Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen

Methods and Limitations of Biological Bank Protection at Waterways

Dipl.-Ing. Jeannine Eisenmann, Dipl.-Ing. Petra Fleischer, Bundesanstalt für Wasserbau

Um die Ufer von Binnenwasserstraßen dauerhaft vor negativen Auswirkungen der hydraulischen Belastungen aus Schifffahrt und gegebenenfalls Hochwasser zu schützen, werden diese bisher in der Regel mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen gesichert. Mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 erhalten ökologische Gesichtspunkte bei allen Aus- und Neubaumaßnahmen sowie Unterhaltungsarbeiten an Wasserstraßen einen zunehmend größeren Stellenwert. Dementsprechend sind verstärkt naturnahe, technisch-biologische Ufersicherungen als Alternative zur klassischen Steinschüttung anzuwenden. Für deren Einsatz an Wasserstraßen gibt es bisher allerdings kaum Erfahrungen und keine Regelwerke. Aus diesem Grund werden seit einigen Jahren in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen mit dem Ziel durchgeführt, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für deren Einsatz an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten. Die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. In dem folgenden Beitrag werden anhand der bereits vorliegenden Erkenntnisse Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen aus technischer Sicht diskutiert.

Sloped embankments of inland waterways are usually protected from erosion and other negative impacts of ship-induced hydraulic loads or high water levels by technical revetments consisting of riprap. Since the European Water Framework Directive has been put into action in 2000 greater emphasis has been placed on ecological aspects in all construction and maintenance work carried out on waterways. Accordingly, semi-natural biotechnical bank protection are required to be used more frequently as an alternative to conventional riprap. However, little experience and no design rules are yet available for the use of such methods on waterways. It is for this reason that the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) and the Federal Institute of Hydrology (BfG) have, for some years now, been collaborating on a joint research project to investigate the hydraulic load capacity and ecological effectiveness of technical-biological bank protection with the aim of drawing up recommendations for their application on inland waterways as well as basic design principles. The investigations are ongoing. Based on the findings to date, the possibilities and limitations of using biological bank protections at waterways are presented in this article and discussed from an engineering point of view.

1 Ausgangssituation
Background

Deutschland besitzt insgesamt ca. 6600 km Binnenschifffahrtsstraßen, etwa 41% staugeregelte und 35% frei fließende Flussstrecken sowie 24% künstliche Wasserstraßen (Kanäle). Um die Ufer sicher und dauerhaft vor Erosion und anderen negativen Auswirkungen der hydraulischen Belastungen aus Schifffahrt bzw. Hochwasser zu schützen, werden diese bisher überwiegend mit Deckwerken aus Steinschüttungen technisch gesichert. Bemessungsgrundlage ist ein breites Regelwerk der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Seit Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 und Überarbeitung der entsprechenden nationalen Regelungen – Bundesnaturschutzgesetz, Wasserhaushaltsgesetz und Wasserstraßengesetz – gibt es für die Unterhaltung und den Aus- und Neubau von Binnenwasserstraßen

neue veränderte Rahmenbedingungen. Bestimmten bisher überwiegend nur die technischen Aspekte die Planungen, um einen ordnungsgemäßen Zustand der Wasserstraße zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs sicherzustellen, müssen jetzt in gleicher Weise ökologische Aspekte berücksichtigt werden. Auch Maßnahmen ausschließlich für ökologische Verbesserungen im Uferbereich können an Bundeswasserstraßen zukünftig erforderlich werden. Die aktuelle Aufgabenstellung heißt daher: „Entwicklung neuer Konzepte für die Ufergestaltung – weg von der klassischen Steinschüttung, hin zu mehr ‚Grün', zu mehr pflanzlichen, ökologisch wertvollen Ufersicherungen", um den gesetzlichen Anforderungen – Erhalt und Schaffung von Lebensraum für Pflanzen und Tiere – auch an Wasserstraßen Rechnung zu tragen.

Für den Einsatz von Ufersicherungen mit pflanzlichen Komponenten gibt es an Wasserstraßen bisher allerdings noch keine ausreichenden Erfahrungen und kein Regelwerk. Aus diesem Grund werden im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen unter Berücksichtigung der Schifffahrt mit dem Ziel durchgeführt, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für deren Einsatz an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten. Neben theoretischen Untersuchungen, Labor- und Modellversuchen werden Erfahrungen aus Anwendungen an kleineren Fließgewässern und aus ersten praktischen Anwendungen an Wasserstraßen ausgewertet und Naturversuche durchgeführt. Die Untersuchungen dauern noch an. Auf der Grundlage erster Ergebnisse werden im Folgenden Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen aus technischer Sicht diskutiert.

2 Technisch-biologische Ufersicherungen an Wasserstraßen
Technical-biological bank protection at waterways

2.1 Definition
Definition

Unter „technisch-biologischen Ufersicherungen" werden Ufersicherungen verstanden, die entweder ausschließlich aus biologischen (pflanzlichen) Komponenten oder aus einer Kombination aus biologischen und technischen Komponenten bestehen. Ein Schutz und eine Stabilisierung der Uferböschung durch Pflanzen können dabei durch die oberirdischen Pflanzenteile und die Wurzeln im Boden erfolgen.

Die bisher an geböschten Ufern üblichen technischen Deckwerke, bestehend aus losen oder teilvergossenen Wasserbausteinen und einem Korn- oder Geotextilfilter, sind bis auf wenige Ausnahmen über die gesamte Böschungslänge von der Sohle bis zum höchst möglichen Wasserstand bzw. höchst möglichen Wellenauflauf erforderlich (MAR, 2008). Ufersicherungen mit lebenden pflanzlichen Komponenten können dagegen nur oberhalb eines mittleren Wasserspiegels angewendet werden. Im Unterwasserbereich werden die technischen Deckwerke weiterhin unverzichtbar sein. Für zukünftige Ufersicherungen an Wasserstraßen wird sich deshalb in vielen Fällen eine Zweiteilung ergeben: Eine Steinschüttung als Sicherung der Unterwasserböschung und eine Ufersicherung im Überwasserbereich, die je nach Belastungen technisch-biologisch, d. h. rein pflanzlich oder als Kombination aus pflanzlichen und technischen Komponenten, oder bei großen hydraulischen Belastungen und in Dammbereichen mit durchwurzelungsgefährdeten Dichtungen auch weiterhin rein technisch als Steinschüttung ausgebildet wird.

Die Ufersicherungsmaßnahmen müssen so konzipiert werden, dass sie sowohl den Uferschutz zuverlässig gewährleisten als auch gute ökologische Bedingungen im Uferbereich schaffen. Beide Ziele in gleicher Weise maximal zu erreichen, ist allerdings auf Grund der gegensätzlichen Anforderungen kaum möglich. Die Belastbarkeit einer Ufersicherung nimmt mit zunehmendem Anteil technischer Komponenten zu, die ökologische Wirksamkeit dagegen ab. Der mögliche Anteil

biologischer Komponenten in der Ufersicherungsmaßnahme hängt entscheidend von der Größe der hydraulischen Belastungen ab. Ziel wird sein, einen optimalen Kompromiss in Abhängigkeit der jeweils gegebenen Randbedingungen zu finden.

Beispiele für nach jetzigem Kenntnisstand an Wasserstraßen anwendbare rein pflanzliche Ufersicherungen sind Weidenspreitlagen und vorgezogene Pflanzmatten. Beispiele für Ufersicherungen mit pflanzlichen und technischen Komponenten sind Röhrichtgabionen, Steinmatratzen mit Pflanzmatten und begrünte Steinschüttungen.

Weidenspreitlagen bestehen aus austriebsfähigen Weidenästen, die quer oder schräg zur Fließrichtung nebeneinander flächig auf die Uferböschung verlegt und mit Pflöcken und horizontalen Querriegeln und Drahtverspannungen sicher am Boden befestigt werden (siehe Bild 1).

Bild 1: Weidenspreitlagen, in die Steinschüttung einbindend
Figure 1: Willow brush mattresses anchored in a riprap layer

Pflanzmatten bestehen aus einem geeigneten Trägermaterial, meist Kokosgewebe, mit vorgezogenen Einzelpflanzen (z. B. Röhrichte oder Gräser). Sie sind in ähnlicher Weise wie die Spreitlagen auf der Böschung zu befestigen.

Röhrichtgabionen besitzen eine feste Umhüllung aus unverrottbaren Kunststoffnetzen oder verzinktem Stahl, die Steine, Schotter, Kies und gegebenenfalls eingeschlämmten Boden, gehalten durch ein Filtervlies, einschließen. Die Schichtdicke beträgt 20 cm bis 30 cm. Einzelne Röhrichtpflanzen werden direkt in den Gabionen vorgezogen (siehe Bild 2).

Bild 2: Röhrichtgabionen – vorgezogene Einzelelemente
Figure 2: Reed-filled gabions with plant growth prior to installation

Steinmatratzen sind mit kleinen Wasserbausteinen (z. B. $CP_{45/125}$) gefüllte hochfeste, kunststoffarmierte Netze mit einer Fläche von 1 m bzw. 2 m x 2 m und einer Schichtdicke von 20 cm bis 30 cm, auf denen vorgezogene Pflanzmatten befestigt werden können.

Eine Begrünung und damit ökologische Aufwertung einer Steinschüttung ist möglich durch den Einbau von Pflanzen, z. B. in Form von lebenden Setzstangen, Faschinen und Buschlagen, oder Kies- bzw. Oberboden-Alginateinbau mit einer Ansaat.

2.2 Hydraulische Uferbelastungen
Hydraulic loads on the banks of waterways

Die überwiegend geböschten Ufer von Binnenwasserstraßen sind hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt, in Flussstrecken zusätzlich infolge Hochwasserabfluss und stark schwankenden Wasserspiegeln ausgesetzt. Heute übliche Binnenschiffe in Wasserstraßen der Klasse Vb sind das Europaschiff (85 m x 9,50 m bei 2,50 m Abladetiefe) und das Großmotorgüterschiff (110 m bis 135 m x 11,45 m bis 12 m bei 2,80 m Abladetiefe). Bei der Betrachtung der Belastungen infolge Schifffahrt ist zu unterscheiden zwischen einem in der Wasserstraße mit etwa gleicher Geschwindigkeit fahrenden Schiff („Normalfahrt“) und dem in Vorhäfen, Liegestellen

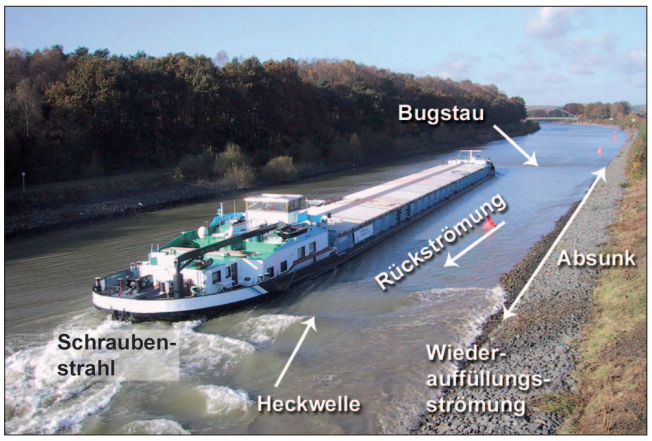


Bild 3: Schiffsinduzierte Einwirkungen auf das Ufer
Figure 3: Ship-induced loads on a bank

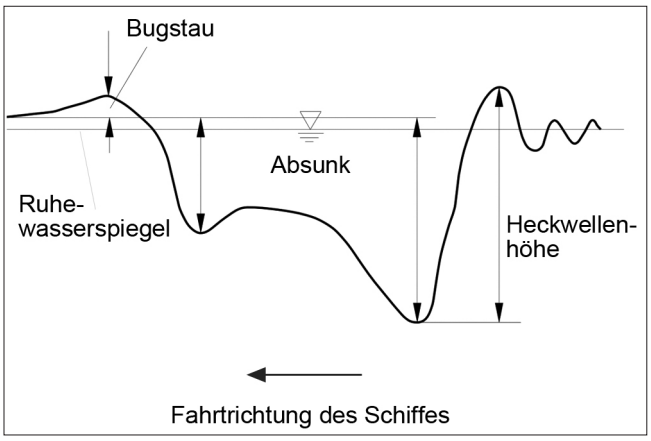


Bild 4: Schematische Darstellung der zeitlichen Wasserspiegelveränderung am Ufer
Figure 4: Diagram showing the fluctuations in the water level at the banks of waterways

o. ä. anfahrenden oder abbremsenden, d. h. manövrierenden Schiff („Manövrierfahrt“). In beiden Fällen sind unterschiedliche hydraulische Einwirkungen für die Bemessung einer Ufer- und Sohlensicherung relevant. Da der überwiegende Teil der Wasserstraßen durch „Normalfahrt“ gekennzeichnet ist, werden im Folgenden nur diese Uferabschnitte betrachtet. In Manövrierbereichen sind zudem die hydraulischen Belastungen lokal wesentlich größer, sodass hier ein Ersatz der technischen Sicherung durch Pflanzen in der Regel nicht möglich sein wird.

Die „Normalfahrt“ eines Binnenschiffs in der Wasserstraße ist eine Verdrängungsfahrt im seitlich- und tiefenbegrenzten Fahrwasser, die durch die hydraulische Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße lokale und temporäre Veränderungen sowohl der Wasseroberfläche als auch der Strömungen um das Schiff herum bewirkt. Dabei wird zwischen Primär- und Sekundärwellen unterschieden. Als Primärwelle wird die Abfolge aus Bugwelle (einschließlich Bugstau) vor dem Schiff, Wasserspiegelabsunk neben dem Schiff und Heckwelle hinter dem Schiff bezeichnet (siehe Bilder 3 und 4). Die Wellenlänge entspricht etwa der Schiffslänge. Die dazugehörigen Strömungen (Rückströmung und Wiederauffüllungsströmung) können sich mit der natürlichen Flussströmung überlagern. An Bug und Heck des Schiffes entstehen gleichzeitig auf Grund der Konturänderungen regelmäßige, kurzperiodische Wellen, die Sekundärwellen.

Die Größe der schiffsinduzierten Belastungen, die auf die Ufer wirken, wird durch folgende Parameter bestimmt:

- Querschnittsverhältnis aus Wasserstraßenquerschnitt und eingetauchtem Schiffsquerschnitt,
- Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser,
- Passierabstand des Schiffs vom Ufer.

Schädliche Auswirkungen der hydraulischen Belastungen im Uferbereich können Oberflächenerosion und eine Gefährdung der Standsicherheit der Uferböschung sein.

2.3 Besondere Randbedingungen
Special boundary conditions

Im Gegensatz zu der bereits seit längerem erfolgreichen Anwendung pflanzlicher Ufersicherungsmaßnahmen an kleineren Fließgewässern ohne Schifffahrtsbelastung sind an Wasserstraßen neben den erläuterten schiffsinduzierten Belastungen noch eine Reihe anderer besonderer Anforderungen zu berücksichtigen.

Die Ufersicherungen müssen in der Regel bei laufendem Schiffsbetrieb eingebaut werden. Das heißt, sie sind unmittelbar nach dem Einbau den schiffsinduzierten hydraulischen Belastungen ausgesetzt. An Flüssen kann ein längerer Überstau auftreten, der die neu eingebaute Ufersicherung zusätzlich durch Auftrieb belastet. Bei einer Steinschüttung ist das kein Problem, da diese sofort in vollem Umfang stabil ist und als Ufersicherung fungiert und sich danach – von eventuellen Schäden abgesehen – nicht mehr verändert. Bei Ufersicherungen mit pflanzlichen Komponenten sind dagegen wachstumsbedingt unterschiedliche

Entwicklungszustände zu berücksichtigen, wobei der Anfangszustand in der Regel der kritische Zustand ist. Die eingebauten Pflanzen müssen sich erst entwickeln und Wurzeln in den Untergrund bilden. In dieser Zeit müssen die Pflanzen durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen auf der Böschung fixiert werden. Diese sind so zu dimensionieren, dass sie gleichzeitig auch den Uferschutz in der Anfangsphase übernehmen können. Weidenspreitlagen oder vorgezogene Pflanzmatten müssen beispielsweise mit tief in den Untergrund reichenden Pflöcken, Riegelhölzern und Drahtverspannungen so befestigt werden, dass sie bei hydraulischen Belastungen in der Anfangszeit auf der Böschung lagestabil sind, eine gute Verbindung zum Untergrund als Voraussetzung für das Einwachsen der Wurzeln gegeben ist und Böschungsrutschungen vermieden werden. Bei längerem Überstau, auch nach der kritischen Anfangsphase, besteht zudem die Gefahr einer Schädigung der Pflanzen, die im Extremfall zum Absterben und damit mittelfristig zum Versagen der Ufersicherung führen kann. Die Belastbarkeit der pflanzlichen Ufersicherung nimmt in der Regel bei längeren Überstauzeiten ab. Das heißt, unter diesen Randbedingungen dürfen nur überstauungsresistente Pflanzen angewendet werden (Florineth, 2004).

Nach dem Bundeswasserstraßengesetz (2010) muss für jede bauliche Maßnahme an Wasserstraßen deren Hochwasserneutralität nachgewiesen werden. Bei Ufersicherungsmaßnahmen mit pflanzlichen Komponenten muss deshalb die Zielvegetation im Vorfeld kritisch hinsichtlich einer möglichen Beeinträchtigung des Hochwasserabflusses beurteilt werden. Aus am Ufer verlegten Weidenspreitlagen beispielsweise wächst langfristig ein Gehölzbestand, der ohne Unterhaltung bei kleinen Gewässerquerschnitten durchaus hochwasserrelevant sein kann. Außerdem sollten, um Übergangsprobleme hinsichtlich der Gefahr von lokalen Erosionen zu vermeiden, große Rauhigkeitsunterschiede zwischen Gewässersohle und -böschung sowie zwischen der Steinschüttung im Unterwasserbereich und der technisch-biologischen Ufersicherung im Überwasserbereich dauerhaft vermieden werden. Die Unterhaltung pflanzlicher Ufersicherungen hat dementsprechend einen anderen Stellenwert als bei technischen Ufersicherungen, wo sie in der Regel auf die Ausbesserung von Schäden im Deckwerk durch Nachschütten von Steinen reduziert ist. Bei pflanzlichen Ufersicherungen ist unabhängig von der erforderlichen Beseitigung möglicher Schäden eine generelle Unterhaltung von Anfang an erforderlich, um einerseits das Gedeihen der Pflanzen zu gewährleisten und andererseits langfristig die Ausbildung der Ufersicherung entsprechend der geplanten Zielvegetation zu fördern. Auch eine gegebenenfalls schädigende Beschattung von Teilen der Ufersicherung ist durch entsprechende Maßnahmen zu verhindern.

Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die Einbauzeiten bei der Verwendung technisch-biologischer Ufersicherungen generell eingeschränkt sind. Ein optimales Anwachsen und Gedeihen der Pflanzen als Voraussetzung für einen stabilen Uferschutz sind nur möglich, wenn die erforderlichen Pflanzzeiten eingehalten werden. Die meisten pflanzlichen Uferschutzmaßnahmen, wie z. B. Weidenspreitlagen und Steckhölzer, müssen in der Vegetationsruhezeit – hauptsächlich in den Monaten Oktober/November und März/April – eingebaut werden. Zu bevorzugen ist die Zeit März/April, da die kritische Anfangsphase durch das sofort beginnende Pflanzen- und Wurzelwachstum wesentlich kürzer ist als beim Einbau im Herbst. An Flüssen können Hochwasserereignisse zu unvorhergesehenen Bauunterbrechungen und damit Bauzeitverlängerungen führen.

2.4 Gewährleistung der Uferstabilität
How to ensure bank stability

2.4.1 Globale Standsicherheit der Uferböschung
Global stability of banks

Die globale Standsicherheit der Uferböschung einschließlich Ufersicherungsmaßnahmen ist grundsätzlich für alle Bemessungssituationen entsprechend (GBB, 2010) und DIN 1054/DIN 4084 nachzuweisen. Bei Anwendung pflanzlicher Ufersicherungen muss die globale Standsicherheit der Uferböschung auch ohne Ufersicherungsmaßnahmen gegeben sein. Eine positive Beeinflussung der globalen Standsicherheit ist gegebenenfalls langfristig durch ausreichend tief reichende Wurzeln möglich.

2.4.2 Lokale Standsicherheit der Uferböschung *Local stability of banks*

2.4.2.1 Hydrodynamische Bodenverlagerung und Abgleiten der Böschung *Hydrodynamic soil displacement and slope failure*

Der Wasserspiegelabsunk neben dem Schiff, der in der Regel bis zum Ufer wirkt, kann hier im anstehenden Boden Porenwasserüberdrücke erzeugen und dadurch die lokale Standsicherheit der Uferböschung bei Schiffsvorbeifahrt herabsetzen. Als Folge können hydrodynamische Bodenverlagerungen und Böschungsrutschungen, d. h. ein Abgleiten der Böschung in einer oberflächennahen, böschungsparallelen Gleitfläche, auftreten und Schäden am geböschten Ufer hervorrufen.

Eine Wasserspiegeländerung im Gewässer würde bei vollständig wassergesättigtem Porenraum zu einer unmittelbaren Druckänderung im Porenwasser führen. Wie in Naturmessungen nachgewiesen werden konnte, sind im relevanten Böschungsbereich im Porenwasser jedoch mikroskopisch kleine Gasblasen eingeschlossen, die das physikalische Verhalten von Wasser maßgeblich beeinflussen (Köhler, 1989). Auf Grund der höheren Kompressibilität des Gas-Wasser-Gemisches sind die Porenwasserdruckreaktionen deutlich verzögert. Der unmittelbar nach dem Wasserspiegelabsunk im Boden auftretende maximale Porenwasserüberdruck wird mit der Zeit vollständig abgebaut, wenn nicht ein weiteres Absunkereignis unmittelbar folgt. Die Größe des Porenwasserüberdrucks hängt neben der Größe des Wasserspiegelabsunks und der Absunkgeschwindigkeit maßgeblich von der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens ab (Holfelder et al., 2006). Gefährdet sind insbesondere kohäsionslose Böden mit geringer Durchlässigkeit. Voraussetzung für das Auftreten von Porenwasserüberdrücken ist, dass die Absunkgeschwindigkeit größer als die Durchlässigkeit des Bodens ist. Durch den Porenwasserüberdruck können die effektiven Spannungen im Boden und damit die Reibungskräfte soweit reduziert werden, dass hydrodynamische Bodenverlagerungen auftreten oder eine Uferböschung in einer böschungsparallelen Bruchfläche in der kritischen Tiefe abgleitet. In der kritischen Tiefe ist der Scherwiderstand des Bodens infolge des Porenwasserüberdrucks am geringsten (GBB, 2010).

Die beschriebenen Versagensmechanismen betreffen jedoch nur den Böschungsbereich unterhalb des Wasserspiegels, in dem pflanzliche Ufersicherungen in der Regel nicht zur Anwendung kommen. Sie spielen deshalb für pflanzliche Ufersicherungen an Wasserstraßen mit quasi konstantem Wasserspiegel, z. B. an Kanälen, keine Rolle. Hier wird die oberhalb des Normalstaus angeordnete pflanzliche Ufersicherung nur durch Wellenauflauf und Wiederauffüllungsströmung belastet (siehe Bild 5, links) und muss dementsprechend lediglich einen ausreichenden Schutz vor Oberflächenerosion (Kap. 2.4.2.2) bieten. Ein längerer Überstau der Pflanzen tritt nicht auf.

Anders ist die Situation an Flüssen mit stark wechselnden Wasserständen. Pflanzliche Ufersicherungen können hier oberhalb Mittelwasser angeordnet werden. Das bedeutet, sie werden planmäßig immer wieder, gegebenenfalls auch über längere Zeiträume, überstaut und liegen damit zumindest zeitweise im Einflussbe-

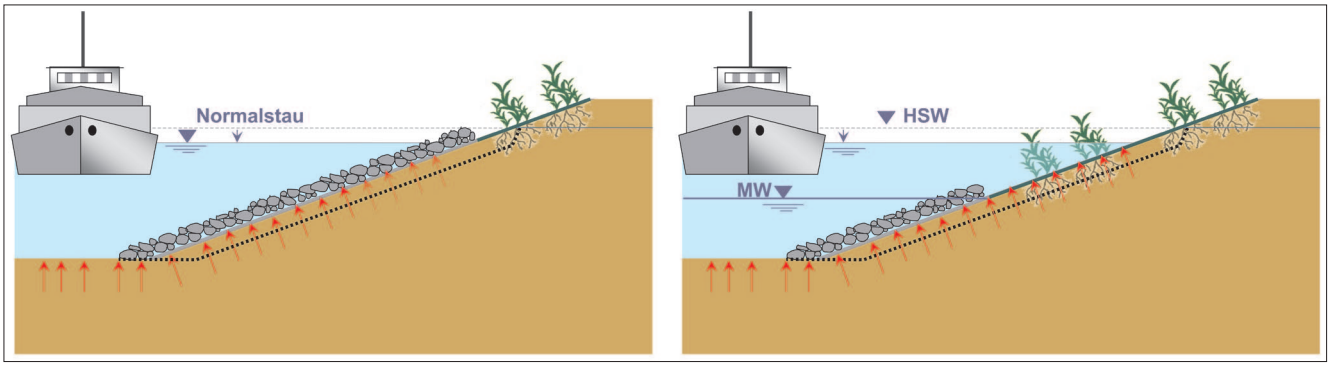
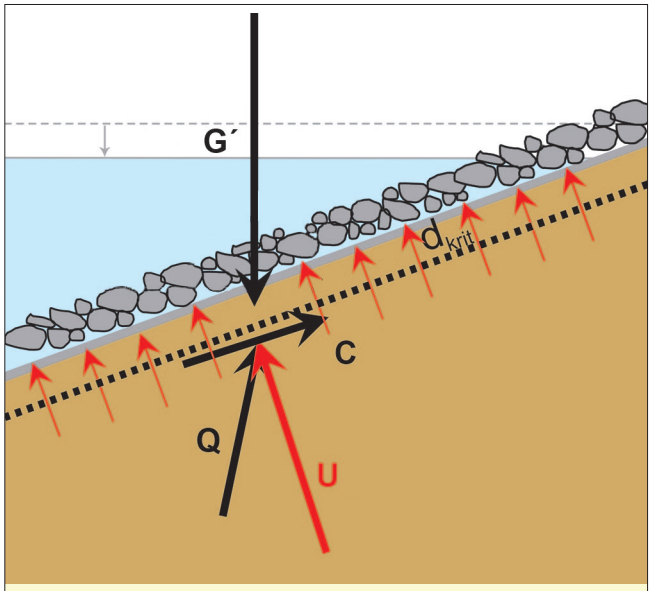


Bild 5: Anordnung pflanzliche Ufersicherungen an einem Kanal mit konstanten Wasserständen (links), an einem Fluss mit schwankenden Wasserständen (rechts)

Figure 5: Location of biological bank protection at a canal with a constant water level (left) and at a river with fluctuating water levels (right)

reich des Wasserspiegelabsunks bei Schiffsvorbeifahrt. Porenwasserüberdrücke im Bereich der durch Pflanzen gesicherten Böschung können dann bis zum höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW), der mehrere Meter über Mittelwasser liegen kann, auftreten. In diesem Fall muss die pflanzliche Ufersicherung nicht nur die Sicherheit gegenüber Oberflächenerosion (Kap. 2.4.2.2), sondern auch die Sicherheit gegenüber Abgleiten der Böschung und hydrodynamischer Bodenverlagerung gewährleisten (siehe Bild 5, rechts).

Bild 6: Technisches Deckwerk aus losen Wasserbausteinen
Figure 6: Riprap consisting of loose armourstones



G' – Gewichtskraft unter Auftrieb (ggf. Steine und oberhalb der Gleitfläche anstehender Boden)
Q – Reibungskraft
C – Kohäsionskraft (Boden und ggf. Wurzeln)
U – Resultierende des Porenwasserüberdrucks

Bild 7: Sicherheit gegenüber Abgleiten der Böschung – Kräfteansatz bei Anwendung einer Steinschüttung (hier ohne Fußstützung oder Aufhängung des Deckwerks)
Figure 7: Safety of a bank against sliding – Forces acting at a riprap (shown here without a toe support or revetment suspension)

Bei Anwendung eines technischen Deckwerks aus Wasserbausteinen (siehe Bild 6) wird die lokale Böschungsstandsicherheit dadurch gewährleistet, dass die Steinschüttung mit einem ausreichenden Flächengewicht bemessen wird (GBB, 2010). Durch das zusätzliche Gewicht auf der Böschung werden die effektiven Spannungen im Boden so weit erhöht, dass trotz Porenwasserüberdrücken keine hydrodynamischen Bodenverlagerungen und Böschungsrutschungen auftreten können (siehe Bild 7). Da ein entsprechendes Gewicht bei rein pflanzlichen Ufersicherungen nicht vorhanden ist, kann die Sicherheit nur über die Wurzeln im Boden erreicht werden. Ufersicherungen, die neben pflanzlichen auch technische Bestandteile aufweisen, wie zum Beispiel Röhrichtgabionen, die u. a. aus kleineren Wasserbausteinen bestehen und eine Schichtdicke von 20 cm bis 30 cm haben, besitzen dagegen bereits beim Einbau ein gewisses Flächengewicht. Das heißt, die kombinierten Ufersicherungen gewährleisten die Böschungsstabilität zum Teil über die Wurzeln der Pflanzen im Boden und zum Teil durch das Gewicht der technischen Bestandteile.

Pflanzenwurzeln können in Abhängigkeit der verwendeten Pflanzenarten und Anordnung der Einzelpflanzen auf der Böschung durch ein feines, dicht verzweigtes Wurzelsystem im Sinne einer zusätzlichen Bodenkohäsion oder durch Einzelwurzeln im Sinne einer bodenmechanischen Vernagelung die Böschung stabilisieren und dadurch ein Abgleiten der Böschung verhindern. Problematisch ist, dass sich die Wurzeln nach dem Einbau der Pflanzen erst mit der Zeit entwickeln und vollständig ausbilden können, sodass rein pflanzliche Ufersicherungen, z. B. Weidenspreitlagen oder vorgezogene Pflanzmatten, im Anfangszustand allein die Sicherheit gegenüber Abgleiten der Böschung in der Regel noch nicht gewährleisten können. In dieser Zeit müssen zusätzliche konstruktive Maßnahmen, z. B. entsprechende Befestigungen wie ein enges Raster tief in den Untergrund reichender Holzpflöcke, diese Aufgabe übernehmen, und sind entsprechend zu bemessen.

Hydrodynamische Bodenverlagerungen können ohne flächige Auflast nur durch ein dichtes Wurzelgeflecht im Sinne einer Bodenkohäsion vermieden werden. Im

Anfangszustand können mögliche böschungsabwärts gerichtete Bodenverlagerungen durch entsprechende linienförmige Befestigungen von beispielsweise Spreitlagen oder Pflanzmatten – parallel zur Uferlinie fest an den Boden gedrückte Querriegel – nur minimiert werden.

Bei Vorhandensein einer Kohäsion im Boden von

$c' > \Delta u \cdot \tan\beta$

c' – Kohäsion des Bodens [kN/m²]
Δu – Porenwasserüberdruck [kN/m²]
β – Böschungswinkel [°]

ist die Sicherheit gegen Abgleiten in einer oberflächennahen Gleitfläche auch ohne das Flächengewicht einer technischen Sicherung gegeben (GBB, 2010).

Der Porenwasserüberdruck Δu, der bei Erreichen des Absunkmaximums seinen Höchstwert besitzt und dann mit der Zeit wieder abklingt, kann nach GBB (2010) in Abhängigkeit vom Wasserspiegelabsunk z_a und dem Porenwasserdruckparameter b, der maßgeblich von der Durchlässigkeit des Bodens abhängt, ermittelt werden:

$$\Delta u(z) = \gamma_w \cdot z_a (1 - a \cdot e^{-bz})$$

γ_w – Wichte des Wassers [kN/m³]
z_a – Wasserspiegelabsunk [m]
a – Porenwasserdruckparameter [-] (a = 1)
b – Porenwasserdruckparameter [1/m]
z – Tiefe im Boden senkrecht zur Böschungsoberfläche [m]

Der mit der Tiefe exponentiell zunehmende Porenwasserüberdruck nähert sich dem maximalen Wert von $\Delta u_{max} = \gamma_w \cdot z_a$ an. An Wasserstraßen der Klasse Vb kann beispielsweise von einem maximalen Absunk z_a von etwa 0,9 m ausgegangen werden (MAR, 2008). Bei den üblichen Böschungsneigungen von 1:3 heißt das, dass die Sicherheit gegenüber Abgleiten mit einer Kohäsion des durchwurzelten Bodens von mindestens 3 kN/m² erreicht werden kann. Bei flacheren Böschungen ist bereits ein entsprechend geringerer Wert ausreichend (2,3 kN/m² bei 1:4 bzw. 1,1 kN/m² bei 1:8 geneigten Böschungen). Hier zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Möglichkeiten der Anwendung pflanzlicher Ufersicherungen umso größer sind, je flacher die Böschungen ausgebildet werden können.

Die Berücksichtigung oberflächennaher Wurzeln in Form einer sogenannten „Durchwurzelungskohäsion“ ist in der Bodenmechanik übliche Praxis. Möglich sind je nach Randbedingungen Werte bis 7 kN/m² (MSD, 2011). Voraussetzung ist jedoch ein dauerhaft flächig dichtes Wurzelsystem. Außerdem muss die Durchwurzelung bis in die erforderliche Tiefe unter der Böschungsoberfläche, d. h. bis unterhalb der kritischen Tiefe, in der ein Abgleiten stattfinden würde, reichen. Grundlage für eine Bemessung ist die genaue Kenntnis der Wurzelentwicklung in Abhängigkeit von der Zeit nach Pflanzeneinbau, d. h. der erreichte Durchwurzelungsgrad und die Durchwurzelungstiefe sowie die Festigkeit der Wurzeln. Hierzu werden gegenwärtig entsprechende Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt (Kap. 2.5).

Tief reichende Einzelwurzeln oder auch bereits tief in den Boden eingebrachte Pflanzenteile, wie zum Beispiel austriebsfähige Weidensteckhölzer, können im Sinne einer Bodenvernagelung bei entsprechender Festigkeit, ausreichender Länge und Abstände zueinander ebenfalls die Sicherheit gegen Abgleiten in einer oberflächennahen Gleitfläche erhöhen. Die Wurzeln und Pflanzenteile im Boden können sowohl Zugkräfte als auch Scherkräfte und Biegemomente aufnehmen. Sie müssen in jedem Fall auch ausreichend weit unter die kritische Tiefe im Boden reichen. Zur Bemessung von „vernagelten“ Böschungen gibt es bekannte bodenmechanische Nachweisverfahren (Witt, 2011). Allerdings wird bei diesen Nachweisverfahren vorausgesetzt, dass die Geometrie und die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Elemente einer Bodenvernagelung genau bekannt sind.

Zwei Versagensmechanismen sind möglich: Wurzeln bzw. in den Boden eingebrachte Pflanzenteile reißen an oder in der Nähe der Gleitfuge ab oder werden abgeschert, wenn deren Festigkeit nicht ausreicht. Oder die Wurzeln bzw. Pflanzenteile werden auf Grund nicht ausreichender Verbundfestigkeit während der Böschungsrutschung aus dem Boden herausgezogen. Maßgebende Kenngrößen der im Boden befindlichen Pflanzenteile sind:

- Durchmesser und Länge der Pflanzenteile,
- Innere Festigkeit der Pflanzenteile,
- Verbundfestigkeit Pflanzteile/ Boden,
- Anzahl und Abstand der Pflanzenteile.

Da die Sicherungselemente lebende Baustoffe sind, die sich mit der Zeit in Abhängigkeit von der Pflanzenart und den jeweils vorherrschenden Randbedingungen gegebenenfalls auch ganz unterschiedlich durch Wachstum und Wurzelbildung entwickeln, kann nicht von definierten Abmessungen und Eigenschaften ausgegangen werden. So hat z. B. Schuppener (2000) in Versuchen nachgewiesen, dass die Verbundfestigkeit zwischen mit definierten Abmessungen eingebauten zunächst unbewurzelten Pflanzenteilen (Steckhölzern) und dem umgebenden Boden in vier Jahren durch Wurzelbildung auf den vier- bis fünffachen Wert ansteigt.

Die zeitabhängige Entwicklung der Wurzeln und oberirdischen Pflanzenteile und deren Einfluss auf die Standsicherheit der Uferböschung werden gegenwärtig im Rahmen des Forschungsprojektes detailliert untersucht (Kap. 2.5). Dabei geht es in Abhängigkeit des Entwicklungszustandes der Pflanzen hauptsächlich um

- die Abmessungen (Länge und Durchmesser) der Wurzeln und die Größe des zu berücksichtigenden durchwurzelten Böschungsbereichs,
- eine mögliche Erhöhung der Scherfestigkeit des Bodens durch Wurzeln und die Größe der ansetzbaren Wurzelkohäsion,
- die Auswirkungen der Wurzeln im Boden auf Porenwasserüberdrücke,
- die Verbundfestigkeit von Wurzeln bzw. Pflanzenteilen mit dem Boden,
- den Einfluss der oberirdischen Pflanzenteile auf die einwirkenden hydraulischen Belastungsgrößen.

2.4.2.2 Oberflächenerosion *Surface erosion*

Durch Heck- und Sekundärwellen sowie Rück- und Wiederauffüllungsströmung infolge Schifffahrt und natürlicher Strömung, zum Beispiel bei Hochwasserabfluss, kann infolge der Schleppkraft des Wassers im Uferbereich Oberflächenerosion ausgelöst werden. Ein Schutz ist immer dann erforderlich, wenn der anstehende Boden selbst nicht erosionsstabil ist. Werden konventionell technische Deckwerke aus losen Wasserbausteinen (siehe Bild 6) als Uferschutz angewendet, wird die erforderliche Einzelsteingröße bzw. das erforderliche Einzelsteingewicht so dimensioniert, dass die Einzelsteine unter Berücksichtigung der Verbundwirkung in der Steinschüttung bei allen auftretenden Belastungen lagestabil sind (GBB, 2010).

Mit pflanzlichen Ufersicherungen kann ein Schutz der Böschung gegen Oberflächenerosion durch das flächige Abdecken des Bodens mit den über die Wurzeln im Boden verankerten, oberirdischen Pflanzenteilen und oberflächennahen Wurzeln erzielt werden. Gleichzeitig können die oberirdischen Pflanzenteile durch Erhöhung der Rauheit am Ufer die hydraulischen Belastungen reduzieren (Rauch, 2006). Lokal können allerdings auch größere hydraulische Belastungen entstehen – zum Beispiel durch Verwirbelungen im Bereich einzelner Weidenstöcke.

Der erforderliche flächige Schutz kann z. B. durch lückenlos eingebaute filterstabile Vegetationsmatten oder Röhrichtgabionen (siehe Bild 21) erreicht werden. Vegetationsmatten müssen in der Anfangsphase bis zur ausreichenden Wurzelbildung gut auf der Böschung befestigt werden. Röhrichtgabionen sind dagegen in Abhängigkeit vom Eigengewicht auch ohne Befestigung von Anfang an lagestabil. Weidenspreitlagen können nur dann ausreichend vor Oberflächenerosion schützen, wenn sie flächendeckend auf der Böschung verlegt und gut fixiert werden (siehe Bild 20). Ansonsten ist zusätzlich ein filterstabiles Geotextil oder ähnliches erforderlich. Nur punktuell oder auch linear wirkende Schutzmaßnahmen sind als alleinige Maßnahmen nicht ausreichend. Der nicht erosionsstabile Boden würde in diesem Fall um die punktuellen oder linienförmigen Sicherungen erodiert werden. Langfristig könnte dadurch auch die über die Wurzel vorhandene Verankerung der Einzelpflanze im Boden geschwächt werden, sodass auch diese nicht dauerhaft erhalten bleibt.

Zur Beurteilung pflanzlicher Ufersicherungen hinsichtlich des Schutzes vor Oberflächenerosion kann zum Teil auf Erfahrungen an kleineren Fließgewässern ohne Schifffahrt zurückgegriffen werden. Hier gibt es für verschiedene pflanzliche Bauweisen bereits empirische Grenzwerte für zugelassene Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Schubspannungen (Hacker, Johannsen, 2012). Die Grenzwerte gelten in der Regel allerdings nicht für den Anfangszustand, sondern für einen Zustand nach Ausbildung von Wurzeln und Trieben. Außerdem beziehen sie sich meist auf die Strömung im Hauptgerinne und nicht am Ufer. Die von verschiedenen

Autoren aus Versuchen gewonnenen Grenzwerte zeigen auf Grund der unterschiedlichen Versuchsrandbedingungen meist eine große Streubreite, können aber gegenwärtig auch für Wasserstraßen angewendet werden.

Fundierte Grenzwerte für zulässige Schiffswellenhöhen, die auf Grund fehlender Erfahrungen an Wasserstraßen noch nicht vorliegen, werden zurzeit im Rahmen des Forschungsprojektes der BAW und BfG erarbeitet (Kap. 2.5).

2.4.3 Filterstabilität
Filter stability

Die Uferschutzmaßnahmen sind konstruktiv so auszubilden, dass bereits unmittelbar nach Einbau, aber auch langfristig die Filterstabilität im Uferbereich gewährleistet ist. Da es durch die Porenwasserüberdrücke zu einer senkrecht zur Böschungsoberfläche nach außen gerichteten Strömung kommt, ist die Gefahr von Bodenaustrag bei jeder Schiffsvorbeifahrt gegeben. Auch die parallele Strömungsbelastung kann zu Bodenaustrag führen. Als Folge des Materialverlustes können Böschungsverformungen und -rutschungen auftreten.

Kann mit den gewählten pflanzlichen Uferschutzmaßnahmen allein keine ausreichende Filterstabilität gewährleistet werden, muss ein zusätzlicher Filter angeordnet werden. Das kann ein Mineralkornfilter oder ein Geotextil sein. Geht es nur um die Sicherung im Anfangszustand, sollte ein verwendetes Geotextil aus ökologischen Gründen biologisch abbaubar sein. Auf diese Weise kann langfristig die Durchgängigkeit des Uferbereiches für Makrozoobenthos und andere Kleinlebewesen wieder hergestellt werden. Die Schwierigkeit besteht allerdings darin, ein Geotextil zu finden, das als Filter in einer Ufersicherung mit pflanzlichen Komponenten alle Anforderungen gleichermaßen erfüllt: Filterstabilität zum anstehenden Boden, ausreichende Durchlässigkeit und Festigkeit, Durchwurzelbarkeit und biologische Abbaubarkeit. Handelsübliche Kokosmatten (siehe Bild 8) beispielsweise sind zwar gut durchwurzelbar und biologisch abbaubar, erfüllen aber nicht die Anforderungen an die Filterstabilität und haben nur sehr geringe Festigkeiten. Das bedeutet, dass sie im Wellenangriffsbereich leicht beschädigt und zerstört werden können. Schafwollvliese (siehe Bild 8) können die Filterstabilität gewährleisten, sind jedoch nicht so gut durchwurzelbar wie Kokosmatten, besitzen keine großen Festigkeiten und bauen sich zu schnell ab. Kunststoffvliese, die standardmäßig als Filter in technischen Deckwerken angewendet werden, sind hinsichtlich Filterstabilität und Festigkeit perfekt geeignet und erlauben auch eine Durchwurzelung. Der entscheidende Nachteil ist, dass sie dauerhaft erhalten bleiben und auch langfristig nicht zersetzt werden. Gegenwärtig muss noch in jedem Anwendungsfall geprüft werden, welche Eigenschaften Prioritäten haben. Recherchen hinsichtlich geeigneter Filtermatten sind u. a. Gegenstand des Forschungsprojektes.

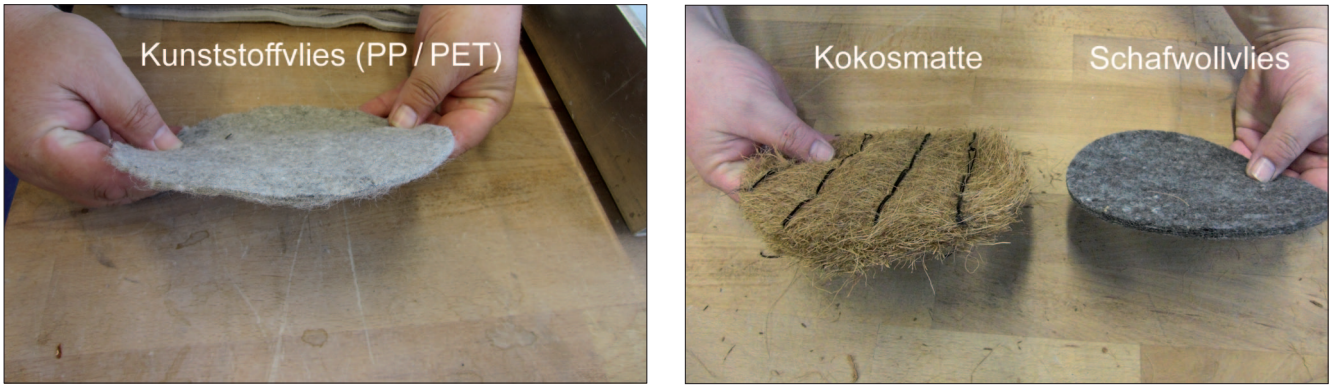


Bild 8: Verschiedene Filtermatten für pflanzliche Ufersicherungen
Figure 8: Different types of filter mats used for biological bank protections

2.5 Forschungsaktivitäten in der BAW und erste Ergebnisse
Research activities at the BAW and preliminary results

2.5.1 Auswertung der Erfahrungen aus praktischen Anwendungen
Evaluation of experiences with the application of biotechnical methods in practice

Da bei lebenden pflanzlichen Ufersicherungen im Gegensatz zu rein technischen Ufersicherungen viele „biologische“ Einflussfaktoren eine Rolle spielen – wie Niederschläge, Trockenzeiten, Sonneneinstrahlung, Bodensubstrat, Überstauzeiten usw. – sind bei der Erarbeitung von Bemessungsgrundlagen praktische Erfahrungen von größter Bedeutung. Eine im Auftrag der BAW von der Universität Stuttgart 2005 durchgeführte internationale Literaturrecherche zeigte, dass es weltweit bisher nur wenig Erfahrungen mit technisch-biologischen Ufersicherungen an schifffahrtsbelasteten Wasserstraßen gibt (Uni Stuttgart, 2005).

Zusätzlich wurde 2004/05 eine Umfrage in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes durchgeführt, die ergab, dass in der Vergangenheit an Bundeswasserstraßen bereits vereinzelt lokal pflanzliche Ufersicherungen probeweise angewendet wurden. In vielen Fällen wurden jedoch die konkreten Randbedingungen nicht in einem für die weiteren Auswertungen ausreichenden Maße erfasst und auch der Erfolg oder Misserfolg der Maßnahmen nicht dokumentiert. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Forschungsprojektes ausgewählte Wasserstraßenabschnitte detailliert untersucht. Begutachtet werden jeweils die angewendeten pflanzlichen Bauweisen, der Erhaltungszustand, der bisherige Unterhaltungsaufwand, die Ufergeometrie, der anstehender Baugrund und die hydraulischen Belastungen sowie die Entwicklung der Vegetation und Fauna.

Abgeschlossen und in einem schriftlichen Bericht (BAW / BfG, 2008) dokumentiert sind bereits die Untersuchungen in der Versuchsstrecke Stolzenau an der staugeregelten Mittelweser (km 241,550 bis km 242,300). Hier wurden 1988/89 in einem Abschnitt von 750 m 15 verschiedene technisch-biologische Bauweisen am rechten Ufer überwiegend sehr erfolgreich angewendet.

Weitere Untersuchungen laufen derzeit in der Strecke Haimar am Mittellandkanal (km 189,500 bis km 190,000). 1989 wurde eine spezielle Bauweise für die Stadtstrecke Hannover getestet, die bei engen Querschnitten eine Begrünung der Ufer ermöglichen sollte. Die technisch-biologische Ufersicherung besteht aus einer Unterwasserspundwand mit sich anschließender Böschung, in deren Schutz sich ein guter Röhrichtbewuchs am Ufer ausbilden konnte. In einem hydraulisch eher gering belasteten Abschnitt der Unteren Havelwasserstraße bei Ketzin (bei km 35,7) wurden 1993 erfolgreich vorgezogene Vegetationsmatten als Uferschutz auf den Böschungen eingebaut, um zu testen, inwieweit die Pflanzen langfristig Wurzeln bis in den anstehenden Boden bilden und so eine Verbindung der Matten mit dem Untergrund erzielen und das Ufer schützen. Am Rhein (km 793,5 bis km 795,0) wurde 1996/97 ein Parallelwerk (Walsum-Stapp) teilweise pflanzlich gesichert, was u. a. auf Grund der sehr großen Belastungen nicht erfolgreich war.

Auf der Grundlage der systematischen Auswertungen dieser ausgewählten praktischen Erfahrungen an Wasserstraßen werden gegenwärtig „Kennblätter“ für einzelne technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen erarbeitet, die bereits jetzt zur Anwendung an Wasserstraßen empfohlen werden können. Darin werden der Aufbau der verschiedenen Ufersicherungen, die einzelnen pflanzlichen und gegebenenfalls technischen Bestandteile, konstruktive Hinweise, Einbauempfehlungen, Wirkungsweise hinsichtlich Uferschutz (unmittelbar nach Einbau und langfristig), Pflegemaßnahmen, ökologische Wirksamkeit und vor allen Dingen erste empirische Grenzwerte für die aufnehmbaren hydraulischen Belastungen in Abhängigkeit der Randbedingungen (anstehender Boden, Böschungsneigung usw.) zusammengestellt. Es sind noch keine endgültigen Werte, sondern erste empirische Werte, die bereits in Wasserstraßen erprobt wurden. Unter ähnlichen Randbedingungen können die genannten Ufersicherungsmaßnahmen bereits jetzt angewendet werden. Die Kennblätter werden auf der Grundlage zunehmender Praxiserfahrungen und weiterer Ergebnisse aus den Modell- und Naturversuchen sukzessiv fortgeschrieben.

Bild 9: Weidenspreitlagen nach Einbau (05/2011)
Figure 9: Willow brush mattresses after installation (05/2011)

Bild 10: Weidenspreitlagen 6 Monate nach Einbau (11/2011)
Figure 10: Willow brush mattresses six months after installation (11/2011)

2.5.2 Labor- und Modellversuche
Laboratory and model tests

Neben den praktischen Untersuchungen vor Ort an ausgewählten Wasserstraßenabschnitten werden seit 2009 umfangreiche Labor- und Modellversuche zur hydraulischen Belastbarkeit unterschiedlicher pflanzlicher Ufersicherungen durchgeführt. Dabei werden die Wurzelentwicklung verschiedener Pflanzen und deren Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften hinsichtlich der Stabilisierung der Uferböschung untersucht. Wichtige Kennwerte sind die Scherfestigkeit bzw. die Kohäsion und die Durchlässigkeit des durchwurzelten Bodens. Außerdem wird das oberirdische Pflanzenwachstum nach Einbau hinsichtlich der Beeinflussung der hydraulischen Belastung auf das Ufer begutachtet.

Schwerpunkt der Untersuchungen bilden derzeit Weiden, die als Weidenspreitlagen (siehe Bild 1 und Bild 20) oder in Form von Steckhölzern oder Setzstangen das Ufer stabilisieren können. Um die Wurzelentwicklung von Spreitlagen nach dem Einbau zeitabhängig zu begutachten, wurden austriebsfähige Weidenäste (Purpur- und Korbweide) im Mai 2011 in einem 2 m x 8 m großen Kasten auf zwei unterschiedlichen Bodenarten (Kies und Sand) eingebaut (siehe Bild 9). Nach etwa sechs Monaten (siehe Bild 10) erfolgte eine erste Untersuchung der ober- und unterirdischen Biomasse. Dazu wurden die sich oberirdisch gebildeten Sprosse in Anzahl, Länge und Durchmesser aufgenommen sowie die Wurzeln im Boden freigelegt und qualitativ und quantitativ erfasst (siehe Bilder 11 und 12).

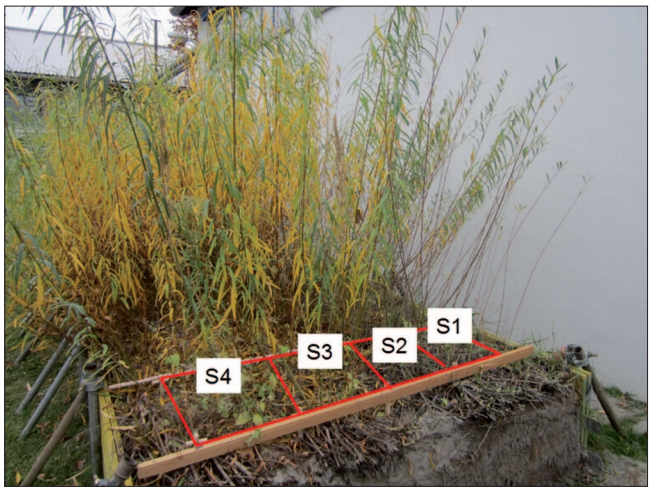


Bild 11: Vorbereitung der Wurzelaufnahme 11/2011
Figure 11: Preparations for studying roots 11/2011

Bild 12: Freigelegte Wurzeln
Figure 12: Exposed roots

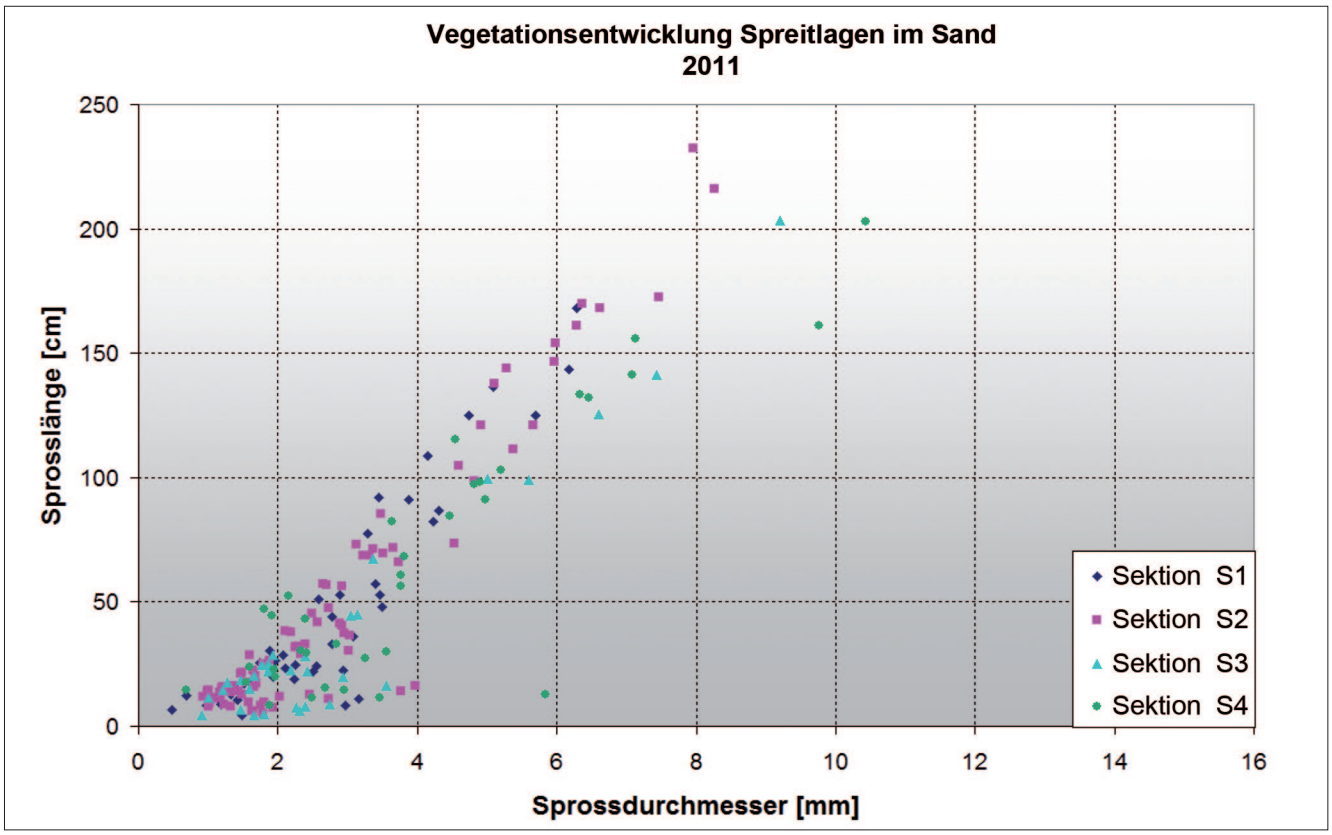


Bild 13: Ermittelte Sprosslängen und -durchmesser (Spreitlagen 6 Monate nach Einbau)
Figure 13: Length and diameter of shoots (measured 6 months after installing of the willow brush mattresses)

Dabei wurde festgestellt, dass sich beim Einbau im Frühjahr nach einer Vegetationsperiode bereits ein relativ dichtes Wurzelwerk im Boden entwickelt hat. Nahe der Bodenoberfläche hat sich ein sehr feines fast flächiges System von Wurzeln gebildet, das bereits den anstehenden Boden gut zurückhalten könnte (siehe Bild 12). Bis zu ca. 60 cm lange Einzelwurzeln reichen in den Boden. Im Sand wurden Sprosslängen bis zu ca. 2 m und Sprossdurchmesser bis etwa 10 mm ermittelt (siehe Bild 13). Parallel dazu erfolgten erste Versuche im Großschergerät (siehe Bild 14) zur Ermittlung der Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens, Ergebnisse dazu liegen noch nicht vor.

In einem zweiten Schritt wurden im März 2012 Weidenspreitlagen in einzelnen 1 m hohen Versuchskästen mit einer Grundfläche von 50 cm x 50 cm eingebaut (siehe Bilder 15 und 16). Diese sind so konzipiert, dass eine Abscherung des durchwurzelten Bodens in verschiedenen Tiefen unter der Bodenoberfläche erfolgen kann. Es ist vorgesehen, die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens nach 6 und 12 Monaten in den jeweils verschiedenen Tiefen unter der Bodenoberfläche im Großscherversuch zu ermitteln.

Ein weiterer praktischer Versuch wird gegenwärtig durchgeführt, um zu prüfen, ob Weidenspreitlagen auf einem geotextilen Filter angewendet werden können – ohne die erforderliche Durchwurzelung im Boden signifikant zu behindern. Ein Geotextil wäre erforderlich, wenn die Weidenäste nicht flächig ohne Zwischenräume auf der Böschung verlegt werden können. In diesem Fall müsste die Erosions- und Filterstabilität zumindest in der Anfangsphase durch zusätzliche konstruktive

Bild 14: Großschergerät in der BAW
Figure 14: Shearing machine at the BAW

Maßnahmen gewährleistet werden. Im November 2011 wurden Spreitlagen zu Vergleichszwecken auf einem Kunststoffvlies (300 g/m²), auf einem biologisch abbaubaren Schafwollvlies (450 g/m²) und zum Vergleich ohne Vlies auf einem kiesigen Boden verlegt. Auch hier wird die Wurzelbildung im Boden zu verschiedenen Zeiten qualitativ und quantitativ begutachtet.

Zur Ermittlung der hydraulischen Belastbarkeit werden verschiedene Modellversuche im Maßstab 1:1 in der in der BAW vorhandenen Wellenanlage durchgeführt. In dem im Grundriss 14 m x 8 m großen und 4 m tiefen Wellenbecken wurde eine 1:3 geneigte Uferböschung aus unterschiedlichen Böden hergestellt (siehe Bild 17). Darauf werden verschiedene biologische Ufersicherungsarten getestet. Durch einen über die gesamte Breite reichenden Tauchkörper können in Abhängigkeit von der Steuerung verschiedene Wellenbelastungen (Variation der Absunkhöhen und -geschwindigkeiten) simuliert werden. Durch Installation entsprechender Messinstrumente werden bei jedem Versuch die Wasserspiegelveränderungen, Strömungsgeschwindigkeiten und -kräfte und auch die im Boden infolge des Absunks entstehenden Porenwasserüberdrücke in verschiedenen Tiefen unter der Oberfläche gemessen. Veränderungen der Böschungsgeometrie infolge Bodenverlagerungen oder Rutschungen werden über eingebaute Neigungsmessketten und Ketteninklinometer erfasst.

Bild 18 zeigt erste Vorversuche mit verschiedenen Böschungsschutzmatten (hier Kokosmatten), die mit Holzpflöcken oder lebenden Weidensteckhölzern im Abstandsraster von 30 cm bis 50 cm auf der Böschung befestigt wurden. Damit wurde zunächst der Anfangszustand einer pflanzlichen Ufersicherung simuliert, in dem die Uferstabilität nur mittels Befestigungen – hier Weidensteckhölzern – gewährleistet wird. Es zeigte sich, dass die eingebauten Böschungsschutzmatten durch Wellen und Absunk bereits bei relativ geringen Belastungswerten (Absunk maximal 43 cm) so stark beansprucht werden, dass die verwendeten 40 cm langen Steckhölzer die Lagestabilität der Matte nicht ausreichend gewährleisten konnten. Das bedeutet, dass für derartige Konstruktionen, wie z. B. auf der Böschung befestigte Pflanzmatten, ein enges Raster aus tief reichenden Befestigungspflöcken erforderlich ist.

Derzeit werden in der Wellenanlage Weidenspreitlagen, die im Mai 2010 jeweils zur Hälfte auf kiesigen und sandigen Böden eingebaut und mit 1 m langen Holzpflöcken im Raster von 0,60 m bis 1,20 m und Drahtverspannung auf der Böschung fixiert wurden, getestet (siehe Bild 19). Die ersten Belastungen erfolgten vier Wochen nach dem Einbau und danach in vierwöchigem Rhythmus. Dabei wurden die Belastungsgrößen schrittweise erhöht (Absunktiefen: 7 cm bis 48 cm, Absunkzeiten:

Bild 15: Versuchskästen mit Spreitlagen
Figure 15: Test boxes with willow brush mattresses

Bild 16: Einbau und Übererdung der Weidenspreitlagen am 15. März 2012
Figure 16: Willow brush mattresses covered with soil on march 15th, 2012

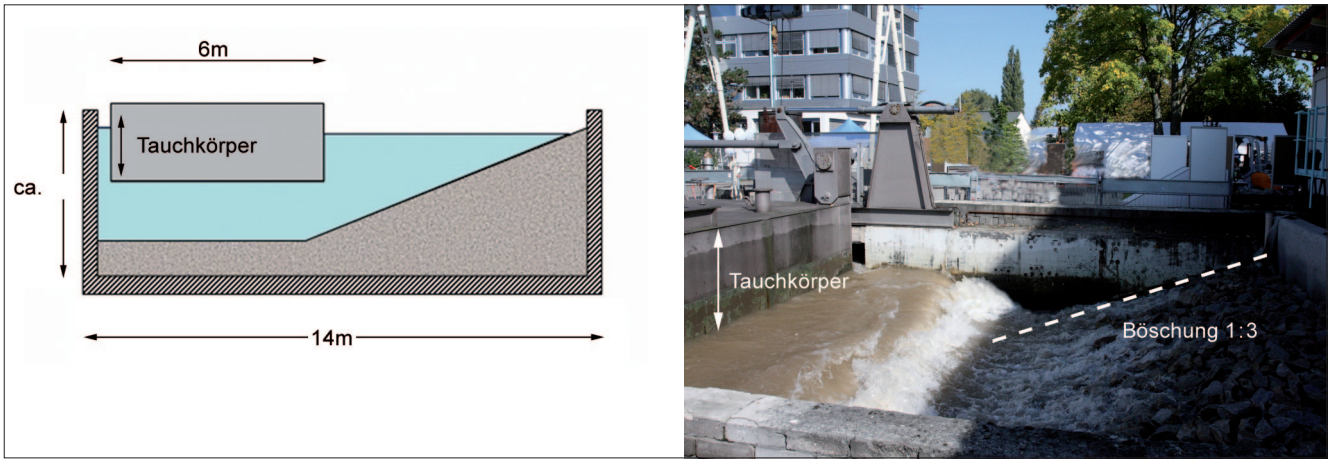


Bild 17: Wellenbecken der Bundesanstalt für Wasserbau (Prinzipskizze und Foto)
Figure 17: Wave basin at the BAW (schematic diagram and photo)

Bild 18: Modellversuch am 10. Juni 2010: Böschungsschutzmatte mit Steckhölzern
Figure 18: Model test on june 10th, 2010: Bank protection mat with willow cuttings

2 s bis 14 s). Die Spreitlagen selbst und die geschützte Böschung blieben bei diesen Belastungswerten stabil, signifikante Bodenverlagerungen wurden nicht festgestellt. Erste Einflüsse der sich entwickelnden Wurzeln auf die Größe des Porenwasserüberdrucks wurden festgestellt. Die Auswertungen sind noch nicht abgeschlossen. Die Untersuchungen werden fortgesetzt, indem die hydraulischen Belastungen bei den Einzelversuchen weiter erhöht werden. Nach der zweiten Vegetationsperiode Ende 2012 ist eine Dauerbelastung mit den maximal erzeugbaren Absunkgrößen geplant. Auf der Grundlage der dann insgesamt vorliegenden Ergebnisse der Labor- und Modellversuche wird über weitere Untersuchungen entschieden.

Bild 19: Modellversuch am 28. Oktober 2011: Weidenspreitlagen, 5 Monate nach Einbau
Figure 19: Model test on october 28th, 2011: Willow brush mattresses 5 months after installation

2.5.3 Naturversuch am Rhein
Field test on the Rhine

Eine weitere Möglichkeit, vertiefende Erkenntnisse über die Entwicklung und Belastbarkeit neuer pflanzlicher Ufersicherungsarten unter Wasserstraßenbedingungen zu gewinnen, ist die Durchführung von Naturversuchen, bei denen die Randbedingungen detailliert erfasst werden und ein intensives Monitoring nicht nur in der Bauphase, sondern auch viele Jahre danach durchgeführt wird. Auf der Grundlage der bisher gewonnenen praktischen Erfahrungen und der Ergebnisse aus den vertiefenden Untersuchungen im Labor und Modell wird zurzeit ein Naturversuch am Rhein in der Nähe von Worms (Pilotstrecke Lampertheim: km 440,6 bis km 441,6) unter Begleitung der BAW und BfG durchgeführt. Träger der Maßnahme ist das WSA Mannheim. In einem Abschnitt von 1 km Länge wurden am rechten Rheinufer von September bis Dezember 2011 neun verschiedene technisch-biologische Ufersicherungen eingebaut. Im Vorfeld wurden 2010 von der BAW und BfG die Randbedingungen – Gewässer- und Ufergeometrie, Baugrund im Uferbereich, vorhandene Vegetation und Fauna, hydraulische Uferbelastungen infolge natürlicher Flussströmung und Schifffahrt – ermittelt und dokumentiert und Empfehlungen für die zu testenden Ufersicherungsarten gegeben (BAW/BfG, 2010).

Für den Naturversuch wurde ein hoch frequentierter Wasserstraßenabschnitt ausgewählt, in dem täglich ca. 120 Schiffe verkehren. Der Rheinwasserstand schwankt hier zwischen GIW und HSW um etwa 6 m. Die etwa oberhalb MIttelwasser neu eingebauten Ufersicherungen werden dementsprechend nicht nur durch Strömungen und Wellen, sondern periodisch auch durch Überstau und Wasserspiegelabsunk bei Schiffsvorbeifahrt belastet. Da sich der Abschnitt in einem Übergangsbereich vom Prall- zum Gleithang befindet und die Fahrrinne in unterschiedlicher Entfernung vom Ufer liegt, sind die hydraulischen Einwirkungen entlang der Versuchsstrecke unterschiedlich groß. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass Strömungsgeschwindigkeiten in Ufernähe etwa zwischen 1,4 m/s (bei km 441,6) und 2 m/s (bei km 440,6) zu erwarten sind. Maßgebend ist dabei überwiegend die Wiederauffüllungsströmung infolge Schifffahrt. Der maximale Absunk und die maximalen Heckwellenhöhen werden voraussichtlich zwischen 0,25 m (km 441,6) und 1,00 m (km 440,6) bzw. 0,30 m (km 441,6) und 1,10 m (km 440,6) liegen.

Im Böschungsbereich stehen unter einer oberflächennahen 1,50 m bis 2,50 m dicken Auelehmschicht überwiegend kiesige Sande an. Unter der ursprünglich vorhandenen losen Steinschüttung aus Wasserbausteinen der Klasse $LMB_{5/40}$ (Schichtdicke ca. 60 cm bis 90 cm) ist noch bis in größere Tiefen ein Konglomerat aus alten Wasserbausteinen und Boden vorhanden. Lokal bildet noch altes Pflaster die Ufersicherung. Der spärliche Bewuchs im Uferbereich war vor der Umgestaltung durch eine geringe Artenvielfalt (keine geschützten Arten, überwiegend Kratzbeergestrüpp, „Allerweltsarten“, neophytische Gehölze wie Eschen-Ahorn und Hybrid-Pappeln), geringe Vegetationszonierung und kaum Strukturvielfalt gekennzeichnet. Auch aus faunistischer Sicht zeigte sich eine geringe Artenvielfalt.

Bild 20: Versuchsfeld 3 – Weidenspreitlagen (12/2011)
Figure 20: Test area no. 3 - Willow brush mattresses (12/2011)

Bild 21: Versuchsfeld 3 – Weidenspreitlagen (06/2012)
Figure 21: Test area no. 3 - Willow brush mattresses (06/2012)

VF	km	Neue technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen
1	440,630 - 440,800	Steinschüttung mit Weidensetzstangen, Lebendfaschinen, Busch- und Heckenlagen, Steinwall mit Flachwasserzone, Totholzstämme mit Wurzelteller
2	440,820 - 440,860	Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung verlegt (nach Entfernung der Steinschüttung)
3	440,880 - 440,950	Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung verlegt (nach Entfernung der Steinschüttung)
4	440,950 - 441,000	Steinschüttung mit Kiesfüllung, Einzelsteingruppen, Totholzfaschinenbündel
5	441,000 - 441,110	Einbau von Röhrichtgabionen und Steinmatratzen auf Kornfilter, Pflanzmatten und Heckenlagen (nach Entfernung der Steinschüttung)
6	441,125 - 441,200	Steinschüttung mit Oberboden-Alginatgemisch-Füllung, Nassansaat, Einzelpflanzen
7	441,200 - 441,375	Einbau von vorgezogenen Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Geotextil, Kokosmatte), Totholzfaschinen, Vegetationswalzen, Nassansaat (nach Entfernung der Steinschüttung)
8	441,375 - 441,475	Steinschüttung und Pflaster mit Röhrichtbewuchs, Erhöhung des vorhandenen Steinwalls
9	441,475 - 441,600	Zulassen freier Erosion und Sukzession, Ausfachungsbuhne, Setzstangen (nach Entfernung der Steinschüttung)

Tabelle 1: Ufersicherungsmaßnahmen in den einzelnen Versuchsfeldern (VF) (BAW, 2012; BAW, BfG, WSA Mannheim, 2012)
Table 1: Types of bank protection used in each test area (BAW, 2012; BAW, BfG, WSA Mannheim, 2012)

Die Versuchsstrecke wurde in neun Versuchsfelder (VF) gegliedert. In fünf Abschnitten (VF 2, 3, 5, 7, 9) wurde die vorhandene Steinschüttung etwa oberhalb des Mittelwasserstands entfernt und durch neue technisch-biologische Maßnahmen ersetzt, in einem Abschnitt (VF 9) blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Abschnitten (VF 1, 4, 6, 8) erfolgten ökologische Aufwertungen der weiterhin mit Wasserbausteinen gesicherten Böschung. Im Unterwasserbereich (unterhalb etwa Mittelwasser) blieb die vorhandene Steinschüttung durchgängig erhalten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ufersicherungsmaßnahmen, die Bilder 20 und 21 zeigen beispielhaft das Versuchsfeld 3 nach Fertigstellung im Dezember 2011 und im Juni 2012.

Für die Auswertung und spätere Übertragung der Ergebnisse auf andere Wasserstraßenabschnitte ist ein umfangreiches Monitoring vorgesehen. Ziel ist eine Bewertung der untersuchten technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich

- der technischen Wirksamkeit zur Gewährleistung der Uferstabilität,
- der ökologischen Wirksamkeit und
- des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes.

Im Einzelnen wird Folgendes untersucht bzw. gemessen und dokumentiert: Uferstabilität, Ufergeometrie, hydraulische Uferbelastungen, Klimaeinflüsse, Vegetation, Fauna, Unterhaltungsmaßnahmen, Schäden und ggf. erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen. Das Monitoring ist zunächst sehr intensiv in einem engen Raster bis 2016 geplant. Für eine fundierte Beurteilung pflanzlicher Bauweisen ist eine Beobachtung über mindestens 4 bis 5 Vegetationsperioden erforderlich. Auf der Basis der 2016 vorliegenden Erkenntnisse wird über Inhalt und Intervalle der weiterführenden Überwachung der Pilotstrecke entschieden. Im Ergebnis werden wichtige Erkenntnisse zur Anwendung alternativer technisch-biologischer Ufersicherungen am Rhein, aber auch an anderen Wasserstraßenabschnitten erwartet.

3 Ausblick
Outlook

Die vorgestellten Untersuchungen im Labor und Modell sowie in der Natur zur Beurteilung der technischen Wirksamkeit, insbesondere der Belastbarkeit pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen, werden von der BAW fortgesetzt. In enger Abstimmung dazu führt die BfG Untersuchungen zur Bewertung der ökologischen Wirksamkeit der Ufersicherungsmaßnahmen u. a. vor dem Hintergrund der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) durch. Im Ergebnis können für Wasserstraßen geeignete technisch-biologische Ufermaßnahmen empfohlen und Hinweise hinsichtlich Einbaubedingungen, Einbauzeiten, Belastbarkeit im Anfangszustand und längerfristig, Überstautoleranzen, Unterhaltungsmaßnahmen, aber auch hinsichtlich Herstellungs- und Unterhaltungskosten sowie ökologischer Wirksamkeit gegeben werden. Auf

dieser Grundlage werden Bemessungsgrundlagen für technisch-biologische Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen erarbeitet. Seit Beginn der Untersuchungen werden alle bereits vorliegenden Ergebnisse sukzessiv auf dem zu dieser Thematik von BAW und BfG eingerichteten Internetportal (http://ufersicherung.baw.de/de/index.html) veröffentlicht, sodass bereits jetzt erste Grundlagen zu technisch-biologischen Ufersicherungen an Wasserstraßen zur Verfügung stehen. In diesem Jahr werden zudem als erste konkrete Arbeitshilfe die im Abschnitt 2.5.1 genannten „Kennblätter" zu einzelnen Ufersicherungsmaßnahmen erstellt und veröffentlicht, mit denen die Mitarbeiter der WSV auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse Hinweise für praktische Anwendungen erhalten.

Generell lässt sich feststellen, dass technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen an schifffahrtsbelasteten Wasserstraßen anwendbar sind. Der Einsatz rein pflanzlicher Ufersicherungen oder Kombinationen aus pflanzlichen und technischen Bestandteilen ist jedoch von den gegebenen Randbedingungen, insbesondere von der Art und Größe der hydraulischen Belastungen, abhängig. Durch die Verwendung von lebenden, sich ständig verändernden Materialien müssen zeitabhängig verschiedene Zustände hinsichtlich der Uferschutzfunktion betrachtet werden, besonders der kritische Anfangszustand. In Wasserstraßenabschnitten mit sehr großen hydraulischen Belastungen wird auch zukünftig nicht auf eine technische Sicherung verzichtet werden können. Insgesamt sind jedoch langfristig durch eine vermehrte Anwendung pflanzlicher Ufersicherungsmaßnahmen ökologische Aufwertungen im Uferbereich der Bundeswasserstraßen zu erwarten.

4 Literatur
References

BAW, BfG (2008): Untersuchungen zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, Teil 2: Versuchsstrecke Stolzenau/Weser, km 241,550 – 242,300, Oktober 2008. Abrufbar unter http://ufersicherung.baw.de/de/index.html.

BAW, BfG (2010): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,600 bis km 441,600, rechtes Ufer, Empfehlungen für die Ausführung der Ufersicherungen, 07.05.2010. Abrufbar unter http://ufersicherung.baw.de/de/index.html.

BAW (2012): Technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen – Naturversuch am Rhein, km 440,600 bis km 441,600 (rechtes Ufer). BAW-Brief 5/2012.

BAW, BfG, WSA Mannheim (2012): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,600 bis km 441,000, rechtes Ufer, Erster Zwischenbericht, Randbedingungen, Einbaudokumentation, Monitoring, 25.01.2012. Abrufbar unter http://ufersicherung.baw.de/de/index.html.

Florineth, F. (2004): Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik, Patzer Verlag Berlin – Hannover.

GBB (2010): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. Abrufbar unter http://www.baw.de/de/die_baw/publikationen/merkblaetter/index.php.html.

Hacker, E., Johannsen, R. (2012): Ingenieurbiologie. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.

Holfelder, T., Kayser, J. (2006): Berücksichtigung von Porenwasserüberdrücken bei der Bemessung von Deckwerken an Wasserstraßen. Beiträge zum 5. Geotechnik-Tag in München. Schriftenreihe der TU München, Heft 38.

Köhler H.-J. (1989): Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 66, Karlsruhe, S. 155 – 174.

MAR (2008): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

MSD (2011): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

Rauch, H. P. (2006): Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen am Beispiel einer biologischen Versuchsstrecke am Wienfluss. Universität für Bodenkultur Wien.

Schuppener, B. (2000): Lebend bewehrte Erde – Böschungssicherung mit Pflanzen. BAW-Kolloquium „Geotechnische Forschung für den Verkehrswasserbau“ am 22. November 2000 in Hannover.

Uni Stuttgart (2005): Alternative, naturnahe Ufersicherungen an schiffbaren Gewässern – Internationale Literatur, Vorschriften und Erfahrungen – Technischer Bericht Nr. 6/2005. Erstellt im Auftrag der BAW. Eigenverlag, Stuttgart.

Witt, K. J. (2011): Grundbautaschenbuch (7. Auflage), Teil 2: Geotechnische Verfahren. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.