

Ufersicherungen mit Pflanzen an großen Schiffahrtsstraßen – Erste Ergebnisse zur Stabilität aus einem Naturversuch am Rhein

Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. R. Soyeaux, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Im Rahmen des gemeinsamen F&E-Projektes der Bundesanstalten für Wasserbau und für Gewässerkunde „Untersuchungen zur Anwendbarkeit von technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen“ wurde 2011 für Sicherungsmethoden unter Verwendung von Pflanzen im Rahmen eines Naturversuchs eine 1 km lange Versuchsstrecke am Rhein gegenüber von Worms eingerichtet. Die Maßnahmen werden dort erstmals an einer verkehrsreichen Wasserstraße mit großen Wasserspiegelschwankungen getestet. Erste Ergebnisse aus dem 5-jährigen Monitoringprogramm zur Belastbarkeit der Maßnahmen hinsichtlich Gewährleistung der Böschungsstabilität werden im Folgenden vorgestellt.

1. Einleitung

Um die Ufer von Binnenwasserstraßen dauerhaft vor Erosion und Instabilitäten infolge hydraulischer Belastungen aus Schifffahrt und Hochwasser zu schützen, werden diese i. d. R. mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen gesichert. Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 erhalten ökologische Gesichtspunkte bei Ausbau, Neubau und Unterhaltung an Wasserstraßen zunehmend einen größeren Stellenwert. Deshalb sind verstärkt naturnahe, technisch-biologische Ufersicherungen als Alternative zur klassischen Steinschüttung anzuwenden. Diese neuen Ufersicherungsmaßnahmen sollen gleichzeitig technischen und ökologischen Anforderungen gerecht werden. Allerdings gibt es bisher für deren Einsatz an stark befahrenen Wasserstraßen noch keine ausreichenden Erfahrungen. Deshalb können gegenwärtig nur ingenieurbologische Erfahrungen von kleineren Fließgewässern ohne Schifffahrt genutzt werden. Entsprechende Regelwerke für die Bundeswasserstraßen gibt es bisher noch nicht.

2. Forschungsprojekt

Um diesen offenen Fragen aus technischer und biologischer Sicht nachzugehen, arbeiten die Bundesanstalten für Wasserbau (BAW) und für Gewässerkunde (BfG) seit mehreren Jahren gemeinsam an dem F&E-Projekt „Untersuchungen zur Anwendbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen“. In diesem Rahmen werden verschiedene Studien zu Ufersicherungsmaßnahmen nur mit oder in Kombination mit Pflanzen, zur Quantifizierung von deren Belastbarkeit, über deren ökologische Wirksamkeit sowie zu Einbaubedingungen, erforderlicher Unterhaltung und Kosten durchgeführt. Langfristiges Ziel ist es, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für den Einsatz technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten. Dafür werden theoretische Untersuchungen, Labor- und Modellversuche durchgeführt und Erfahrungen aus ersten praktischen Anwendungen an Wasserstraßen ausgewertet. Einen Schwerpunkt bildet der seit 2011 laufende, groß angelegte Naturversuch am Rhein bei Worms, bei dem

verschiedene Ufersicherungsmaßnahmen mit Pflanzen unter Wasserstraßenbedingungen getestet werden. Erste Ergebnisse des Monitorings aus technischer Sicht werden in diesem Beitrag vorgestellt.

3. Gewährleistung der Uferstabilität

3.1 Schiffsinduzierte Uferbelastungen

Geböschte Ufer an Binnenwasserstraßen sind hydraulischen Belastungen aus Schifffahrt, in Flussstrecken zusätzlich aus Hochwasserabfluss und stark schwankenden Wasserspiegeln ausgesetzt. Bei der Fahrt des Schiffes in der Strecke führt die hydraulische Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße zu lokalen und temporären Veränderungen der Wasseroberfläche und der Strömungen um das Schiff: Zum einen tritt die „Primärwelle“ als Abfolge aus Bugwelle (inkl. Bugstau) vor dem Schiff, Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff und Heckwelle hinter dem Schiff auf (Bilder 1 und 2). Die dazu gehörigen Strömungen (Rückströmung und Wiederauffüllungsströmung) können sich mit der natürlichen Flussströmung überlagern. Zum anderen entstehen an Bug und Heck des Schiffes regelmäßige, kurzperiodische Wellen, die „Sekundärwellen“. Die Größe der schiffsinduzierten Uferbelastungen wird maßgeblich durch das Querschnittsverhältnis (Gewässer-/eingetauchtem Schiffsquerschnitt), die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser und den Uferabstand des Schiffes bestimmt.

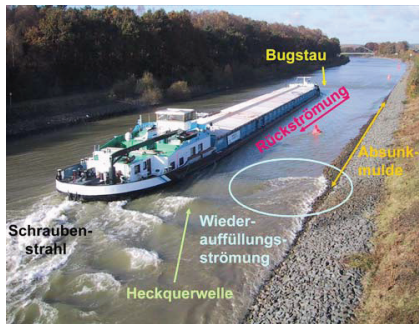


Bild 1: Schiffsinduzierte Belastungen

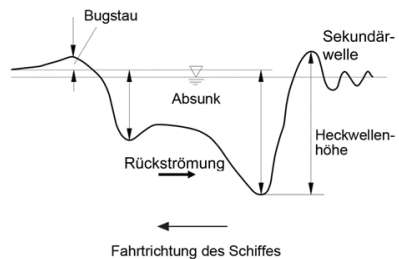


Bild 9: Schematische Darstellung der zeitlichen Wasserspiegelveränderung am Ufer

3.2 Nachweise zur Uferstabilität

Technisch-biologische Ufersicherungen – nur aus Pflanzen oder als Kombination aus Pflanzen und technischen Bestandteilen – müssen aus technischer Sicht so konzipiert sein, dass sowohl die Gesamtstandsicherheit der Uferböschung als auch die lokale Sicherheit gegenüber Abgleiten einer oberflächennahen Bodenschicht, gegen hydrodynamische Bodenverlagerung und gegenüber Oberflächenerosion entsprechend der Stabilitätsanforderungen gegeben sind.

Die Gesamtstandsicherheit der Uferböschung ist entsprechend DIN 1054 / EC 7 nachzuweisen. Pflanzen als Ufersicherung können ggf. nur langfristig die Gesamtstandsicherheit erhöhen, wenn sich ausreichend tiefe und stabile Wurzeln im Untergrund gebildet haben.

Hinsichtlich der lokalen Sicherheit gegen Abgleiten einer oberflächennahen Bodenschicht und hydrodynamische Bodenverlagerung sind die Auswirkungen des Wasserspiegelabsinks bei Schiffsvorbeifahrt auf die Uferböschung relevant. Eine Wasserspiegeländerung im Gewässer

würde bei vollständig wassergesättigtem Porenraum im angrenzenden Boden zu einer unmittelbaren Druckänderung im Porenwasser führen. Da jedoch im relevanten Böschungsbereich im Porenwasser mikroskopisch kleine Gasblasen eingeschlossen sind, die zu einer höheren Kompressibilität des Gas-Wasser-Gemisches führen, sind die Porenwasserdruckreaktionen deutlich verzögert (Köhler, 1989). Der unmittelbar nach dem Wasserspiegelabsink im Boden auftretende maximale Porenwasserüberdruck wird mit der Zeit vollständig abgebaut, wenn nicht ein weiteres Absinkereignis unmittelbar folgt. Die Größe des Porenwasserüberdrucks hängt neben der Größe des Wasserspiegelabsinks und der Absinkgeschwindigkeit maßgeblich von der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens ab (Holfelder, Kayser, 2006). Durch den Porenwasserüberdruck können die effektiven Spannungen im Boden und damit die Reibungskräfte so stark reduziert werden, dass die Uferböschung in einer böschungsparellen Gleitfläche in der kritischen Tiefe, in der der Scherwiderstand des Bodens infolge des Porenwasserüberdrucks am geringsten ist, abgleitet oder dass hydrodynamische Bodenverlagerungen auftreten. Besonders kritisch sind in dieser Hinsicht nicht kohäsive, feinkörnige Böden mit geringer Durchlässigkeit. Günstig wirken sich möglichst flach geneigte Uferböschungen aus.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der effektiven Spannungen im Boden besteht in der Anordnung einer flächigen Auflast auf der Böschung, wie das durch die Anwendung technischer Schüttsteindeckwerke erfolgt (GBB, 2010). Erreicht werden kann das auch durch kombinierte Ufersicherungen mit Pflanzen und technischen Bestandteilen, wie z. B. ein begrüntes Schüttsteindeckwerk oder bepflanzte Gabionen. Pflanzen als alleiniger Uferschutz, z. B. Weidenspreitlagen, können die Böschung dagegen nur langfristig durch ein genügend tief in den Boden reichendes, dichtes und verzweigtes Wurzelsystem im Sinne einer zusätzlichen Bodenkohäsion oder durch ausreichend tiefe Einzelwurzeln im Sinne einer bodenmechanischen Vernagelung stabilisieren. Daher müssen in der Anfangszeit zusätzliche konstruktive Maßnahmen die Sicherung gegen Abgleiten übernehmen, z. B. die zur Fixierung der Pflanzen erforderlichen Befestigungen, ein enges Raster tief in den Untergrund reichender Holzpflocke, die auch wie eine Bodenvernagelung wirken.

Die Nachweise hinsichtlich Abgleiten einer oberflächennahen Bodenschicht und hydrodynamischer Bodenverlagerung sind für Ufersicherungen mit Pflanzen nur dann relevant, wenn diese zeitweise eingestaut und gleichzeitig hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt (Wasserspiegelabsink) ausgesetzt sind, z. B. an Flüssen mit größeren Wasserspiegelschwankungen wie dem Rhein. Wie die Sicherheit gegenüber Abgleiten in einer oberflächennahen Bodenschicht und hydrodynamischer Bodenverlagerung ohne flächige Auflast, allein durch Pflanzenwurzeln gewährleistet werden kann, wird derzeit noch in der BAW durch umfangreiche Modell- und Laborversuche untersucht (Eisenmann, Fleischer, 2012). Am Beispiel von verschiedenen Weidenarten werden u. a. Untersuchungen zur Quantifizierung der Wurzel Ausbildung in Abhängigkeit von der Zeit und zu Korrelationen zwischen Durchwurzelungsgrad und Kohäsion des durchwurzelten Bodens durchgeführt. Auch aus dem im Weiteren vorgestellten Naturversuch am Rhein werden dahingehend wichtige Ergebnisse erwartet (s. Kap. 4).

Durch Heck- und Sekundärwellen sowie Rück- und Wiederauffüllungsströmung infolge Schifffahrt und durch natürliche Strömung, z. B. bei Hochwasserabfluss, kann durch die Schleppkraft des Wassers im Uferbereich außerdem Oberflächenerosion ausgelöst werden, wenn der anstehende Boden selbst nicht erosionsstabil ist. Pflanzen können, wenn sie mit ihren Wurzeln fest verankert sind, mit den oberirdischen Pflanzenteilen, die sich auf den Boden legen, und mit den oberflächennahen Wurzeln Schutz vor Oberflächenerosion bieten. Bis sich ausreichend Wurzeln und Sprosse entwickelt haben, ist ggf. für den Anfangszustand ein zusätzlicher Erosionsschutz, z. B. in Form von biologisch abbaubaren Filtervliesen, erforderlich.

Zur Beurteilung pflanzlicher Ufersicherungen hinsichtlich des Schutzes vor Oberflächenerosion kann auf Erfahrungen an kleineren Fließgewässern ohne Schifffahrt zurückgegriffen werden (Hacker, Johannsen, 2012).

4. Naturversuch am Rhein

4.1 Zielsetzung und Planung

Im Jahr 2011 wurden am rechten Rheinufer gegenüber von Worms im Rahmen eines Naturversuchs in einem Abschnitt von 1 km Länge (km 440,600 - 441,600) unterschiedliche technisch-biologische Ufersicherungen eingebaut. Träger der Maßnahme ist das WSA Mannheim. Dieser Flussabschnitt ist mit mehr als 120 Schiffen pro Tag einer hohen Verkehrsbelastung ausgesetzt. Ziel des Versuchs ist es, praktische Erfahrungen zur Belastbarkeit verschiedener technisch-biologischer Ufersicherungen an einer verkehrsreichen Wasserstraße zu sammeln und deren technische und ökologische Wirksamkeit zu ermitteln.

Die erste Entwurfsplanung wurde 2010 im Rahmen des o. g. F&E-Projektes von BAW und BfG erarbeitet. Auf dieser Grundlage wurde von zwei Fachbüros (Stowasserplan, Geitz & Partner GdR), die sich auf technisch-biologische Ufersicherungen spezialisiert haben, eine technische Ausführungsplanung erstellt. Für die Bauüberwachung waren die gleichen Büros zuständig. Die Bauausführung erfolgte durch eine ARGE (Rudolph Garten- und Landschaftsbau GmbH, Grünbau GmbH & Co KG). Mit der Aufzucht der Pflanzen in vorgefertigten Bauteilen (Röhrichtgabionen, Pflanzmatratzen) wurde 10 Monate vor dem Einbau ein spezialisierter Gartenbaubetrieb beauftragt. Nach Bauabschluss Ende 2011 wurde von BAW und BfG ein umfangreiches und detailliertes Monitoring über einen Zeitraum von zunächst fünf Jahren gestartet, um die Ufersicherungsmaßnahmen aus technischer und ökologischer Sicht zu beurteilen (s. Kap. 4.4).

4.2 Randbedingungen

Die Randbedingungen wurden im Vorfeld von BAW und BfG intensiv untersucht (BAW, BfG, 2010). Besonders hervorzuheben ist, dass der Wasserstand sehr stark – um etwa 6 m zwischen GlW und HSW – schwankt (Bild 3).

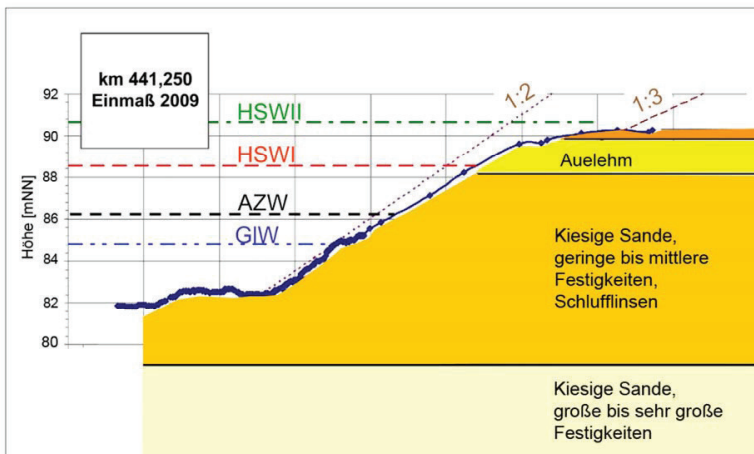


Bild 3: Uferquerschnitt mit Baugrundsichtung und maßgebenden Rheinwasserständen

Der betrachtete Abschnitt befindet sich am Innenufer einer leichten Rechtskurve. Der Abstand Fahrrinne-Ufer steigt von nur 23 m bei km 440,600 (Prallhangbereich) auf 140 m bei km 441,600 (Gleithangbereich), weshalb die schiffserzeugten Belastungen bei km 440,600 am größten sind und in Fließrichtung abnehmen. Aufgrund theoretischer Berechnungen nach GBB 2010 (BAW, 2011) sind maximale Heckwellenhöhen von 0,40 m (km 441,600) bis 1,00 m (km 440,600) zu erwarten. Als Strömungsgeschwindigkeit am Ufer bei Hochwasser wurden am 15. Januar 2011 während eines Ereignisses, bei dem das angrenzende Gelände bereits zum Teil überflutet war, mehr als 2 m/s gemessen.

Vor Beginn der Baumaßnahmen wiesen die Böschungen i. d. R. Neigungen von 1:2 bis 1:3 auf. Die vorhandene Ufersicherung bestand aus einer losen Schüttung aus Wasserbausteinen der Klasse LMB_{5/40} (Schichtdicke ca. 60 - 90 cm). Darunter wurde bis in ca. 60 cm Tiefe ein Konglomerat aus Wasserbausteinen und Boden gefunden. Untersuchungen des Untergrunds im Bereich der Böschung haben gezeigt, dass unter dem in einer 1,50 - 2,50 m mächtigen Schicht anstehenden Auelehm überwiegend kiesige Sande vorhanden sind (s. Bild 3). Die Gesamtstandsicherheit der Uferböschung wurde für verschiedene Lastfälle mit und nach Rückbau der Steinschüttung oberhalb AZW (Ausbauzentralwasserstand, s. Bild 3) nachgewiesen.

4.3 Technisch-biologische Ufersicherungen und ihre Umsetzung

Die 1 km lange Versuchsstrecke wurde in neun Versuchsfelder (VF) gegliedert. In fünf Feldern wurde die vorhandene Steinschüttung oberhalb AZW entfernt: In den VF 2, 3, 5 und 7 wurden neue technisch-biologische Maßnahmen eingebaut, im VF 9 blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Abschnitten (VF 1, 4, 6, 8) erfolgten Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung der weiterhin bis zur Böschungsoberkante mit Wasserbausteinen gesicherten Böschung. Im Böschungsbereich unterhalb etwa AZW blieb die vorhandene Steinschüttung durchgängig erhalten. Die neun alternativen Ufersicherungsmaßnahmen wurden unter Berücksichtigung der schiffserzeugten hydraulischen Belastungen angeordnet, die wegen der zunehmenden Uferabstände der Fahrrinne in Fließrichtung abnehmen.

Tab.1: Übersicht der neu eingebauten Ufersicherungsmaßnahmen (VF = Versuchsfeld)
(BAW, BfG, WSA-MA, 2012)

VF	Rhein-km	Neue technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen
1	440,630 - 440,800	Steinschüttung mit Weidensetzstangen, Lebendfaschinen, Busch- und Heckenlagen, Steinwall vor Flachwasserzone, Totholzstämmen 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) – Bild 7
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) – Bild 4 und Bild 5
6	441,125 - 441,200	Steinschüttung mit Oberboden-Alginatgemisch-Füllung, Nassansaat, Einzelpflanzen
7	441,200 - 441,375	Einbau vorgezogener Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Geotextil, Kokosmatte), Totholzfaschinen, Vegetationswalzen, Nassansaat (nach Entfernung der Steinschüttung) – Bild 6
8	441,375 - 441,475	Steinschüttung und Pflaster mit Röhrichtbewuchs, Erhöhung des vorhandenen Steinwalls
9	441,475 - 441,600	Zulassen freier Erosion und Sukzession, Ausfachungsbühne, Setzstangen (nach Entfernung der Steinschüttung)

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die umgesetzten Ufersicherungsmaßnahmen (Detaillierte Beschreibungen siehe (BAW, BfG, WSA-MA, 2012)). Alle Ufersicherungen wurden von September bis Dezember 2011 vom Land aus eingebaut. Die meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen waren gut. Über den gesamten Zeitraum herrschten niedrige Wasserstände, sodass die Baumaßnahmen weitestgehend im Trockenen ausgeführt werden konnten.

Für die neuen technisch-biologischen Ufersicherungen kamen einerseits vorgefertigte Elemente wie z. B. *Röhrichtgabionen* (Schichtdicke 30 cm) – bestehend aus Wasserbausteinen der Klasse CP_{45/125}, umhüllt von Drahtgeflecht und Kokosgewebe mit vorgezogenen Röhrichtpflanzen an der Oberfläche (VF 5; Bilder 4 und 5) –, *Steinmatratzen* (Schichtdicke 25 cm) – bestehend aus Wasserbausteinen der Klasse CP_{45/125}, umhüllt von einem Kunststoffnetz ohne vorgezogene Pflanzen (VF 5) – und *Pflanzmatten* (Schichtdicke ca. 1 cm) – mit verschiedenen Pflanzen vorgezogene Kokosmatten (VF 7; Bild 6) – zur Anwendung. Andererseits wurden *Weidenspreitlagen* (VF 2 und 3; Bild 7), die aus gebietsnah gewonnenen Weidenästen vor Ort hergestellt wurden, aufgebracht. Das Vorziehen der Röhrichtgabionen und Pflanzmatten erfolgte über die Dauer einer Vegetationsperiode.



Bild 4: Röhrichtgabionen während des Einbaus auf einem Kornfilter, 12.10.2011 (VF 5)



Bild 5: Röhrichtgabionen und Steinmatratzen nach Fertigstellung, 14.12.2011 (VF 5)



Bild 6: Pflanzmatten auf Filtervlies und Kokosgewebe über Nassansaat unmittelbar nach dem Einbau, 14.12.2011 (VF 7)



Bild 7: Weidenspreitlagen unmittelbar nach dem Einbau, 14.12.2011 (VF 3)

Bei Anwendung lebender Pflanzen wird das Ufer erst mit der Zeit durch zunehmendes Wurzel- und Sprosswachstum stabilisiert. Daher ist der Anfangszustand der kritischste Zustand. Da die Pflanzen zu Beginn keine Wurzeln haben, müssen sie i. d. R. mit Pflöcken, Querriegeln und Drahtverspannungen gut auf der Böschung befestigt werden. Wichtig ist, dass die Pflöcke ausreichend tief im Boden einbinden, um die bei Überstau auftretenden Zugkräfte, die durch Auftrieb und gleichzeitige Belastung durch Strömung und Wellen entstehen, aufnehmen zu können. Hydraulische Belastungen treten bereits unmittelbar nach Einbau und auch während des Einbaus auf.

Zur Gewährleistung der Filterstabilität im Uferbereich wurden die Röhrichtgabionen und Steinmatratten auf einem Kornfilter (VF 5) eingebaut. Unter den Pflanzmatten kamen teilweise verschiedene Filtermatten (VF 7) – Schafwollvliese, Kokosmatten, Kunststoffvliese – zum Einsatz. Keine der zur Verfügung stehenden Matten kann jedoch alle Anforderungen – Filterstabilität, Festigkeit, Durchwurzelbarkeit und biologische Abbaubarkeit – gleichermaßen erfüllen. Die Erfahrung wird zeigen, welche Produkte geeignet sind. Bei den Weidenspreitlagen kann auf einen zusätzlichen Filter verzichtet werden, wenn sie flächendeckend auf der Böschung verlegt werden.

Als Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung der vorhandenen Steinschüttung wurden sowohl Setzstangen, Busch- und Heckenlagen sowie Lebendfaschinen (VF 1) als auch Alginat mit Nassansaat (VF 6) gewählt. Reinen Strukturverbesserungen dienen Totholzfaschinen und Einzelsteingruppen (VF 4). Die eigentliche Ufersicherung erfolgt in diesen drei Feldern nach wie vor durch die Steinschüttung. Die Beurteilung dieser drei Aufwertungsmaßnahmen hinsichtlich deren ökologischer Wirksamkeit ist für Wasserstraßenabschnitte wichtig, in denen aufgrund hoher hydraulischer Belastungen nicht auf eine Steinschüttung verzichtet werden kann.

Im Feld VF 9 hat wegen der geringsten hydraulischen Belastungen ein Rückbau der Steinschüttung über AZW stattgefunden, ohne diese durch eine neue Maßnahme zu ersetzen. Damit wird dort zu Untersuchungszwecken bewusst Erosion zugelassen. Im Rahmen des Monitorings werden alle Veränderungen der Uferböschung durch hydraulische Belastungen und Überflutungen erfasst und ausgewertet. Einen sicheren Übergang zur stromab vorhandenen Steinschüttung am Ende der Versuchsstrecke gewährleistet eine Ausfachungsbühne, bei der mehrere Baumstämme fächerartig angeordnet und in der Böschung eingegraben und verankert wurden. Der landseitige Betriebsweg soll durch eine Doppelreihe Weidenetzstangen – und mittelfristig deren Wurzeln – an der Böschungsoberkante geschützt werden.

4.4 Monitoring

Für die Erfolgskontrolle und spätere Übertragung der Ergebnisse auf andere Wasserstraßen haben BAW und BfG ein umfangreiches Monitoringprogramm aufgestellt. Ziel ist eine Bewertung der eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungen hinsichtlich

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

Im Einzelnen umfasst das Monitoring folgende Bereiche:

- Stabilität der Einzelmaßnahmen
- Uferstabilität, Ufergeometrie
- Hydraulische Uferbelastungen
- Porenwasserdrücke im Boden
- Wetter und Wasserstände
- Vegetation und Fauna
- Ökologie

- Kosten, Unterhaltungsmaßnahmen
- Schäden und Instandsetzungsmaßnahmen

Das Monitoring begann bereits 2009/2010 mit einer Ist-Zustandserfassung von biologischen Indikatoren und technischen Randbedingungen, z. B. Geometrie, Baugrund und Schifffahrt (BAW, BfG, WSA-MA, 2012). Seit Fertigstellung der Versuchsstrecke Ende 2011 lag der Fokus des Monitorings auf der kritischen Anfangsphase, in der sich Wurzeln und Sprosse erst entwickeln mussten (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Wie haben sich die eingebauten Pflanzen entwickelt? Waren die vorgesehenen Befestigungen ausreichend? Wie haben sich die hydraulischen Belastungen und Überstauzeiten unmittelbar nach Einbau auf die Pflanzenentwicklung ausgewirkt? Inwieweit konnten die unterschiedlichen Maßnahmen bereits im Anfangszustand eine ausreichende Sicherheit gegenüber Oberflächenerosion gewährleisten? War die Böschungsstandsicherheit durchgängig gegeben? Aus welchen Gründen waren Sanierungsmaßnahmen erforderlich?

Seit Januar 2012 wurden in regelmäßigen Abständen und zusätzlich nach besonderen Hochwasserereignissen vor Ort aus technischer Sicht Inspektionen zur Beurteilung des Zustandes der Sicherungsmaßnahmen und der Stabilität der Ufer durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse wurden in einer Fotodokumentation festgehalten. Für geometrische Vergleichszwecke wurden 28 Querprofile festgelegt, die jährlich eingemessen werden. Die hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt wurden im Juni 2012 bei einer 3-tägigen Messkampagne gemessen, wobei die Wasserstände in Höhe der neuen Ufersicherungen lagen. Zusätzlich wurden aus drei Messungen die Porenwasserüberdrücke im Boden bei Schiffs vorbeifahrten ermittelt.

4.5 Erste Ergebnisse aus geotechnischer Sicht

Da nur die in den Versuchsfeldern 2, 3, 5 und 7 nach Rückbau der Steinschüttung neu eingebauten Maßnahmen Uferschutzfunktion haben (siehe Tab. 1), werden im Weiteren nur diese Bauweisen betrachtet. Zusätzlich wird kurz auf Versuchsfeld 9, das über AZW keinerlei Ufersicherungen mehr aufweist, eingegangen.

Die Ufersicherungen mit Pflanzen waren im ersten Jahr bereits teilweise sehr großen Belastungen ausgesetzt. Dazu zählten mehrere Hochwasser (höchster Wasserstand ca. 1 m unter BOK) bereits unmittelbar nach Bauabschluss, länger anhaltender, dabei kurzzeitig auch sehr starker Frost ohne schützende Schneedecke und teilweise lang anhaltende Niedrigwasserstände, die v. a. zu Beginn der Vegetationsperiode von Anfang Februar bis Mitte April 2012 auftraten. Weitere Hochwasser folgten in den Sommermonaten, bei denen der untere Böschungsbereich von AZW - 0,5 m bis AZW + 1,0 m ohne Unterbrechung 6 Wochen überstaut war. Bei diesen höheren Wasserständen wurde der überstaute Bereich durch Auftrieb, natürliche Strömung und hydraulische Einwirkungen infolge Schifffahrt belastet. 2009 durchgeführte Messungen der schiffserzeugten Belastungen bei Wasserständen um AZW ergaben Wellenhöhen von maximal 80 cm, weitere Messungen 2012 bei höheren Wasserständen von 2,5 m über AZW Wellenhöhen von bis zu 30 cm. Da bei diesen Messungen nur eine begrenzte Anzahl von Schiffen erfasst wurde, können im gesamten Untersuchungszeitraum durchaus auch größere Wellenhöhen aufgetreten sein.

Der Bereich zwischen AZW - 0,5 m und AZW + 1,0 m war durch ständigen Wellenaufbau bei mittleren Wasserständen und durch den längsten und höchsten Überstau bei Hochwasser hydraulisch am stärksten belastet. Die 2012 bei höheren Wasserständen (ca. NN + 88,30 m, s. Bild 3) gemessenen ufernahen Strömungsgeschwindigkeiten (5 m vom Ufer entfernt) lagen zwischen 0,3 m/s und 1,1 m/s.

Mit den drei bei Wasserständen zw. AZW und HSW I im Versuchsfeld 3 durchgeführten Porenwasserdruckmessungen konnte nachgewiesen werden, dass während der Schiffs vorbeifahrten infolge des Wasserspiegelabsinks Porenwasserüberdrücke im

anstehenden Boden unterhalb der Spreitlagen aufgetreten sind. Das bedeutet, dass die Ufersicherungsmaßnahmen bei Überstau Belastungen ausgesetzt sind, die nicht nur zu Oberflächenerosion, sondern prinzipiell auch zu einem Abgleiten der Uferböschung und zu hydrodynamischen Bodenverlagerungen führen können. Die bisher gemessenen Porenwasserüberdrücke sind allerdings gering (max. $0,6 \text{ kN/m}^2$), da der sandig-kiesige Boden relativ durchlässig ist und bisher auch nur geringe Absinkwerte (max. 26 cm) registriert wurden. Theoretisch sind jedoch größere Absinkwerte und damit auch größere Porenwasserüberdrücke im Boden möglich, weswegen in den nächsten Jahren weitere Messungen bei unterschiedlichen Wasserständen durchgeführt werden.

Die eingebrachten Pflanzen mussten 2012 erst ausreichend Wurzeln bilden, um stabil im Untergrund verankert zu sein. Generell lässt sich feststellen, dass die Uferschutzmaßnahmen, die neben den Pflanzen auch technische Bestandteile (z.B. Wasserbausteine) besitzen – wie die Röhrichtgabionen und Steinmatratzen im Versuchsfeld 5 –, aufgrund ihres größeren Eigengewichts von Anfang an stabiler waren als die Ufersicherungen nur mit Pflanzen. Sie konnten sich deshalb insgesamt gut entwickeln. Auf zusätzliche Befestigungen konnte hier verzichtet werden. Der für das Wurzelwachstum erforderliche flächige Kontakt zum Untergrund war von Anfang an gegeben. Die Röhrichtgabionen konnten sich auf der 1:2,5 geneigten Böschung gut entwickeln. Negativ hat sich allerdings der relativ lange ununterbrochene Überstau (ca. 6 Wochen) des unteren Böschungsbereiches auf die Pflanzenvitalität ausgewirkt. Bild 8 zeigt den Zustand dieses Bereiches (gekennzeichnet mit „1“) vor dem Überstau, Bild 9 unmittelbar danach. Langfristig konnten sich die Pflanzen jedoch wieder erholen. Die Uferschutzfunktion war durchgehend gegeben.



Bild 8: VF 5, unterer Uferbereich am 06.06.2012 (Blick stromauf)

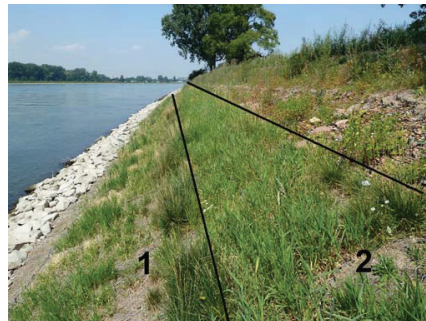


Bild 9: VF 5 Ende Juli 2012 nach 6-wöchigem Überstau (Blick stromab) – Vitalitätsverlust

Bei den Ufersicherungen ausschließlich mit Pflanzen, die unter Auftrieb kein signifikantes Eigengewicht besitzen – wie die Weidenspreitlagen und Pflanzmatten –, zeigte sich die Bedeutung der Befestigungen (Querriegel, Pflöcke, Drahtverspannungen) in der kritischen Anfangsphase sehr deutlich. Wegen einiger im Untergrund noch vorhandener Steine konnte die planmäßige Einbindetiefe der Holzpföcke nicht überall erreicht werden, sodass diese bei Überstau durch Auftrieb und Wellenbelastung herausgezogen wurden und erneuert werden mussten.

Die Weidenspreitlagen in VF 2 und VF 3 (überwiegend Purpur- und Silberweide) haben sich auf der 1:3 geneigten Böschung flächendeckend insgesamt gut entwickelt (Bild 10 im Vgl. zu Bild 7). Bis Oktober 2012 wurden Triebblängen von bis zu 2,50 m erreicht. Trotz wiederholtem Überstau wurden nur begrenzte Bodenverlagerungen festgestellt. Im November 2012 erfolgte

am unterstromigen Ende von VF 3 eine erste Aufgrabung der Weidenwurzeln, um deren Entwicklung beurteilen zu können. An zwei Stellen der Böschung in verschiedenen Höhen wurden die Wurzeln auf einer Fläche von ca. 1,0 m x 0,5 m freigelegt (Bild 11). Dabei zeigte sich, dass sich bereits nach der ersten Vegetationsperiode ein relativ dichtes Wurzelwerk mit Wurzellängen bis ca. 60 cm entwickelt hatte. Aufgrund dieser Wurzel Ausbildung kann davon ausgegangen werden, dass sich oberflächennah die Scherfestigkeit des Bodens bereits deutlich erhöht hat. Außerdem hat sich im Bereich der verlegten Weidenäste eine wenige Zentimeter dicke Schicht aus feinen, verflochtenen Wurzeln gebildet, die zunehmend einen besseren Schutz vor Oberflächenerosion bietet. Weitere Ausgrabungen, auch in anderen Versuchsfeldern, sind in den nächsten Jahren geplant.



Bild 10: Weidenspreitlagen in VF 3 (Juli 2012)



Bild 11: Wurzel aufgrabung in VF 3 (20.11.2012)

Die Pflanzmatten mit vorkultivierten Pflanzen der Ufer- und Röhrichtzone – eingebaut im VF 7 auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Kunststoffvlies, Kokosgewebe) bei einer Böschungsneigung von 1:3 – konnten sich dagegen in den wiederholt und zum Teil lange eingestauten Bereichen nicht gut entwickeln. Durch die nur punktuellen (Pflöcke) und linienförmigen (Querriegel) Befestigungen war ein flächiger Kontakt zwischen Pflanzmatten und Boden bei Belastung durch Auftrieb und Wellen nicht dauerhaft zu gewährleisten. Bei Überstau hoben und senkten sich die Pflanzmatten unter diesen Belastungen zwischen den Befestigungen, sodass die Wurzeln der vorgezogenen Einzelpflanzen nicht in den Untergrund einwachsen konnten bzw. erste feine Wurzeln wieder abgerissen wurden. Lose und herausgezogene Pflöcke mussten wiederholt erneuert werden. Bild 12 zeigt den unteren Böschungsbereich im VF 7, der bis etwa 1 m über AZW lange eingestaut und wesentlich stärkeren hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt ausgesetzt war. Im Vergleich zu dem gut entwickelten Bewuchs im darüber liegenden Böschungsbereich ist hier die Pflanzmatte z. T. zerstört und weitestgehend ohne Bewuchs, die darunterliegende Filtermatte liegt teilweise frei. Das bereichsweise verwendete Schafwollvlies hat sich wesentlich schneller abgebaut als erwartet, sodass hier schon kein Erosionsschutz mehr gegeben war. An der freien Lage der Querriegel ist auf Bild 12 deutlich zu erkennen, wie Bodenerosion stattgefunden hat. Deshalb musste zur Gewährleistung der Böschungsstabilität der untere Böschungsbereich lokal bereits wieder mit Wasserbausteinen abgedeckt werden.

Das Versuchsfeld 9, das nach Rückbau der Steinschüttung oberhalb AZW ohne Ufersicherung blieb, zeigt, dass bei den gegebenen hydraulischen Belastungen ohne jeglichen Uferschutz – wie erwartet – zunehmend Erosionen auftreten (Bild 13). Ob das Hinterland in diesem begrenzt dynamischen Uferabschnitt durch die am Böschungsübergang

zur Planie in 2 Reihen gepflanzten Weidensetzstangen und deren Wurzelwerk langfristig ausreichend geschützt werden kann, wird die weitere Entwicklung zeigen.



Bild 12: Pflanzmatten im VF 7 im unteren stark belasteten Böschungsbereich (30.05.2013)



Bild 13: VF 9 ohne Böschungsschutz (22.02.2012)

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Naturversuch am Rhein werden verschiedene technisch-biologische Ufersicherungen in situ unter den Bedingungen einer viel befahrenen Wasserstraße mit großen Wasserspiegelschwankungen getestet. Umfangreiche Erfahrungen zum Einbau der Maßnahmen und zu deren Entwicklung in der kritischen Anfangszeit konnten bereits gewonnen werden, von denen im vorliegenden Beitrag nur ein kleiner Teil dargestellt werden kann. Ausführliche Berichte mit weiteren Ergebnissen sind auf dem speziellen Fachportal dieses Forschungsprojektes „<http://ufersicherung.baw.de/de/index.html>“ abrufbar.

Der überwiegende Teil der technisch-biologischen Ufersicherungen konnte sich im ersten Jahr nach Fertigstellung gut entwickeln und den Uferschutz ausreichend gewährleisten. In einigen Versuchsfeldern waren anfänglich Nachbesserungsarbeiten erforderlich, z. B. die Erneuerung der durch Überstau gelockerten Befestigungen. Nur bei den überwiegend punktuell befestigten Pflanzmatten im Versuchsfeld VF 7 mussten lokal bereits Sanierungsmaßnahmen (Überschüttung des unteren Böschungsbereiches mit Wasserbausteinen) durchgeführt werden, da sie durch Überstau und schiffsinduzierte Belastungen zu stark geschädigt waren.

Das Monitoring wird in gleicher Weise in den nächsten Jahren weitergeführt. Aus geotechnischer Sicht liegt der Fokus dabei weiterhin auf der Stabilität der Maßnahmen und des Ufers unter Berücksichtigung des fortschreitenden Pflanzen- und Wurzelwachstums. Vegetationskundliches und faunistisches Monitoring zielen darauf ab, die ökologische Wirksamkeit der Maßnahmen zu beurteilen. Eine weitestgehend abschließende Beurteilung der einzelnen Maßnahmen ist frühestens 2016 nach mehreren Vegetationsperioden möglich.

Die Erfahrungen aus der Versuchsstrecke am Rhein und anderen Naturversuchen sowie die Ergebnisse der Labor- und Modellversuche sollen langfristig die Grundlage für fundierte Anwendungsempfehlungen und Bemessungsregeln für den Einsatz von technisch-biologischen Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen bilden. Einige der bis jetzt vorliegenden Ergebnisse aus dem F&E-Projekt der BAW und BfG sind in das kurz vor der Fertigstellung befindliche DWA-Merkblatt M519 (DWA, 2013) eingeflossen. Das Merkblatt zeigt eine Vorgehensweise, wie bei dem jetzigen Kenntnisstand unter bestimmten

Randbedingungen technisch-biologische Ufersicherungen auf der Grundlage von ingenieurbologischen Erfahrungen an kleineren Fließgewässern unter Berücksichtigung des bestehenden technischen Regelwerkes geplant werden können, wobei Langzeiterfahrungen an Wasserstraßen noch nicht vorliegen.

LITERATUR

BAW – Bundesanstalt für Wasserbau 2011, Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB 2010), Karlsruhe, http://www.baw.de/de/de/die_baw/publikationen/merkblaetter/index.php.html

BAW, BfG – Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde 2010, Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Empfehlungen für die Ausführung der Ufersicherungen, Karlsruhe, Koblenz

BAW, BfG, WSA-MA – Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim 2012, Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer – Erster Zwischenbericht: Randbedingungen, Einbaudokumentation, Monitoring, Karlsruhe, Koblenz

BAW, BfG, WSA-MA – Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim 2013, Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer – Zweiter Zwischenbericht: Erste Monitoringergebnisse 2012, Karlsruhe, Koblenz

DWA 2013, Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Gewässern, DWA-Merkblatt M519, Entwurf 31.10.2013

Eisenmann, J., Fleischer, P. 2012, Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen, BAW Mitteilungsblatt Nr. 95 (Johann Ohde Kolloquium), S. 21-39, Karlsruhe

Hacker, E., Johannsen, R. 2012, Ingenieurbilogie, 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, TU München, Nr. 38

Köhler, H.-J. 1989, Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund, BAW Mitteilungsblatt Nr. 66, S. 155-174, Karlsruhe

VORTRÄGE

HTG-Kongress 2014



Berlin

21. – 23. Mai 2014

Maritim proArte Hotel Berlin

Hafentechnische Gesellschaft e.V.
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg
Telefon: 040 – 4 28 47-21 78
Fax: 040 – 4 28 47-21 79
E-Mail: service@htg-online.de
Internet: www.htg-online.de

Vorsitzender: Reinhard Klingen
Stellv. Vorsitzender: Dr. Karl Morgen

Geschäftsführung:
Jan Schüller
Meike Stielau
Felix Scholz

Registergericht: Amtsgericht Hamburg
Vereinsregister Nr. VR 1112
Ust-IdNr.: DE253776206

Druck: Neumann Druck e.K., Benzstr. 1, 84030 Landshut
Verlag: nm neumann medien, Benzstr. 1, 84030 Landshut

Herstellung: M. Herold · www.typografikdesign.de

ISBN: 978-3-9815800-1-3