5.2 Planen mit der Natur - Böschungs- und Ufersicherung

Erfahrungen mit Deckwerken an Binnenwasserstraßen in Deutschland

Dipl.-Ing. Petra Fleischer
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dr.-Ing. Jan Kayser
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Ufer und teilweise auch Sohlen der Binnenwasserstraßen in Deutschland werden in weiten Bereichen konstruktiv gesichert, um Schäden infolge betriebsbedingter und natürlicher Einwirkungen zu vermeiden. Bei der Wahl der Sicherungsmaßnahmen ist neben den Sicherheitsaspekten auch die Wirtschaftlichkeit der Bauweisen zu berücksichtigen. In der Regel werden die Ufer und falls erforderlich auch die Sohlen mit Deckwerken gesichert, für die es eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionen gibt, die sich i. w. in der Art der Deckschicht unterscheiden. Überwiegend werden in Deutschland Deckwerke mit Deckschichten aus losen Wasserbausteinen auf einer Filterschicht angewendet. In Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung sind diese Deckwerke hinsichtlich der erforderlichen Schichtdicke und der notwendigen Größe bzw. des notwendigen Gewichtes der Einzelsteine zu bemessen. 2004 wurden die Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen in einem umfangreichen Regelwerk zusammengestellt /GBB, 2004/.

Um vermehrt auch praktische Erfahrungen mit vorhandenen Deckwerken an Wasserstraßen sammeln und auswerten zu können, werden von der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe seit etwa 10 Jahre systematisch bestehende Deckwerke untersucht. In ausgewählten Streckenabschnitten werden der Zustand der Deckwerke und die gegebenen Randbedingungen erfasst. Die hydraulischen Belastungen werden gemessen und daraus die erforderlichen Deckwerksabmessungen ermittelt. Die berechneten Deckwerke werden mit den aktuell vorhandenen Deckwerken unter Berücksichtigung des vorgefundenen Zustands und des Unterhaltungsaufwandes verglichen. Die Ergebnisse erlauben gleichzeitig eine Validierung der theoretischen Berechnungsgrundlagen.

Im folgenden Beitrag werden anhand der 2006 durchgeführten Untersuchungen an Deckwerken in der Nordstrecke der Dortmund-Ems-Kanals Messergebnisse und Berechnungsergebnisse nach /GBB, 2004/ gegenüber gestellt und bewertet. Die hydraulischen Einwirkungen wurden einerseits vor Ort gemessen und andererseits aus den gegebenen Randbedingungen theoretisch berechnet. Zum Teil noch vorhandene Defizite und Grenzen der Bemessungsgrundlagen werden anhand des Beispiels aufgezeigt und bewertet.

1. Einführung

In Deutschland gibt es ca. 6600 km Binnenwasserstraßen, davon sind etwa 41 % staugeregelte Flussstrecken, 35 % frei fließende Flussstrecken und 24 % künstliche Wasserstraßen (Kanäle). Die Schifffahrt führt zu maßgeblichen hydraulischen Belastungen der Ufer- und Sohlenbereiche der Wasserstraßen. In Flüssen erfolgt eine zusätzliche hydraulische Belastung durch Hochwasser. Die Ufer und zum Teil auch die Sohlenbereiche sind deshalb in der Regel konstruktiv - beispielsweise durch Deckwerke aus Wasserbausteinen - geschützt. Mit der Weiterentwicklung im Schiffsbau stehen zunehmend größere Schiffe mit leistungsstärkeren Antrieben zur Verfügung, die dementsprechend zu größeren Belastungen der Ufer und gegebenenfalls der Sohle führen. Um die Weiterentwicklung des umweltfreundlichen Schiffsverkehrs nicht zu behindern, müssen die Querschnitte der Wasserstraßen sukzessiv dieser Entwicklung folgen und den neuen Schiffen angepasst werden. Einer hinsichtlich Standsicherheit und Kosten optimalen Bemessung der erforderlichen Deckwerke auf die jeweiligen Belastungen infolge Schifffahrt kommt dabei aufgrund des großen Investitionsvolumens der Ufersicherungen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ein hoher Stellenwert zu.

Seit etwa 10 Jahren werden die Erfahrungen mit verschiedenen Deckwerkskonstruktionen an deutschen Wasserstraßen im Rahmen eines Forschungsprojektes der Abteilung Geotechnik der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe systematisch ausgewertet. Parallel dazu wurden die theoretischen Ansätze zur Deckwerksbemessung in einem Regelwerk „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)“ zusammengestellt /GBB, 2004/. Durch Berücksichtigung der umfangreichen praktischen Erfahrungen konnten die theoretischen Ansätze weiter validiert und angepasst werden.

Auf den Ergebnissen von /Fleischer, Kayser, 2006/ aufbauend, wird im folgenden Beitrag ein Überblick zum aktueller Stand der Deckwerksbemessung in Deutschland gegeben. Messergebnisse zur hydraulischen Uferbelastung, ermittelt 2006 im Rahmen umfangreicher Untersuchungen an vorhandenen Deckwerken im Bereich des Dortmund-Ems-Kanals (DEK), werden mit den Ergebnissen theoretischer Berechnungen nach /GBB, 2004/ verglichen und bewertet.

2. Randbedingungen für Deckwerksbemessungen in Deutschland

Um einen einheitlichen Standard zu gewährleisten, werden Binnenwasserstraßen in Deutschland in Klassen (Klasse „I“ bis „VI“) eingeteilt. Grundlage der Klassifizierung sind die Abmessungen der für diese Wasserstraßen in Abhängigkeit der vorhandenen Wasserstraßenquerschnitte jeweils zugelassenen Schiffstypen. Das heißt, es existieren in Deutschland Wasserstraßen mit ganz unterschiedlichen Abmessungen und dementsprechend unterschiedlichen hydraulischen Uferbelastungen. Die wichtigsten Kanalstrecken, wie z. B. der Mittellandkanal (MLK) und der Dortmund-Ems-Kanal (DEK), werden gegenwärtig entsprechend den Anforderungen der Wasserstraßenklasse Vb für das Befahren von Großmotorgüterschiffen mit maximalen Abmessungen von 135 m Länge und 12 m Breite und Schubverbänden mit einer Länge von 185 m und einer Breite von 11,45 m ausgebaut, d.h. in ihrem Querschnitt erweitert. Die größte zugelassene Abladetiefe beträgt 2,80 m. Für diese Wasserstraßenklasse gibt es als Regelquerschnitt das Trapezprofil (T) mit beidseitig geneigten

Ufern und das Rechtecktrapezprofil (RT) mit einem geböschten und einem senkrechten Ufer, das in der Regel mit einer Spundwand ausgeführt wird. Die Abmessungen im Einzelnen zeigt die Tabelle 1. Das Querschnittsverhältnis n (Verhältnis des Wasserstraßenquerschnitts zum eingetauchten Schiffsquerschnitt) beträgt hier etwa 5,2.

Profil	Wasserspiegelbreite	Wassertiefe	Böschungsneigung	
			1. Ufer	2. Ufer
	[m]	[m]	[-]	
T	55,0	4,00	1:3	1:3
RT	48,5	4,00	1:3	∞

Tabelle 1: Regelquerschnitt für Wasserstraßenklasse Vb (MAR, 2008)

Daneben gibt es auch Wasserstraßen mit kleineren Querschnitten wie beispielsweise die Müritz-Elde-Wasserstraße (Wasserstraßenklasse I, zugelassen nur für Sport- und Fahrgastschiffe) oder die Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals (DEK) nördlich von Bergeshövede (Wasserstraßenklasse IV, zur Zeit zugelassen für Europaschiffe mit den Abmessungen 95 m x 9,60 m und einer Abladetiefe von maximal 2,70 m), die 1950 bis 1960 zuletzt ausgebaut wurde. Das Querschnittsverhältnis n, das maßgeblich die hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt beeinflusst, beträgt unter Berücksichtigung der heute in diesem Abschnitt zugelassenen Schiffe nur etwa 4,1.

Zu nennen sind außerdem Flussabschnitte, wie beispielsweise die Untere Havel-Wasserstraße, in denen sich enge kanalartige Querschnitte mit Aufweitungen bis hin zu seenartigen Erweiterungen abwechseln. Das Querschnittsverhältnis n und dementsprechend auch die hydraulische Uferbelastung infolge Schifffahrt variieren auf kurzen Abschnitten sehr stark. Das bedeutet, hier ist eine sehr differenzierte Betrachtung bei der Deckwerkbemessung erforderlich.

Ein neuer Gesichtspunkt bei der Bemessung von Deckwerken hat sich mit dem Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) 2000 ergeben, nach der insgesamt ein stärker ökologisch ausgerichteter, ganzheitlicher Gewässerschutz erreicht werden soll. Das Ziel besteht u.a. darin, bis 2015 bei oberirdischen Gewässern einen guten ökologischen und chemischen Zustand bzw. bei erheblich veränderten künstlichen Gewässern ein gutes ökologisches Potential zu erreichen. Leitbild ist der natürliche Gewässerzustand. Neben der Wiederanbindung von Altarmen geht es u.a. um stärkere Berücksichtigung ökologischer Aspekte beim Uferschutz. Das bedeutet, dass bei bestehenden Deckwerken zu prüfen ist, inwieweit ein Rückbau der Deckwerke möglich ist oder die Deckwerke durch nachträgliche Begrünung oder Bepflanzung ökologisch aufgewertet werden können. Bei Neu- und Ausbauvorhaben wird zunehmend von vornherein die Möglichkeit der Anwendung von biologischen oder technisch-biologischen Ufersicherungen als Alternative zum rein technischen Deckwerk geprüft. Wichtige Grundlage für diese Entscheidungen sind auch hier zunächst die Berechnungsansätze für technische Deckwerke. Weitergehende Empfehlungen für die Anwendung alternativer naturnaher Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen werden gegenwärtig in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erarbeitet. Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind unter www.baw.de veröffentlicht.

Die Randbedingungen und Zielstellungen für die Planung und Ausführung von Deckwerken an Binnenwasserstraßen sind dementsprechend nicht feststehend, sondern permanent in der Entwicklung. Das erfordert differenzierte, auf die jeweiligen Randbedingungen zugeschnittene Bemessungen und demzufolge allgemeingültige, breit anwendbare Bemessungsgrundlagen.

3. Grundlagen für die Bemessung von Deckwerken

3.1 Aktuelle Regelwerke

Der aktuelle Stand der theoretischen Grundlagen für die Deckwerksbemessung an Binnenwasserstraßen (GBB) wurde 2004 in einem Mitteilungsblatt der BAW veröffentlicht /GBB, 2004/. Damit steht dem planenden Ingenieur ein umfassendes Formelwerk zur Verfügung, mit dem unter den jeweils gegebenen geometrischen Randbedingungen die hydraulische Belastung an Ufer und Sohle infolge der zu erwartenden Schifffahrt ermittelt werden kann. Mit diesen Ausgangsgrößen können unter Beachtung der Ufer- und Sohlgeometrie und der anstehenden Böden Deckwerke für den konkreten Anwendungsfall bemessen werden. Am häufigsten werden an deutschen Wasserstraßen Deckwerke aus losen, aber auch teil- oder vollvergossenen Wasserbausteinen eingesetzt, die als durchlässige oder dichte Deckwerke ausgebildet werden können (siehe Bild 1).

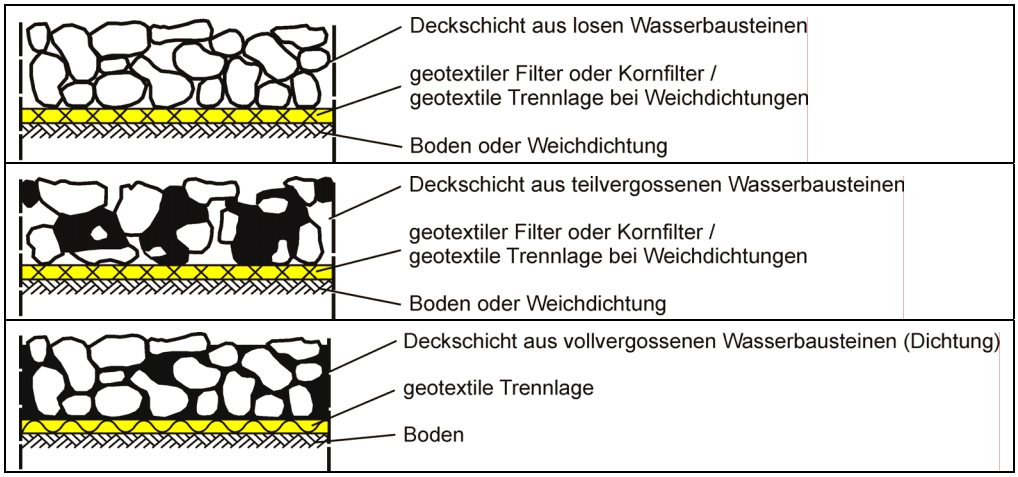

Bild 1: Regelbauweisen für Deckwerke /MAR, 2008/

Zur Vereinfachung der Anwendung der theoretischen Grundlagen für die Deckwerksbemessung /GBB, 2004/ wurden die Berechnungsalgorithmen zusätzlich in einer Software „GBBSoft“ umgesetzt, die allen Interessierten zur Verfügung steht (nähere Informationen unter www.baw.de). Speziell für die Wasserstraßen der Klasse Vb (siehe Kapitel 2) wurde 2008 das Merkblatt für die Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen /MAR, 2008/ überarbeitet. Die Dimensionierung der dort beschriebenen Regelbauweisen erfolgte auf Basis der aktuellen Bemessungsgrundlagen mit Hilfe von „GBBSoft“. Damit steht für die aktuellen Ausbauvorhaben am deutschen Kanalnetz zusätzlich eine konkrete Empfehlung für die Deckwerksbemessung auf dem neuesten Stand der Technik zur Verfügung.

Die Bemessungsansätze des GBB werden auch weiterhin anhand von Messergebnissen aus der Praxis überprüft und validiert. Im Folgenden wird am Beispiel von Untersuchungen im nördlichen Bereich des Dortmund-Ems-Kanals (DEK) gezeigt, wie die theoretischen Bemessungsansätze im Vergleich zu den aktuellen Messergebnissen zu bewerten sind.

3.2 Hydraulische Deckwerksbelastungen infolge Schifffahrt

Bei der Betrachtung der hydraulischen Belastungen der Ufer- und Sohlenbereiche infolge Schifffahrt ist zu unterscheiden zwischen dem mit etwa gleichmäßiger Geschwindigkeit fahrenden Schiff in einem Wasserstraßenabschnitt („Kanalfahrt“) und dem in Vorhäfen, Liegestellen o.ä. anfahrenden oder abbremsenden, d.h. dem manövrierenden Schiff mit einer Geschwindigkeit von nahezu Null („Manövrierfahrt“). In beiden Fällen sind unterschiedliche hydraulische Einwirkungen für die Bemessung einer Ufer- und Sohlsicherung relevant.

Ein Schiff, das mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch die Wasserstraße (“Kanalfahrt”) fährt, erzeugt durch die hydraulische Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße lokale und temporäre Veränderungen der Wasseroberfläche und der Strömungen unter und neben dem Schiff. Es entstehen Wellen und schiffsinduzierte Strömungen, die als hydraulische Belastungen auf Ufer und Sohle des Gewässers wirken (Bild 2).

Während der „Kanalfahrt“ eilt dem fahrenden Schiff auf ca. einer Schiffslänge eine Wasserspiegelanspannung von wenigen Zentimetern voraus (Kolbeneffekt). Dem Bug direkt wandert ein Aufstau (Bugstau) vorher. Während der Passage des Schiffs reduziert sich der Fließquerschnitt im Bereich des Schiffes, dadurch kommt es zu einer Verdrängungsströmung (Rückströmung) zum Heck hin. Diese nimmt erst in einem größeren Abstand zum Schiff - etwa 1/2 Schiffslänge - ab. Die Rückströmung bedingt eine Absenkung des Wasserspiegels neben dem Schiff (Absunk). In diese Absunkmulde sinkt das Schiff ein, was als Squat (fahrdynamisches Einsinken) bezeichnet wird. Am Heck des Schiffes gleichen sich die Abflussverhältnisse wieder aus. Das ist mit einer Wasserspiegelanhebung, der Heckquerwelle und einer Wiederauffüllungsströmung (mitlaufender Rollbrecher) verbunden (siehe Bild 2). Diese gesamte Abfolge aus Bugwelle, Absunkmulde und Heckwelle längsseits des Schiffes wird als Primärwelle bezeichnet. Die Wellenlänge entspricht etwa der Schiffslänge.

An Bug und Heck des Schiffes entstehen gleichzeitig aufgrund der Konturänderungen regelmäßige, kurzperiodische Wellen, die Sekundärwellen. Diese Wellen sind zum einen Schrägwellen, die sich mit einem Winkel zur Schiffsachse ausbreiten, zum anderen Querwellen, annähernd senkrecht zur Schiffsachse orientiert. Die Überlagerung beider Systeme erzeugt eine Interferenzlinie, die abhängig von der Fahrgeschwindigkeit einen charakteristischen Winkel zur Schiffsachse aufweist.

Alle genannten schiffsinduzierten Belastungen werden umso größer, je kleiner das Querschnittsverhältnis n (Verhältnis des Wasserstraßenquerschnitts zum eingetauchten Schiffsquerschnitt) ist und je schneller und näher am Ufer das Schiff fährt.

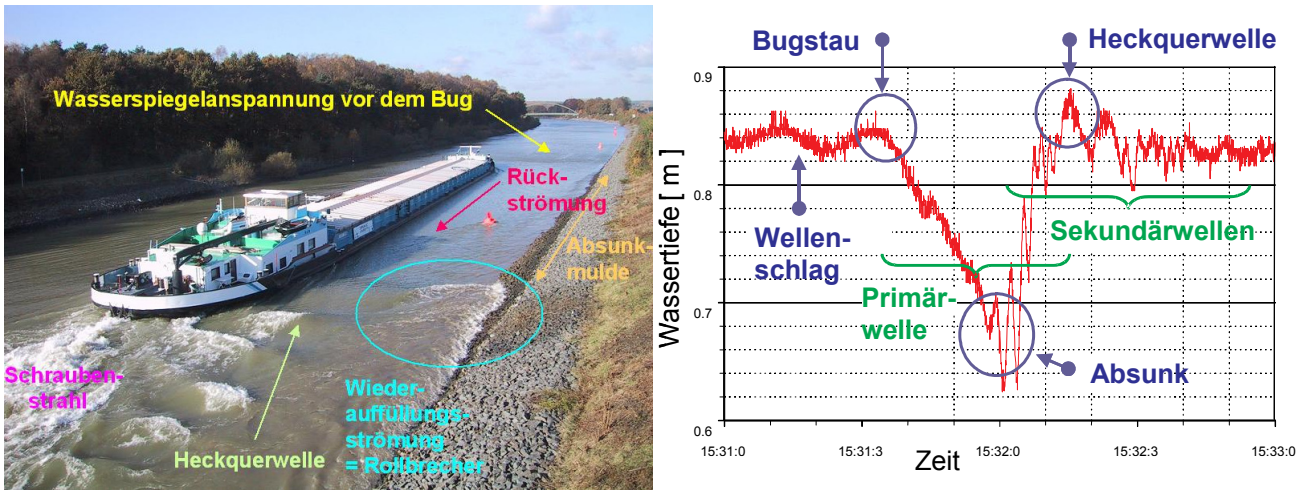

Bild 2: Schiffserzeugte Wellen und Strömungen während der „Kanalfahrt“ - rechts: am Ufer gemessene Wasserspiegelauslenkung während einer Schiffspassage

Für die Deckwerksbemessung maßgebende Kenngrößen der hydraulischen Einwirkungen, die sich aus der „Kanalfahrt“ ergeben, sind der Bugabsunk ($z_{a,B}$) bzw. der Heckabsunk ($z_{a,H}$), die sich aus der Bugwellenhöhe ($H_{u,Bug}$) bzw. der Heckwellehöhe ($H_{u,Heck}$) ergeben, und die dazu gehörigen Absunkgeschwindigkeiten ($t_{a,B}$ und $t_{a,H}$) (siehe Bild 3). Die Berechnung dieser Größen kann nach /GBB, 2004/ erfolgen.

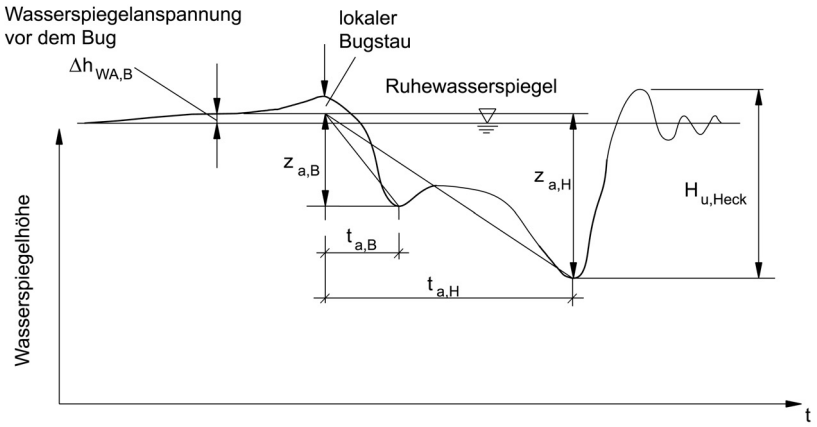

Bild 3: Hydraulische Belastungskenngrößen nach /GBB, 2004/

Bei ufernaher Fahrt kann unter Umständen zusätzlich die maximale Strömungsgeschwindigkeit maßgebend für die Deckwerksbemessung sein. Das ist die Strömungsgeschwindigkeit infolge Rückströmung unter und neben dem Schiff, die sich ggf. mit der natürlichen Strömung im Gewässer überlagert, oder die Wiederauffüllungsströmung am Ufer. Auch diese Größen können nach /GBB, 2004/ berechnet werden.

Im Gegensatz zur „Kanalfahrt“ ergeben sich die maßgebenden hydraulischen Einwirkungen während der „Manövrierfahrt“ durch die Antriebs- und Steuerorgane mit dem zugehörigen Schraubenstrahl. Der Schraubenstrahl kann aufgrund seiner hohen Strömungsgeschwindigkeit und der hohen Turbulenz beim Manövrieren beträchtliche Belastungen erzeugen. Ein Wellenbild - wie bei der „Kanalfahrt“ - tritt nicht auf. Maßgebende Bemessungskenngröße für die Deckwerksbemessung in diesen Bereichen ist dementsprechend die Strömungsgeschwindigkeit, die lokal infolge Propulsion auftreten kann. Manövrierbereiche wie Vorhäfen und Liegestellen werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

3.3 Dimensionierung von Deckwerken aus Wasserbausteinen nach GBB

Die hydraulischen Einwirkungen infolge Schifffahrt müssen bei der Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen sowohl aus geotechnischer als auch aus hydraulischer Sicht berücksichtigt werden. Durch den schnellen Wasserspiegelabsunk ($z_{a,B}$/ $z_{a,H}$ - siehe Bild 3) können Porenwasserüberdrücke im anstehenden Baugrund hervorgerufen werden, die das erforderliche Flächengewicht für ein aus geotechnischer Sicht standsicheres Deckwerk maßgeblich beeinflussen. Die Größe des Porenwasserüberdrucks hängt neben der Größe des Wasserspiegelabsunks und der Absunkgeschwindigkeit maßgeblich von dem unter dem Deckwerk anstehenden Boden, insbesondere von dessen Durchlässigkeit und Scherfestigkeit ab /Kayser, Holfelder, 2006/.

Die Wellen- und Strömungsbelastungen können außerdem zu einer Verlagerung von einzelnen Wasserbausteinen einer losen Steinschüttung führen. Eine Dimensionierung der erforderlichen Einzelsteingröße bzw. des Einzelsteingewichtes ist dementsprechend erforderlich. Bei teil- und vollvergossenen Wasserbausteinen wird die Lagestabilität der einzelnen Steine durch den Vergussstoff gewährleistet, der Nachweis einer erforderlichen Einzelsteingröße ist in diesem Fall nicht notwendig.

Neben der Dimensionierung der Deckwerke selbst ist immer auch die Gesamtstandsicherheit der mit einem Deckwerk gesicherten Böschung nach DIN 4084 nachzuweisen.

Alle Berechnungsgrundlagen sind im Detail ausführlich in /GBB, 2004/ dargestellt. Als Grundlage für die weiteren Ausführungen werden an dieser Stelle die wichtigsten erforderlichen Nachweise für die Bemessung eines durchlässigen Böschungsdeckwerks aus losen Wasserbausteinen und einer Filterschicht in einer Kanalstrecke kurz erläutert.

Bild 4 zeigt das Kräftegleichgewicht für den Nachweis der lokalen Standsicherheit eines Böschungsdeckwerks. Zu bemessen ist zunächst das erforderliche Deckwerksgewicht, das das Abgleiten des Deckwerks und einer oberflächennahen Bodenschicht in einer Gleitfläche im Boden infolge Porenwasserüberdrucks, der durch den schnellen Wasserspiegelabsunk im Boden entsteht, verhindert.

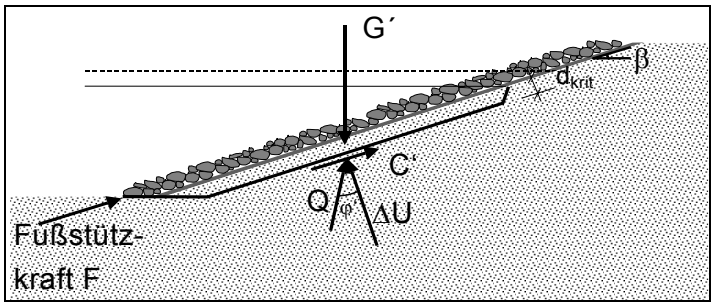

Bild 4: Kräftegleichgewicht für den Nachweis der lokalen Standsicherheit (Abgleiten) /Kayser, Holfelder, 2006/

Das erforderliche Flächengewicht wird unter Berücksichtigung einer in der Regel vorhandenen Fußstützung nach Gleichung (1) berechnet /GBB, 2004/. Aus dem Flächengewicht kann unter Berücksichtigung des Porenvolumens der Steinschüttung und der Dichte der verwendeten Wasserbausteine die notwendige Schichtdicke der Steinschüttung ermittelt werden.

Flächengewicht

$$g' = \gamma'_D \, d_D = \frac{\Delta u \, \tan\varphi' - c' - \tau_F}{\cos\beta \, \tan\varphi' - \sin\beta} - (\gamma'_F \, d_F + \gamma' d_{krit}) \quad (1)$$

gültig für $\varphi' > \beta$ mit

g'	Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]
d_D/d_F	Dicke der Deckschicht/ der Filterschicht [m]
γ'_D/γ'_F	Wichte der Deckschicht/ des Filters unter Auftrieb [kN/m³]
γ'	Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
c'	effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
φ'	effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
β	Böschungswinkel [°]
τ_F	Zusatzspannung aus einer Fußstützung [kN/m²]
d_{krit}	Tiefe der kritischen, statisch maßgebenden Bruchfuge (siehe Bild 4)

Die Größe der Zusatzspannung aus einer Fußstützung hängt von der konstruktiven Ausbildung der Fußstützung ab. Üblich sind Fußeinbindungen in die Sohle oder Fußvorlagen, in Ausnahmefällen auch Fußspundwände /GBB, 2004/.

Der Porenwasserüberdruck Δu wird nach Gleichung (2) in Abhängigkeit vom Wasserspiegelabsunk z_a und den Porenwasserdruckparametern a und b ermittelt /GBB, 2004/. Es ist zu prüfen, ob hinsichtlich Größe und Absunkgeschwindigkeit der Bugabsunk (z_{aB}) oder der Heckabsunk (z_{aH}) zu größeren Porenwasserüberdrücken führt und dementsprechend maßgebend ist. Der Parameter a kann aufgrund der Erfahrungen in der Regel gleich 1 gesetzt werden, der Parameter b ist maßgeblich von der Durchlässigkeit des Bodens und der Absunkgeschwindigkeit abhängig.

Porenwasserüberdruck

$$\Delta u(z) = \gamma_W \, z_a \left(1 - a \, e^{-bz}\right) \quad (2)$$

Zusätzlich zum Nachweis gegenüber Abgleiten in einer oberflächennahen Gleitfläche im Boden ist der Nachweis zu führen, dass ein Mindestdeckwerksgewicht eingehalten ist, um bei kohäsionslosen Böden eine Hebung der Bodenoberfläche unter dem Deckwerk infolge des Porenwasserüberdruckes zu verhindern. Dies könnte ansonsten im Untergrund zu Auflockerungen und dementsprechend hydrodynamischen Bodenverlagerungen unter dem Deckwerk führen.

Die erforderliche Einzelsteingröße einer losen Steinschüttung kann in Abhängigkeit von der Heckwellenhöhe nach Gleichung (3) ermittelt werden /GBB, 2004/.

Steingröße infolge Heckwellenhöhe

$$D_{50} \geq \frac{H_{Bem}}{B'_B \left(\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} \right) m^{1/3}} \quad (3)$$

D_{50}	erforderliche Steingröße (Siebkorndurchmesser) bei 50 % Massendurchgang der Summenlinie [m]
H_{Bem}	Bemessungswellenhöhe [m], Maximalwert von $H_{u,Heck}$ bzw. $H_{Sek,q}$
m	Böschungsneigung m = cot β [-], $2 \leq m \leq 5$
B'_B	Stabilitätsbeiwert [-],
	B'_B=1,5 bei häufigem Auftreten des Bemessungsfalls und/oder wenn Deckwerksschäden möglichst vollständig vermieden werden sollen
	B'_B=2,3 bei geringer Häufigkeit des Bemessungsfalls und/oder wenn ein begrenzter Unterhaltungsaufwand in Kauf genommen wird
ρ_W	Dichte des Wassers [kg/m³]
ρ_S	Dichte der Wasserbausteine [kg/m³]

Unter bestimmten Randbedingungen können auch die Sekundärwellen oder die Strömungsgeschwindigkeit (Rückströmung, ggf. überlagert mit natürlicher Strömung oder Wiederauffüllungsströmung) bei der „Kanalfahrt“ maßgebend für die Einzelsteinbemessung werden. Die entsprechenden Nachweise, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird, sind in /GBB, 2004/ enthalten.

Die erläuterten Bemessungsformeln bilden die Grundlage für die im Folgenden dargestellten vergleichenden Deckwerksbemessungen für einen konkreten Abschnitt des DEK. Ausgangsgrößen sind einerseits die vor Ort im Uferbereich gemessenen und andererseits die nach /GBB, 2004/ berechneten hydraulischen Einwirkungen.

4. Validierung der Ansätze zur Deckwerksbemessung am Beispiel des DEK

4.1 Messergebnisse an bestehenden Deckwerken - DEK-Nordstrecke

Seit etwa 10 Jahren werden Deckwerke in unterschiedlichen Wasserstraßen von der BAW vor Ort hinsichtlich ihres Erhaltungszustandes unter Berücksichtigung der jeweiligen hydraulischen Belastungen begutachtet. Ziel ist es, praktische Erfahrungen mit bestehenden Deckwerken zu sammeln und die Ergebnisse sukzessiv in die theoretischen Berechnungsgrundlagen für Deckwerke an Binnenwasserstraßen einfließen zu lassen.

Bei der Begutachtung wird im Einzelnen wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung und Dokumentation der aktuellen Wasserstraßengeometrie (Wasserstraßenquerschnitt, Böschungsneigungen), der vorhandenen Deckwerke (Aufbau, Schichtdicken, Material, Steingrößen, Erhaltungszustand) und des anstehenden Baugrundes (Bodenarten, Schichtung, Kennwerte, Grundwasser),
- Messungen zur hydraulischen Belastung infolge Schifffahrt, in der Regel in einem Zeitraum von 7 bis 10 Tagen (Schiffstypen, Schiffsgrößen, Anzahl, Geschwindigkeit, Uferabstand der Schiffe, Wellen- und Strömungsbelastung am Ufer),
- Auswertung der Daten hinsichtlich Deckwerksbauweise und Erhaltungszustand unter den jeweiligen hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen,
- Vergleich Soll-/ Istzustand unter Berücksichtigung der nach /GBB, 2004/ ermittelten, rechnerisch erforderlichen Deckwerksabmessungen,
- Erfassung des für die Deckwerke erforderlichen Unterhaltungsaufwandes.

Schwerpunktmäßig wurden bisher die überwiegend angewendeten durchlässigen Deckwerke aus losen Wasserbausteinen auf einer Filterschicht begutachtet. Eine Auswertung von verschiedenen Wasserstraßenabschnitten erfolgte bereits in /Fleischer, Thyssen, 2005/ und /Fleischer, Kayser, 2009/.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer 2006 durchgeführten Begutachtung der Deckwerke in der Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals (DEK) vorgestellt /BAW, 2008/.

Der betrachtete Streckenbereich des DEK liegt zwischen Bergeshövede (DEK-km 108,4) und der Einmündung in die Ems unterhalb der Schleuse Gleesen (km 138,4). Der südliche Bereich des Dortmund-Ems-Kanals wurde von 1892 bis 1899 gebaut, eine Erweiterung Richtung Norden erfolgte bis 1914. Nach den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts, als der einseitige Ausbau des DEK für Schiffe bis 1.500 t Tragfähigkeit durchgeführt wurde, gab es im Bereich der DEK-Nordstrecke bis auf den Ersatz der Schleuse Altenrheine im Jahr 1974 keine weiteren Ausbaumaßnahmen mehr. Das heißt, noch heute sind die damals hergestellten Querschnitte - überwiegend ein Rechteck-Trapezprofil (RT-Profil), abschnittsweise auch ein Trapezprofil (T-Profil) - vorhanden. Die bestehenden Böschungen sind planmäßig zwischen 1 : 2,1 und 1 : 3,0 geneigt, die Fläche des Wasserstraßenquerschnitts beträgt ca. 107 m² (RT-Profil) bzw. 120 m² (T-Profil) mit einem minimalen n-Verhältnis von 4,1. Der Baugrund besteht i. w. aus Sanden mit wechselnden Schluffbeimengungen.

In der DEK-Nordstrecke sind gegenwärtig Schiffe mit einer maximalen Länge von 95 m, einer Breite von 9,6 m und einem Tiefgang von 2,70 m zugelassen. Die zulässige Schiffsgeschwindigkeit beträgt 12 km/h für Leerfahrer mit einem Tiefgang kleiner 1,3 m und 10 km/h für abgeladene Schiffe mit einem Tiefgang größer 1,3 m.

Ein reguläres Deckwerk nach dem heutigen Stand der Technik ist gegenwärtig nicht vorhanden. Beim ursprünglichen Bau des Kanals wurde in der Wasserwechselzone lediglich eine 20 cm dicke Schicht aus losen Wasserbausteinen auf einer Splittunterlage als Filter eingebaut. Beim Ausbau vor ca. 50 Jahren wurden die Böschungen der Ausbauseite über die ganze Höhe mit losen Wasserbausteinen (Schichtdicke 30 cm) auf einer 10 cm dicken Splittschicht gesichert. Durch wiederholtes Nachschütten von Wasserbausteinen im Rahmen der Unterhaltung hat sich die Deckschichtdicke in den letzten Jahren sukzessiv erhöht.

Der während der Begutachtung 2006 oberhalb des Wasserspiegels visuell erkennbare Zustand der Deckwerke konnte zunächst als zufriedenstellend bezeichnet werden, signifikante Schäden oder Fehlstellen wurden hier nicht beobachtet. Die Vielfalt der unterschiedlichen Wasserbausteine bestätigte jedoch, dass in dem gesamten Streckenbereich über die Jahre erhebliche Mengen an Wasserbausteinen nachgeschüttet wurden. Der dokumentierte Unterhaltungsaufwand ist vergleichsweise groß. Die untersuchten, heute vorhandenen Wasserbausteine haben eine Steindichte von im Mittel 2350 kg/m³ und entsprechen in ihrer Größe der Klasse $CP_{90/250}$ /TLW, 2003/ mit einem vorhandenen mittleren Steindurchmesser $D_{50,vorh}$ (Siebkorndurchmesser) zwischen 14,0 cm und 18,0 cm, im Mittel 15,9 cm (siehe Bild 5).

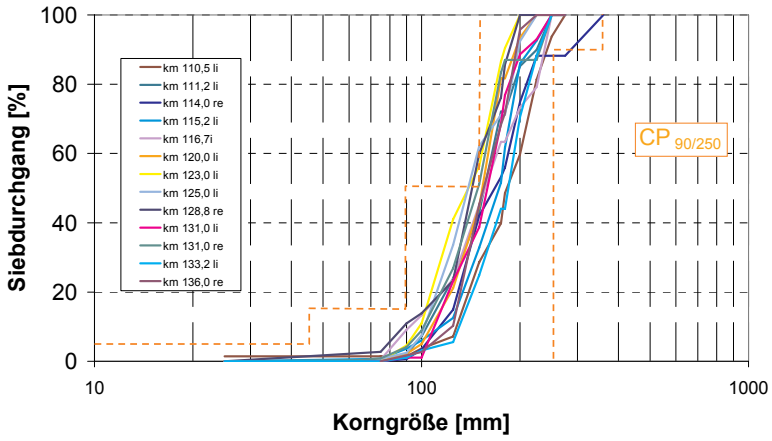

Bild 5: Vor Ort ermittelte Wasserbausteingrößen

Peilungen in mehreren Querprofilen zeigen, dass die Böschungen unter Wasser über große Bereiche erodiert sind und stark vom Sollzustand abweichen. Die Böschungsneigung ist mit überwiegend etwa 1:1,8 deutlich steiler als ursprünglich hergestellt.

In einer 14-tägigen Messkampagne im Juli 2006 wurden bei DEK-km 111,2 die hydraulischen Belastungen am Ufer infolge Schifffahrt mittels Drucksonden und Strömungssonden gemessen. Gleichzeitig wurden alle fahrenden Schiffe mit ihren wichtigsten Daten sowie die Schiffsgeschwindigkeit und der Uferabstand registriert. Insgesamt wurden die Daten von 245 Güterschiffen, d.h. von etwa 18 Schiffen pro Tag, ausgewertet.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Güterschiffe mit Geschwindigkeiten von 4,8 km/h bis 14,3 km/h, im Mittel mit 9 km/h gefahren sind. Das heißt, die zulässigen Geschwindigkeiten wurden von einigen Schiffen deutlich überschritten. Der überwiegende Teil der Schiffe ist mit 70 % bis 97 % der rechnerischen kritischen Schiffsgeschwindigkeiten v_{krit} gefahren (siehe Bild 6). 12 %, das sind etwa 25 Schiffe, fuhren schneller als 0,97 v_{krit}, 4 % der Schiffe sogar mit Geschwindigkeiten, die größer als die theoretisch berechneten kritischen Schiffsgeschwindigkeiten v_{krit} sind. Aus fahrdynamischen Gründen kann v_{krit} von den üblichen Güterschiffen praktisch nicht überschritten werden. Das heißt, diese Werte sind nicht realistisch, sondern in den vorhandenen Ungenauigkeiten in den Berechnungsansätzen zur Ermittlung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit begründet. Die tatsächlich gefahrenen Schiffsgeschwindigkeiten sind für die weiteren Auswertungen von Bedeutung, da die gegenwärtige Bemessung von Deckwerken in der Regel für Schiffsgeschwindigkeiten von 0,97 v_{krit} erfolgt /GBB, 2004/, /MAR, 2008/.

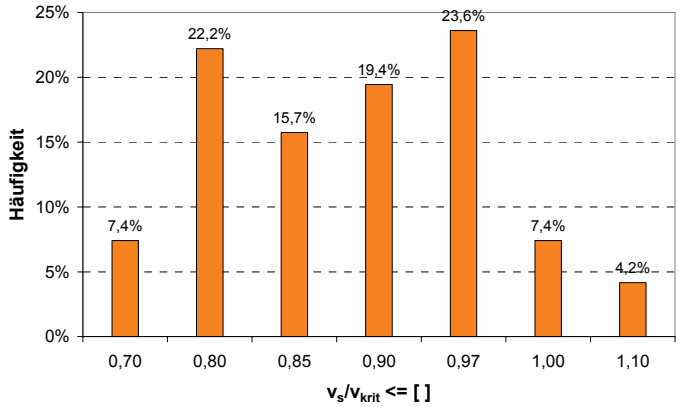

Bild 6: Gemessene Schiffsgeschwindigkeiten im Verhältnis zu den theoretischen kritischen Schiffsgeschwindigkeiten

Mit den Druckmessdosen wurden bei jeder Schiffsvorbeifahrt die Bug- und Heckwellenhöhen (vergleiche Bild 3) am Ufer gemessen. Bild 7 zeigt die gemessenen Bugwellenhöhen $H_{u,Bug}$, Bild 8 die gemessenen Heckwellenhöhen $H_{u,Heck}$.

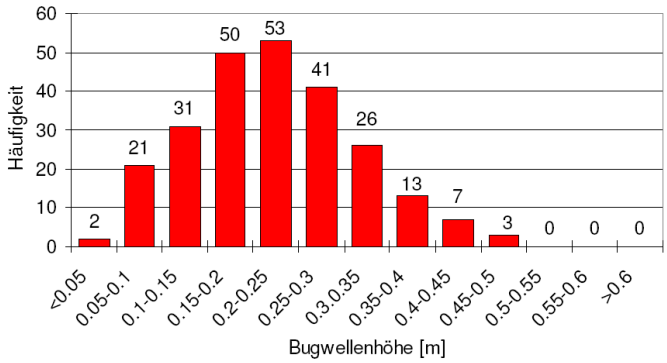

Bild 7: Am Ufer gemessene Bugwellenhöhen $H_{u,Bug}$ (siehe hierzu auch Bild 3)

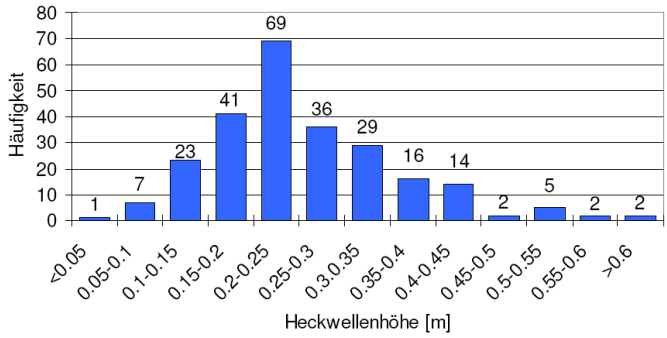

Bild 8: Am Ufer gemessene Heckwellenhöhen $H_{u,Heck}$ (siehe hierzu auch Bild 3)

Die maximal gemessene Bugwellenhöhe beträgt 0,47 m, der Mittelwert 0,22 m. Die gemessenen Heckwellenhöhen sind insgesamt etwas größer, die maximale Heckwellehöhe beträgt 0,68 m, der Mittelwert 0,26 m. Die maximal in Ufernähe gemessene Strömungsgeschwindigkeit infolge der Rückströmung beträgt 1,64 m/s. Insgesamt liegen die Messwerte ansonsten zwischen 0,5 und 1,5 m/s (siehe Bild 9).

Die in der DEK-Nordstrecke am Ufer gemessenen hydraulischen Belastungen sind nicht auffällig, sondern entsprechen etwa Messergebnissen in vergleichbaren Kanalabschnitten.

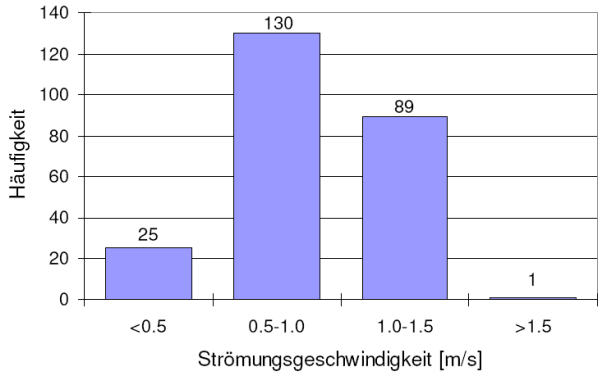

Bild 9: Am Ufer gemessene Strömungsgeschwindigkeiten

4.2 Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten hydraulischen Einwirkungen

Aufgrund des festgestellten Zustandes und des hohen Unterhaltungsaufwands in der untersuchten DEK-Nordstrecke ist davon auszugehen, dass die vorhandenen Deckwerke für die heutige Schiffsbelastung nicht mehr ausreichend bemessen sind. Es wurden dementsprechend Berechnungen nach /GBB, 2004/ durchgeführt.

Mit den Messergebnissen (Kap. 4.1) stehen die tatsächlich vorhandenen hydraulischen Einwirkungen infolge Schifffahrt - Bug- und Heckwellenhöhen sowie Strömungsgeschwindigkeiten in Ufernähe - direkt für die Berechnung zur Verfügung. Gleichzeitig wurden alle relevanten Schiffsdaten - Schiffsgröße und Abladetiefe, Schiffsgeschwindigkeit und Uferabstand - registriert bzw. gemessen und die aktuelle Geometrie der Wasserstraße aufgenommen. Mit diesen Daten können die hydraulischen Einwirkungen parallel dazu auch nach /GBB, 2004/ berechnet werden. So ist ein Vergleich der direkt gemessenen und der berechneten hydraulischen Einwirkungen möglich und damit eine Validierung der theoretischen Bemessungsansätze. Alle Berechnungen erfolgten mit Hilfe der Software „GBBSoft“.

Zunächst werden die gemessenen (Kap. 4.1) und entsprechend Kap. 3.2 berechneten Bugwellenhöhen $H_{u,Bug}$ verglichen.

Im Diagramm im Bild 10 sind die gemessenen und berechneten Bugwellenhöhen gegenüber gestellt – und zwar die Ergebnisse für alle relevanten Schiffsvorbeifahrten im Messzeitraum 2006. Die rot gestrichelte Linie kennzeichnet die „Solllinie“, für die gemessene und berechnete Bugwellenhöhen identisch sind ($H_{u,Bug}$ gemessen = $H_{u,Bug}$ berechnet). An dem relativ geringen Korrelationskoeffizienten r^2 = 0,55 ist die große Streubreite der Ergebnisse erkennbar. Die Mehrheit der Punkte liegt oberhalb dieser „Solllinie“. Die berechneten Bugwellenhöhen sind im Mittel um etwa 3 cm größer als die gemessenen Werte. Im Durchschnitt ist die Übereinstimmung dementsprechend als gut zu bezeichnen, die berechneten Werte liegen auf der sicheren Seite.

Einen Vergleich der gemessenen (Kap. 4.1) und nach Kap. 3.2 berechneten Heckwellenhöhen zeigt Bild 11.

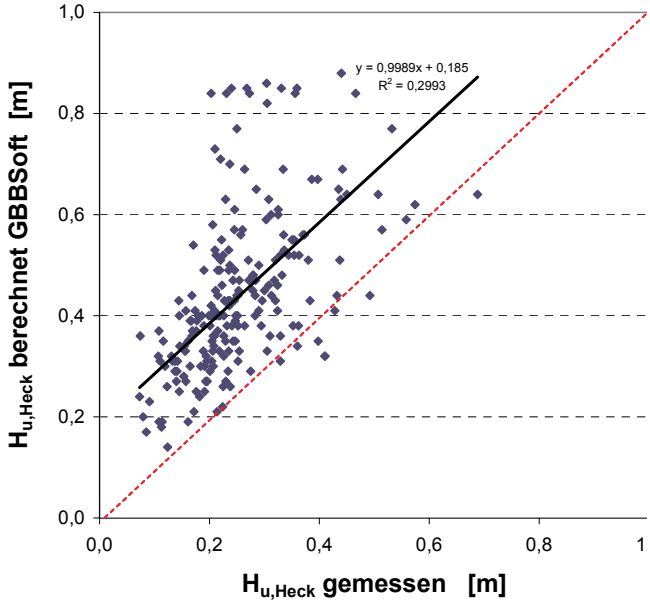

Bild 11: Vergleich der gemessenen und berechneten Heckwellenhöhen

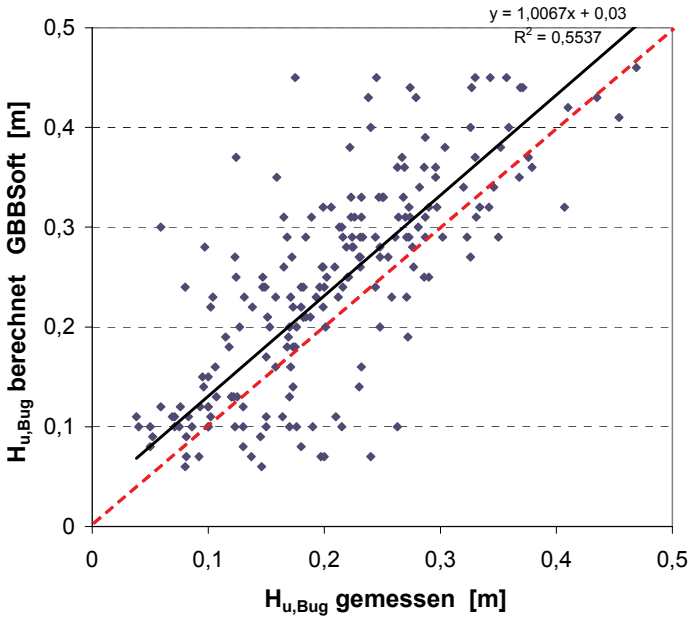

Bild 10: Vergleich der gemessenen und berechneten Bugwellenhöhen

Die gemessenen Heckwellenhöhen sind bis auf eine Ausnahme kleiner als 60 cm. Insgesamt sind die berechneten Heckwellenhöhen deutlich größer als die gemessenen Heckwellenhöhen - im Durchschnitt etwa 10 cm bis 15 cm. In einigen Fällen ist der Unterschied noch größer. Bei den berechneten Wellenhöhen von über 80 cm sind diese bis zu viermal größer als die gemessenen Wellenhöhen. Positiv ist auch hier festzustellen, dass die Berechnungen auf der sicheren Seite liegen, hier allerdings weit mehr als bei den Bugwellenhöhen.

Eine wesentliche Ursache für die in einigen Fällen großen Abweichungen bei den Heckwellenhöhen liegt in den theoretischen Ansätzen zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeiten v_{krit}, die großen Einfluss auf die Wellenhöhen haben. Verschiedene Einflussgrößen, wie beispielsweise der Squat (siehe Kap. 3.2), d.h. das fahrdynamische Einsinken des Schiffes, können in der Regel nicht genau berücksichtigt werden. Da die Größe der Wellenhöhe exponentiell ansteigt, wenn sich die Schiffsgeschwindigkeit der kritischen Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} nähert, führen hier schon kleine Fehler bei der Be-

rechnung von v_{krit} zu großen Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Wellenhöhen. So beziehen sich die genannten extremen Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Werten auf Schiffe, die mit Geschwindigkeiten gefahren sind, die theoretisch bereits der kritischen Schiffsgeschwindigkeit entsprechen oder die sogar darüber liegen. Hier sind dementsprechend keine sinnvollen Ergebnisse zu erwarten.

Weitere mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Wellenhöhen liegen in Ungenauigkeiten bei der Messung der Schiffsgeschwindigkeit, die möglichst für den Schiffsführer unbemerkt mittels Radar vom Ufer aus erfolgt, und bei der Messung des Uferabstandes. Hinzu kommen Ungenauigkeiten bei der Messung der Wellenhöhen mittels Druckmessdosen, die bei den Heckwellen größer sind als bei den Bugwellen, die in der Regel wesentlich größere Wellenlängen aufweisen.

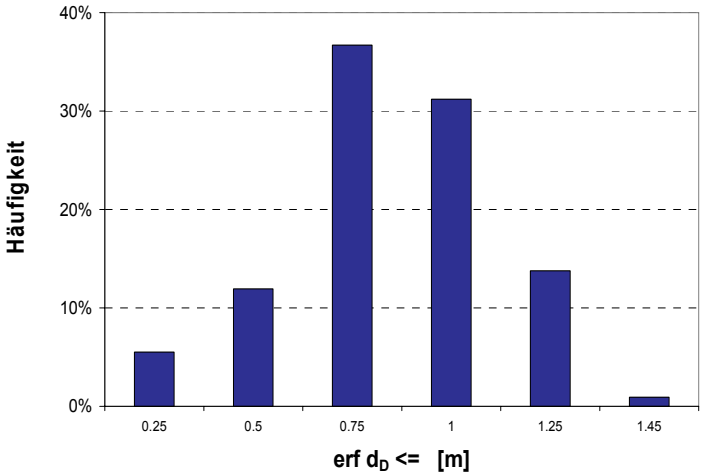

Bild 12: Erforderliche Deckwerksdicken, ermittelt aus direkt gemessenen Bug- bzw. Heckwellen

Insgesamt sind die theoretischen Bemessungsgrundlagen im /GBB, 2004/, die zum Teil empirischen Ursprung haben und den Einfluss verschiedener Parameter berücksichtigen müssen, deshalb von vornherein so ausgelegt, dass sie auf der sicheren Seite liegen.

Unter den genannten Randbedingungen sind die Vergleichsergebnisse zwischen berechneten und gemessenen Wellenhöhen insgesamt aber durchaus als akzeptabel anzusehen. Wichtig für praktische Belange ist, dass die Berechnungen auf der sicheren Seite liegen. Mit weiteren zunehmenden Erfahrungen aus der praktischen Bestandsaufnahme von bestehenden Deckwerken müssen die Bemessungsansätze allerdings auch zukünftig weiter präzisiert und optimiert werden.

4.3 Deckwerksbemessung auf der Grundlage von berechneten und gemessenen hydraulischen Einwirkungen

In einem zweiten Schritt wurde untersucht, wie sich die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen hydraulischen Einwirkungen auf die Dimensionierung der Deckwerke nach /GBB, 2004/ auswirken. Dazu wurden zunächst die erforderlichen Schichtdicken für ein Deckwerk aus losen Wasserbausteinen unter den Randbedingungen des untersuchten nördlichen DEK-Abschnittes berechnet. Der anstehende Boden - ein schluffiger Sand mit einer relativ geringen Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-6}$ m/s bis $5 \cdot^{10-5}$ m/s - wurde in den Boden B3 nach /MAR, 2008/ eingestuft. Die tatsächlich vorhandenen Böschungsneigungen von 1:1,8 wurden berücksichtigt.

Die Berechnung der erforderlichen Deckwerksdicke erfolgte entsprechend Kap. 3.3 (Gl. (1)) für jede einzelne Schiffspassage (Bild 12). Zugrunde gelegt wurden zunächst die direkt gemessenen hydraulischen Einwirkungen, d.h. die gemessenen Bug- bzw. Heckwellen. Aus diesen Größen wurde entsprechend Kap. 3.2 der Bug- bzw. Heckabsunk berechnet. Für jeden Einzelfall wurde geprüft, ob der Bug- oder Heckabsunk für die Bemessung maßgebend ist.

Die erforderlichen Deckwerksdicken (Bild 12) sind mit Werten zwischen 0,25 m und 1,45 m im Vergleich zu anderen Kanalstrecken relativ groß. Prinzipiell war das auch zu erwarten, da der anstehende Boden relativ gering durchlässig ist und die Entstehung von Porenwasserüberdrücken begünstigt. Hinzu kommt, dass die Böschungen mit 1:1,8 sehr steil geneigt sind und dementsprechend große Deckwerksdicken erfordern, um die lokale Standsicherheit der Böschung zu gewährleisten. Die besonders hohen Werte von 1,25 m und größer (Bild 12) entstehen durch die 12 % der Schiffe, die schneller als 0,97 v_{krit} gefahren sind (siehe Kap. 4.1, Bild 6). In jedem Fall wird deutlich, dass die vorhandenen Deckwerke weit unterdimensioniert sind.

Bild 13 zeigt dazu im Vergleich die erforderlichen Deckwerksdicken, die aus den nach /GBB, 2004/ berechneten Bug- und Heckwellenhöhen ermittelt wurden. Diese liegen insgesamt beträchtlich über den Deckwerksdicken, die auf der Grundlage der gemessenen Einwirkungen (Bild 12) ermittelt wurden (im Mittel etwa 25 cm). Hauptursache sind - wie zu erwarten - die gegenüber den gemessenen Wellenhöhen insgesamt größeren berechneten Wellenhöhen (siehe Bilder 10 und 11). Auffällig sind die für etwa 6 % der Schiffspassagen ermittelten Deckwerksdicken von etwa 4 m. Diese Berechnungswerte ergeben sich überwiegend für die Schiffe, die mit Geschwindigkeiten gefahren sind, die theoretisch über den kritischen Schiffsgeschwindigkeiten liegen. Dies führt bereits rechnerisch zu viel zu großen Heckwellenhöhen, die in diesen Fällen bemessungsrelevant sind und zu sehr großen, praktisch nicht sinnvollen Deckwerksdicken führen. Hier zeigt sich noch einmal deutlich, dass sich die Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit besonders stark bei Schiffsgeschwindigkeiten im überkritischen Bereich auswirken.

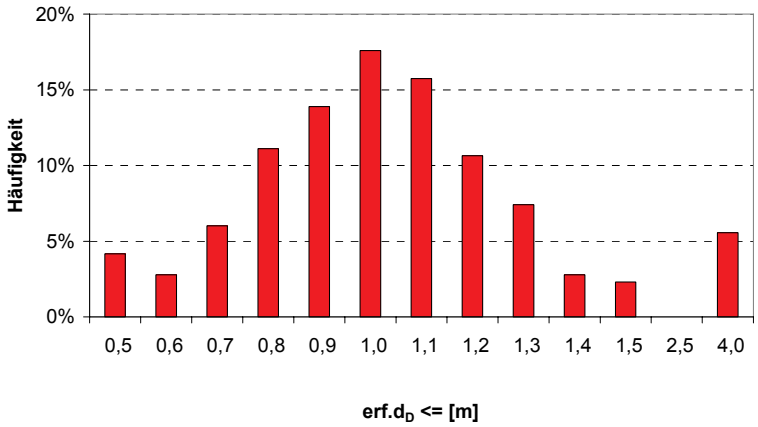

Bild 13: Erforderliche Deckwerksdicken, ermittelt aus berechneten Bug- bzw. Heckwellen

Nach der Ermittlung der erforderlichen Deckwerksdicken wurden die erforderlichen Einzelsteingrößen für das Deckwerk aus losen Wasserbausteinen nach Kap. 3.3, Gleichung (3) berechnet. Ausgangsgrößen waren auch hier einerseits die direkt gemessenen Heckwellenhöhen (Bild 8) und andererseits die auf der Grundlage des /GBB, 2004/ nach Kap. 3.2 für jede Schiffsvorbeifahrt berechneten Heckwellenhöhen (Bild 11). Es wurde die vor Ort im Mittel festgestellte Steindichte von 2350 kg/m^3 zu Grunde gelegt. Wie in der Regel für Kanalstrecken üblich, wurde in der Gleichung (3) der Stabilitätswert B'_B = 2,3 gesetzt und damit ein begrenzter Unterhaltungsaufwand akzeptiert. Die Ergebnisse sind vergleichend im Bild 14 dargestellt.

Die Einzelsteingrößen D_{50} (Siebgrößen), die sich aus den gemessenen Einwirkungen ergeben, liegen in einem für Kanalstrecken üblichen Spektrum. Die mittlere Steingröße D_{50} liegt für die überwiegenden Belastungen (97 % der Schiffsvorbeifahrten) im Bereich zwischen 10 cm und 20 cm, nur 3 % der Schiffspassagen erfordern größere Steindurchmesser (maximal 30 cm).

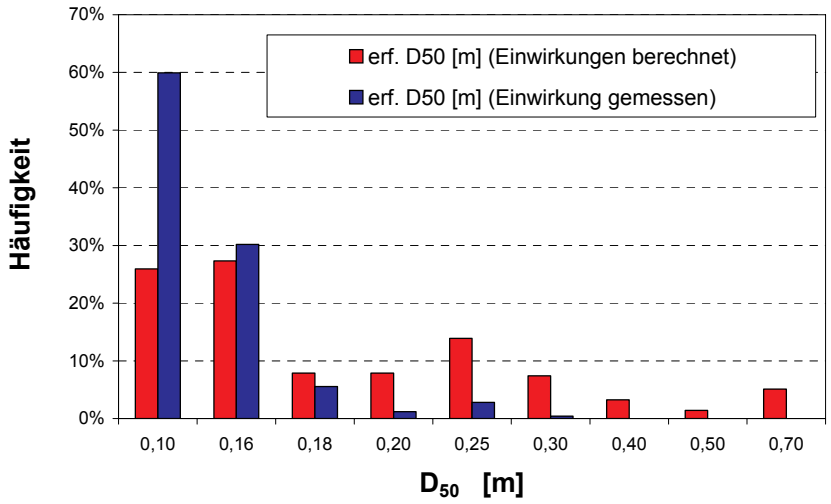

Bild 14: Erforderliche Einzelsteingrößen (Siebgrößen), ermittelt aus berechneten und gemessenen Heckwellen

Praktisch bedeutet das, dass die vorhandene Steinklasse $CP_{90/250}$ mit einem vor Ort ermittelten $D_{50,vorh}$ von 15,9 cm (siehe Kap. 4.1) - wie aufgrund der Bestandsaufnahme zu erwarten - nicht ausreichend lagestabil ist. Erforderlich ist mindestens die nach /TLW, 2003/ nächst größere Steinklasse $LMB_{5/40}$.

Im Vergleich dazu sind die erforderlichen Einzelsteingrößen D_{50}, die sich nach Gleichung (3) aus den berechneten Heckwellenhöhen ergeben, erwartungsgemäß wesentlich größer, da die berechneten Heckwellenhöhen als Eingangsgrößen signifikant größer als die gemessenen Heckwellenhöhen sind (siehe Bild 11). Eine mittlere Steingröße von 10 cm bis 20 cm ist danach nur für 69 % der Schiffsvorbeifahrten ausreichend. In 6,5 % der Fälle sind sogar Steingrößen zwischen 50 und 70 cm erforderlich. Diese extremen Werte sind auch hier überwiegend auf die Schiffe zurückzuführen, die mit Geschwindigkeiten gefahren sind, die theoretisch über den kritischen Schiffsgeschwindigkeiten liegen. Diese Werte sind aus den bereits oben beschriebenen Gründen nicht realistisch und nicht praxisrelevant.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen /GBB, 2004/ steht aktuell ein umfassendes Grundlagenwerk für die Dimensionierung von Deckwerken zur Verfügung. Die Handhabung des Formelwerkes konnte durch die Umsetzung in einer einfach bedienbaren Software „GBBSoft“ sehr erleichtert werden. Für Standard-Deckwerksbauweisen gibt es zusätzlich ein speziell für die Randbedingungen der Wasserstraßenklasse Vb konzipiertes übersichtliches Merkblatt /MAR, 2008/. Dem planenden Ingenieur steht damit eine fundierte Grundlage für alle Fragestellungen zur Deckwerksdimensionierung im Zusammenhang mit Aus- und Neubaumaßnahmen sowie Unterhaltung an Wasserstraßen zur Verfügung.

Die Bemessungsansätze müssen jedoch weiter validiert werden. Dazu stehen aus der seit etwa 10 Jahren laufenden Bestandsaufnahme der BAW an bestehenden Deckwerken in verschiedensten Wasserstraßenabschnitten umfangreiche Messergebnisse zur Verfügung. Auf der Grundlage von Vergleichen von Messergebnissen und Berechnungsergebnissen nach /GBB, 2004/ werden Defizite und Grenzen der Bemessungsgrundlagen aufgezeigt und die Verfahren auf dieser Basis weiter angepasst und optimiert.

Am Beispiel einer Strecke des Dortmund-Ems-Kanals konnte gezeigt werden, dass die theoretischen Berechnungsansätze auf der sicheren Seite liegend für praktische Anwendungen gut anwendbar sind. Es wurde jedoch auch deutlich, dass die Übereinstimmung von gemessenen und auf der Grundlage von /GBB, 2004/ berechneten hydraulischen Belastungsgrößen insbesondere bei Schiffen, die mit Geschwindigkeiten fahren, die sich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit annähern, noch nicht zufriedenstellend ist. Hier müssen die bestehenden parameterbehafteten Ansätze weiter präzisiert werden, um die noch vorhandenen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung weiter zu minimieren.

Für Bemessungsaufgaben auf der Grundlagen des /GBB, 2004/ bzw. des /MAR, 2008/ im Rahmen aktueller Deckwerksplanungen erfolgt die Dimensionierung aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel für Schiffsgeschwindigkeiten, die 97 % der kritischen Geschwindigkeit betragen. Bis zu diesen Geschwindigkeiten sind die Bemessungsgrundlagen zur Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen trotz der darin zum Teil noch vorhandenen Ungenauigkeiten bereits praxisnah anwendbar.

Literatur

GBB (2004). Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, Mitteilungsblatt Nr. 87, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

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

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

Fleischer, Kayser (2006). Analyse bestehender Deckwerke für den Uferschutz an Binnenwasserstraßen, Tagungsunterlagen, PIANC-Kongress 2006, Estoril

Fleischer, Thyssen (2005). Erfahrungen mit Deckwerken an Bundeswasserstraßen, Tagungsunterlagen, HTG-Kongress 2005, Bremen

BAW (2008): Forschungsbericht „Grundsatzaufgabe Bestandsaufnahme von Deckwerken, 9. Teilbericht, Untersuchungen an der DEK-Nordstrecke“, unveröffentlicht

Verfasser

Dipl.-Ing. Petra Fleischer
Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Geotechnik
Referat Erdbau und Uferschutz
Kussmaulstr. 17, 76187 Karlsruhe
Telefon: 0721 97263570
E-Mail: petra.fleischer@baw.de

Dr.-Ing. Jan Kayser
Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Geotechnik
Referat Erdbau und Uferschutz
Kussmaulstr. 17, 76187 Karlsruhe
Telefon: 0721 97263100
E-Mail: jan.kayser@baw.de