

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Kayser, Jan

Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen im Wandel der Zeit

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105345>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

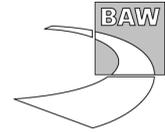
Kayser, Jan (2009): Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen im Wandel der Zeit. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Verkehrswasserbau. S. 47-59.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen im Wandel der Zeit

Jan Kayser, Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Geotechnik

1 Einführung

In Deutschland gibt es ca. 6500 km Binnenwasserstraßen. Deren Uferböschungen und z. T. auch Gewässersohlen werden durch natürliche und schiffsinduzierte hydraulische Einwirkungen so belastet, dass Sicherungsmaßnahmen erforderlich sind, um den dauerhaften Bestand der Wasserstraße und des angrenzenden Hinterlands zu gewährleisten.

Der Beitrag beschreibt die technische Entwicklung der Ufersicherungen im Laufe der Zeit und unter welchen Randbedingungen sie stattgefunden hat. Es werden verschiedene Bauweisen dargestellt und hinsichtlich ihrer dauerhaften Verwendung in der Wasserstraße bewertet. Hierbei wird besonders auf die Dimensionierung technischer Ufersicherungen in den letzten 100 Jahren und auf die Schussfolgerungen, die sich daraus für die zukünftigen Ufersicherungen ergeben, eingegangen.

Da die Entwicklung von Ufersicherungen naturgemäß eng mit der Entwicklung der Wasserstraßen und der Schiffe verbunden ist, führt ein kurzer Überblick über die Historie der Wasserstraßen in die Thematik ein.

Für Bauweisen für Ufersicherungen ist noch ein erhebliches Entwicklungspotential vorhanden. Die möglichen Entwicklungen und die hierfür noch zu klärenden Fragen werden abschließend in einem Ausblick auf zukünftige Ufersicherungen an Wasserstraßen erläutert.

2 Übersicht über die Entwicklung des Verkehrswasserbaus

2.1 Entwicklung der Wasserstraßen

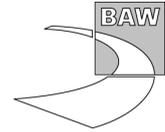
Die wichtigsten Transportwege für Massengüter sind seit alters her die Flüsse. Zu Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse wurde das natürliche Gewässerbett schon früh den Anforderungen der Schifffahrt angepasst. Übliche Maßnahmen waren Vertiefungen der Fahrrinne oder kurze, künstliche Gerinne zur Umfahrung natürlicher Hindernisse bzw. zum Abschneiden von Kurven. Erste Baumaßnahmen sind zwischen 2300 und 2180 v. Ch. aus Ägypten bekannt. Mit der Zeit entwickelten sich die zunächst kurzen künstlichen Gerinne zu immer längeren Teilstücken bis hin zu eigenständigen, von der Linienführung des Flusses entkoppelten Seitenkanälen.

Die nächste Entwicklung bestand darin, die Schifffahrt auch zwischen Flusssystemen zu ermöglichen. Hierfür waren Wasserscheiden zu überwinden. Der erste derartige Kanal war der Ling Chu 219 v. Chr., der mit keinem bzw. sehr geringem Gefälle gebaut wurde, wodurch der Bau einer Scheitelhaltung mit den entsprechenden Problemen in der Wasserhaltung vermieden werden konnte. In vergleichbarer Gradientenführung wurde die Fossa Carolina 793 als erster Kanal in Deutschland in Angriff genommen, wobei dieser Kanal bereits über ein künstlich aufgestautes Wasserreservoir zur Wasserversorgung verfügte.

Der nächste Technologiesprung im Kanalbau wurde durch den Bau von Scheitelhaltungskanälen ausgelöst. Der erste derartige Kanal entstand mit dem „Großen Kanal“ im 6. Jahrhundert n. Chr. in China. Bestandteil des Kanals waren Abstiegsbauwerke als Schleusen oder geneigte Bootsschleppen sowie ein Wasserreservoir für die Wasserversorgung der Scheitelhaltung. Der erste Scheitelhaltungskanal Deutschlands war der Stecknitzkanal, der Vorgänger des Elbe-Lübeck-Kanals, aus dem 14. Jahrhundert.

Im 17. und 18. Jahrhundert fand die Entwicklung der Wasserstraßen zu großen Teilen in Frankreich (z. B. Canal du Midi), mit dem Beginn der industriellen Revolution Ende auch in England statt. Bautechnische Höhepunkte aus diesen Zeiten sind Aquädukte, Schleusentreppen und Tunnel.

Erdarbeiten zum Bau von Wasserstraßendämmen fanden bis zu diesem Zeitpunkt nur untergeordnet und dann auch nur als Aushub statt. Den Bau von Wasserstraßen oberhalb des natürlichen Geländes hat



man vermieden bzw. dort, wo er nicht vermeidbar war, in Aquädukten geführt. Seitlich einfassende Dämme zur Anhebung des Wasserspiegels über das Gelände wurden noch nicht in Betracht gezogen. Zu groß war die Unsicherheit im Verständnis der bodenmechanischen Vorgänge durchströmter Erdbauwerke. Zudem fehlte es auch an den Geräten zur Bewegung großer Erdmassen. Erst Ende des 18. Jahrhundert wurden erste Dämme für Wasserstraßen, zunächst als Anschlüsse an Aquädukte, gebaut. Der größte bekannte Wasserstraßen-Damm ist der 1914 gebaute Ragöser Damm im Verlauf des Oder-Havel-Kanals mit 28 m Höhe (ICOMOS, 1996).

Mit dem Aufkommen der Eisenbahn in Europa ab der Mitte des 19. Jahrhundert trat die Schifffahrt zunächst bis weit in die 2. Hälfte des 19. Jahrhundert in den Hintergrund, bis die Entwicklung des maschinellen Schraubenantriebs für Schleppschiffe wieder konkurrenzfähige Transportzeiten auf dem Wasser ermöglichte. Diese Art der Schleppfahrt erforderte aber auch neue und größere Kanäle, womit die bis heute andauernde Zeit der Großschifffahrtskanäle begann.

Nach dem 2. Weltkrieg verdrängten die selbst fahrenden Schiffe (Selbstfahrer) die Schleppzüge. So wuchs der Anteil des Laderaums von Selbstfahrern auf dem Rhein nach 1949 von 10 % (BMV, 1949) schnell auf fast 100 % an. Ebenso erhöhte sich die Motorleistung der Schiffsflotte beständig, so dass moderne Binnenschiffe relativ schnell fahren können und dies unbenommen von schifffahrtspolizeilichen Regelungen auch tun (Fleischer et al., 2003).

2.2 Entwicklung der Ufersicherungen

Die Entwicklung der Ufersicherungen an Wasserstraßen ist eng mit der Entwicklung der Schiffe und Schiffsantriebe verbunden. Über Jahrtausende bewegte sich die Binnenschiffe durch die natürliche Strömung in den Flüssen, durch externen Antrieb über Treidelpferde und –knechte oder unter Segeln fort. Diese Art der Antriebe ermöglichte nur geringe Geschwindigkeiten und erzeugt somit auch keine nennenswerte hydraulische Belastung auf die Ufer. Die Ufer wurden allenfalls durch Vegetation gesichert, die sich zumeist durch natürliche Sukzession eingefunden hat.

Technische Ufersicherungen wurden zunächst nur in Kanälen eingesetzt, in denen es aufgrund unstabiler Böschungen – z. B. in Feinsanden – bautechnisch erforderlich war. Dies war z. B. beim Kanhave-Kanal in Dänemark der Fall (gebaut im 8. Jahrhundert), bei dem die Ufer mit einer Kombination vertikaler Holzpfähle und horizontaler Dielen gesichert wurde. Erste massive und lang gestreckte Befestigungen von Ufern wurden mit den Flussbegradigungen erforderlich, z. B. im Zuge der Begradigung des Oberrheins ab 1817 mit Faschinen und Steinpflaster.

Erst mit der Entwicklung von leistungsfähigen, maschinellen Schiffsantrieben wurde auch die hydraulische Belastung aus Schiffsverkehr merkbar größer. So wurden zunehmend stärkere technische Sicherungsmaßnahmen erforderlich, insbesondere in dem seit dem Ende des 19. Jahrhunderts umfangreich erweiterten Kanalnetz. Bild 1 zeigt eine Anfang des 20. Jahrhunderts an der Unteren Havel gebaute Ufersicherung mit einem Deckwerk. Hier sind bereits alle Funktionselemente (Deckschicht, Filter, Fußsicherung) enthalten, die auch heutzutage in Böschungs- und Sohlsicherungen mit modernen Deckwerken verwendet werden. Die eigentlich schützende Deckschicht besteht hier aus einer gepflasterten Steinlage. Zur Verhinderung von Bodenausspülungen liegt unter der Deckschicht eine Schicht aus grober Gesteinskörnung (Steinknack) als Filter. Auch die Notwendigkeit, das Deckwerk nach unten hin zu stützen, war bereits bekannt und wurde hier mit einer Fußsicherung in Form einer Stülpwand realisiert.

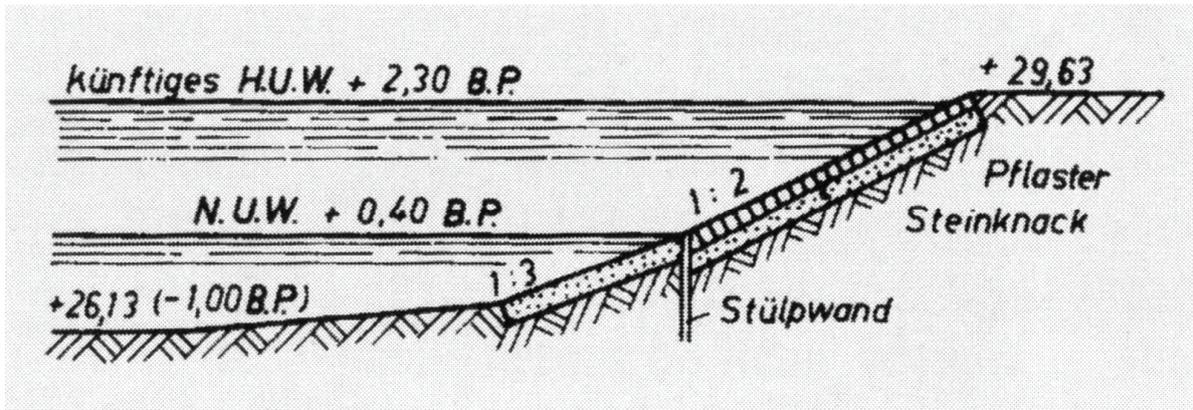


Bild 1: Deckwerk Silokanal, Anfang 20. Jahrhundert, aus (Uhlemann, 1994)

In den nachfolgenden Jahrzehnten wurden die Ufersicherungen sukzessive immer massiver. Während die erste Generation von Deckwerken in den Kanälen zunächst oft nur den Wasserwechselbereich mit dünnen Steinlagen von 30 cm auf einem unklassiertem Filter gesichert war, wurden die Steinschüttungen immer dicker und zunehmend über die gesamte Böschungslänge hin gezogen. Auch wurde die Bedeutung eines auf die hydraulischen Anforderungen bemessenen Filters unter der Deckschicht für die Dauerhaftigkeit des Deckwerks erkannt. Der Anlass für die laufende Verbesserung waren meistens Schäden an den bestehenden Ufersicherungen, die durch die kontinuierlich ansteigenden hydraulischen Belastungen hervorgerufen wurden. Diese Entwicklung ist z. B. an den Deckwerken erkennbar, die im Zuge des ca. 20 Jahre dauernden Ausbaus des Wesel-Datteln-Kanals zur Wasserstraßenklasse Vb verwendet wurden. Bild 2 zeigt die Entwicklung von den ersten Deckwerken aus dem Jahr 1966 bis hin zu den letzten Deckwerken aus 1987.

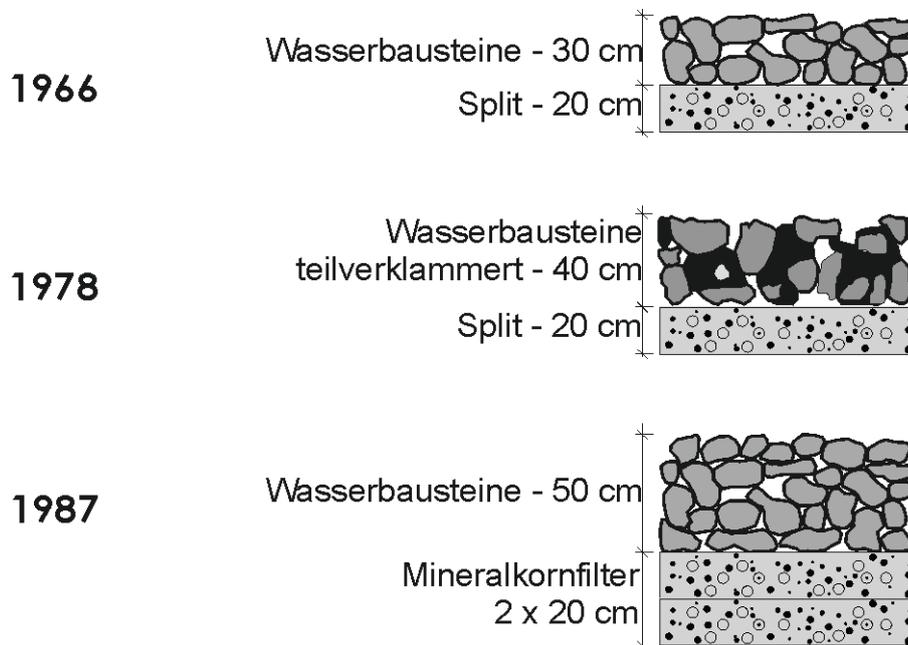
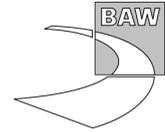


Bild 2: Entwicklung der Böschungsdeckwerke am Wesel-Datteln-Kanal, (nach Bartnik, 1988)

Die in den 60-er Jahren noch typische Bauweise bestand aus einer 30 cm dicken Deckschicht aus Wasserbausteinen und einer konstruktiv als Filter vorgesehenen Splitschicht. Eine dem gegenüber verstärkte Bauweise ist das teilverklammerte Deckwerk mit 40 cm dicker Deckschicht und ebenfalls einem Splitfilter (1978). Eine Bemessung der Filter erfolgte zu dem damaligen Stand noch nicht. Die letzten Abschnitte des WDK wurden dann in einem Standard von 50 cm Wasserbausteinen auf 2 x 20 cm Mineralkornfilter ausgebaut (1987) (Bartnik, 1988).



Während die Bauweisen der Ufersicherungen bis in die 70-er Jahre durch lokal begrenzte Erfahrungen aus der Vergangenheit bestimmt waren, wurde Anfang der 80-er Jahre begonnen, diese Erfahrungen regional übergreifend zu bündeln und in ein zukunftsgerichtetes Konzept unter Beachtung der sich weiter erhöhenden hydraulischen Belastungen umzusetzen. In diesem Rahmen wurde eine systematische Bestandsaufnahme durchgeführt, in Fahrversuchen die relevanten hydraulische Einwirkungen ermittelt sowie Probestecken gebaut und ausgewertet (AG Kanalsohlen, 1987). Diese Arbeiten bildeten dann auch die Grundlage für das „Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR)“ von 1993 (BAW, 1993).

3 Bauweisen für Ufersicherungen an modernen Großwasserstraßen

3.1 Überblick

Seit den 60-er Jahren wurden in Deutschland viele Bauprojekte initiiert, die den Ausbau des Wasserstraßennetzes für Schiffsgrößen entsprechend dem großen Rheinschiff mit bis zu 11,45 m Breite und 100 bis 135 m Länge bei Querschnittsverhältnissen vom Wasserquerschnitt zum eingetauchtem Schiffsquerschnitt von $n \geq 5,2$ zum Ziel haben. Einige Großprojekte sind seit vielen Jahren abgeschlossen, andere befinden sich derzeit im Bau oder in der Planung.

Im Zuge der Großprojekte wurden verschiedene Varianten von Ufersicherung angewendet, wobei Bauweisen auch z. T. neu entwickelt und erstmals in der Wasserstraße eingesetzt wurden. Man verfolgte zwei unterschiedliche Konstruktionsprinzipien:

- Steinschüttungen als erosionssichere und stabilisierende Deckschicht oder
- feste, erosionssichere Beläge.

Mit dem Einsatz der verschiedenen Bauweisen wollte man die Entwicklungen, die seit den 60-er Jahren in Deutschland in der Maschinen- und Materialtechnik stattfanden, für die technische und wirtschaftliche Optimierung der Ufersicherungen von Wasserstraße nutzen. In einigen Ausbauabschnitten wurden gleich mehrere Bauweisen angewendet, so dass hier die Ufersicherungen auf wenigen 100 m z. T. mehrfach wechseln.

Mittlerweile liegen für verschiedene Bauweisen für Ufersicherungen Erfahrungen hinsichtlich ihrer Langzeitbeständigkeit vor, die auch in den relevanten Regelwerken berücksichtigt sind.

3.2 Hydraulische Belastung

Durch ihre starke Motorisierung können moderne Schiffe ihre kritische Schiffsgeschwindigkeit erreichen. Messungen zeigen, dass die meisten Schiffe aus wirtschaftlichen Gründen etwas unterhalb der kritischen Schiffsgeschwindigkeit fahren (Fleischer et al., 2003). Die dabei entstehenden erheblichen hydraulischen Belastungen auf das Ufer sind in Bild 3 dargestellt.

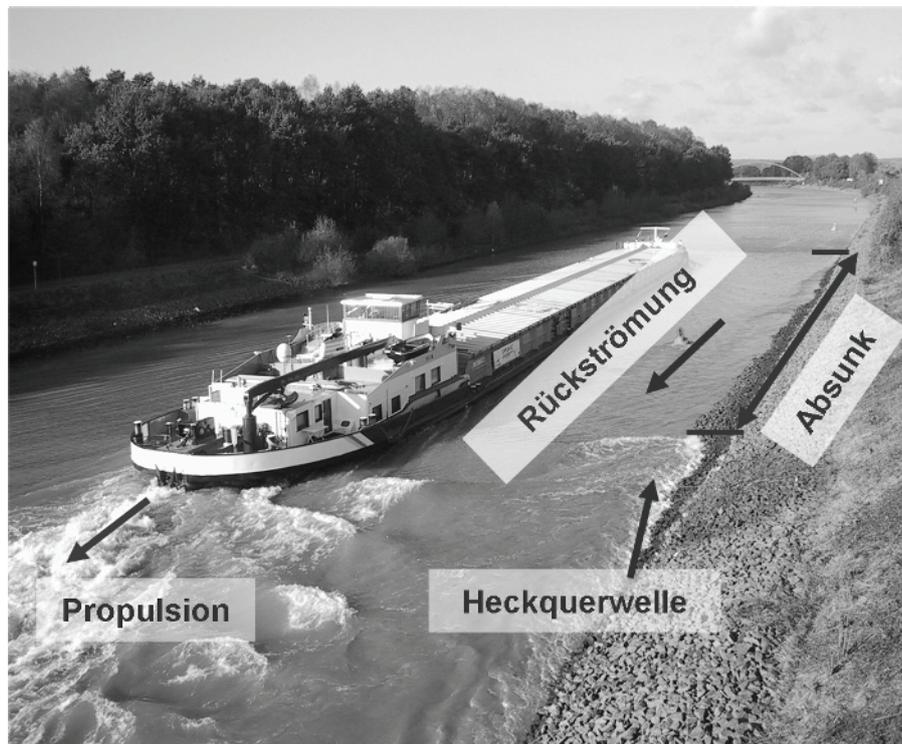


Bild 3: Schiffsinduzierte Wellen und Strömungsbelastung in einem Schifffahrtskanal

Durch die Wasserverdrängung des Schiffes entsteht im räumlich beschränkten Wasserquerschnitt eine Rückströmung, die entgegen der Fahrtrichtung wirkt. Infolge der Rückströmung sinkt der Wasserspiegel neben dem Schiffes ab, was als Absunk bezeichnet wird. Der Absunk wird auf der Höhe des Schiffeshecks durch die Heckquerwelle wieder aufgefüllt. Zusätzlich bewirkt der Schiffsantrieb eine Propulsionsströmung. Rückströmung, Heckquerwelle und Propulsion können zu Erosionen am Gewässerbett (Böschung und Sohle) führen. Der Absunk erzeugt Porenwasserüberdrücke im Boden, die zu Bodenverlagerungen und Böschungsinstabilitäten führen können (Holfelder, Kayser, 2006). Darüber hinaus bilden sich vom Bug und vom Heck Sekundärwellensysteme aus, die aber für die Dimensionierung von Böschungssicherungen von untergeordneter Bedeutung sind.

Bei der Planung von Ufersicherungen ist zu beachten, dass durch immer größere und stärkere Schiffe auch die hydraulische Belastung der Ufer weiterhin zunehmen wird. Dies ist anhand vergleichender Messungen am Wesel-Datteln Kanal aus 1982 und 2005 erkennbar (s. Bild 4). Dargestellt sind in einer Summenlinie die von den Schiffen erzeugten Absunkwerte, gemessen in den Jahren 1982 und 2005.

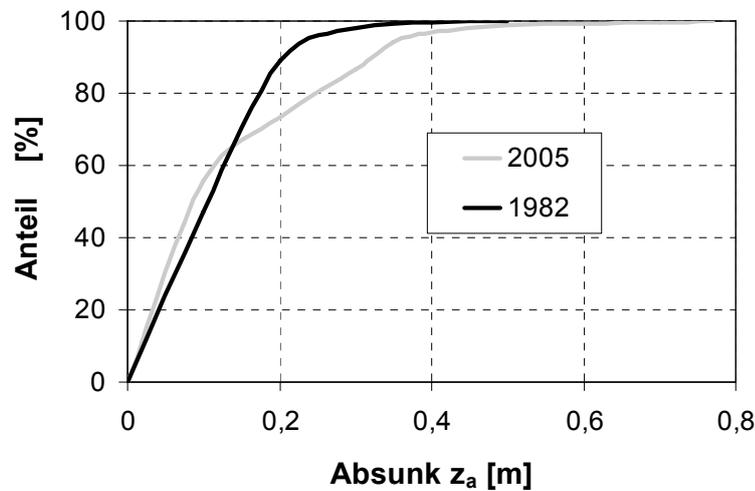


Bild 4: Vergleichende Messungen Absenk 1982 und 2005

Während 1982 der Anteil an Schiffen, die einen Absenk von über 20 cm erzeugten, bei ca. 10 % lag, hat sich dieser Anteil bis in 2005 auf 30 % erhöht. Der Maximalwert stieg von 50 cm auf 77 cm. Die hydraulische Belastung ist also im bemessungsrelevanten Bereich zwischen 1982 und 2005 stark angestiegen. Gleichzeitig wuchs in dem betreffenden Kanalabschnitt der Anteil am großen Rheinschiff mit 11,4 m Breite und entsprechend hoher Leistungsfähigkeit von 0 % auf ca. 20 %, d. h. der Zusammenhang zwischen größerem Schiffstyp und größerer hydraulischer Belastung ist deutlich erkennbar.

3.3 Ufersicherung mit Steinschüttungen

Die Sicherung von Ufern mit Steinschüttungen ist eine der ältesten Bauweisen, über die daher auch umfangreiche Erfahrungen vorliegen. Der grundsätzliche Aufbau einer Ufersicherung mit Steinschüttung ist in Bild 5 dargestellt. Die eigentliche stabilisierende Deckschicht besteht aus einer Schüttung mit Wasserbausteinen. Zur Verhinderung von Bodenerosion ist unter der Deckschicht ein Filter aus Mineralkorn oder ein geotextiler Filter vorzusehen. Für gedichtete Strecken kann an der Unterseite des Deckwerkes noch eine Dichtung, die meistens aus 20 bis 30 cm Ton besteht, eingebaut werden. Am Böschungsfuß ist das Deckwerk als Fußauflager i. d. R. in die Gewässersohle einzubinden.

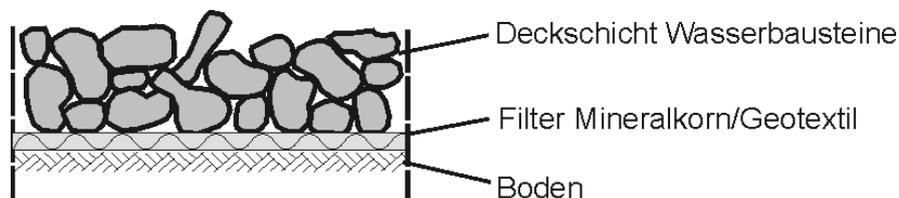


Bild 5: Schematischer Aufbau einer Ufersicherung mit Wasserbausteinen

Das Deckwerk muss einen auf die oben erläuterten hydraulischen Einwirkungen abgestimmten Widerstand besitzen. Dies wird durch eine ausreichende Gesamtdicke des Deckwerkes (Deckschicht mit Filter) und durch eine ausreichende Größe der Einzelsteine sichergestellt.

Durch den Absink entstehen im Boden Porenwasserüberdrücke, die sich im Grundwasserpotential durch überwiegend böschungsparell verlaufende Potentiallinien verdeutlichen lassen (s. Bild 6). Das Grundwasserpotential Φ berechnet sich in den böschungsparellen Potentiallinien nach

$$\Phi = \gamma_W \cdot h_W + \Delta u = \gamma_W \cdot h_W + \gamma_W \cdot z_a \left(1 - e^{-b \cdot t}\right)$$

mit h_W = geodätische Höhe des abgesenkten Wasserspiegels
 b = Porenwasserdruckparameter, i. w. abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens
 t = Tiefenordinate beginnend von der Unterkante des Deckwerks

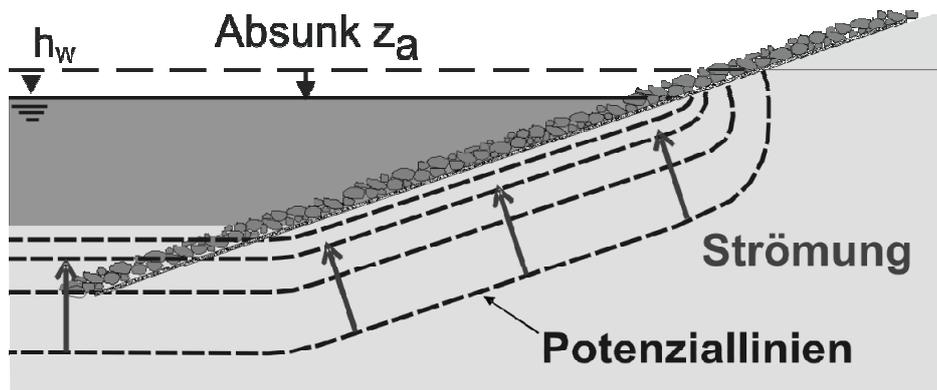


Bild 6: Potentiallinien in und Strömung während des schiffserzeugten Absinks

Das Grundwasser strömt während des Absinks senkrecht zu den Potentiallinien in Richtung des freien Wassers im Kanal. Die so entstehende Strömungskraft wirkt als Auftriebskraft statisch ungünstig, so dass die ungesicherte Böschung abrutschen oder auftreiben und sich in Folge dessen verformen kann. Die Aufgabe des Deckwerks ist es hier, durch eine ausreichende Auflast den Strömungskräften entgegen zu wirken und so die Stabilität der Böschung zu gewährleisten. Darauf ist die Dicke des Deckwerks zu bemessen.

Ebenso ist sicher zu stellen, dass die Wasserbausteine einen ausreichend großen Widerstand gegen die hydraulischen Einwirkungen besitzen, d. h. sie müssen groß bzw. schwer genug sein. Die Größe der Belastung hängt wesentlich von der Schiffsflotte, insbesondere dem Anteil an großen und leistungsfähigen Schiffen, von den Querschnittsverhältnissen und dem Fahrverhalten (Schiffsposition und Schiffsgeschwindigkeit) ab.

Für die Steinbemessung wird i. d. R. die Heckwelle relevant. Für die Berechnung der erforderlichen Steingröße D_{50} gibt es unterschiedliche Rechenvorschriften, die alle dem Hudson-Typ entsprechen. Im Rahmen von Langzeituntersuchungen wurde gezeigt, dass die Bemessungsformel

$$D_{50} = \frac{H_{Heck}}{1,5 \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) \cdot m^{1/3}}$$

D_{50} = 50% Siebdurchgang , ρ_s = Gesteinsdichte
 H_{Heck} = Höhe der Heckwelle , m = Böschungsneigung (2)

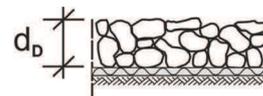
(aus (BAW, 2004)) sichere und wirtschaftlich gute Bemessungsgrößen liefert. Neue Bemessungskonzepte sehen vor, die Bemessung der Steingröße auf der Grundlage gewichteter Ergebnisse unterschiedlicher Rechenvorschriften zu ermitteln, um damit für die Steinbemessung eine breitere Basis hinsichtlich der Vielzahl bekannter Ansätze zu erhalten.

Zur Bemessung von Ufersicherungen mit Steinschüttungen wurde mit den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherung an Binnenwasserstraßen (GBB)“ 2004 (BAW, 2004) erstmals ein umfangreiches Regelwerk erstellt. Hierdurch wird insofern ein Qualitätssprung in der Planung von Deckwerken erreicht, als dass mit den Bemessungsregeln die Deckwerke nicht nur aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit den derzeit bekannten Belastungen, sondern darüber hinaus auch für prognostizierte leistungsfähige Schiffstypen sicher geplant werden können. Seit 2008 steht mit GBBSoft ein anwendungsorientiertes Rechenprogramm zur Bemessung von Deckwerken nach dem GBB zur Verfügung.

Aus dem GBB bzw. den Berechnungsergebnissen von GBBSoft wurden Regelbauweisen abgeleitet, die i. w. an den Kanälen der Wasserstraßenklasse V gelten, aber ggf. auch auf andere Wasserstraßen übertragbar sind. Diese Regelbauweisen stellen den heutigen Stand der Technik für technische Ufersicherungen an den modernen Wasserstraßen dar, der auch auf die zukünftig steigenden Belastungen ausgelegt ist. Die Regelbauweisen sind im „Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen MAR“ aus 2008 (BAW 2008) enthalten. Die Dimensionen der Standardbauweisen mit loser Steinschüttung für verschiedene Böden und Filterarten und Rohdichten der Wasserbausteine nach MAR zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Empfohlene Deckschichtdicken (lose Wasserbausteine) für Böschung und Sohle (BAW, 2008)

Rohdichte [kg/m ³]	WBSt-Klasse	Empfohlene Deckschichtdicken d_b [m] bei Fußeinbindung (Einbindetiefe: 1,50 m)					
		Böschung			Sohle		
		Geotextil nach MAG			Kornfilter nach MAK	Geotextil nach MAG	Kornfilter nach MAK
		B1, B2, B5*	B3	B4	alle Böden	alle Böden	alle Böden
2300	LMB _{10/60}	0,70	0,85	0,95	0,70	0,70	0,70
2650	LMB _{5/40}	0,60	0,70	0,80	0,60	0,60	0,60
3000	LMB _{5/40}	0,55	0,60	0,70	0,55	0,60	0,55
3600	CP _{90/250}	0,50	0,50	0,60	0,50	0,60	0,50



*B5 einschließlich Weichdichtungen

Umfangreiche Untersuchungen an bestehenden Deckwerken zeigen, dass der Unterhaltungsaufwand für Deckwerke mit ausreichend dimensionierten Deckschichten aus losen Wasserbausteinen bis zu 0,05 €/m² im Jahr beträgt, auch bei bereits über 40 Jahre alten Deckwerken. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von 0,2 % der Herstellkosten und ist somit sehr niedrig. Als ausreichend kann eine Bemessung für die Deckschichten angesehen werden, wenn sie die hydraulische Belastung bei 99 % der passierenden Schiffe abdeckt (Fleischer, Kayser, 2009).

Zur Erhöhung der Stabilität der einzelnen Wasserbausteine können diese auch mit Vergussmörtel (früher teilweise Asphaltmastix, heutzutage Zementmörtel) teilweise vergossen werden. Mit vergossenen Wasserbausteinen ist die erforderliche Konstruktionshöhe der Deckschicht kleiner als bei losen Wasserbausteinen, da durch den Verguss ein flächiges Tragwerk entsteht, das auftretende Hangabtriebskräfte im Gegensatz zur losen Deckschicht seitlich abträgt. Hinsichtlich der Verwendung in der freien Strecke sind teilvergossene und lose Deckschichten als technisch gleichwertig zu sehen. In Manövrierebereichen (z. B. Liegestellen, Schleuseneinfahrten) ist ggf. aufgrund des größeren hydraulischen Widerstandes eine teilvergossene Deckschicht häufig sinnvoller.

3.4 Ufersicherung mit Belägen

Bei Bauweisen mit Belägen wird i. d. R. ein erosionsfester Belag auf einer Filter- bzw. Trennschicht angeordnet. Sie wurden überwiegend in den 60-er bis 80-er Jahren des letzten Jahrhunderts gebaut. Zur Anwendung kamen

- Asphaltbauweisen als dichtes oder durchlässiges Deckwerk,
- Betonbauweisen als dichtes Deckwerk und
- Beläge mit Betonformsteinen als durchlässiges Deckwerk.

Der Vorteil dieser Bauweisen war die industrielle Vorfertigung des Deckwerks bzw. seiner Komponenten, was eine hohe Materialqualität ermöglicht. Die Dimensionierung von Bauweisen mit Belägen erfolgt i. d. R. nach Erfahrungswerten, Bemessungsansätze gibt es nur vereinzelt.

Asphaltbauweisen

Die größte Anwendung fanden Asphaltbauweisen im Neubau von Kanälen, da hier mit dem maschinellen Einbau mittels Straßenfertiger große Tagesleistungen möglich waren. Überwiegend wurden dichte Beläge aus Asphaltbeton in Schichtdicken zwischen 15 und 20 cm in Lagen von 6 bis 10 cm hergestellt.

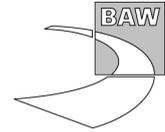
Im Dauerbetrieb zeigten sich in der Wasserstraße folgende Nachteile dieser Bauweise:

- Durch das relativ geringe Gewicht ist das Deckwerk empfindlich gegenüber erdseitigem Wasserdruck.
- Eine Reparatur ist sehr aufwändig, unter Wasser kaum möglich.
- Asphalt ist besonders bei niedrigen Temperaturen relativ hart. Durch eine gewisse Steifigkeit können Schadstellen unter dem Deckwerk überbrückt werden, bei Vergrößerung der Hohllage besteht die Gefahr eines plötzlichen unkontrollierten Einbruchs.
- Asphalt kann in großen Flächen nur im Trockenen eingebaut werden.
- Asphalt dichtungen bewachsen und durchwurzeln gut (s. Bild 7). Zwar zeigen Untersuchungen der BAW, dass die Dichtwirkung durch den Bewuchs zunächst nicht vollkommen verloren geht (Durchlässigkeitsbeiwert ca. $k = 6 \cdot 10^{-5}$ m/s), der Asphaltbeton sich jedoch mit zunehmender Durchwurzelung in Aggregate im cm-Bereich auflöst



Bild 7: Bewuchs einer Asphaltdichtung

Asphaltbauweisen finden bei neuen Baumaßnahmen im Verkehrswasserbau in Deutschland aus den o. g. Gründen so gut wie keine Verwendung mehr.



Betonbauweisen

Bauweisen für Deckwerke mit Beton können sein

- vollständig mit Mörtel vergossene Wasserbausteine (Vollverguss, Regelbauweise nach MAR) oder
- Betonbeläge.

Beide Bauweisen sind i. d. R. dicht. Aufgrund ihres geringen Eigengewichts sind sie jedoch anfällig gegen Wasserüberdruck z. B. bei hoch anstehendem Grundwasser. Betonbeläge sind sehr starr, so dass ggf. unter dem Belag auftretende Schäden erst spät entdeckt werden und daher zu einem schlagartigen Versagen führen können. Die Reparatur von Betonbelägen ist relativ aufwändig.

Beläge mit Betonformsteinen

Auch Beläge mit Betonformsteinen finden Verwendung in Wasserstraßen, häufig in Fließgewässern oberhalb des Niedrig- oder Mittelwassers bei steilen Böschungsneigungen von bis zu 1:1. Der Belag besteht entweder aus einem Steinssatz („Pflasterung“) oder aus Steinen im Verbund. Früher wurde der Steinsatz als klassische Pflasterung mit Natursteinen ausgeführt. Heutzutage kommen aus Kostengründen und aufgrund des leichteren Einbaus fast ausschließlich Betonformsteine zur Anwendung. Der Zusammenhalt der Steine untereinander wird beim Steinsatz durch die Reibung in den Fugen erzeugt. Bei Bauweisen mit Steinen im Verbund entsteht der Verbund der Einzelsteine untereinander mittels Drähten oder besonderer Ausformungen an den Steinelementen (z. B. Nasen und Aussparungen). Die Beläge werden auf einem geotextilen oder Mineralkorn-Filter verlegt, so dass ein durchlässiges Deckwerk entsteht.

Aufgrund des geringen Eigengewichts genügen die früher hergestellten Deckwerke mit Belägen aus Steinen häufig nicht mehr den heutigen Anforderungen in den Großschiffahrtskanälen. Beläge mit Steinsatz oder Steinen im Verbund werden i. d. R. nach Erfahrungswerten dimensioniert, Bemessungsregeln für den Einsatz im Binnenbereich existieren nicht.

3.5 Technisch-biologische Ufersicherungen

Bei den bereits beschriebenen rein technischen Deckwerken können ökologische Aspekte nicht immer wie gewünscht berücksichtigt werden. Bei vielen Baumaßnahmen - insbesondere in Gebieten von hohem naturschutzfachlichem Rang - haben neben den technischen Anforderungen jedoch auch ökologische Gesichtspunkte einen zunehmend größeren Stellenwert. Das bedeutet, dass bei Unterhaltung, Aus- und Neubau von Wasserstraßen zunehmend auch technisch-biologische Ufersicherungsmethoden anzuwenden sind. Eine besondere Bedeutung werden technisch-biologische Ufersicherungen hinsichtlich der Realisierung von Maßnahmen zur Verbesserung von Gewässerstrukturen im Rahmen der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) erhalten.

Es können herkömmliche, rein technisch geprägte Ufersicherungen durch technisch-biologische Methoden ergänzt oder sogar ersetzt werden. Beispiele für technisch-biologische Ufersicherungen sind Lahnungen, im Wasserwechselbereich begrünte KRT-Profile, begrünte Deckwerke oder rein vegetative Sicherungen. Eine systematische Verwendung technisch-biologischer Bauweisen gibt es derzeit noch nicht. In Einzelmaßnahmen konnten jedoch bereits Erfahrungen mit entsprechenden Bauweisen gesammelt werden.

4 Weiterentwicklungen für den Entwurf von Ufersicherungen

4.1 Weiterentwicklungen für Ufersicherung mit Steinschüttungen

Mit den Regelwerken GBB (BAAW 2004) in Verbindung mit der Software GBBSoft und MAR (BAW 2008) ist eine gute Basis für die Dimensionierung von Ufersicherungen mit Steinschüttungen an Binnenwasserstraßen vorhanden. Eine zukünftige Aufgabe wird es sein, die Bemessungsregeln weiter zu optimieren. Die Erfahrungen in der Bemessung von losen Steinschüttungen sind gezielt auszuwerten und zusammen mit den Erfahrungen aus dem Betrieb hergestellter Deckwerke systematisch auszuwerten. Entsprechen-

de Untersuchungen laufen bereits in einem Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Wasserbau (Fleischer, Kayser, 2009).

Der Fokus der Regelwerke lag zunächst auf der Anwendung in Kanälen, d. h. in Gewässern ohne natürliche Strömungsbelastung. Ein zunehmender Bedarf an der Dimensionierung sicherer und wirtschaftlicher Deckwerke ist an staugeregelten und frei fließenden Gewässern erkennbar. Entsprechende Anpassungen wurden bereits in der Software GBBSOft implementiert und werden auch in der derzeitigen Überarbeitung des GBB berücksichtigt. Wesentliche Punkte sind hier die Berücksichtigung unregelmäßiger Gewässergeometrien, die Abbildung der Strömungsverhältnisse in den Fließgewässern und das Fahrverhalten der Schiffe. Der Erfahrungsschatz in der Anwendung des GBB an Fließgewässern ist noch relativ gering und ist daher zukünftig systematisch zu erweitern. Aus dieser Basis und mit Hilfe weiterer Naturuntersuchungen wie Schiffsbeobachtungen sowie Strömungs- und Wellenmessungen sind die Bemessungsregeln technisch und wirtschaftlich für Fließgewässer zu optimieren.

4.2 Weiterentwicklungen für Bauweisen mit Betonformsteinen

Bauweisen mit Betonformsteinen werden wie bisher auch zukünftig überwiegend bei steilen Böschungen oberhalb des Niedrigwassers in Fließgewässern zur Anwendung kommen. Sie können auch als partielle Ergänzung zu natürlichen Bauweisen eingesetzt werden. Je nach geographischer Lage kann es auch sehr aufwändig sein, qualitätsgerechte Wasserbausteine für den Bau und die Unterhaltung der Wasserstraßen zur Verfügung zu stellen. Auch hier könnten Bauweisen mit Betonformsteinen eine Alternative darstellen.

Für die wirtschaftliche Dimensionierung von Betonformsteinen ist es sinnvoll, Bemessungsregeln auf die hydraulische Belastung in Binnengewässern aufzustellen. Eine wesentliche, noch weitgehend unbekannt Größe ist hierbei der Ansatz des Verbundes der Steine untereinander („Interlocking“). Die internen Kräfte sorgen dafür, dass die einzelnen Steine des Deckwerks untereinander kraftschlüssig verbunden sind und somit als Flächentragwerk wesentlich stabiler sind als ein Einzelstein (s. Bild 8). Somit können die auf den Einzelstein sowohl durch den Absink des Kanalwasserspiegels (dargestellt in Bild 8) als auch durch die anschließende Heckquerwelle induzierten Liftkräfte (F_{Lift}) über die Verbundkräfte (F_{Inter}) und das Eigengewicht (G) sicherer abgetragen werden.

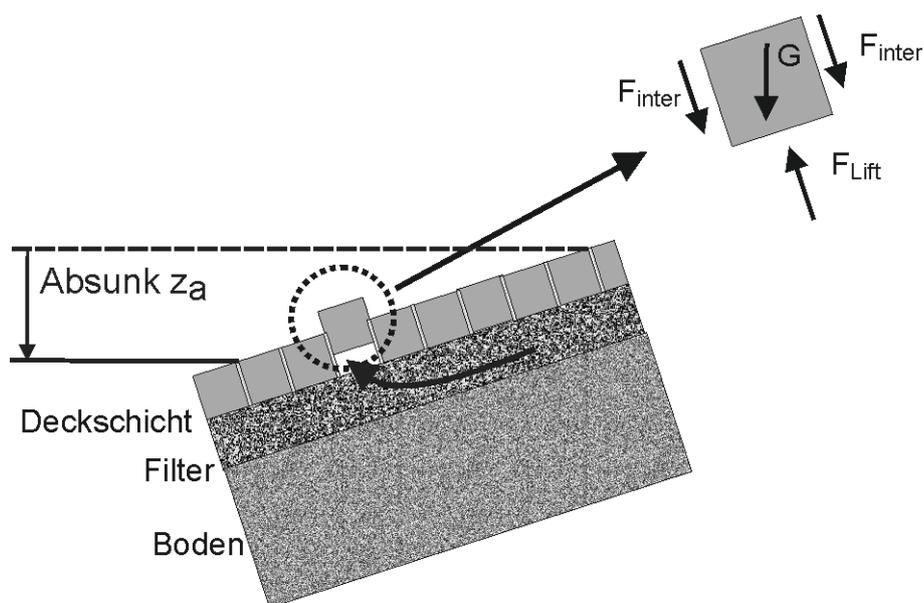


Bild 8: Stabilität des Einzelsteins im Verbund

4.3 Weiterentwicklungen für technisch-biologische Sicherungen

Zu technisch-biologischen Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen gibt es bisher nur wenig Erfahrungswerte und keine Bemessungsregeln. Systematische Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit von technisch-biologischen Ufersicherungen bei Einwirkungen aus Schifffahrt werden seit 2004 von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) durchgeführt. Es wird die Anwendbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen an Wasserstraßen unter technischen, ökologischen und naturschutzfachlichen Gesichtspunkten untersucht. Langfristiges Ziel ist es, den planenden Ingenieuren fundierte Grundlagen (Bemessungsregeln) und Empfehlungen zur Anwendung technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zur Verfügung zu stellen.

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) hat bereits verschiedene Versuchsstrecken eingerichtet, an denen Vegetationskomponenten eingebaut und beobachtet werden. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchsstrecken werden derzeit von der BAW und der BfG gebündelt ausgewertet.

Die weiterführenden Untersuchungen basieren auf den Erfahrungen an der Wasserstraße, erfordern aber auch Modell- und Laborversuche zur Schaffung einer detaillierten wissenschaftlichen Grundlage für die Bemessung der technisch-biologischen Ufersicherungen.

Für das Frühjahr 2010 ist die Einrichtung einer Versuchsstrecke am Rhein geplant, an der verschiedene technisch-biologische Bauweisen getestet werden sollen.

Ergänzend dazu sind in der BAW Untersuchungen zur Verbesserung der Erosionsstabilität von Böschungen mittels technisch-biologischer Maßnahmen angelaufen. In Modellversuchen (u. a. in einem Wellenbecken und anderen 1:1 Modellen) und in Laborversuchen ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Vegetation auf die hydraulischen Einwirkungen hat (z. B. Wellendämpfung, Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten) und inwieweit Pflanzen und deren Wurzeln den Erosionswiderstand des Bodens erhöhen.

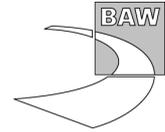
4.4 Rückbau von Ufersicherungen

Eine Variante der Umgestaltung von Ufern, die zukünftig sicherlich in erhöhtem Maß gefordert sein wird, ist der Rückbau von Böschungssicherungen. Das Ufer wird nach dem Rückbau der natürlichen Sukzession überlassen, wodurch sich die Böschungen deutlich abflachen und daher erhebliche Flächen im Hinterland beansprucht werden.

Es gibt derzeit keine Prognoseverfahren für die Abflachung der Böschung unter schiffserzeugter hydraulischer Belastung. Es besteht ein Zusammenhang zwischen den bodenmechanischen Eigenschaften des Bodens (Reibungswinkel φ , Rohdichte ρ_s , Kornverteilung mit 50-% Durchgang D_{50}) sowie der hydraulischen Belastung (Absenk und Sekundärwellen, Wellenhöhe H_{Welle} bzw. Wellenlänge λ) und der sich natürlich einstellenden Böschungsneigung. In Analogie zu entsprechenden Ansätzen aus dem Küstenschutz wird für den Böschungswinkel des ungeschützten Ufers β von einem Zusammenhang der Form

$$\cot \beta = \cot \varphi' + \left(\frac{K}{\rho_s'} \cdot \frac{H_{\text{welle}}}{D_{50, \text{Boden}}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Welle}}}{H_{\text{Welle}}}} \right)^A \quad \text{mit } K = \text{Beiwert}, A = \text{Beiwert} = f(H_{\text{Welle}}/D_{50}) \quad (1)$$

ausgegangen. Untersuchungen zur Uferabflachung durch schiffserzeugte Wellen müssen die relevanten Kennwerte der Wellen berücksichtigen. Zu hinterfragen sind ebenso die bodenmechanischen Parameter hinsichtlich ihrer Bedeutung der Fragestellung, ggf. sind noch ergänzende charakteristische Bodenparameter zu betrachten. Die für an die Verhältnisse von Binnenwasserstraßen angepassten Beiwerte (hier K und A benannt) sind empirisch zu ermitteln.



5 Zusammenfassung

Wasserstraßen und ihre Ufersicherungen haben sich im Laufe der Zeit weiterentwickelt und werden dies auch zukünftig weiter tun. Als langlebig und wirtschaftlich haben sich Bauweisen mit Deckschichten aus losen Wasserbausteinen erwiesen und wurden daher auch als Standardbauweisen im MAR 2008 bestätigt. Durch die Weiterentwicklung der Bemessungsansätze mit dem Fokus auf die Anwendung in Fließgewässern kann die Anwendung von Bauweisen mit losen Steinschüttungen weiter optimiert werden.

Weitere technische Bauweisen wie vergossene Wasserbausteine oder Deckschichten mit Steinsatz bzw. Steinen im Verbund werden auch zukünftig Anwendung finden, insbesondere unter hoher hydraulischer Belastung oder bei steilen Böschungsneigungen über 1:2.

Zukunftsweisend für die Sicherung von Ufern sind gezielt eingesetzte naturnahe, technisch-biologische Bauweisen unter Verwendung eines möglichst hohen Anteils vegetativer Elemente. Hinsichtlich des komplexen Zusammenhangs zwischen Vegetation, hydraulischer Belastung und Widerstandsfähigkeit des durchwurzelten Bodens besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, um wissenschaftlich-technisch fundierte Bemessungsregeln und die Anwendungsgrenzen der technisch-biologischen Bauweisen festlegen zu können.

Literatur

- AG Kanalsohlen (1987): Schlussbericht über den Zustand der Kanalsohle und Deckwerksfüße der Nord- und Westdeutschen Kanäle sowie über die möglichen Auswirkungen einer Vergrößerung der zulässigen Abladetiefe von 2,50 auf 2,80 m, Arbeitsgruppe Kanalsohlen, Karlsruhe 1987
- Bartnik, W. (1988): Entwicklung und Stand der Deckwerksbauweisen im Bereich der WSD West, in: Tagungsband zum BAW-Kolloquium „Deckwerke“, Karlsruhe 1988
- BAW (1993): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR), Karlsruhe 1993
- BAW (2004): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, Karlsruhe 2004
- BAW (2008): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR), Karlsruhe 2008
- BMV (1949): Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen der Wasserstraßen, Bundesverkehrsministerium, Offenbach 1949
- Fleischer, P.; Kayser, J.; Thyßen H. J. (2003): Erfahrungen mit Deckwerken an Bundeswasserstraßen, HANSA, International Maritim Journal, 140. Jg., Nr. 12, Hamburg, 2003
- Fleischer, P.; Kayser, J. (2009): Erfahrungen mit Deckwerke an Binnenwasserstraßen, Vortragsband zum HTG-Kongress 9. bis 11. Sept. 2009 in Lübeck,
- Holfelder, T.; Kayser, J. (2006): Berücksichtigung von Porenwasserüberdrücken bei der Bemessung von Deckwerken an Wasserstraßen, Tagungsband „Geotechnik-Tag 2006“, N. Vogt (Hrsg.), TU München, München, 2006
- ICOMOS (1996): The International Canal Monument List, Paris, 1996
- Uhlemann, H.-J. (1994): Berlin und die Märkischen Wasserstraßen, DSV-Verlag, Hamburg, 1994

