

Diss. ETH Nr. 12575

**Stabilität von Weidenverbauungen
an Flussufern**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE

vorgelegt von

Matthias Oplatka

Dipl. Kultur-Ing. ETH
geboren am 6. Mai 1964
von Zürich, Zürich



Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. D. Vischer, Referent
Prof. Dr. H.R. Heinemann, Korreferent
Dr. B. Zarn, Korreferent

1998

ZUSAMMENFASSUNG

Bei ingenieurbioologischen Ufersicherungen ist auch heute noch wenig über die Zerstörungsprozesse und deren auslösende Momente bekannt. Ebenso fehlt ein allgemeingültiges Bemessungskonzept. Deshalb behilft man sich mit Erfahrungswerten, welche auf zufälligen Beobachtungen basieren und folglich nicht zwingend mit den effektiven Grenzwerten identisch sind. Die bisherige Forschung im Zusammenhang mit Vegetation galt primär der Bestimmung der Abflusskapazität und nicht der Uferstabilität.

Eines der Ziele dieser Arbeit ist, ein Bemessungskonzept für ingenieurbioologische Ufersicherungen zu erarbeiten, das der heute im Tragwerkbau gängigen Bemessungsphilosophie entspricht. Dieses Konzept besteht aus den Teilen Gefährdungsanalyse, Widerstands- und Beanspruchungsmodell, welche sowohl auf den Boden als auch auf die Pflanze anzuwenden sind.

Das massgebende Gefährdungsbild ist für Ufersicherungen mit Steckhölzern eine Kombination aus Erosion und in der Pflanze hängen gebliebenes Geschwemmsel. Die massgebende Beanspruchung auf die Pflanze ist die Strömungskraft und nicht die oft verwendete Schleppspannung. Diese sollte nur bei einem grossen Verhältnis von Abflusstiefe zu Expositionshöhe verwendet werden, was für die massgebende Beanspruchung auf den Boden hingegen zutrifft.

Der Widerstand der drei- bis sechsjährigen Weidensteckhölzer, welche in Kiesrohböden oder in Kiesböden mit einer überlagerten Siltschicht aufwachsen, wird auf Grund von Ausreissversuchen zwischen 4 und 10 kN liegen. Eine Erhöhung des Widerstandes erfolgt mit zunehmendem Steckholzdurchmesser und der Einbindetiefe im Boden sowie dem Alter der Pflanze. Steckhölzer, welche in einem Blockwurf verkeilt sind, weisen die höchsten Widerstände auf. Der Bodenaufbau und der Wasserhaushalt bestimmen das Wurzelbild massgeblich und somit auch den Widerstand.

Der Widerstand des Bodens ist vor allem durch dessen Korngrössenverteilung und die Böschungsneigung bestimmt. Die Wurzeln tragen nur bei Feinböden zu einer Erhöhung des Widerstandes bei.

Die Beanspruchung der bis zu 4.5 m hohen Pflanzen wurde in einem 140 m langen Schleppkanal gemessen. Die auf die Pflanze wirkende Strömungskraft liegt bei einer Fliessgeschwindigkeit von 4 m/s maximal zwischen 1 und 2 kN. Da Weiden sehr elastisch sind, nehmen sie mit zunehmender Geschwindigkeit eine strömungsgünstigere Form an. Die angeströmte Fläche verkleinert sich bereits bei 1 m/s um einen Faktor 4 bis 5 und bei 4 m/s um einen solchen von 20 bis 40 gegenüber der Nullgeschwindigkeit.

Das hat zur Folge, dass die Beanspruchung nur linear statt im Quadrat zunimmt. Diese Kontraktion der Pflanze wird bei den heutigen Abflussmodellen nicht berücksichtigt.

Die Beanspruchung des Bodens in Form einer Schleppspannung wird massgeblich durch Belastungsspitzen bestimmt, welche durch Wirbelbildung hervorgerufen werden. Weitergehende Untersuchungen wurden aber dazu nicht durchgeführt.

Aus dem Vergleich von Widerstand und Beanspruchung kann gefolgert werden, dass es immer zu Erosion kommen muss, bevor eine Ufersicherung mit Steckhölzern versagt. Geht man davon aus, dass der Widerstand des Bodens durch die Wurzeln nur in engen Grenzen erhöht wird, so bedeutet dies, dass die Hauptwirkung von ingenieurb biologischen Ufersicherungen in der Reduktion der Fliessgeschwindigkeit unmittelbar oberhalb des Uferbodens und somit in der Verminderung der Beanspruchung des Bodens liegt. Deshalb sind Uferverbauungen so zu gestalten, dass sie die Zone mit den grossen Fliessgeschwindigkeitsgradienten und intensiver Wirbelbildung von der Bodenoberfläche fern halten.

Die weitere Forschung sollte einen Schwerpunkt auf das strömungsmechanische Verhalten von Pflanzen legen, damit die Geschwindigkeitsverteilung im Uferbereich und somit die Beanspruchung des Bodens besser vorhergesagt werden kann. Im Weiteren sind die Fragen der Erosionsresistenz durchwurzelter Böden und der Wurzelverteilung in Funktion der Standortbedingungen und des Pflanzenalters noch so gut wie gar nicht beantwortet.

ABSTRACT

The processes related to the stability and failure of vegetation-stabilized river banks are not well known. As a result, there is an absence of general design criteria for soil bioengineering solutions to river bank stabilization. Many soil bioengineering solutions rely on limited empirical observations and tend to emphasize the discharge capacity of the channel rather than bank erosion thresholds and bank stability.

The aim of this work is to develop a design concept for soil bioengineering constructions along river banks. It is based on the state of the art philosophy for structural design, and consists of risk analysis, resistance and stress models. The concept has to be applied to the soil as well as the vegetation.

The most significant threat to plant cuttings used in soil bioengineering is the combination of sediment erosion and shear induced by floating debris. The total force on the plant rather than the force per unit area is most appropriate for design. Shear stress should only be used for design purposes when the height of exposure of the object is much smaller than the water depth, as is common in the case of sediment transport.

Field tests for resistance were performed on three to six year old willow cuttings grown in either gravel or silt-covered gravel soils. Fourteen geometric configurations for the pulling tests were used. Resistance values ranged from 4 to 10 kN. The resistance values increased with age, thickness and burial depth. The texture of the soil and water regime control the distribution of roots in the soil and consequently the resistance to removal.

The resistance of the soil is determined from the grain size distribution and the slope angle. The roots increase the resistance only in fine soils.

The stresses induced by the current to the willows were measured in a 140 m long towing tank. The height of the willows varied from 1.8 to 4.5 m, and the towing velocities ranged from 1 to 4 m/s. The maximum measured current force acting on the willows was 1 to 2 kN. Because of the unusual flexibility of the willows, they formed streamlined bodies when subjected to a current. Compared with the no-flow condition, the area perpendicular to the flow decreased by a factor of 4 to 5 at a velocity of 1 m/s, and by a factor of 20 to 40 at a flow velocity of 4 m/s. The relationship between force and flow velocity follows a linear rather than a squared relationship because the plant structure contracts, resulting in a decrease of projected flow area as a function of the velocity and the mechanical properties of the plant structure. In most design models this contraction of flow area of the plants is not taken into consideration.

The stress from the flow to the soil is calculated as a bed shear stress arising from the structure of the flow and turbulence, no additional research was done on this topic.

Comparison of the applied force and the resistance of the plant shows that there is always significant sediment erosion prior to the onset of the failure of the construction. The soil binding capacity of the roots is negligible. Thus the main effect of the plant is to reduce the velocity directly above the ground and keep the stress below the threshold level of erosion. Therefore soil bioengineering constructions to protect river banks should be designed in a way to minimize near-bed zones of high velocity and large eddies in susceptible areas.

This study suggests that further understanding of these processes would be enhanced by investigating the hydromechanical interaction of the plant with near bank flow field and the shear stress on the soil surface. Furthermore little is known about the resistance of soils with abundant roots and the distribution of roots as a function of the site condition and the age of the plant.

RÉSUMÉ

Les processus de dégradation des berges stabilisées avec des moyens du génie biologique et les facteurs qui y concourent sont encore peu connus aujourd'hui. Il manque aussi un concept général pour le dimensionnement de cette stabilisation. Ce dernier est alors entrepris sur la base de l'expérience et des observations faites, observations qui ne fournissent pas forcément les valeurs limites admissibles. La recherche réalisée jusqu'ici sur l'effet de la végétation concerne principalement la détermination de la capacité d'écoulement et non pas la stabilité des berges.

Un des buts du présent travail consiste en l'établissement d'un concept de dimensionnement des berges stabilisées par des moyens du génie biologique, qui corresponde à la philosophie actuelle prévalant pour le dimensionnement des structures. Ce concept comprend une analyse des risques, respectivement un modèle décrivant la résistance et la sollicitation tant du sol que des plantes elles-mêmes.

La situation de risque déterminante pour les berges stabilisées avec des boutures est une combinaison des effets dus à l'érosion et à l'impact des corps flottants retenus par la végétation. La sollicitation de la plante est due à la force du courant et non aux tensions d'entraînement souvent prises en considération. Cette notion de tension ne devrait être utilisée que si le rapport de la profondeur d'eau à la hauteur d'exposition de la plante est grand, alors qu'elle est déterminante pour la sollicitation du sol.

La résistance à l'arrachement des saules âgés de trois à six ans ayant grandi dans des sols graveleux recouverts d'une couche de limon, mesurée lors d'essais, varie entre 4 et 10 kN. Cette résistance croît avec le diamètre des boutures, avec leur profondeur de fiche dans le sol et avec leur âge. Les plus grandes résistances sont constatées sur les boutures plantées dans un tapis de blocs. La consistance du sol et sa teneur en eau sont des facteurs influençant la formation des racines, donc le degré de résistance de la plante.

La résistance du sol, quant à elle, dépend essentiellement de la répartition granulométrique de celui-ci et de la pente du talus. Les racines ne contribuent à l'augmentation de la résistance que dans les sols fins.

La sollicitation des saules atteignant une hauteur de 4,5 m a été mesurée dans un canal d'étalonnage d'une longueur de 140 m. La force du courant qui agit sur la plante lorsque la vitesse de celui-ci est de 4 m/s se situe au maximum entre 1 et 2 kN. Etant très élastiques, les saules prennent, à vitesse croissante, une forme plus favorable à l'écoulement. La surface touchée par les filets liquides à une vitesse de 1 m/s se réduit d'un facteur de

4 à 5, respectivement d'un facteur de 20 à 40 à 4 m/s, en comparaison de la situation à vitesse nulle. Cette réduction du maître couple a pour conséquence que la sollicitation augmente avec une fonction linéaire et non quadratique. La déformation de la plante n'est encore guère prise en considération dans les modèles d'écoulement actuels.

La sollicitation du sol, exprimée par la tension d'entraînement, est soumise à des pointes caractéristiques provoquées par la formation de tourbillons dans l'écoulement. Un examen plus approfondi de ce phénomène n'a toutefois pas été entrepris.

La comparaison de la résistance et de la sollicitation montre que la rupture d'un ouvrage de stabilisation de berges ne peut se produire que si elle a été précédée d'une érosion. Si l'on admet que la résistance du sol n'est que peu augmentée par la présence des racines, il s'ensuit que l'effet principal de la stabilisation des berges par des moyens biologiques consiste en la réduction de la vitesse du courant immédiatement au-dessus du sol et, par conséquent, en la diminution de la sollicitation de ce dernier. Pour cette raison, les ouvrages de protection des berges doivent être conçus de manière à ce que la zone à fort gradient de vitesse et à formation importante de tourbillons reste éloignée de la rive.

La recherche future devrait mettre l'accent sur le comportement des plantes dans l'écoulement, afin que la répartition des vitesses au voisinage de la berge et, par là, la sollicitation du sol puissent être mieux simulées. De plus, il faut mentionner que les questions relatives à la résistance à l'érosion des sols entrelacés de racines, respectivement à l'évolution des racines en fonction des conditions de l'emplacement et de l'âge de la plante n'ont pas encore obtenu de réponse.