _{Br}	[kN]	Bruchkraft der Wurzel
t	[m]	Länge des Steckholzes im Boden
v	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
y	[m]	Abflusstiefe
ε	[%]	Dehnung
φ'	[°]	innerer Reibungswinkel des Bodens
γ'	[kN/m ³]	Raumgewicht des Bodens unter Wasser
γ _w	[kN/m ³]	Raumgewicht des Wassers
ρ _w	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
σ	[kN/m ²]	vorhandene Spannung
σ'	[kN/m ²]	effektive Spannung im Boden
σ _f	[kN/m ²]	Festigkeit im massgebenden Querschnitt
σ _{Br}	[N/mm ²]	maximale Zugfestigkeit der Wurzel = Bruchspannung der Wurzel
σ _r	[kN/m ²]	Bruchspannung des Steckholzes
τ	[kN/m ²]	vorhandene Schubspannung im Boden
τ _f	[kN/m ²]	Scherfestigkeit des Bodens

8 Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

Tabellen

Tabelle A1	Übersicht über Bodenparameter und Zusammenhänge zwischen Wurzel und Boden.....	43
Tabelle A2	Übersicht über Zusammenhänge zwischen Wurzel und Kornverteilung des Bodens einerseits und deren Einfluss im Falle von Oberflächen- und Seitenerosion andererseits.....	44
Tabelle A3	Messresultate aus dem Felde.....	45
Tabelle A4	E-Module für Wurzeln der Spezies <i>Salix matsudana</i> und <i>Salix purpurea</i> aus den Daten von Hathaway (1973).....	47
Tabelle A5	Resultate der Versuche zu den Wurzelzugfestigkeiten.....	49
Tabelle A6	Vergleich von Querschnittsflächen und Umfang bei Wurzelverzweigungen.....	52
Tabelle A7	Formeln zur Berechnung von E-Modul und Bruchspannung σ_r aus Durchbiegungsversuchen an Steckhölzern.....	56
Tabelle A8	Messresultate der Versuche zum E-Modul und zur Bruchspannung σ_r	57
Tabelle A9	Bruchspannungen σ_r , resultierend aus den Feldversuchen.....	57

Bilder

Bild A1	Typische Kornverteilungskurven von Kies- und Siltböden.....	43
Bild A2	Verhältnis von Wurzeldurchmesser mit und ohne Rinde.....	46
Bild A3	Darstellung von Spannung und Dehnung von Weidenwurzeln der Spezies <i>Salix elaeagnos</i> und <i>Salix matsudana</i> x <i>alba</i>	47
Bild A4	Vergleich der Zugfestigkeit von Wurzeln mit Werten aus Hiller (1966) und Hathaway (1973).....	48
Bild A5	Versuchsergebnisse von Hathaway (1973) im Vergleich zu den in dieser Arbeit gemessenen Wurzelzugfestigkeiten der Testserie 1 für Siltböden.....	48
Bild A6a-f	Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 16, 17, 18, 19, 21 und 22.....	53
Bild A6g-l	Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 24, 26, 27, 28, 29 und 30.....	54
Bild A6m-r	Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 31, 32, 33, 34, 35 und 36.....	55
Bild A6s-u	Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 37, 38 und 39.....	56
Bild A7	Verlauf der Spannung σ und der Durchbiegung bei Krafteinleitungen in den Drittelpunkten bei 60 cm langen Steckhölzern.....	57

	Kiesboden	Kiesboden mit überlagerter Siltschicht
Bodenmatrix Erosionswahrscheinlichkeit Wassergehalt innerer Reibungswinkel ϕ' Kohäsion c' Austrocknungsgefahr Nährstoffverfügbarkeit Wachstumsbedingungen	abhängig von Korngrößenverteilung 4-5% ~ 39° keine hoch mittel schlecht	hoch erosiv 30-35% ~ 30.5° ~ 0.12 N/mm ² niedrig hoch gut
Wurzelnetz Vertikale Verteilung nächste Wurzel an der Oberfläche Hauptwurzelbereich Senkwurzeln am Ende der Steckholzpflanze	gleichmässig ca. 10 cm unterhalb Oberfläche verteilt gut entwickelt	grossteils in der Siltschicht, wenige im Kies direkt unterhalb der Oberfläche nur in Siltschicht klein oder nicht existent
einzelne Wurzel Querschnittsfläche Wachstumsrichtung Anteil Haarwurzeln	wechselnd leicht nach unten niedrig	immer kreisförmig horizontal im Silt hoch
Wurzel und Boden Wurzelnetz Bodenbindungsvermögen der Wurzeln	schwach entwickelt, Einzelwurzeln schlecht	stark vernetztes System mit hoher Wurzeldichte sehr gut, viele Haarwurzeln

Tabelle A1 Übersicht über Bodenparameter und Zusammenhänge zwischen Wurzel und Boden.

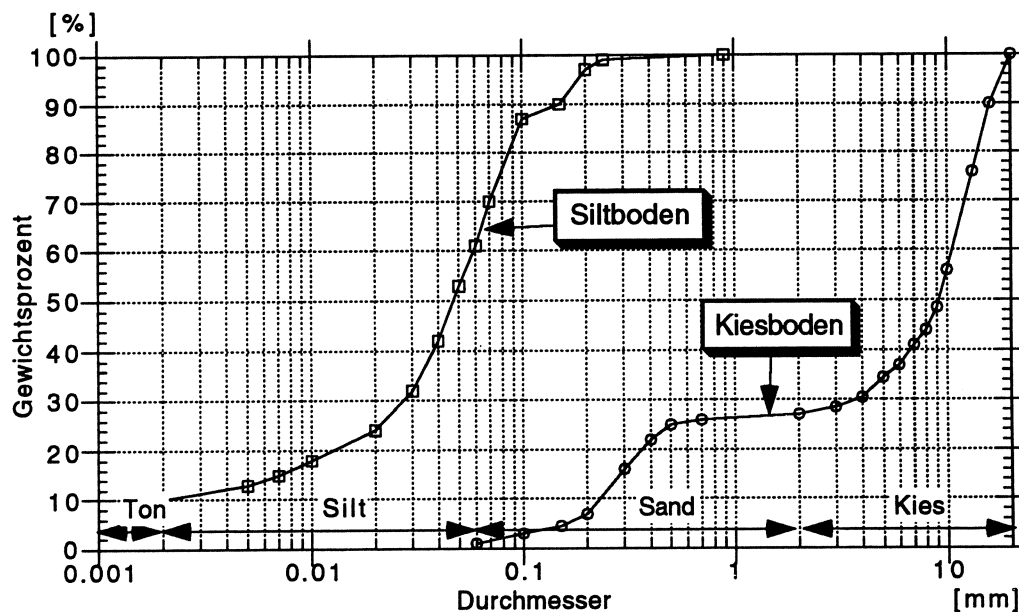


Bild A1 Typische Kornverteilungskurven von Kies- und Siltböden. Beim Siltboden handelt es sich genau genommen um einen sandigen Silt. Die Kurven wurden aus je drei Proben ermittelt.

	Kiesboden	Kiesboden mit überlagerter Siltschicht
<u>Oberflächenerosion</u>	Kolkung	evtl. Erosion der Siltschicht
Pflanze jünger als 3 Jahre	Wurzeln haben kaum Einfluss auf Erosion, Korngrößenverteilung entscheidend, tiefere Wurzeln geben Stabilität	keine Verbandswirkung, Wurzelnetz wird flussabwärts geschwemmt, hohe Versagenswahrscheinlichkeit
Pflanze 3 bis 6 Jahre alt	Wurzeln haben kaum Einfluss auf Erosion, Korngrößenverteilung entscheidend, tiefere Wurzeln geben Stabilität	durchgehendes Wurzelnetz zwischen den Steckholzpflanzen, hohe Erosionsresistenz
Abrasion durch Geschiebe	hoch	niedrig
Nach dem Hochwasser	aus verbleibenden Hauptwurzeln können neue Pflanzen entstehen	gesamte Wurzelmasse wird weggeschwemmt
<u>Seitenerosion</u>		
Pflanze jünger als 3 Jahre	Wurzeln haben kaum Einfluss auf Erosion, Korngrößenverteilung entscheidend	Wurzeln haben kaum Einfluss auf Erosion, Korngrößenverteilung entscheidend
Pflanze 3 bis 6 Jahre alt	Wurzeln haben kaum Einfluss auf Erosion, Korngrößenverteilung entscheidend	Wurzelnetz verlangsamt Erosion und schützt Kies
Nach dem Hochwasser	aus verbleibenden Hauptwurzeln können neue Pflanzen entstehen	aus verbleibenden Hauptwurzeln können neue Pflanzen entstehen
Erosionsgrad ist abhängig von Alter und Pflanzungsabstand der Steckholzpflanzen		

Tabelle A2 Übersicht über Zusammenhänge zwischen Wurzel und Kornverteilung des Bodens einerseits und deren Einfluss im Falle von Oberflächen- und Seitenerosion andererseits.

Nr.:	Salix	Test Serie	Alter [y]	Steckholz im Boden [m]	Volumen der Äste [dm ³]	Durch- messer [cm]	gem. Kraft [kN]	Bodenaufbau Tiefe ab O.K. Boden			Kommentar
								0-10 [cm]	10-30 [cm]	30- [cm]	
1	matsudana x alba	1	3			4.0	4.29	si	si-sa	ki	
2	matsudana x alba	2	3	0.82	2.8	4.2	8.54	si	si-sa	ki	
3	matsudana x alba	10	3	0.86	4.2	4.5		si	si-sa	ki	Steckholzpflanze ausgegraben
4	matsudana x alba	4	3	0.60	4.3	4.2	4.63	sa-ki	ki	ki	HW legt Wurzelnetz frei
5	elaeagnos	4	3	0.47	2.7	4.2	3.22	sa-ki	ki	ki	HW legt Wurzelnetz frei
6	elaeagnos	4	3	0.35	3.6	3.8	3.33	sa-ki	ki	ki	HW legt Wurzelnetz frei
7	matsudana x alba	4	3	0.50	3.2	4.4	3.19	sa-ki	ki	ki	HW legt Wurzelnetz frei
8	matsudana x alba	2	3	0.80	4.6	4.0	8.72	si	si-sa	ki	Steckholz gebrochen
9	matsudana x alba	8	3	0.85	3.2	3.6	7.34	si	si-sa	ki	W. abgeschnitten, St. gebrochen
11	elaeagnos	2	3	0.85	3.9	5.4	10.37	si	si-sa	ki	Steckholz gebrochen
10	matsudana x alba	9	3	0.80	1.8	3.4	5.17	si	si-sa	ki	vertikal gezogen
12	matsudana x alba	5	3	0.60	4.4	3.8	3.31	si	ki	ki	
13	purpurea	5	3	0.80	3.0	4.3	5.68	si	si-sa	ki	
14	purpurea	5	3	0.75	1.5	3.9	6.13	si	si-sa	ki	Steckholz geknickt
15	elaeagnos	5	3	0.65	4.5	3.5	4.25	si	ki	ki	
16	purpurea	10	6.5	0.70	1.4	5.6		ki	ki	ki	Steckholzpflanze ausgegraben
17	purpurea	3	6.5	0.70	1.0	4.7	4.82	ki	ki	ki	
18	purpurea	3	6.5	0.75	2.8	4.9	4.97	ki	ki	ki	Steckholz geknickt
19	purpurea	6	6.5	0.75	2.1	5.2	1.07	ki	ki	ki	10 cm Seitenerosion
20	purpurea	3	6.5	0.60	2.1	6.5	10.00	ki	ki	ki	
21	purpurea	6	6.5	0.55	0.5	4.9	1.48	ki	ki	ki	20 cm Seitener., schwache Pflanze
22	purpurea	6	6.5	0.65	2.0	5.2	5.11	ki	ki	ki	20 cm Seitenerosion
23	purpurea	6	6.5	0.75	2.1	3.7	6.40	ki	ki	ki	30 cm Seitenerosion, St. geknickt
24	purpurea	6	6.5	0.70	2.0	4.2	4.55	ki	ki	ki	30 cm Seitenerosion, St. geknickt
25	purpurea	3	6.5	0.60	1.6	5.2	6.88	ki	ki	ki	Steckholz gebrochen
26	elaeagnos	7	3	0.70	0.8	2.9	0.34	ki	ki	ki	
27	elaeagnos	7	3	0.70	1.1	3.6	0.33	ki	ki	ki	
28	elaeagnos	7	3	0.55	0.6	3.2	0.14	ki	ki	ki	
29	elaeagnos	7	3	0.55	1.9	4.7	1.47	si-sa	ki	ki	
30	elaeagnos	7	3	1.10	1.8	4.0	0.27	si-sa	si-sa	ki	
31	elaeagnos	7	3	0.80	1.3	4.3	0.65	si-sa	ki	ki	
32	matsudana, elaeagnos ?	7	3	0.90	2.3	4.2	0.77	si-sa	ki	ki	
33	matsudana, elaeagnos ?	7	3	0.89	2.2	5.0	1.66	si-sa	ki	ki	gute Wurzelverteilung
34	matsudana x alba	7	3	0.70	1.6	4.8	0.39	si-sa	ki	ki	
35	elaeagnos ?	7	3	0.82	1.1	4.1	1.74	si	si-sa	ki	Hauptwurzel stromaufwärts
36	purpurea	4	3	0.80	1.7	5.3	3.04	si-sa	ki	ki	HW legt Wurzelnetz frei
37	purpurea	4	3	0.85	0.9	3.5	3.78	si	si-sa	ki	HW legt Wurzelnetz frei
38	elaeagnos	4	3	0.75	1.2	4.3	3.44	sa-ki	ki	ki	HW legt Wurzelnetz frei
39	matsudana	10	5	1.00		4.7					Steckholzpflanze ausgegraben
40	elaeagnos ?	8	0.4	0.79		4.7	2.34	ki	ki	ki	Steckholz gebrochen
41	elaeagnos ?	8	0.4	0.86		4.6	3.62	ki	ki	ki	Steckholz gebrochen
42	elaeagnos ?	8	0.4	0.85		5.3	2.46	ki	ki	ki	Steckholz gebrochen
43	elaeagnos ?	8	0.4	0.75		5.1	1.17	ki	ki	ki	Steckholz gebrochen
44	elaeagnos ?	8	0.4	0.81		4.3	2.00	ki	ki	ki	
45	elaeagnos ?	8	0.4	0.85		4.5	2.61	ki	ki	ki	Steckholz geknickt

si = Silt, sa = Sand, ki = Kies, St = Steckholz, W = Wurzel, HW = Hochwasser

Tabelle A3 Messresultate aus dem Felde.

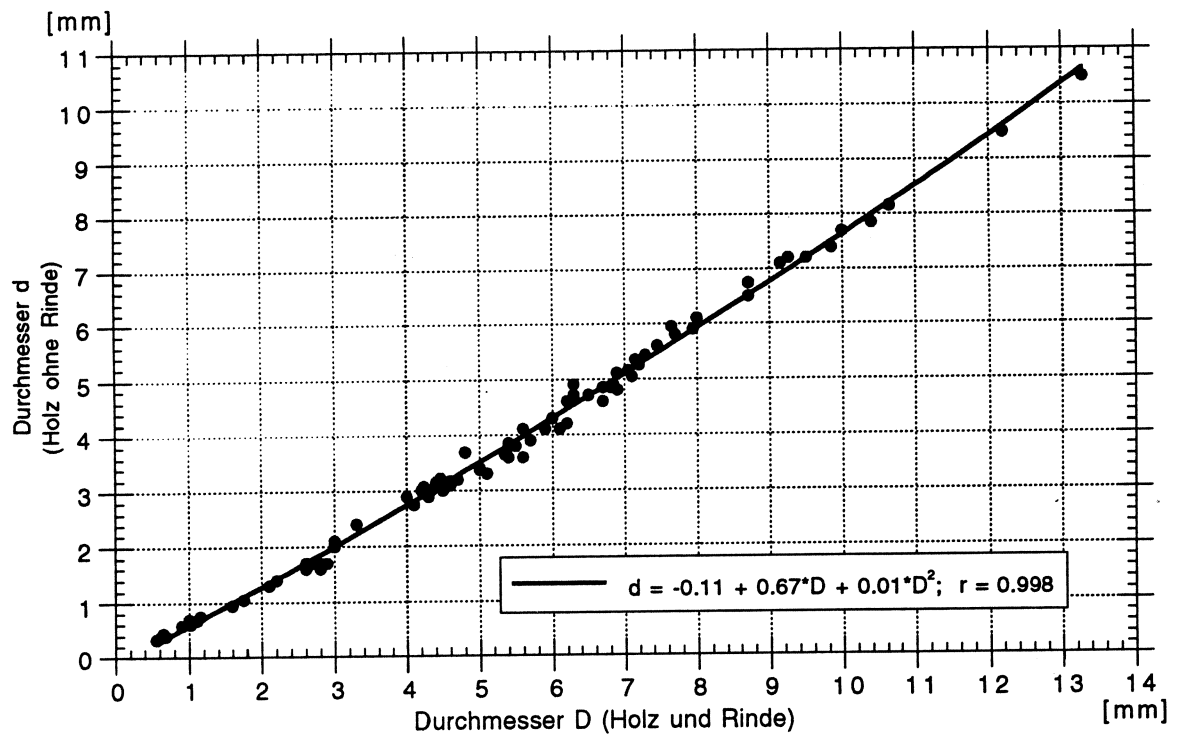


Bild A2 Verhältnis von Wurzelndurchmesser mit und ohne Rinde.

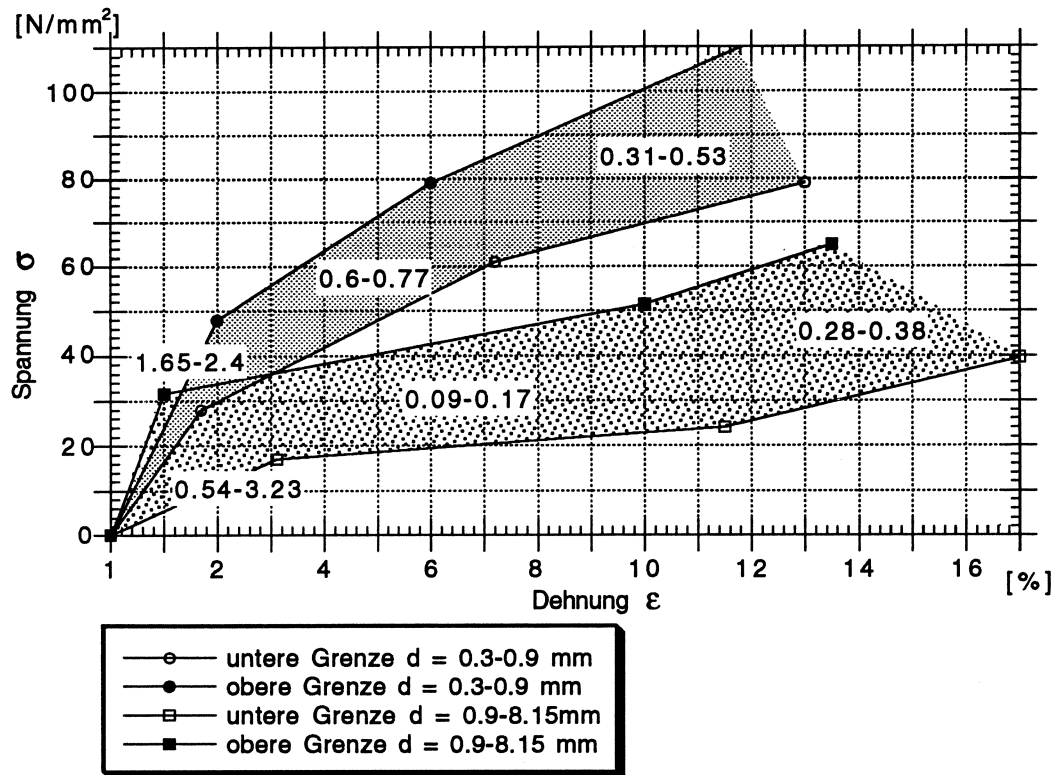


Bild A3 Darstellung von Spannung und Dehnung von Weidenwurzeln der Spezies *Salix elaeagnos* und *Salix matsudana* x *alba*. Es sind die Bereiche für Feinwurzeln ($\varnothing = 0.3 - 0.9$ mm) und dickere Wurzeln ($\varnothing = 0.9 - 8.15$ mm) unterschieden. Die Werte in der Schraffur geben den Variationsbereich des E-Moduls in [kN/mm²] für einen bestimmten Abschnitt an.

Hathaway (1973) hatte an je vier Weidenwurzeln der Spezies *Salix matsudana* und *Salix purpurea* Spannung und Dehnung gemessen. Aus den Graphiken seiner Publikation konnten die in Tabelle A4 aufgeführten E-Module bestimmt werden.

	E-Modul [kN/mm ²] bei Dehnung von etwa 0-2%	E-Modul [kN/mm ²] bei Dehnung von etwa 2-11%	E-Modul [kN/mm ²] bei Dehnung von etwa 11-18%
Salix Matsudana $\varnothing$: 3.00; 3.22; 3.25; 3.32 mm	0.45 - 0.79	0.11 - 0.20	0.27 - 0.33
Salix Purpurea $\varnothing$: 2.45; 2.87; 3.28; 3.73 mm	0.62 - 1.30	0.12	0.20 - 0.24

Tabelle A4 E-Module für Wurzeln der Spezies *Salix matsudana* und *Salix purpurea* aus den Daten von Hathaway (1973).

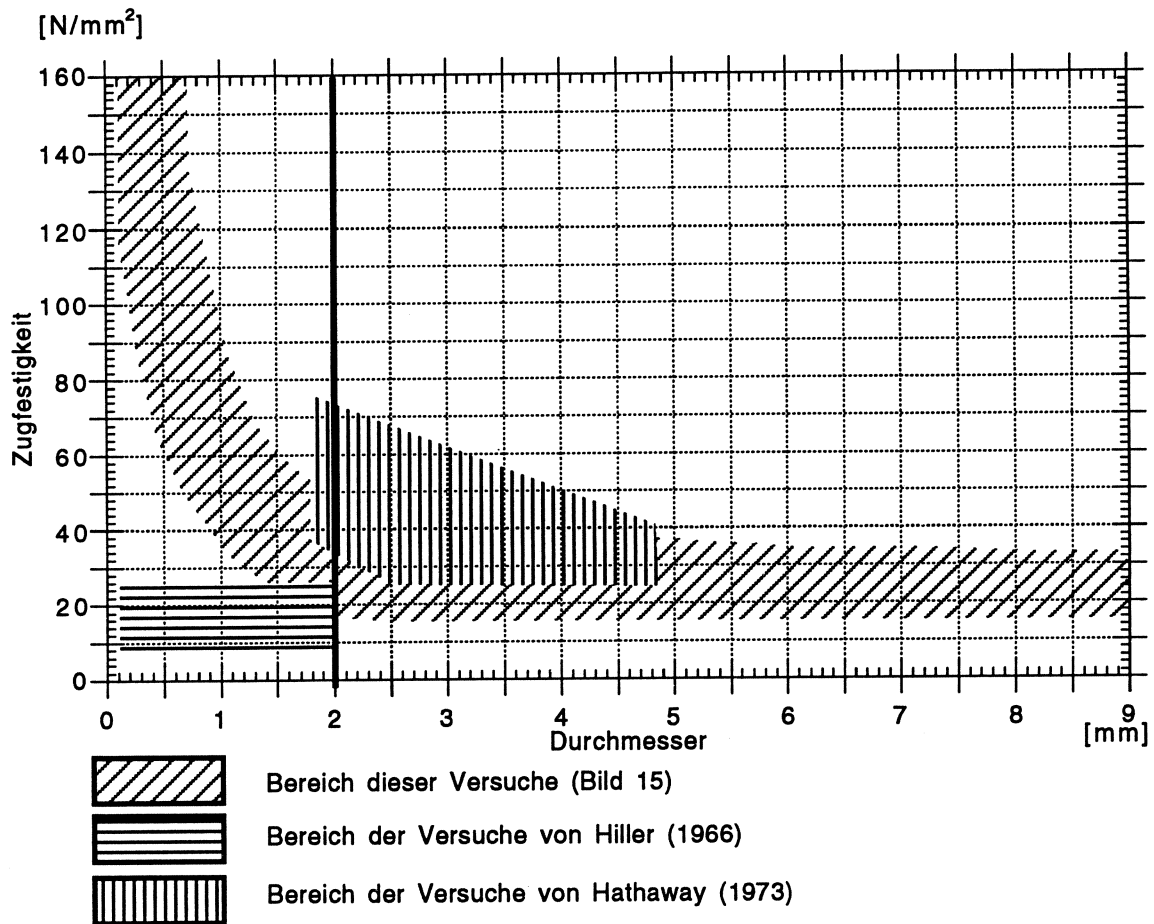


Bild A4 Vergleich der Zugfestigkeit von Wurzeln mit Werten aus Hiller (1966) und Hathaway (1973).

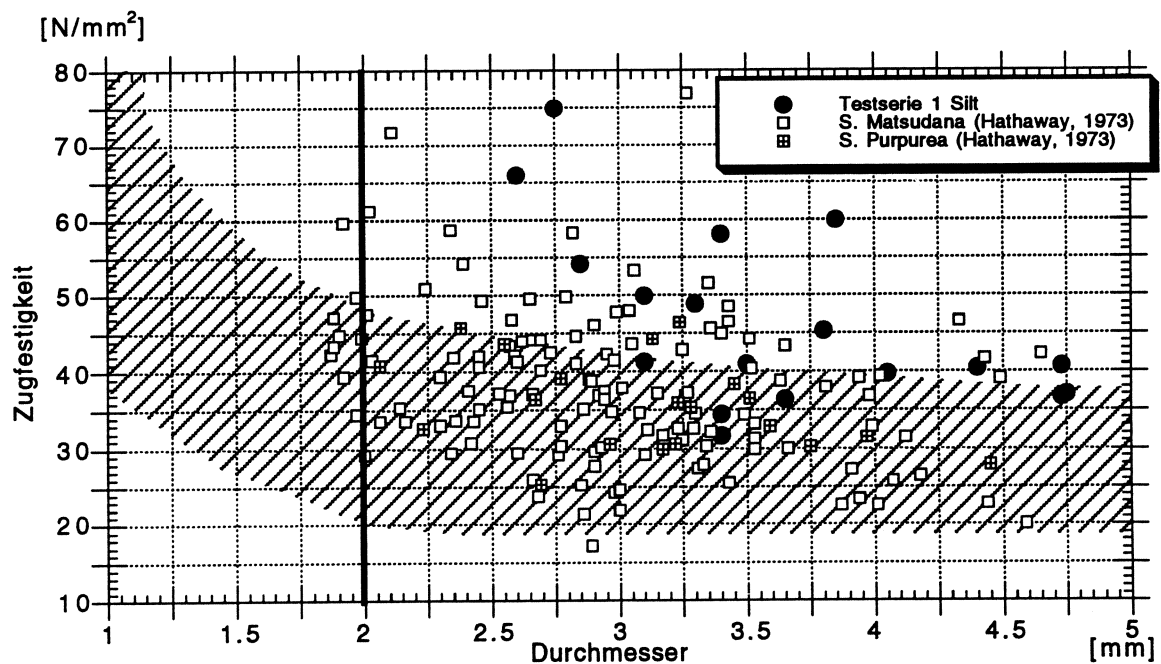


Bild A5 Versuchsergebnisse von Hathaway (1973) im Vergleich zu den in dieser Arbeit gemessenen Wurzelzugfestigkeiten der Testserie 1 für Siltböden.

Pflanze	Wurzel	Durch- messer	Test- länge	Bruch- kraft	Span- nung	Mess- serie	Boden	Weiden -Art
[Nr]	[Nr]	[mm]	[cm]	[N]	[N/ mm ²]			
12	1	2.30	20.0	107.96	25.98	1	ki	m/a
12	2	1.90	20.0	137.27	48.42	1	ki	m/a
12	3	1.40	20.0	66.68	43.32	1	ki	m/a
12	4	0.70	20.0	58.31	151.52	1	ki	m/a
12	5	3.40	17.0	282.62	31.13	1	ki	m/a
12	6	2.50	17.0	253.31	51.61	1	ki	m/a
10	1	3.80	17.0	512.92	45.23	1	si	m/a
13	1	2.60	19.0	350.22	65.96	1	si	pu/l
13	2	3.50	20.0	393.88	40.94	1	si	pu/l
13	3	3.30	16.5	418.41	48.92	1	si	pu/l
14	1	5.10	17.0	740.22	36.24	1	si-ki	pu/l
14	2	3.30	20.0	448.32	52.42	1	si-ki	pu/l
19	1	3.40	19.0	146.24	16.11	1	ki	pu/l
19	2	1.15	11.0	49.94	48.08	1	ki	pu/l
19	3	3.00	16.5	109.75	15.53	1	ki	pu/l
19	4	0.60	15.0	23.62	83.53	1	ki	pu/l
19	5	0.95	14.0	29.00	40.91	1	ki	pu/l
19	6	2.20	12.0	146.84	38.63	1	ki	pu/l
19	7	1.10	17.0	98.39	103.53	1	ki	pu/l
19	8	0.95	17.0	34.38	48.51	1	ki	pu/l
19	9	1.85	16.0	107.36	39.94	1	ki	pu/l
19	10	1.00	15.0	39.17	49.87	1	ki	pu/l
19	11	1.00	18.0	49.94	63.58	1	ki	pu/l
19	12	0.55	9.0	15.24	64.15	1	ki	pu/l
19	13	2.50	19.0	182.13	37.10	1	ki	pu/l
19	14	2.65	19.0	140.86	25.54	1	ki	pu/l
19	15	2.00	16.5	132.48	42.17	1	ki	pu/l
19	16	2.05	16.0	71.47	21.65	1	ki	pu/l
19	17	2.05	14.5	98.39	29.81	1	ki	pu/l
19	18	1.60	16.0	72.67	36.14	1	ki	pu/l
19	19	1.00	20.0	49.34	62.82	1	ki	pu/l
27	1	1.20	20.0	38.68	34.20	1	ki	el
27	2	2.00	19.0	103.07	32.81	1	si-ki	el
27	3	0.90	14.0	28.84	45.33	1	si-ki	el
27	4	0.60	13.0	24.29	85.91	1	si-ki	el
27	5	4.80	19.0	347.76	19.22	1	ki	el
27	6	2.80	21.0	215.19	34.95	1	ki-si	el
27	7	3.10	20.0	143.98	19.08	1	ki-si	el
27	8	3.10	17.0	243.22	32.22	1	ki-si	el
27	9	2.20	16.5	146.25	38.48	1	ki-si	el
26	1	1.05	18.0	78.88	91.09	1	si-ki	el
26	2	0.95	7.0	166.75	235.26	1	si-ki	el

Tabelle A5 Resultate der Versuche zu den Wurzelzugfestigkeiten (Fortsetzung).

Pflanze	Wurzel	Durchmesser	Testlänge	Bruchkraft	Spannung	Messserie	Boden	Weiden-Art
[Nr]	[Nr]	[mm]	[cm]	[N]	[N/mm ²]			
26	3	1.30	14.5	94.78	71.41	1	si-ki	el
26	5	3.30	14.5	146.30	17.11	1	si-ki	el
26	6	2.50	19.0	169.02	34.43	1	si-ki	el
26	7	3.40	5.0	318.25	35.05	1	si-ki	el
26	8	3.85	4.0	389.46	33.46	1	si-ki	el
26	10	2.40	4.5	224.32	49.59	1	ki	el
28	3	1.30	12.0	74.91	56.44	1	ki	el
28	4	1.50	14.0	146.80	83.07	1	ki	el
28	5	1.10	9.0	66.50	69.98	1	ki	el
28	9	2.40	17.0	89.23	19.72	1	ki	el
28	10	1.65	17.0	57.41	26.85	1	ki	el
29	1	0.33	17.5	10.23	119.59	1	si-ki	el
29	2	0.37	8.1	11.30	105.06	1	si-ki	el
29	3	0.39	11.1	9.77	81.79	1	si-ki	el
29	6	2.75	15.0	445.24	74.96	1	si	el
29	7	3.85	21.5	698.26	59.98	1	si	el
29	8	4.40	18.8	614.93	40.44	1	si	el
29	9	2.85	18.5	345.25	54.12	1	si	el
29	10	3.10	18.9	377.06	49.96	1	si	el
29	11	3.10	18.9	311.16	41.23	1	si	el
33	1	6.00	19.5	949.99	33.60	1	si	el; ma
33	2	5.40	19.0	798.84	34.88	2	si	el; ma
33	3	2.55		167.82	32.86	2	si	el; ma
33	4	4.30	17.8	307.21	21.16	2	si	el; ma
33	5	3.40	20.9	526.89	58.03	2	si	el; ma
33	6	3.65	20.2	380.69	36.38	1	si	el; ma
33	7	4.05	20.7	511.74	39.72	1	si	el; ma
39	1	5.73	19.5	615.16	23.90	2	si	m/a
39	2	4.73	17.8	644.71	36.77	2	si	m/a
39	3	4.75	13.8	656.07	37.02	1	si	m/a
39	4	5.50	15.0	849.24	35.75	1	si	m/a
39	5.1	8.15	20.0	1760.00	33.74	1	si	m/a
39	5.2	7.40	20.0	1770.00	41.16	1	si	m/a
39	6	7.15	20.0	1355.00	33.75	1	si	m/a
39	7	4.73	14.6	714.40	40.66	1	si	m/a
39	8	5.91	14.5	1057.56	38.55	1	si	m/a
39	9	2.73	15.5	194.73	33.27	2	si	m/a
39	10	3.93	16.5	175.04	14.47	2	ki	m/a
39	11	0.60	16.8	37.17	131.46	1	si	m/a
39	12	2.10	23.5	155.34	44.85	2	si	m/a
39	13	0.75	22.3	35.65	80.70	2	si	m/a
39	14	3.40	19.7	312.51	34.42	1	si	m/a
39	15	2.80	17.0	226.15	36.73	2	si	m/a

Tabelle A5 Resultate der Versuche zu den Wurzelzugfestigkeiten (Fortsetzung).

Pflanze	Wurzel	Durch- messer	Test- länge	Bruch- kraft	Span- nung	Mess- serie	Boden	Weiden- -Art
[Nr]	[Nr]	[mm]	[cm]	[N]	[N/ mm ²]			
39	16	1.45	9.6	72.15	43.69	2	si	m/a
39	17	2.55	18.6	99.29	19.44	2	si-ki	m/a
39	18	4.15	20.9	293.57	21.70	2	si	m/a
39	19	2.65	20.0	115.95	21.02	2	si	m/a
39	20	3.35	14.2	247.90	28.13	2	si	m/a
39	21	1.60	17.6	84.13	41.85	2	si-ki	m/a
39	22	1.70	17.3	71.26	31.39	2	ki-si	m/a
39	23.1	3.30	11.7	154.93	18.11	2	si	m/a
39	23.2	3.70	12.2	370.73	34.48	2	si-ki	m/a
39	24.1	1.75	9.5	93.01	38.67	2	ki-si	m/a
39	24.2	3.00	11.7	229.83	32.52	2	si-ki	m/a
39	25.1	1.30	23.2	43.39	32.69	2	ki-si	m/a
39	25.2	1.40	5.5	73.76	47.91	2	ki-si	m/a
39	25.3	2.10	17.0	157.87	45.58	2	si-ki	m/a
39	26.1	4.70	14.8	259.84	14.98	2	ki-si	m/a
39	26.2	3.40	17.7	286.65	31.57	2	si	m/a
39	27.1	2.70	20.0	139.05	24.29	2	ki-si	m/a
39	27.2	1.80	14.5	117.08	46.01	2	ki-si	m/a
39	27.3	1.90	14.0	91.96	32.44	2	ki-si	m/a
39	28.1	2.90	17.2	206.06	31.20	2	si-ki	m/a
39	28.2	3.20	18.2	297.25	36.96	2	si-ki	m/a
39	28.3	3.20	10.0	342.71	42.61	2	si-ki	m/a
19	21	3.50		206.00	21.41	1	ki	pu/l
19	22	3.70		240.00	22.32	1	ki	pu/l
19	23	3.60		266.00	26.13	1	ki	pu/l

Abkürzungen:

m/a	Salix matsudana x alba
pur/l	Salix purpurea lrette
el	Salix elaeagnos
el; m/a	Salix elaeagnos oder Salix matsudana x alba
si	Silt
ki	Kies
si-ki	Silt-Kies, wobei Wurzeln sich wie im Silt verhalten
ki-si	Kies-Silt, wobei Wurzeln sich wie im Kies verhalten

Tabelle A5 Resultate der Versuche zu den Wurzelzugfestigkeiten.

d	d ₁	d ₂	A	A ₁	A ₂	U	U ₁	U ₂	$\frac{A_1+A_2}{A}$	$\frac{U_1+U_2}{U}$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1.65	1.19	1.13	4.29	2.24	2.01	7.34	5.30	5.03	0.99	1.41
1.84	1.34	1.27	5.31	2.84	2.54	8.17	5.97	5.65	1.01	1.42
1.91	1.48	0.99	5.73	3.46	1.54	8.48	6.60	4.40	0.87	1.30
2.02	1.80	0.74	6.38	5.11	0.87	8.95	8.01	3.30	0.94	1.26
2.23	1.98	1.03	7.79	6.16	1.65	9.90	8.80	4.56	1.00	1.35
2.55	2.12	1.24	10.18	7.07	2.41	11.31	9.42	5.50	0.93	1.32
2.72	2.05	1.48	11.59	6.57	3.46	12.07	9.09	6.60	0.87	1.30
2.72	2.51	0.53	11.59	9.93	0.44	12.07	11.17	2.36	0.89	1.12
2.83	2.40	1.48	12.57	9.08	3.46	12.57	10.68	6.60	1.00	1.38
3.04	2.90	1.59	14.52	13.20	3.98	13.51	12.88	7.07	1.18	1.48
3.18	2.37	1.87	15.90	8.81	5.52	14.14	10.52	8.32	0.90	1.33
3.46	2.86	2.33	18.86	12.88	8.55	15.39	12.72	10.37	1.14	1.50
3.47	3.26	1.92	18.87	16.70	5.79	15.40	14.49	8.53	1.19	1.49
3.68	2.62	2.30	21.24	10.75	8.30	16.34	11.62	10.21	0.90	1.34
3.82	3.68	1.80	22.90	21.24	5.11	16.96	16.34	8.01	1.15	1.44
4.03	3.25	2.40	25.52	16.62	9.08	17.91	14.45	10.68	1.01	1.40
4.10	2.93	1.52	26.42	13.53	3.63	18.22	13.04	6.75	0.65	1.09
5.44	4.04	3.66	46.49	25.66	21.00	24.17	17.96	16.24	1.00	1.41
6.58	5.44	3.63	67.95	46.49	20.67	29.22	24.17	16.12	0.99	1.38
Ø									0.98	1.35

d = Durchmesser
A= Querschnittsfläche
U = Umfang

Indizes: Hauptwurzel
1 dickere Wurzel nach der Verzweigung
2 dünnere Wurzel nach der Verzweigung

Tabelle A6 Vergleich von Querschnittsflächen und Umfang bei Wurzelverzweigungen. Die Querschnittsfläche nahm nach der Verzweigung um durchschnittlich 2 % ab und der Umfang um durchschnittlich 35 % zu.

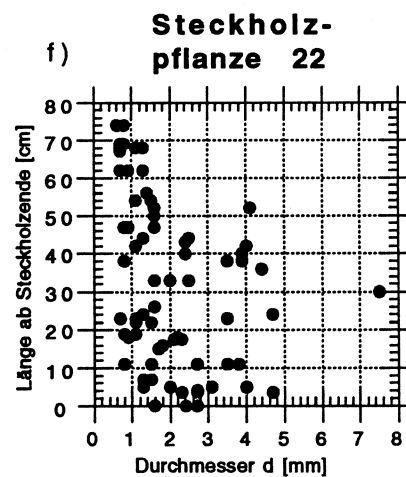
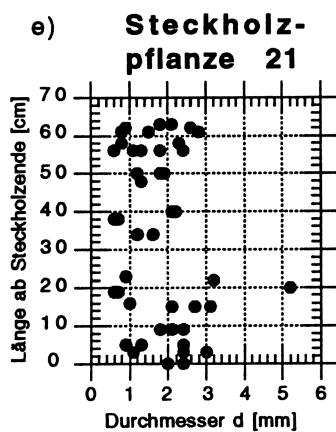
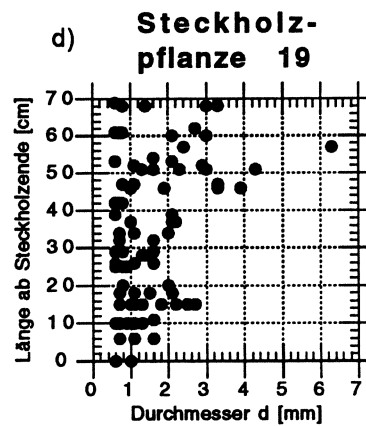
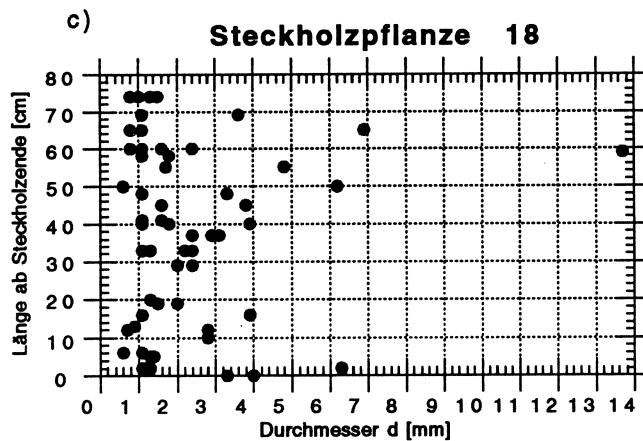
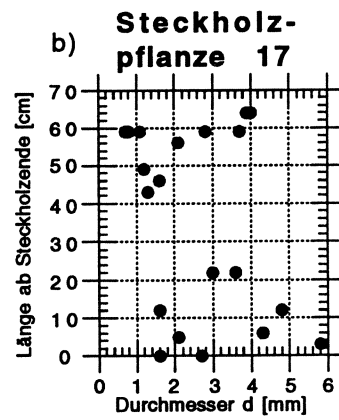
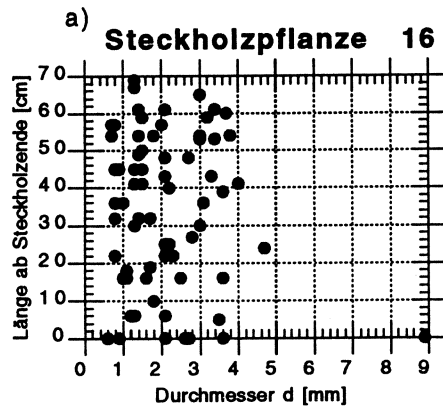


Bild A6a-f Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 16, 17, 18, 19, 21 und 22.

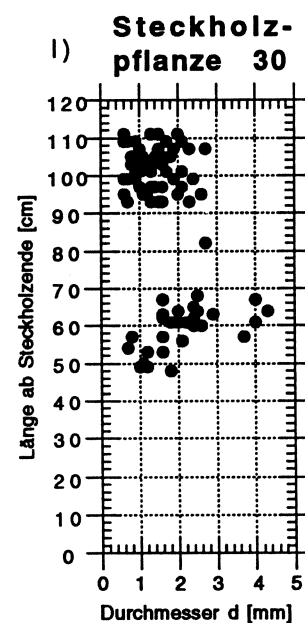
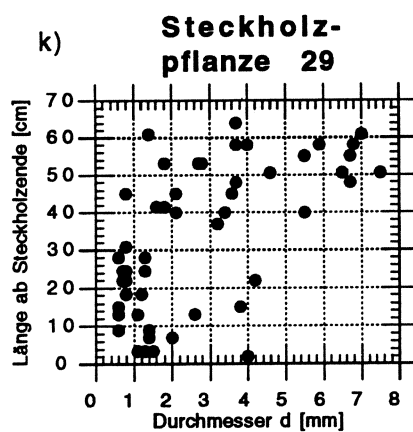
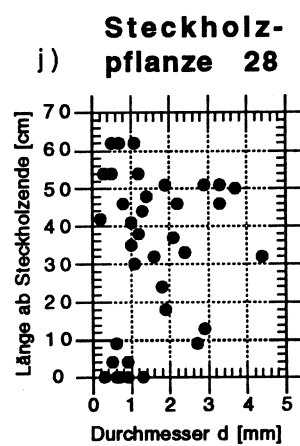
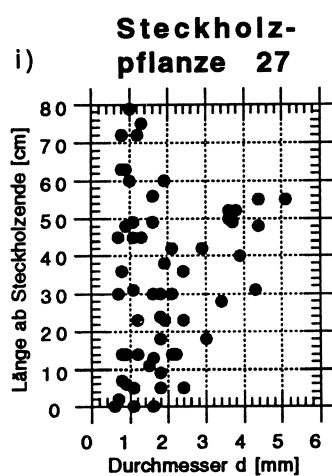
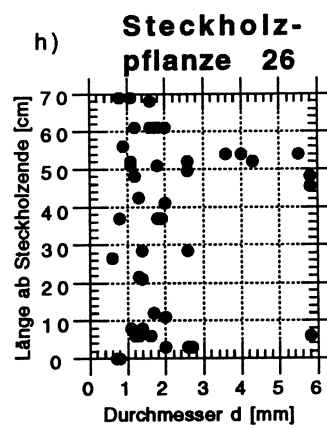
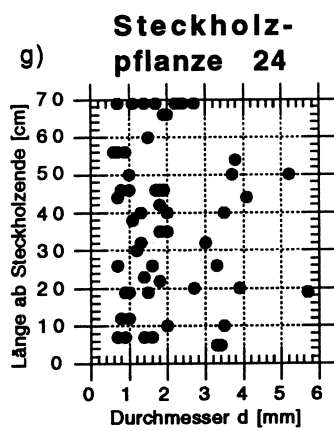


Bild A6g-I Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 24, 26, 27, 28, 29 und 30.

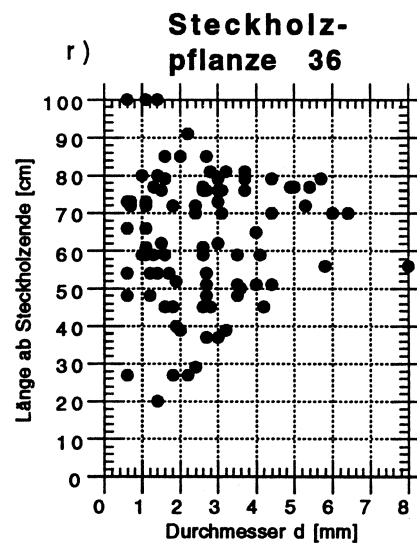
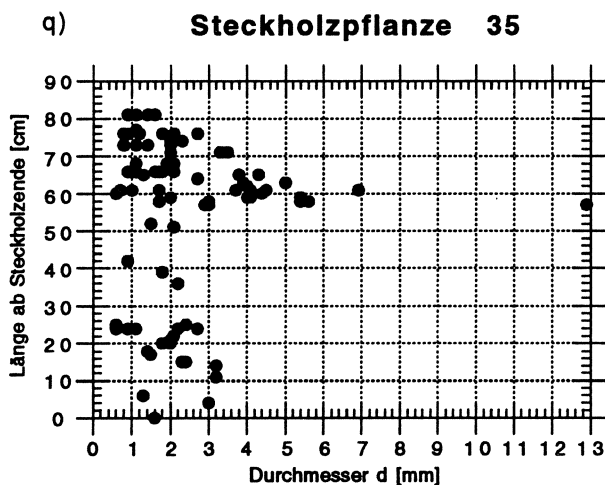
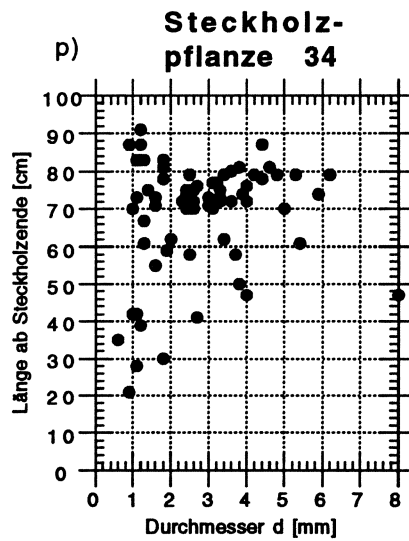
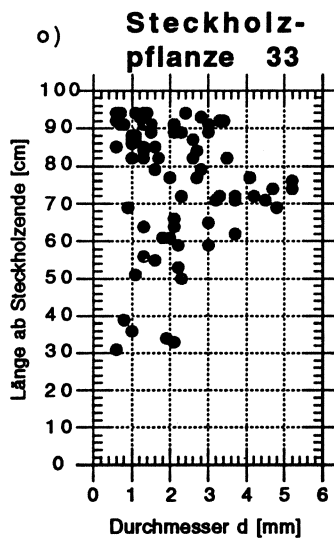
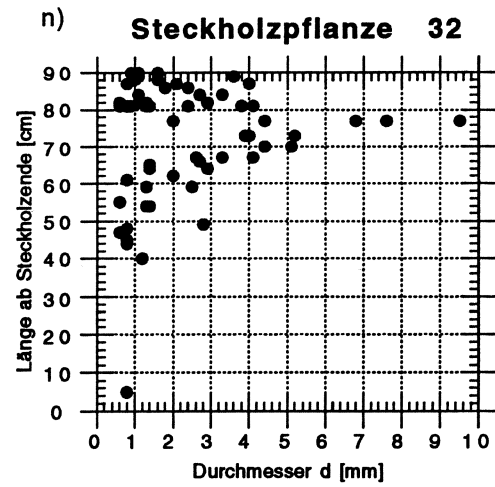
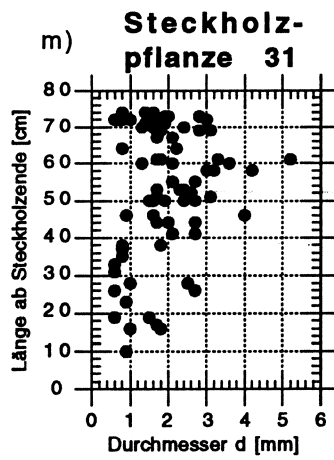


Bild A6m-r Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 31, 32, 33, 34, 35 und 36.

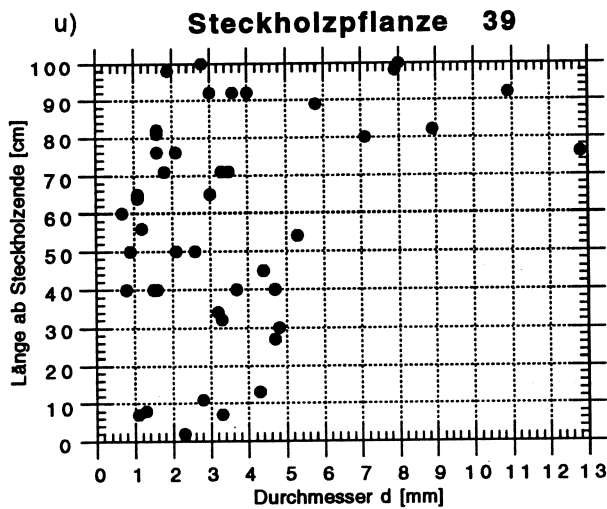
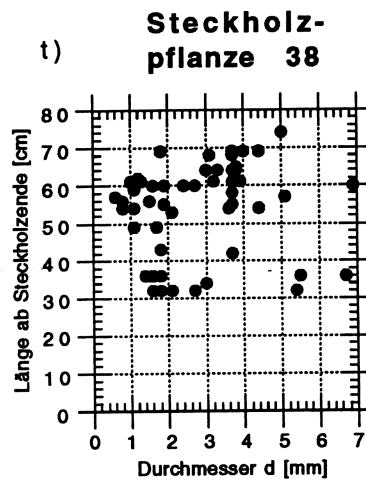
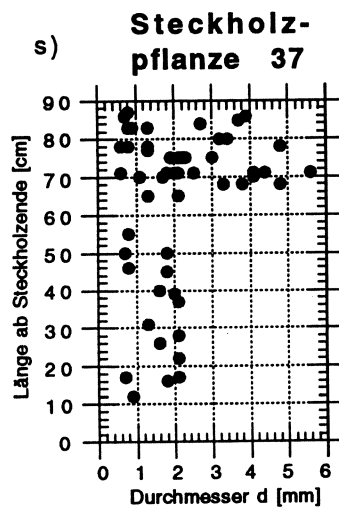


Bild A6s-u Verteilung der Adventivwurzeln an den Steckhölzern 37, 38 und 39.

Trägheitsmoment	E-Modul	Bruchspannung
$I = \frac{\pi D_s^4}{64}$	$E = \frac{23}{1296} \frac{\Delta P L^3}{\Delta x}$	$\sigma_r = \frac{P_{\max} L}{6 I} \frac{D_s}{2}$

Legende:

D_s	Steckholzdurchmesser
L	Länge Steckholz zwischen den Auflagepunkten
$P_{\max}$	Maximum der gemessenen Kraft
ΔP	Kraftänderung
Δx	Wegänderung

Tabelle A7 Formeln zur Berechnung von E-Modul und Bruchspannung σ_r aus Durchbiegungsversuchen an Steckhölzern

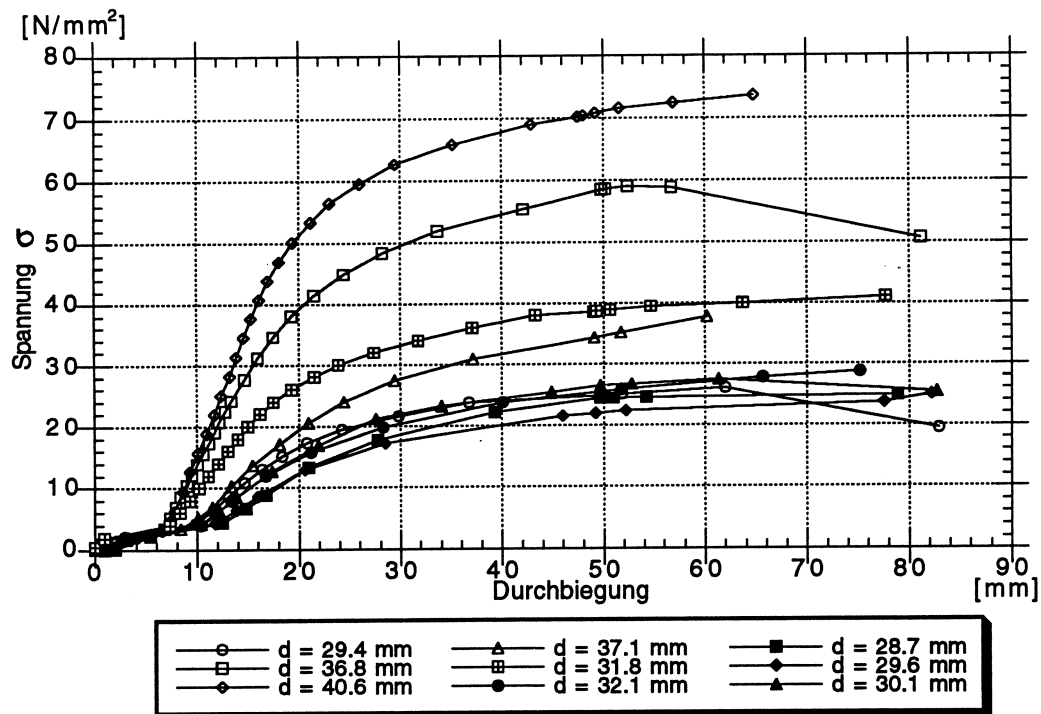


Bild A7

Verlauf der Spannung σ und der Durchbiegung bei Kräfteinleitungen in den Drittelpunkten bei 60 cm langen Steckhölzern. Der Weg konnte aus technischen Gründen nur bis maximal 83 mm gemessen werden. Die Kraftmessung konnte jedoch bis zu einer Durchbiegung von etwa 250 mm weitergeführt werden, wobei die Kraft zwischen 60 und 90 mm ihr Maximum erreicht hatte.

Spezies	Durchmesser [mm]	E-Modul [kN/mm ²]	Bruchspannung σ_r [N/mm ²]
matsudana x alba	29.4	6.48	48.1
purpurea (1)	36.8	7.40	69.5
purpurea (1)	40.6	7.50	71.5
purpurea (2)	37.1	3.78	44.3
purpurea (3)	31.8	7.79	64.9
purpurea (3)	32.1	4.48	44.7
matsudana x alba	28.7	5.66	48.3
matsudana x alba	29.6	4.54	51.8
matsudana x alba	30.1	5.46	50.4

Tabelle A8 Messresultate der Versuche zum E-Modul und zur Bruchspannung σ_r .

Versuchsnummer	40	41	42	43	44	45
Durchmesser [mm]	47	46	53	51	43	45
Bruchspannung σ_r [N/mm ²]	62	70	64	29	64	130

Tabelle A9 Bruchspannungen σ_r , resultierend aus den Feldversuchen. Es handelt sich dabei vermutlich um die Weidenart *Salix elaeagnos*.