

Beurteilung des Fließverhaltens der Elbe bei Hochwasser unter Berücksichtigung der Verbuschung in den Deichvorländern

Kurzfassung des auf Einladung der Bezirksgruppe Lüneburg des Bundes der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (BWK) und der Karl Hilmer Gesellschaft am 29. November 2006 an der Leuphana Universität Lüneburg in Suderburg gehaltenen Vortrages.

R. A. Dietrich*

Zusammenfassung

Seit 1981 hat die Verbuschung auf den Bühnen und in den Deichvorländern der Elbe erheblich zugenommen. Beim August Hochwasser 2002 wurde zum ersten Mal drastisch deutlich, dass hierdurch ein Abflusshindernis entstanden ist, das Auswirkungen auf das Fließverhalten der Elbe bei Hochwasser und somit einen höheren Wasserstand zur Folge hat. Um die hydromechanischen Zusammenhänge aufzuzeigen, wurde eine zweidimensionale nichtlineare Finite-Element-Analyse bei tiefenintegrierter Strömung durchgeführt. Basis dieser Analyse ist der Elbeabschnitt von Elbe-km 536,240 (Neu Darchau) bis Elbe-km 538,240. Die wesentlichen Ergebnisse und die daraus sich ergebenden Schlussfolgerungen werden erläutert.

1. Einleitung, Motivation

Seit einigen Jahrzehnten sind die Beweidung und der Rückschnitt der Sträucher und Büsche im Abflussbereich des Hochwassers im Elbetal, d.h. in den Bühnenfeldern und den Deichvorländern, aus welchen Gründen auch immer, weitestgehend eingestellt. Dies hat dazu geführt, dass sich in diesen Regionen meterhohe Verbuschungen ausgebreitet haben, die bei Hochwasser zu Veränderungen des Abflusses und zur Erhöhung des Wasserstandes geführt haben und führen werden. Beim Hochwasser im August 2002 haben sich diese Verbuschungen erstmals als Abflusshindernis in das Bewusstsein der Menschen gedrängt.

Daher wird seit 2002 das Thema „**Verbuschung im Elbevorland**“ in der Region des "Biosphärenreservats Elbtalau" zwischen Schnackenburg und Hohnstorf intensiv und kontrovers diskutiert und durch Leserbriefe in der lokalen Presse begleitet. Bei diesen Diskussionen liegt die Priorität leider nicht immer auf der Sicherstellung des Hochwasserschutzes unter Berücksichtigung der hydromechanischen Zusammenhänge zwischen Abfluss und Verbuschung.

Um zu verdeutlichen, von welcher Art die Verbuschungen sind und welche Ausmaße sie haben, werden in den Bildern 1 und 2 unterschiedlich ausgeprägte Verbuschungen dargestellt, z. B. für



* Copyright © 2007 IBSNM, Ingenieur-Büro für Systemanalyse und Numerische Modellierung, Hohnstorf/Elbe. Als Manuskript erstellt. Für dieses Manuskript behält sich der Verfasser alle Rechte vor.
Anschrift des Verfassers: Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. Rudolf Adolf Dietrich, Neues Land 26, 21522 Hohnstorf/Elbe, Tel.: 04139 - 6 96 91 49, E-Mail: Rudolf-Adolf.Dietrich@t-online.de, <http://www.rudolf-adolf-dietrich.de/IN007/B-12.pdf>

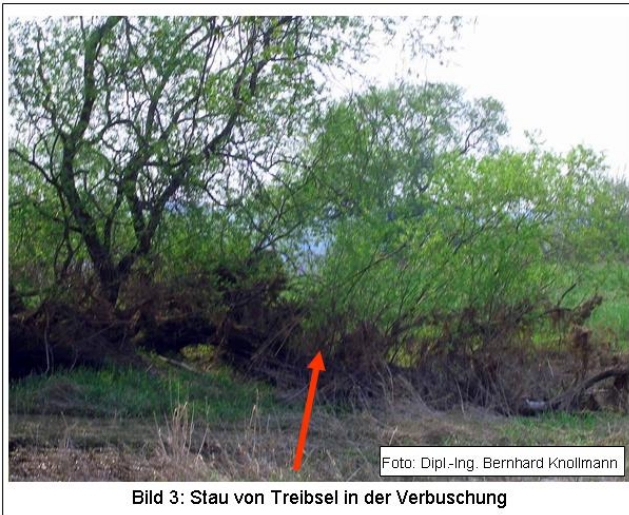


Bild 3: Stau von Treibsel in der Verbuschung



Bild 4: Stau von Treibsel in der Verbuschung

die Elbe bei Barförde und Wendewisch mit Blickrichtung vom Deich zur Elbe.

Beim Betrachten dieser Bilder wird deutlich, dass bei diesen Verbuschungen ein ungehindertes Fließen der Elbe bei Hochwasser nicht mehr möglich ist. Dies gilt besonders für Verbuschungen, die blockadebildend oder im Sinne einer Querverriegelung wirken können. Ferner ist zu berücksichtigen, dass durch gestaute Treibsel eine zusätzliche Blockade oder Querverriegelung verursacht werden kann (siehe Bild 3 und 4).

Auch bei Eisgang stellen die Verbuschungen eine zusätzliche Gefährdung dar, da aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit des Wassers im Bereich der Verbuschungen dort zuerst die Eisbildung einsetzt, d.h. die Verbuschungen sind gleichzeitig Keimzellen für die Eisbildung. Wo Eis ist, fließt aber kein Wasser. Ferner ist bei der Bildung von großen Eisschollen in der Natur zu beobachten, dass Verbuschungen abgeschert und mit dem Wasser-Eis-Strom weiter transportiert werden. Die Gefahr, dass die Verbuschungen zusammen mit den Eisschollen an einer anderen Stelle zu einer Blockade führen, wächst mit dem Umfang der abgerissenen Verbuschungen und der Größe und Anzahl der Eisschollen.

2. Problembeschreibung

Beim August Hochwasser 2002 wurde bei Neu Darchau bei einem maximalen Abfluss von 3424 m³/s ein Wasserstand von 13,00 m+NN (NN steht für Normal Null) gemessen. Ein Vergleich dieser Daten mit denen früherer Hochwasser zeigte, dass bei diesen früheren Hochwassern mit höheren Abflüssen geringere Wasserstände gemessen wurden, so dass es sich als notwendig erwies, diesen Widerspruch, geringerer Abfluss, aber höherer Wasserstand, zu klären. Von diesen Hochwassern lieferte das Januar Hochwasser von 1981 die umfassendste Datenlage. Bei diesem Hochwasser wurde bei Neu Darchau bei einem maximalen Abfluss von 3570 m³/s ein Wasserstand von nur 12,57 m+NN gemessen.

Zur Klärung dieses scheinbaren Widerspruches mussten die hydromechanischen Zusammenhänge zwischen dem Abfluss, der Erhöhung der Rauigkeit durch die Verbuschung (Veränderungen des Abflussbereiches der Elbe) und dem Wasserstand durch detaillierte Untersuchungen ermittelt werden.

Für die weiteren Betrachtungen wurde daher als Referenzabschnitt der Abschnitt der Elbe bei Neu Darchau (s. Bild 5) von Elbe-km 536,240



Bild 5: Blick auf die Elbe flussabwärts bei Neu Darchau

(Neu Darchau) bis Elbe-km 538,240 gewählt, da für diesen Referenzabschnitt außerdem weitere umfangreiche geodätische und hydromechanische Messdaten für beide Hochwasser 1981 und 2002 zur Verfügung standen. Für einen erweiterten Abflussbereich der Elbe muss die Datenlage noch wesentlich verbessert werden, um die Verknüpfungen zwischen der numerischen Modellierung eines Referenzsystems und den experimentell ermittelten Daten der Elbe zu verbessern.

Zur Beurteilung des quasi stationären Fließverhaltens der Elbe im definierten Referenzabschnitt wurden drei Fälle betrachtet:

Fall A: Bei einem Abfluss von $Q = 3570 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen die Wasserstände am Eintritt $12,57 \text{ m}+\text{NN}$ und am Austritt $12,31 \text{ m}+\text{NN}$. Auf der Basis der gemessenen Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten wurden die durchschnittlichen Sohlen- und Vorlandrauigkeiten für ein hydraulisches Referenzsystem berechnet.

Fall B: Bei einem durch Verbuschung reduzierten Abfluss von $Q = 3424 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen die Wasserstände am Eintritt $13,00 \text{ m}+\text{NN}$ und am Austritt $12,74 \text{ m}+\text{NN}$. Auf der Basis der gemessenen Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten wurde die durchschnittliche Vorlandrauigkeit für ein hydraulisches Referenzsystem berechnet. Für die durchschnittliche Sohlenrauigkeit wurde der für das hydraulische Referenzsystem A berechnete Wert verwendet.

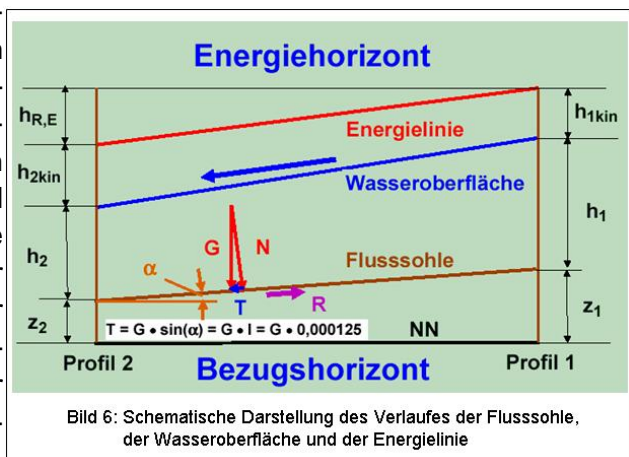
Hierdurch wurde erreicht, dass die Froude-Zahl und die Reynolds-Zahl, die sich aus den berechneten Parametern des Referenzsystems ergaben, identisch sind mit denen, die sich aus den Messdaten für den Referenzbereich der Elbe ermitteln ließen. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Strömungsformen des Referenzsystems mit denen der Elbe hydromechanisch gleich sind, was an Hand der dimensionslosen Navier-Stokes-Gleichungen zu erkennen ist, da in diesen nur noch das Quadrat der Froude-Zahl und die Reynold-Zahl als reziproke Koeffizienten auftreten [3 - 5].

Es stellte sich zusätzlich die Frage, welcher Wasserstand zu erwarten ist, wenn der bei dem geringeren Verbuschungsgrad von 1981 für die Deichhöhen zugrunde gelegte Bemessungsabfluss von $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ bei dem erhöhten Verbuschungsgrad vom August 2002 wirklich auftritt? Dazu ist anzumerken, dass der Verbuschungsgrad inzwischen noch wesentlich höher geworden ist.

Daher wurde zusätzlich der Fall C betrachtet:

Fall C: Für das durch den Fall B definierte hydraulische Referenzsystem wurden die Wasserstände am Ein- und Austritt bei dem Bemessungsabfluss von $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet.

In Bild 6 ist der Verlauf der Flusssohle, der Wasseroberfläche und der Energielinie schematisch dargestellt. Damit wird deutlich, dass ein drastischer Anstieg des Reibungswiderstandes R infolge einer starken Erhöhung der Rauigkeit durch die Zunahme der Verbuschung im Deichvorland nur dadurch überwunden werden kann, dass die in Fließrichtung wirkende Kraftkomponente T zur Aufrechterhaltung der Strömung ebenfalls größer wird. Dies kann aber bei einem offenen Fließgewässer mit konstanter mittlerer Sohlneigung nur dann erfolgen, wenn das vertikal wirkende Gewicht G der Wassermasse erhöht wird, was wiederum nur durch die Erhöhung des Wasserstandes möglich ist.



3. Durchgeführte Berechnungen

Um bei der Beantwortung der in der öffentlichen Diskussion aufgetretenen Fragen einen sachli-

chen Beitrag zu leisten, wurde auf der Basis der beschriebenen Datenlage mit dem Referenzsystem eine zweidimensionale nichtlineare Finite-Element-Analyse bei tiefenintegrierter Strömung durchgeführt [1]. Zur mathematischen Beschreibung des Fließverhaltens des Wassers im offenen Referenzsystem wurden die Impulsgleichungen und die Kontinuitätsgleichung verwendet. Dabei wurden die Impulsgleichungen für die horizontale Ebene durch die x- und y-Koordinaten definiert und über die Wassertiefe tiefenintegriert.

Die Impulsgleichungen ermöglichen, die hydraulischen Effekte aus der lokalen Beschleunigung, der Advektion, der Sohlneigung, der freien Oberfläche, der Corioliskraft, der Sohlreibung, dem Windeintrag und der turbulenten Viskosität zu erfassen. Diese Gleichungen wurden mittels des Galerkin-Verfahrens [2] in Finite-Element-Gleichungen umgeformt und die sich hieraus ergebenden Matrixgleichungen wurden numerisch gelöst. Zur Diskretisierung wurde ein isoparametrisches finites Element mit 9 Knoten, vier Eckknoten, vier Mittelknoten an den Seitenkanten und ein Mittelknoten in der Fläche, verwendet.

Die umfangreichen Messdaten für die Kalibrierung des numerischen Referenzsystems wurden vom Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Lauenburg freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

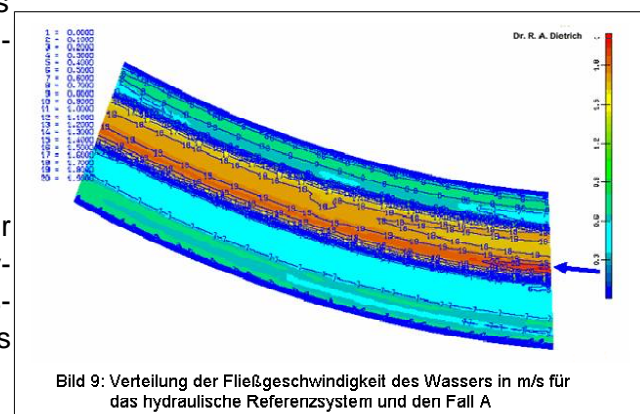
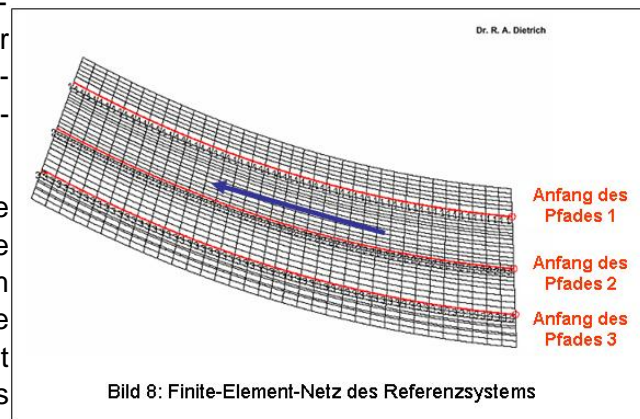
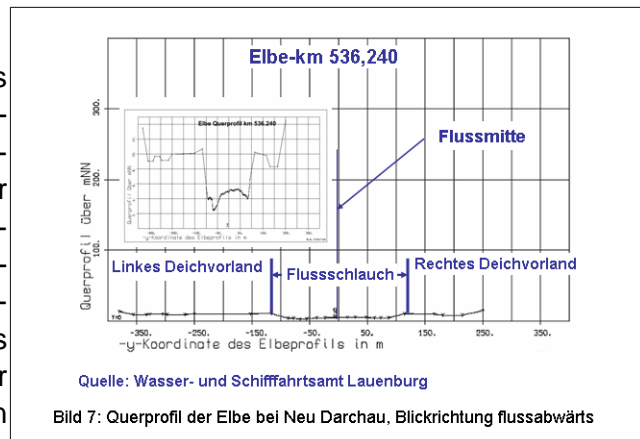
3.1. Beschreibung des Referenzsystems

In Bild 7 ist ein repräsentatives Querprofil des Abflussbereiches der Elbe bei Neu Darchau dargestellt. Dabei ist für die Darstellung der Gelände- und Sohlenhöhe sowie der Ausdehnung der Elbe und der Deichvorländer in der Ebene nahezu der gleiche Maßstab gewählt. Dadurch erscheint der gesamte Abflussbereich wie eine flache Schale. Mit Hinblick auf ein besseres Verständnis der Ergebnisse für die Verteilung der Fließgeschwindigkeit ist in dem kleinen Bild in Bild 7 für die Darstellung der Gelände- und Sohlenhöhe über dem Querprofil ein überhöhter Maßstab gewählt, bei dem die Kontur des gesamten Querprofils, vor allem des Flussschlauches, deutlicher wird.

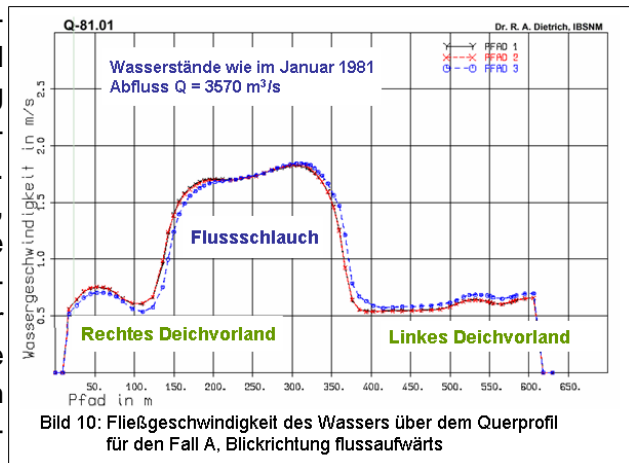
Das Finite-Element-Netz für das hydraulische Referenzsystem ist in Bild 8 dargestellt. Die Elbe macht bei Neu Darchau einen Bogen mit einem Krümmungsradius von 5 km. Das mittlere Gefälle der Flusssohle und der Deichvorländer wurde mit 0,0125 % angesetzt. In dem Bild 8 sind ebenfalls drei Pfade eingezeichnet, die zur Darstellung des Verlaufes der Wasserstände in Fließrichtung dienen (siehe Bild 13).

3.2. Erläuterung der Ergebnisse

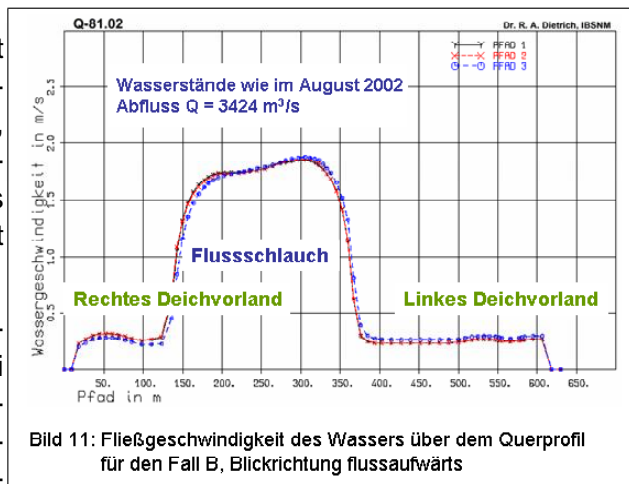
Bild 9 gibt einen Überblick über die Verteilung der Fließgeschwindigkeit des Wassers für das hydraulische Referenzsystem und Fall A. Die Ausprägung der Fließgeschwindigkeit im Bereich des Flussschlauches ist deutlich erkennbar.



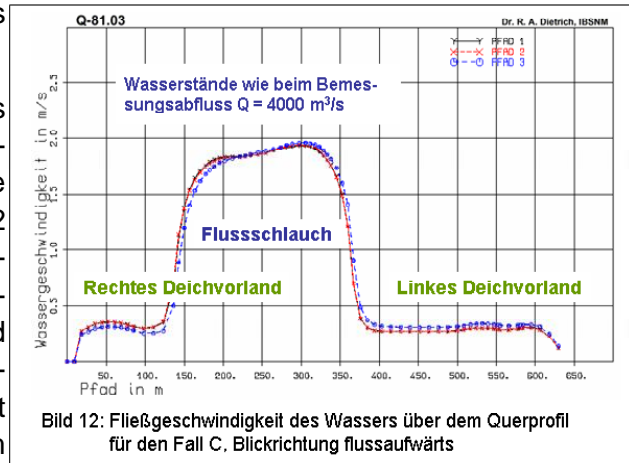
In den Bildern 10 bis 12 ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers über dem Querprofil für den Fall A bis Fall C dargestellt. Bei dieser Darstellung wird der unterschiedliche Einfluss des Flussschlauches und der Deichvorländer deutlich. Auch der Einfluss des Querprofils (s. in Bild 7, kleines Bild) ist erkennbar. Beim Fall A liegt die mittlere Fließgeschwindigkeit in den Deichvorländern bei ca. 0,6 m/s. Für den Fall B und C mit der ausgeprägteren Verbuschung liegt die mittlere Fließgeschwindigkeit bei ca. 0,3 m/s. Im Bereich des Flussschlauches verändert sich die Fließgeschwindigkeit nur geringfügig.



Der Verlauf der Wasserstände in Fließrichtung ist für die drei betrachteten Fälle in Bild 13 dargestellt. Die Kurvenverläufe lassen auch erkennen, dass der Wasserstand in der Außenkurve des Referenzsystems (Pfad 3) geringfügig höher ist als in der Innenkurve. Dieses Verhalten stimmt mit den Beobachtungen in der Natur überein.

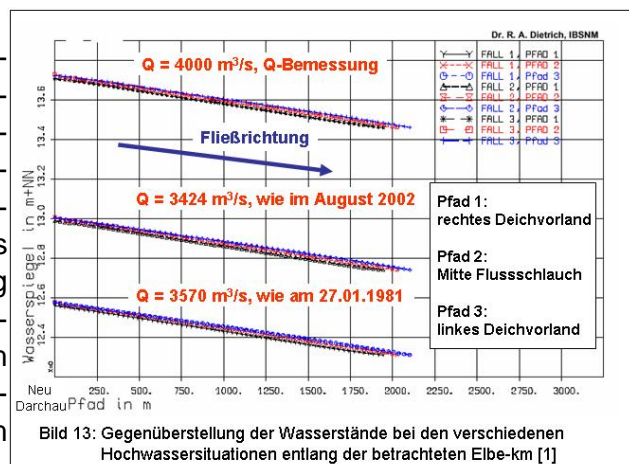


Die Berechnungen zeigen ferner, dass der Wasserstand von 13,00 m+NN im August 2002 bei Neu Darchau nahezu dem Wasserstand entspricht, der sich bei dem gleichen Verbuschungsgrad wie 1981 jedoch bei einem für die Bemessung der Deichhöhe zugrunde gelegten Abfluss von 4000 m³/s ergeben hätte [1].



Unter der Voraussetzung, dass die Deiche das Wasser im Abflussbereich halten, d.h. kein Überströmen und somit kein Abfluss über die Deiche erfolgt, muss mit einem Wasserstand von 13,72 m+NN gerechnet werden, wenn ein Bemessungsabfluss von 4000 m³/s auftreten sollte. Da die Deiche für diesen um 0,72 m erhöhten Wasserstand aber nicht bemessen sind, ist eine zu hohe Belastung oder sogar ein Überströmen der Deiche nicht auszuschließen, wodurch zwangsläufig mit einem Deichbruch zu rechnen wäre.

Bei der Beurteilung der öffentlich diskutierten Situation, ob die Verbuschung an der Innen- oder Außenkurve der Elbe bleiben kann, sollte berücksichtigt werden, dass bei Hochwasser der gesamte Abflussbereich (Flussschlauch und Deichvorländer) ein geschlossenes hydromechanisches System darstellt. Jede Behinderung der Strömung auf der einen Seite hat unmittelbare Auswirkungen auf das gesamte hydromechanische System und somit auch auf den Wasserstand auf der anderen Seite zur Folge. Bild 14 zeigt, dass bei dem



geringeren Verbuschungsgrad von 1981 21 % des gesamten Abflusses über das Deichvorland und 79 % des gesamten Abflusses über den Flussschlauch flossen. Bei dem Verbuschungsgrad im August 2002 sind trotz der Erhöhung des Wasserstandes und somit des Abflussquerschnittes von 1228 m² 1981 auf 1400 m² 2002 nur 13 % des gesamten Abflusses über das gesamte Deichvorland und bereits 87 % des gesamten Abflusses über den Flussschlauch abgeflossen.

Diese Veränderung des Abflusses im Bereich des Deichvorlandes um 8 Prozentpunkte ist auf

die Erhöhung des Verbuschungsgrades und somit der Rauigkeit in diesem Bereich zurückzuführen und hat, trotz des um 146 m³/s geringeren gesamten Abflusses, aufgrund der hydromechanischen Eigenschaften eines offenen Gewässers zu der Erhöhung des Wasserstandes um 0,43 m geführt. Die Ursache ist in dem nachdrückenden Wasser vom Oberlauf der Elbe zu sehen. Dieses Wasser muss aufgrund der Kontinuität der Strömung im Mittel- und Unterlauf der Elbe stets abgeführt werden, was bei einer Erhöhung der Rauigkeit durch die Verbuschung zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Deichvorland und somit zu einem Stau führt, wodurch wiederum der Wasserstand ansteigt. Je mehr der wirksame Abflussbereich der Elbe bei Hochwasser durch die Reduzierung der Strömungsanteile in den Deichvorländern infolge der Verbuschung eingeengt und somit kanalisiert wird, desto mehr und schneller steigt der Wasserstand und um so höher müssen die Deiche sein.

Dr. R. A. Dietrich, IBSNM

1. Fall: WST = 12,57 m + NN, Q = 3570 m ³ /s				
	A (m ²)	v _m (m/s)	Q (m ³ /s)	%
Vorländer	1228	0,62	736	21
Flussschl.	1756	1,61	2834	79
	2984		3570	100
2. Fall: WST = 13,00 m + NN, Q = 3424 m ³ /s				
	A (m ²)	v _m (m/s)	Q (m ³ /s)	%
Vorländer	1400	0,31	436	13
Flussschl.	1856	1,61	2988	87
	3256		3424	100
3. Fall: WST = 13,72 m + NN, Q = 4000 m ³ /s				
	A (m ²)	v _m (m/s)	Q (m ³ /s)	%
Vorländer	1688	0,31	523	13
Flussschl.	2023	1,72	3477	87
	3711		4000	100

WST = Wasserstand
A = Abflussquerschnitt
v_m = Mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers
Q = Abfluss

Bild 14: Beurteilung der Abflüsse im Flussschlauch und in den Deichvorländern [1]

4. Schlussbetrachtungen

Das Elbetal ist ein Kulturraum mit den verschiedensten Lebens-, Aktions- und Bewirtschaftungsformen. Für alle Bewohner, Benutzer und Besucher des Elbetals sowie für alle politisch Verantwortlichen, auch wenn sie nicht im Elbetal leben, sollte das Ziel, den Schutz von Menschenleben und der Natur hinter den Deichen bei einem Hochwasser sicherzustellen, absoluten Vorrang haben.

Um dies zu gewährleisten, ist es dringend geboten, von der allgemeinen Forderung "**Gebt den Flüssen mehr Raum**", die im Sommer 2002 spontan erhoben worden ist, wegzukommen. Für den mittleren und unteren Elbeabschnitt muss die Forderung vielmehr gezielt lauten "**Gebt der Elbe bei Hochwasser ihr altes Fließverhalten im Deichvorland wieder!**", denn zu jeder Zeit muss davon ausgegangen werden, dass der Bemessungsabfluss von 4000 m³/s, für den ein freier Abfluss auch im Deichvorland erforderlich ist, auftreten kann.

Aufgrund der akuten Situation müssen schnellstens neue Wege gefunden und die dazu notwendigen finanziellen Mittel bereitgestellt werden, um die enorme Ausbreitung der Verbuschung im Abflussbereich des Hochwassers der Elbe zu beseitigen. Ferner muss dafür gesorgt werden, dass ein Nachwachsen der Verbuschung nachhaltig vermieden wird. Beim heute vorhandenen Verbuschungsgrad im Elbeabschnitt zwischen Dömitz und Hohnstorf und dem in diesem Bereich vorhandenen geringen mittleren Sohlengefälle von 0,0125 % muss damit gerechnet werden, dass bereits mittlere Abflussmengen zu kritischen, schnell ansteigenden Wasserständen führen werden (siehe Erläuterungen zu Bild 6), wie es sich bereits während des Hochwassers im April 2006 angekündigt hat.

Sollte die Verbuschung nicht auf den Stand von 1981 zurückgenommen werden, so ist eine drastische Erhöhung der Deiche zwingend und schnellstens erforderlich. Die hydromechanischen Wechselwirkungen, die das Fließverhalten der Elbe in einem Abflussbereich mit Verbuschungen bestimmen, geben berechtigten Anlass, darauf zu schließen, dass viele der letzten Hochwasserschutz-

maßnahmen im Raume Hitzacker hätten vermieden werden können, wenn die Verbuschungen im wirksamen Abflussbereich des Hochwassers frühzeitig grundlegend entfernt worden wären. Es geht somit um die Entscheidung, finanzielle Mittel gezielt entweder für das Entfernen der Verbuschungen im Abflussbereich der Elbe oder verstärkt für ständige Deicherhöhungen und Deichneubauten aufzuwenden.

Der gesamte Abflussbereich, der durch die Festlegung der Deichtrassen für den Bemessungsabfluss von $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ursprünglich bereitgestellt wurde, ist auch heute noch erforderlich und darf nicht anderen Begehrlichkeiten geopfert werden, wenn der Hochwasserschutz für die Kulturlandschaft Elbetal weiterhin gewährleistet werden soll. Auch Deichrückverlegungen werden das Problem nicht lösen, da die so gewonnenen freien Flächen in kurzer Zeit durch die schnell nachwachsenden Hölzer ebenfalls verbuscht sein werden und eine erneute Deichrückverlegung erforderlich wäre. Außerdem wäre bei einem Abfluss von $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ allein für die Speicherung der Abflussmenge eines Tages bei einer Stauhöhe von 1 m eine Fläche von ca. 340 km^2 erforderlich. Die Elbe benötigt bei Hochwasser auch im Deichvorland einen ungehinderten Abfluss, damit sie ohne Gefährdung der Kulturlandschaft weiterhin das Wasser aus ihrem Einzugsgebiet der Nordsee zuführen kann.

Danksagung

Für die Bereitstellung der Messdaten sei der Leiterin, Dipl.-Ing. Bettina Kalytta, und dem Mitarbeiter, Dipl.-Ing. Norbert Rölver, des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Lauenburg besonders gedankt.

Die Bilder 3 und 4 wurden freundlicherweise von Dipl.-Ing. Bernhard Knollmann zur Verfügung gestellt, wofür ebenfalls Dank ausgesprochen sei.

Literatur

- [1] Dietrich, R. A.: Zweidimensionale nichtlineare Finite-Element-Analysen bei tiefenintegrierter Strömung zur Beurteilung des Fließverhaltens der Elbe bei Hochwasser unter Berücksichtigung der Verbuschung in den Deichvorländern. *Basis der Analysen ist der Elbeabschnitt von Elbe-km 536,240 (Neu Darchau) bis Elbe-km 538,240*. IBSNM-Bericht 05/V/B03.3, Stand: Dezember 2005. <http://www.rudolf-adolf-dietrich.de/IN007/B-05.pdf>
- [2] Dietrich, R. A.: Nichtlineare Finite-Element-Modellierungen von Sickerströmungen und Schadstofftransporten in ungesättigten und gesättigten oberflächennahen Zonen von Deichregionen bei extremen Ereignissen. Dissertation am Fachbereich Umweltwissenschaften der Universität Lüneburg. GKSS 99/E/22, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, 1999.
- [3] Schlichting, H.: Grenzschichttheorie, Verlag G. Braun, Karlsruhe.
- [4] Bathe, K. J.: Finite Element Procedures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1996.
- [5] Kardestuncer, H.: Finite Element Handbook, McGraw-Hill, Inc., New York, 1987