



# Deichquerschnitte mit integrierten

## Geokunststoffen

Katja Werth, Ronald Haselsteiner, Georg Heerten, Theodor Strobl

### Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1 Einleitung .....	2
2 Geokunststoffe im Wasserbau .....	3
2.1 Allgemeines.....	3
2.2 Anwendungsbereiche.....	5
3 Überströmungssicherung mit Geokunststoffen .....	6
3.1 Allgemeines.....	6
3.2 Auswirkungen von Überströmungssicherungen .....	7
3.2.1 Betrachtetes System (Beispiel) .....	8
3.2.2 Verzögerung der Überflutung des Polders .....	9
3.2.3 Vermeidung von monetären Schäden.....	11
3.2.4 Deichbruchwahrscheinlichkeit.....	15
3.3 Anwendung von Geokunststoffen zur Überströmungssicherung.....	16
3.3.1 Allgemeines .....	16
3.3.2 Sicherungsmöglichkeiten .....	17
3.3.3 Eigene Untersuchungen.....	20
3.3.4 Umsetzung im Zuge von Deichertüchtigungen.....	22
4 Zusammenfassung & Ausblick.....	23
Literatur .....	24

# 1 Einleitung

Geokunststoffe haben im Wasserbau eine lange Tradition. Im Allgemeinen ersetzen oder ergänzen Geokunststoffe natürliche Baustoffe, so dass heute die Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen oder geotextile Filtervliesstoffe zu den a.a.R.d.T. zählen. Bei den neueren Bauweisen, z. B. bei der Landgewinnung und Bereitstellung von Flächen, die aufgrund der ungünstigen Untergrundtragfähigkeiten vor wenigen Jahren noch als nicht überbaubar galten, sind Geokunststoffe zur Bodenbewehrung heute unverzichtbar.

Vor dem Hintergrund der vergangenen Katastrophenhochwasser mit enormen volkswirtschaftlichen Schäden durch Deichbrüche bzw. Überschwemmungen (Abb. 1) stellen Deiche das Rückrat des Hochwasserschutzes dar, deren Funktionstüchtigkeit für alle zu erwartenden Lastfälle gegeben sein muss. Die Hochwasser haben gezeigt, dass die Versagensmechanismen bei Deichbrüchen zumeist von der landseitigen Böschung ausgehen. Insbesondere eine unplanmäßige Überströmung, führt i. d. R. bei entsprechend langer und starker Überströmung zum Deichbruch. Für die zukünftige Entwicklung sicherer Deichquerschnitte werden insbesondere multifunktionale Geokunststoffe, z. B. Geogitter-Vliesstoffkombinationen mit integriertem Erosionsschutz zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Stabilisierung des Bodens an Ort und Stelle und damit das vollständige Vermeiden von Erosion bei hydraulischer Beanspruchung – auch bei Überströmung - kann im Deichbau als zukünftige Schlüsselaufgabe angesehen werden.

Die Überströmungssicherung von Deichen bewirkt bei Bemessungsbelastung einer Verzögerung der Polderflutung. Hier kann Reaktionszeit für die Betroffenen und die Katastrophenschutzbehörden gewonnen werden, was zu einer Schadensreduktion und generell zu einer Risikominderung für Güter und Menschenleben führt. Der Einsatz von Geokunststoffen kann nicht nur im Zuge von Deichertüchtigungsmaßnahmen sondern auch bei Neubaumaßnahmen wirtschaftliche Vorteile bringen, wenn steilere Bö-

schungsneigungen die Einbaukosten für die Geokunststoffe durch die Ersparnis beim Erdbau in etwa ausgleichen.



Abb. 1: Über 100 Deichbrüche und Überflutungen an der Mulde im August 2002  
(HEERTEN & HORLACHER, 2002)

## 2 Geokunststoffe im Wasserbau

### 2.1 Allgemeines

Im Wasserbau sind Geokunststoff-Bauweisen seit etwa 1955 bekannt. Die ersten Empfehlungen des 1972 gegründeten Arbeitskreises AK14 "Kunststoffe im Erd- und Wasserbau" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (heute DGGT e.V.) wurden zusammen mit dem damaligen Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) e.V. (heute: DWA) in den Jahren 1975 „Grundlagen“, 1979 „Kunststoff-Dichtungsbahnen“ und 1982 „geotextile Filter“ und „Anwendungsbeispiele“ veröffentlicht. 1989 wurde vom DVWK erstmalig eine Empfehlung "Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erdbau und Wasserbau" als Empfehlung des AK 14 herausgegeben und die Funktionen Filtern, Trennen, Dränen, Schützen, Dichten, Bewehren und Verpacken, einschließlich Rohstoffkunde, Bauweisen und Prüfmethode umfassend und fachübergreifend, d. h. für Anwendungen im Deponie-, Wasser-, Verkehrswegebau behandelt (DVWK 76, 1989). Seit 1989 hat die Geokunststoff-Technologie eine rasante Entwicklung hinsichtlich Bauweisen und Produkttechnologie durchlaufen. Getrennt nach Fachbereichen wurde eine große Anzahl von deutschsprach-

chigen Empfehlungen, Regelwerken, Normen und Leitlinien für eine Vielfalt von Anforderungen erarbeitet und neue Forschungsfelder erschlossen. Die früher in Frage gestellte Funktionsdauer von Geokunststoffen wird heute an der Funktionsdauer der zu planenden Bauwerke gemessen. Für PEHD-Dichtungsbahnen, geosynthetische Drän-systeme und Bentonitmatten mit Nachweisen zur Eignung für Deponien wurden Funktionsdauern von deutlich mehr als 100 Jahren unter Belastung nachgewiesen. Die be-messungsrelevanten Einflüsse auf das Langzeitverhalten von Geokunststoffen in Ab-hängigkeit von der Funktion sind erfasst und in den Regelwerken berücksichtigt. Eine Auswahl der für den Erd- und Wasserbau relevanten Regelwerke/Empfehlungen für geotextile Filter, geosynthetische Tondichtungsbahnen, Kunststoffdichtungsbahnen, Geogitter zur Bodenbewehrung, Dränmatten, Erosionsschutzsysteme, geotextile Con-tainer und Schläuche ist im Folgenden zusammengestellt (Tab. 1):

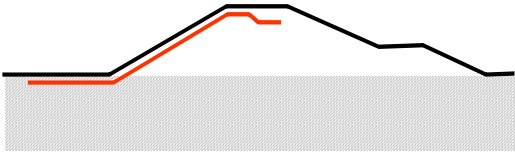
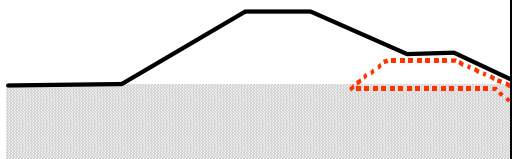


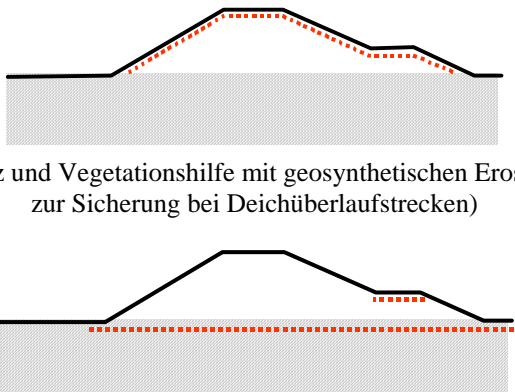
Tab. 1: Übersicht über die Regelwerke zur Anwendung von Geokunststoffen im Erd- und Wasserbau

<b>Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)</b>
Merkblatt zur Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG, 1993) Technische Lieferbedingungen für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte (TLG, 2003), Richtlinien für die Prüfung von geotextilen Filtern im Verkehrswasserbau (RPG, 1994), BAW Karlsruhe Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen (EAO, 2001) Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW, 2006)
<b>Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA)</b>
Themenheft: Dichtungssysteme in Deichen (2005) Dichtungssysteme im Wasserbau, Heft 215 (1990), in Überarbeitung Anwendung von Geotextilien im Wasserbau, Heft 221 (1992)
<b>Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)</b>
EBGEO: Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen (1997), in Überarbeitung EAG-GTD: Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen (2002) EAG-Con: Empfehlungen zur Anwendung geotextiler Container, in Vorbereitung EAG-Drän: Empfehlungen zur Anwendung geotextiler Dränsysteme, in Vorbereitung EAK: Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke (2002)
<b>Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)</b>
M Geok E: Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus (2005) TL Geok E-StB: Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaus (2005)

## 2.2 Anwendungsbereiche

In den gemäß a.a.R.d.T. ausgeführten Hochwasserschutzdeichen übernehmen Geokunststoffe unterschiedliche Funktionen. Eine Übersicht über die Standardanwendungen ist in Tabelle 1 angegeben (Tab. 2):

Tab. 2: Geokunststoffanwendungen in Deichen und Dämmen (aus SAATHOFF & WERTH, 2003)

		<b>Moderner Drei-Zonen-Deich mit Geokunststoffen</b>	
Ort		Wasserseite	Binnenseite
Deichzone			
Funktion		Dichtung mit geosynthetischer Tondichtungsbahn (Bentonitmatte)	Filtervliesstoffe für filterstabilen (erosionsfesten) Übergang vom anstehenden Deichkernmaterial und Untergrund zum sehr wasserdurchlässigen Drän- und Auflastkörper
Beispiel		 Kinzigdeichsanierung 2001	 Oderdeich bei Zehlendorf, 1997
<b>Weitere Geokunststoffanwendungen innerhalb des Drei-Zonen-Deiches</b>			
Deichzone & Funktion		 <p>Oberflächenerosionsschutz und Vegetationshilfe mit geosynthetischen Erosionsschutzsystemen (z.B. zur Sicherung bei Deichüberlaufstrecken)</p> <p>Erhöhung der Tragfähigkeit bei Gründung auf gering tragfähigem Untergrund mit Geokunststoffbewehrungen (z.B. mit Geogittern) an Deichsohle und/oder Tragschicht des Deichverteidigungsweges</p>	

## 3 Überströmungssicherung mit Geokunststoffen

### 3.1 Allgemeines

Überströmungssicherungen von Erdbauwerken, wie sie bei z. B. Hochwasserrückhaltebecken zur Anwendung kommen, können in vielen Variationen ausgeführt werden. Eine Übersicht der Möglichkeiten bietet z. B. LFU BW (2004). Die Anforderungen an Überströmungssicherungen an Dauerhaftigkeit, Stabilität, Landschaftsverträglichkeit, u.v.m. sind in zahlreichen Publikationen, wie z. B. in BOSSHARD (1991), BIEBERSTEIN (2003), LFU BW (2004), HASELSTEINER & STROBL (2005) und HASELSTEINER ET AL. (2007) erläutert. Bei nur bei Hochwasser eingestauten Deichen oder Hochwasserrückhaltebecken, die als in letzter Zeit häufig als Trockenbecken ausgeführt werden, werden über die die Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit berücksichtigenden Anforderungen in besonderem Maße die landschaftsästhetische Einbindung sowie ökologische Aspekte berücksichtigt. Im Deichbau fordert DIN 19712/1997, dass bei „*jeder Deichplanung ... zu überprüfen [ist], ob sich die Katastrophengefahr verringern lässt durch die Ausbildung von gegen Erosion gesicherten Überlaufstrecken in günstig gelegenen Deichabschnitten.*“ Dabei zielt die DIN 19712/1997 wahrscheinlich eher auf die Schaffung von Notventilen und die Gewinnung von Retentionsraum ab, die vorher dargelegten Gründe unterstreichen diese Aussage jedoch zusätzlich. Bei Hochwasserschutzdeichen gehört eine derartige, Sicherung „*bisher nicht zur wasserbaulichen Praxis.*“

Überströmungssicherungen mit Geokunststoffen zählen nach LFU BW (2004) zu den Verbundbauweisen. Die Anwendungs- bzw. Konstruktionsmöglichkeiten sind vielfältig. Es können Schlaufen, Lagen, Schläuche, Container oder auch mit Erdnägeln befestigte Auflagen ausgeführt werden. Die Vorteile im Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Stabilität bestätigt auch LFU BW (2004): „*Grundsätzlich lassen solche Bauweisen eine deutlich größere Belastbarkeit bzw. steilere luftseitige Böschungsneigungen zu, weshalb sie auch aus wirtschaftlichen Erwägungen von Bedeutung sein können.*“ Dass diese Bauweise mit Geokunststoffen noch nicht baupraktisch im Bereich Deichbau umgesetzt wurde, liegt vor allem daran, dass ein „*umfassendes statisches Nachweiskonzept für*

*Verbundbauweisen ... bislang noch nicht*“ existiert (LFU BW, 2004). Die Funktionalität sowie die Standsicherheit des Deiches und aller mit der Überströmungssicherung zusammenhängenden Bauwerke müsste für den Einzelfall bislang noch versuchstechnisch festgestellt werden. Hinzuweisen gilt es an dieser Stelle, dass im Küstenschutz zur Dünensicherung und Deichertüchtigung geotextile Sandcontainer- und Schlauchkonstruktionen bereits seit längerem eingesetzt werden (vgl. z. B. MARTINI, 2003; OUMERACI ET AL., 2002; RESTALL ET AL., 2004).

### 3.2 Auswirkungen von Überströmungssicherungen

Eine Überströmungssicherung bewirkt bei entsprechenden Wasserständen eine im Vergleich zu einem Deichbruch verzögerte Flutung des Deichhinterlandes. Diese Verzögerung kann zum einen den vom Hochwasser Bedrohten und den Hochwasserschutzbehörden Zeit schenken, entsprechende Maßnahmen zur Evakuierung zu treffen, und zum anderen aber auch eine bestimmte Zeitspanne zur Verfügung stellen, auch wenn diese nur wenige Stunden beträgt, damit die Betroffenen Maßnahmen zur Hochwasserabwehr treffen und den drohenden Schaden vermindern können. Dies kann sich durch Maßnahmen zur Objektverteidigung äußern oder dadurch, dass Güter aus dem Gefahrenbereich geschafft werden. Dies führt i. Allg. zu einer Veränderung der Schadensfunktion im Objektgebiet, was bei der folgenden Betrachtung der Auswirkung von für Überströmung ausgelegten Deichen näher erläutert ist (siehe Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.3).

Durch die Überströmungssicherung wird auch die Deichbruchwahrscheinlichkeit vermindert, was daran liegt, dass bei seltener auftretenden Wasserständen die Standsicherheit des Deiches gewährleistet bleibt (siehe Abschnitt 3.2.4).

Darüber hinaus sollte unbedingt beachtet werden, dass im Zuge von Deichertüchtigungsmaßnahmen, infolge derer nicht selten aufgrund von erdstatischen Erwägungen eine Abflachung der landseitigen Böschung erfolgen muss, der Einsatz von Geokunststoffen als Bodenbewehrung steilere Böschungen zulassen können. Dies kann dazu führen, dass ohne zusätzliche Kosten ein Deich ertüchtigt und gleichzeitig überströmungssicher ausgebildet werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.4).

### 3.2.1 Betrachtetes System (Beispiel)

Zur Veranschaulichung der verzögernden Wirkung und der Schadensreduktion wird ein einfaches theoretisches Beispiel eines mit einem Deich geschützten Polders betrachtet.

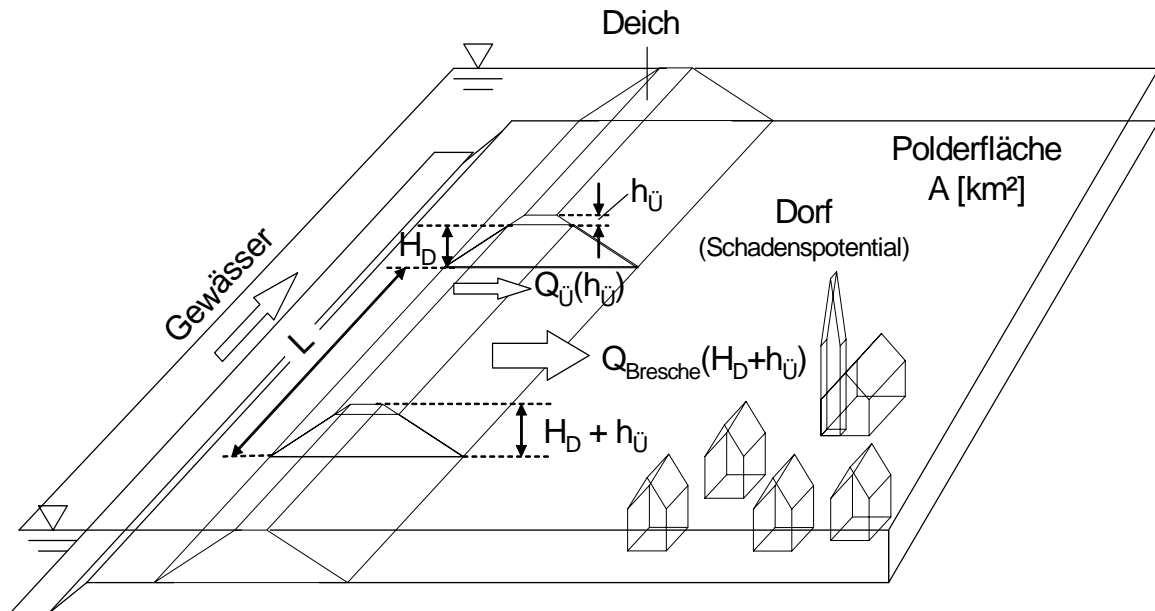


Abb. 2: Systemskizze des Anschauungsbeispiels – eingedeichter Polder mit Dorf

Verglichen wird der Zufluss, der infolge eines Deichbruchs und infolge einer Überströmung des Deichs in den Polder auftritt. Die Überströmungshöhe  $h_{\ddot{U}}$  beträgt im Beispiel konstant  $h_{\ddot{U}} = 0,30$  cm. Die betrachtete Breschenhöhe beläuft sich dementsprechend auf die Deichhöhe  $H_D$  zuzüglich der Überströmhöhe  $h_{\ddot{U}}$ . Vereinfachend wird zur Berechnung des Abflusses durch die Bresche bzw. über den Deich die POLENI-Formel (Gleichung (1)) mit einem für breite Wehrüberfälle charakteristischen Überfallbeiwert  $\mu = 0,577$  verwendet.

$$Q = c \cdot \mu \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_{\ddot{U}}^{3/2} \quad (1)$$

mit  $c$ : Faktor für den Rückstau einfluss [-] (hier vernachlässigt:  $c = 1,0$ ),  $\mu$ : Überfallbeiwert nach POLENI [-] (hier:  $\mu = 0,577$ ),  $L$ : Länge des Überfalls bzw. der Deichbresche [m],  $g$ : Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ],  $h_{\ddot{U}}$ : Überfallhöhe [m].



Die bei der Überfallhöhe zu berücksichtigende Geschwindigkeitshöhe (Energiehöhe) kann bei der Annahme von parallel zum Gewässer angeordneten Deichen und geringen Fließgeschwindigkeiten am Deich vernachlässigt werden. Speziell für Deichbrüche entwickelte Überflussformeln wurden z. B. DISSE ET AL. (2003) und BROICH (2003) angegeben. Da es in der folgenden Betrachtung weniger auf den Deichbruch selbst oder die damit verbundene Breschenentwicklung bzw. zeitliche Flutung ankommt, da der Schadensentwicklung die ungünstigsten Verhältnisse zugrunde gelegt werden, ist eine Abschätzung mit der herkömmlichen POLENI-Formel bei Weitem ausreichend.

Der Polderraum wird als Quader mit der Grundfläche  $A$  [km<sup>2</sup>] und der Höhe  $H_D + h_{\bar{U}}$  [m] angenommen. Es wird ferner angenommen, dass der Polder ohne Verzögerung geflutet wird. Somit wird die sich einstellende zeitliche Ausbreitung der auftretenden Flutwelle vernachlässigt. Untersuchungen zur Ausbreitung von Flutwellen infolge des Versagens von Hochwasserschutzbauwerken sind z. B. in HARMS ET AL. (2004) veröffentlicht.

### 3.2.2 Verzögerung der Überflutung des Polders

Die Verzögerung der Überflutung des Polders bzw. des ansteigenden Polderwasserstand  $h_{w,Polder}$  [m] resultiert aus dem Unterschied des Abflusses, der sich aufgrund der Überströmung mit  $h_{\bar{U}} = 0,30$  m und der Breschenhöhe  $H_D + h_{\bar{U}}$  [m] einstellt. Für eine Polderfläche  $A_{Polder} = 1$  km<sup>2</sup> und Deichhöhen  $H_D = 1 \div 4$  m ist der Polderwasserstand in Abhängigkeit von der Überströmzeit  $t_{\bar{U}}$  [h] in Abb. 3 dargestellt. Bei einem Deichbruch füllt sich aufgrund der höheren Überströmhöhe der Polder naturgemäß schneller. Der Polder füllt sich je nach Deich- bzw. Polderhöhe bis zur Polderwasserstandshöhe  $h_{w,Polder} = H_D + h_{\bar{U}}$ . Mit zunehmendem Wasserstand im Polder nimmt die Überströmhöhe ab, so dass der Zufluss in den Polder sich verringert und folglich das Ansteigen des Polderwasserstandes sich verlangsamt. Der Polder des Anschauungsbeispiels ist bei Überströmung je nach Polderhöhe in etwa nach 20 bis 100 h gefüllt, bei einem Deichbruch hingegen bereits nach ca. 10 h (Abb. 3). Der Zeitunterschied  $\Delta t$  zwischen den Zeitpunkten, wann je nach Flutungsvorgang – Überströmung oder Deichbruch – der gleiche Polderwasserstand erreicht ist, wird als Verzögerung bezeichnet.

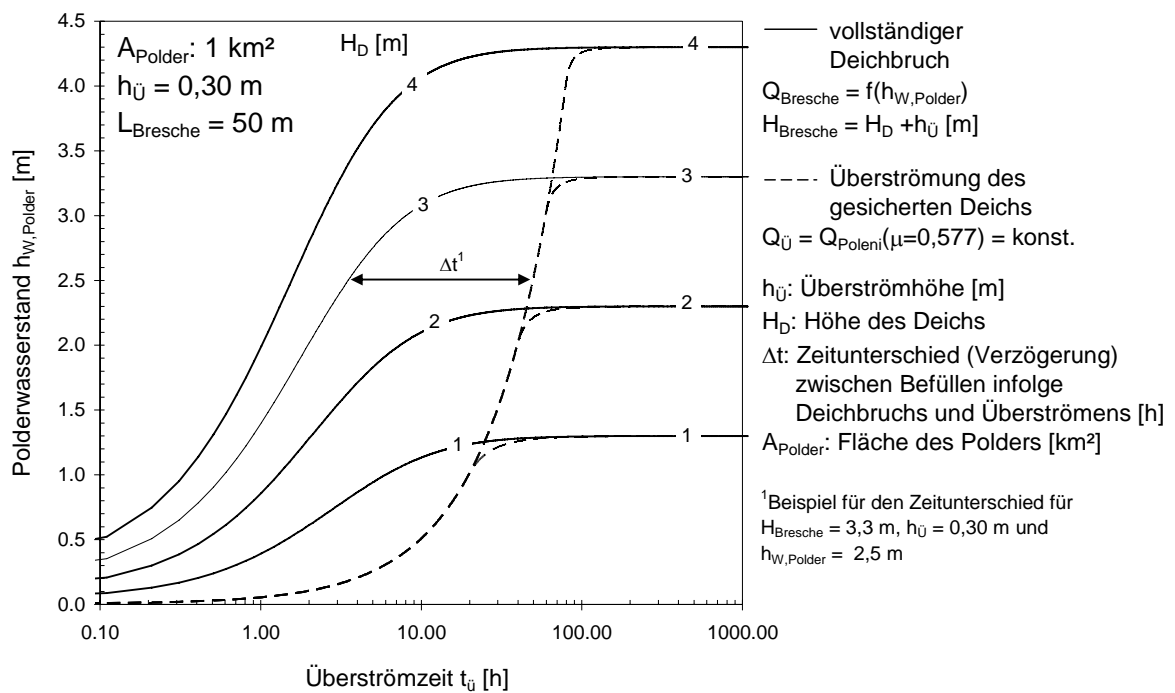


Abb. 3: Polderwasserstand  $h_{\text{W,Polder}}$  in Abhängigkeit von der Überströmzeit  $t_{\text{Ü}}$  für die Polderflutung infolge eines Deichbruchs und infolge Überströmens

Wird die Verzögerung  $\Delta t$  [h] über den Polderwasserstand  $h_{\text{W,Polder}}$  [m] aufgetragen, erhält man den in Abb. 4 dargestellten Zusammenhang. Annähernd kann eine lineare Abschätzung der Verzögerung unter Verwendung des Polderwasserstands  $h_{\text{W,Polder}}$  [m] verwendet werden. Bei im Vergleich zur Deichhöhe hohen Polderwasserständen nimmt die Verzögerung ab. Wenn der Polderwasserstand gleich der Deichhöhe ist, bleibt die Verzögerung konstant, da bei den hier getroffenen Annahmen der Zufluss infolge Überströmung und Deichbruch gleich sind. Im betrachteten Beispiel beträgt die Verzögerung, bis dass sich ein Polderwasserstand von 0,50 m einstellt, in etwa 10 h. Mit zwei Tagen Verzögerung stellt sich bei einem gesicherten Deich bei entsprechenden Deichhöhen  $H_{\text{D}} = 3$  oder 4 m ein Wasserstand von 2,5 m ein.

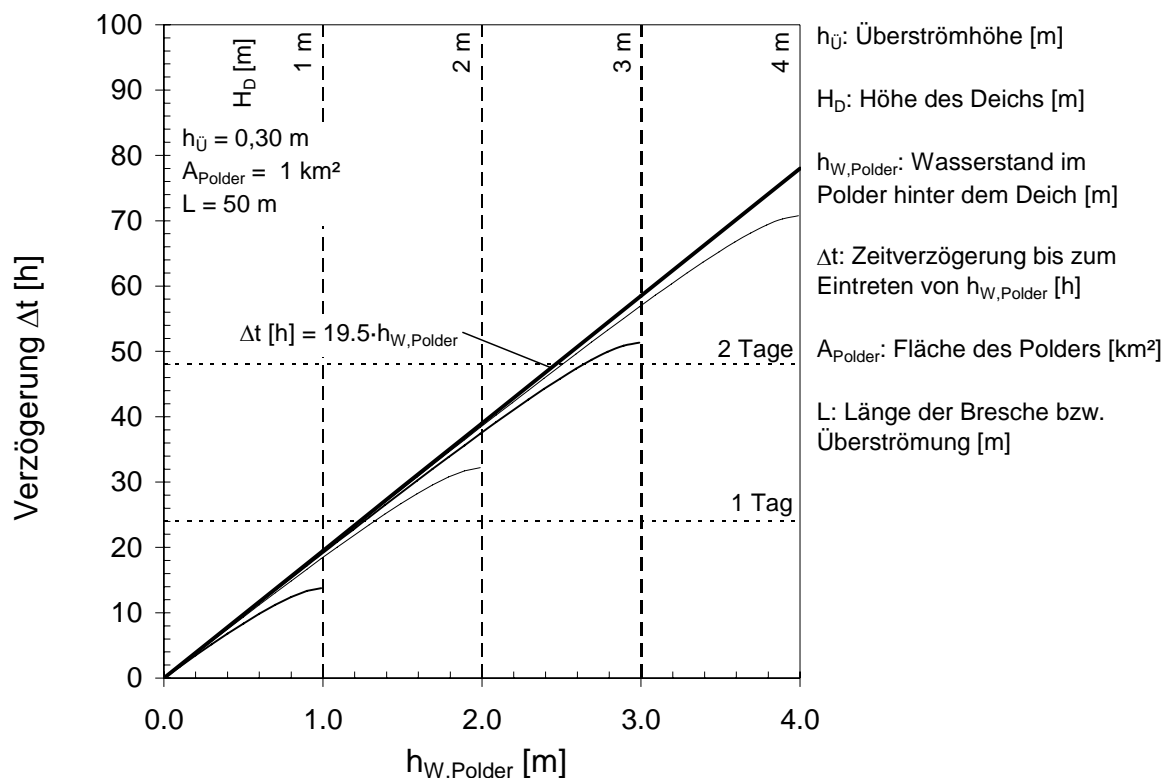


Abb. 4: Verzögerung  $\Delta t$  der Überflutung abhängig von der Deichhöhe  $H_D$  und dem Wasserstand im Polder  $h_{W,Polder}$

### 3.2.3 Vermeidung von monetären Schäden

Die Zuordnung von monetären Schäden zu bei Überflutungen auftretenden Wasserständen im Polder kann unter Zuhilfenahme von Schadensfunktionen erfolgen (siehe z. B. PATT, 2001; MERZ, 2006). Voraussetzung ist natürlich, dass im Überflutungsgebiet Schadenspotential vorhanden ist. Im Beispiel wurde deshalb in den Polder kurzerhand ein Dorf hineingelegt. Mit Gleichung (2) ist eine einfache Form einer Schadensfunktion aus MERZ (2006) angegeben:

$$D = B \cdot \sqrt{h_{W,Polder}} \quad (2)$$

mit  $D$ : monetärer Schaden [ $10^3$  €],  $B$ : Anpassungsfaktor [-],  $h_{W,Polder}$ : Wasserstand im Polder [m].

Es stehen eine große Anzahl verschiedener Funktionen zur Beschreibung der jeweiligen Schadenscharakteristik eines Polders zur Verfügung. Näheres kann z. B. PATT (2001) entnommen werden. Da die Betrachtung hier nur auf eine qualitative Aussage abzielt, wird im Folgenden ausschließlich Gleichung (2) aus MERZ (2006) verwendet. Dabei wird erst für einen besiedelten Polderbereich der mittlere Anpassungsfaktor  $B_0 = 23,5$  nach MERZ (2006) gewählt. Da, wie in Abschnitt 3.2.2 gezeigt wurde, eine erhebliche Verzögerung der Überflutung des Polders bei gegen Überströmung gesicherten Deichstrecken auftreten kann, wird angenommen, dass durch die zusätzliche Reaktionszeit für die betroffenen Bewohner auch eine zusätzliche Vermeidung von Schaden auftreten kann, was hier durch eine Anpassung des Faktors  $B_1 = 2/3 \cdot B_0 = 15,67$  berücksichtigt wird (Abb. 5).

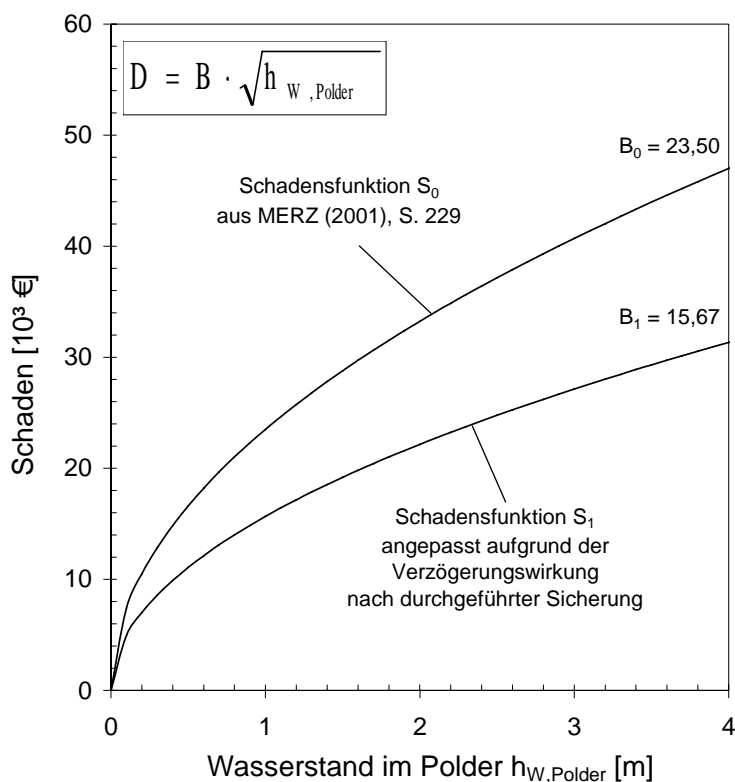


Abb. 5: Zugrunde gelegte Schadensfunktionen  $S_0$  und  $S_1$

Praktisch können die Katastrophenschutzbehörden den Betroffenen unter Berücksichtigung des Risikos im betrachteten Beispiel bei Inkaufnahme eines Wasserstandes von 0,50 m im Polder 10 h Zeit bis zur Evakuierung lassen. Diese zusätzliche Zeit kann genutzt werden, um zum einen Güter, Tiere und natürlich sich selbst an einen sicheren

Ort zu schaffen und/oder Vorort Hochwasserabwehrmaßnahmen durchzuführen, wie dies z. B. durch das Aufstellen von mobilen Hochwasserschutzelementen geschehen kann. Dadurch kann im Einzelfall Schaden gänzlich vermieden und kumulativ im Überflutungsgebiet die Gesamtschäden verringert werden.

Die Schadensreduktion  $\Delta D/D_{\max}$  [-] ist somit abhängig von der Überströmdauer  $t_{\bar{U}}$  [m] (Abb. 6). Die durchgezogenen Linien sind mit der Schadensfunktion  $S_0$  aus Abb. 5 berechnet worden, die gestrichelten Linien mit der Schadensfunktion  $S_1$ . Bei geringen Überströmdauern wird aufgrund des sich daraus ergebenden niedrigen Wasserstands im Polder ein im Vergleich zu einem Deichbruch geringerer Schaden verursacht. Die Schadensreduktion ist folglich dann besonders hoch. Dauert die Überströmung an, verursacht auch der Zufluss infolge Überströmung einen hohen Wasserstand und somit einen hohen Schaden. Wird die etwas flacher geneigte Schadensfunktion  $S_1$  zugrunde gelegt, nähern sich die Kurven für die Schadensreduktion (gestrichelte Linien) einem Endniveau, das größer Null ist. Diese minimal auftretende Schadensreduktion hängt lediglich von der Veränderung der Schadensfunktion (hier:  $S_0 \rightarrow S_1$ ) ab.

Aus den Zusammenhängen in Abb. 6 ist ersichtlich, dass kurz überströmte für diese Belastung ausgelegte Deiche die größte Schadensreduktion – im Beispiel bis zu ca. 65% – bewirken, da sich ein sehr geringer Wasserstand im Polder einstellt. Durch die verzögernde Wirkung und die dadurch möglichen den Schaden mindernden Handlungen wird diese Reduktion bei  $t_{\bar{U}} = 10$  h noch auf etwa 75% verstärkt. Während bei der Schadensfunktion  $S_0$  ab einer Überströmdauer  $t_{\bar{U}} > 100$  h keine Schadensreduktion mehr auftritt, werden beruhend auf Schadensfunktion  $S_1$  noch 33% der Schäden vermieden. Praktisch betrachtet würde das für bayrische Verhältnisse heißen, dass an Gewässern mit schnell an- wie ablaufenden Hochwasserganglinien mit kurzen Scheiteldauern, beispielhaft seien hier die südbayerischen Flüsse Mangfall und Salzach erwähnt, die Reduktion des Schadens in erster Linie vom reduzierten Wasserstand im Polder herrührt. An größeren Gewässern, wie z. B. dem Main und der Donau, wenn lang anhaltende Hochwasser auftreten können, kann eine Schadensreduktion aus dem Handlungsspielraum resultieren, den eine Verzögerung der Überflutung bei gesicherten Deichen mit sich bringt.

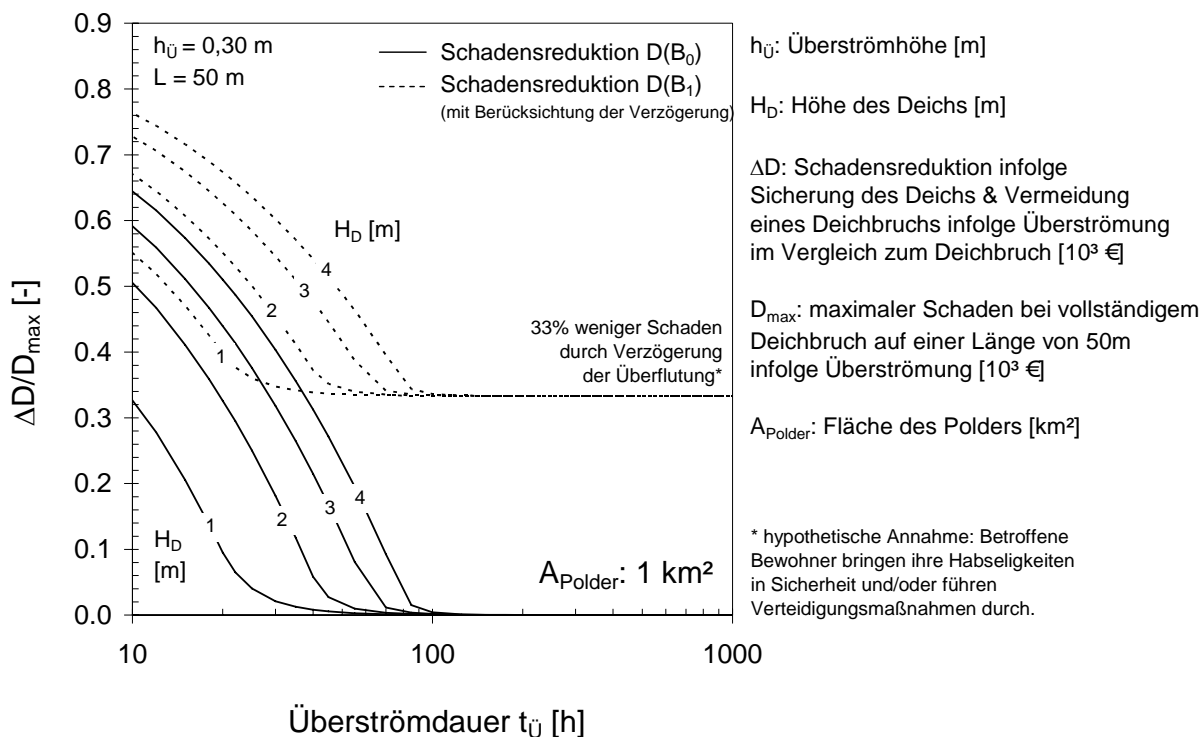


Abb. 6: Schadensreduktion anteilig am Maximalschaden im Falle eines Deichbruchs in Abhängigkeit von der Überströmdauer  $t_{\text{Ü}}$  für verschiedene Deichhöhen  $H_D$  und die zwei Schadensfunktionen  $S_0$  und  $S_1$  aus Abb. 5

Aus dem Schaden kann das Risiko  $R$  [ $10^3$  €] hergeleitet werden. Die hier angeführte einfache Gleichung (3) wird auch als Versicherungsrisiko bezeichnet. Es bildet sich aus dem Produkt des Schadens  $D$  [ $10^3$  €] und der Eintretenswahrscheinlichkeit  $\alpha$  [-]:

$$R = \alpha \cdot D \quad (3)$$

mit  $R$ : Risiko [ $10^3$  €],  $D$ : monetärer Schaden [ $10^3$  €],  $\alpha$ : Eintretenswahrscheinlichkeit [-] ( $\alpha = 0 \div 1$ ).

Da es i. Allg. sehr schwierig ist, für Deichbrüche realistische Eintretenswahrscheinlichkeiten abzuschätzen, wird im folgenden Abschnitt dieser Punkt zwar qualitativ behandelt, jedoch nicht mehr im Hinblick auf das Risiko näher behandelt. Angemerkt sei hier noch, dass die Eintretenswahrscheinlichkeit des Schadens vom Zustand des Deichbauwerks und dem vorhandenen Schutzgrad, sprich Wasserstand, abhängt.

### 3.2.4 Deichbruchwahrscheinlichkeit

Deiche können, sofern sie nicht den allgemein anerkannten Regeln (a.a.R.d.T.) entsprechen, bei niedrigen Wasserständen weit unter dem Bemessungshochwasserstand (BHW) versagen. Deiche die den a.a.R.d.T. entsprechen sind i. d. R. auf Kronenstau bemessen und versagen dementsprechend bei dieser Belastung mit der verbleibenden, nie auszuschließenden Restwahrscheinlichkeit. Bei Ingenieurbauwerken wird in diesem Zusammenhang nicht selten von einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $p_0 = 10^{-6}$  ausgegangen. Übersteigt der Wasserstand jedoch die Krone und tritt eine Überströmung ein, so werden hierfür nicht ausgelegte Deiche auf kurz oder lang „mit Sicherheit“ versagen. Ist ein Deich dagegen auf eine bestimmte Überströmungshöhe  $h_{\bar{U}}$  [m] dimensioniert, versagt er mit der eben genannten Wahrscheinlichkeit  $p_0$ .

Qualitativ ist der Zusammenhang zwischen Wasserstand und Deichbruchwahrscheinlichkeit für drei unterschiedlich ausgebildete Deiche in Abb. 7 dargestellt. Im gezeigten, theoretischen Beispiel wurde angenommen, dass der „Altdeich“ bei Kronenstau, der den a.a.R.d.T. entsprechende Deich bei  $h_{\bar{U}} = 0,50$  m und der für  $h_{\bar{U}} = 0,30$  m gesicherte Deich bei  $h_{\bar{U}} = 1,0$  m eine Versagenswahrscheinlichkeit von 100% aufweist.

Die für einen Deichbruch verantwortlichen Versagensmechanismen sind vielfältig und in ihrem Ablauf unterschiedlich. Einige Hinweise und Beispiele hierzu enthalten ARMBRUSTER-VENETI (1999) und HASELSTEINER & STROBL (2005). Deshalb kann eine absolute Deichbruchwahrscheinlichkeit unter Beachtung aller möglichen Schädigungsprozesse und Versagensmechanismus derzeit und wahrscheinlich auch in näherer Zukunft nicht verlässlich ermittelt werden. Aus diesem Grund werden bei Simulationen von Deichbruchszenarien auch vereinfachte Deichbruchfunktionen verwendet, die ähnlich den in Abb. 7 gezeigten Verlauf haben können. Näheres hierzu kann z. B. in BROICH (2006) nachgelesen werden.

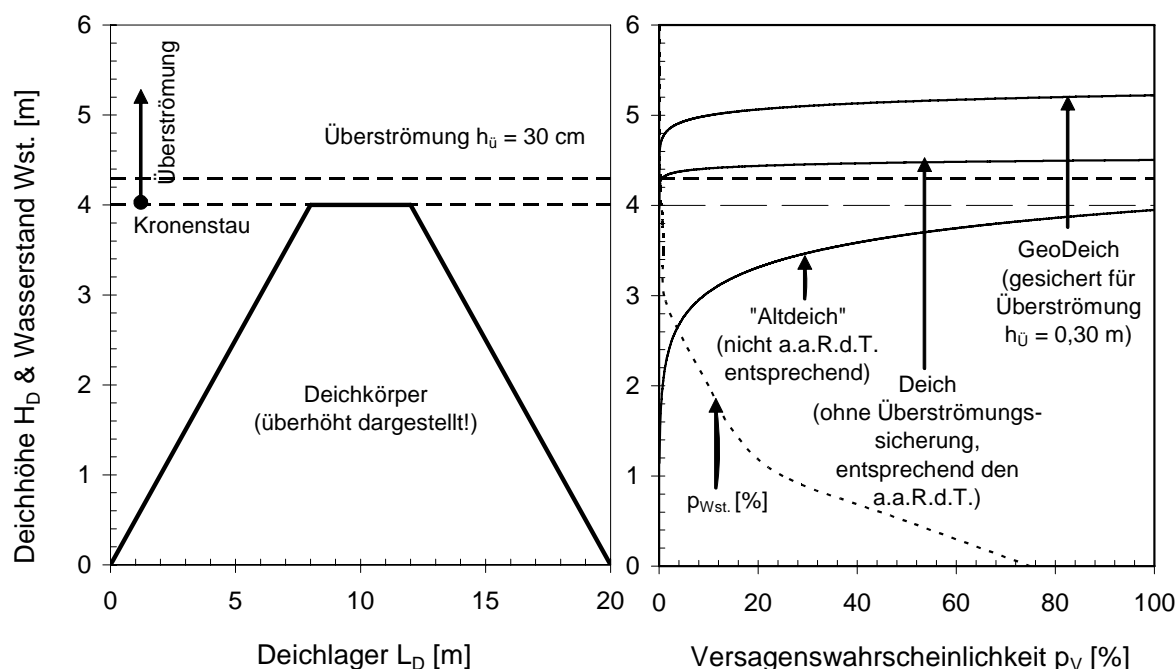


Abb. 7: Versagenswahrscheinlichkeit von Deichen in Abhängigkeit vom Wasserstand für drei unterschiedliche Deichsysteme (qualitativ)

Hilfreicher erscheint für praktische Anwendungen zur Abschätzung der Sicherheit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit von Hochwasserschutzbauwerken, wie Fluss- oder Küstendeiche, die Verwendung von unscharfen Wahrscheinlichkeiten (vgl. z. B. PERZLMAIER & HASSELSTEINER, 2006; KORTENHAUS & OUMERACI, 2002). Schwierig bleibt es jedoch, die maßgebenden Versagensfälle, z. B. anhand einer Ereignisbaumanalyse, herauszufiltern, da, wie es z. B. bei Hochwasserschutzdeichen der Fall ist, das Versagen vom Bauwerk selbst, seinen Materialien und dem Aufbau bzw. Zustand abhängt. Daraus ergeben sich viele unbekannte Eingangsgrößen sowohl auf der Einwirkungs- und Versagensannahme als auch auf der Widerstandsseite.

### 3.3 Anwendung von Geokunststoffen zur Überströmungssicherung

#### 3.3.1 Allgemeines

Neben den zahlreichen, meist bei Hochwasserrückhaltebecken als Hochwasserentlastungsanlage verwendeten, meist sehr kostenintensiven Möglichkeiten zur Ausbildung von Überströmstrecken an Deichen und Dämmen (siehe z. B. LFU BW, 2004; HASSELSTEINER ET AL., 2007) wird in letzter Zeit verstärkt nach Möglichkeiten gesucht,



kostengünstig unter Verwendung von Geokunststoffen überströmbare Deiche und Dämme auszubilden. Gemäß ihren Anwendungsgebieten (siehe Abschnitt 2; DVWK 76, 1986; DVWK 221, 1992) werden Geokunststoffe hierbei zum Trennen, Filtern, Bewehren, Verpacken, etc. eingesetzt. Geokunststoffe erhöhen den Erosionswiderstand und stellen je nach Bedarf die Filterstabilität her. Die Konstruktionen müssen dabei dauerhaft den auftretenden Belastungen, die auch von der Durchsickerung des Deichs herrühren, standhalten.

### 3.3.2 Sicherungsmöglichkeiten

Generell können gesicherte Deiche mit

- Schlaufen
- waagrechten Bahnen
- befestigten, böschungsp parallelen Bahnen
- Schläuchen /Containern

ausgeführt werden.

Ausführungen mit Schlaufen und Containern sind bereits in LFU BW (2004) berücksichtigt. *„Grundsätzlich lassen solche Bauweisen eine deutlich größere Belastbarkeit bzw. steilere luftseitige Böschungsneigungen zu, weshalb sie auch aus wirtschaftlichen Erwägungen von Bedeutung sein können. ... Ein umfassendes statisches Nachweiskonzept für Verbundbauweisen ist bislang noch nicht verwirklicht ... .“*

Der Deich kann bei Betrachtung der Überströmungssicherung in die Bereiche wasserseitige Böschung, Krone, landseitige Böschung und landseitiger Deichfuß aufgeteilt werden. Während zur Sicherung des landseitigen Deichfußes aufgrund der dort auftretenden hohen Belastung i. Allg. eher geschlossene Systeme – Container oder Schläuche – in Frage kommen, ist die Sicherung der Böschung je nach Geokunststoff, Belastung und Deichaufbau auf verschiedene Arten möglich (Abb. 8). Je nach Ausführungsart und

Belastung können am landseitigen Deichfuß eine Energieumwandlungsanlage in Form eines Tosbeckens oder einer Tosmulde notwendig sein.

Neben den genannten Möglichkeiten werden Geokunststoffe selbstverständlich gemäß ihres Anwendungsgebietes in Kombination mit den herkömmlichen Sicherungsmaßnahmen, wie z .B. einem Steinwurf, verwendet. BOSSHARD (1991) verweist auch auf die Möglichkeit, Vegetationsdecken mit Geokunststoffen, wie z. B. einem Wirtgelege, zu verstärken und als Überströmungssicherung heranzuziehen.

Weitere Erläuterungen sowohl zu den einzelnen, prinzipiellen Möglichkeiten der Überströmungssicherung von Deichen mit Geokunststoffen als auch der Umsetzung bei Deichertüchtigungsmaßnahmen können HASELSTEINER ET AL. (2007) entnommen werden (vgl. Abb. 8).

An dieser Stelle wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die hier und in HASELSTEINER ET AL. (2007) enthaltenen, theoretischen Ausführungen und versuchs-technisch erprobten Konstruktionen keine Musterbauwerke darstellen, anhand derer Bemessungen durchgeführt werden sollten, sondern eine Art Grundlagenstudie, die einige Hinweise zur möglichen baupraktischen Ausführung und Bemessung geben können.

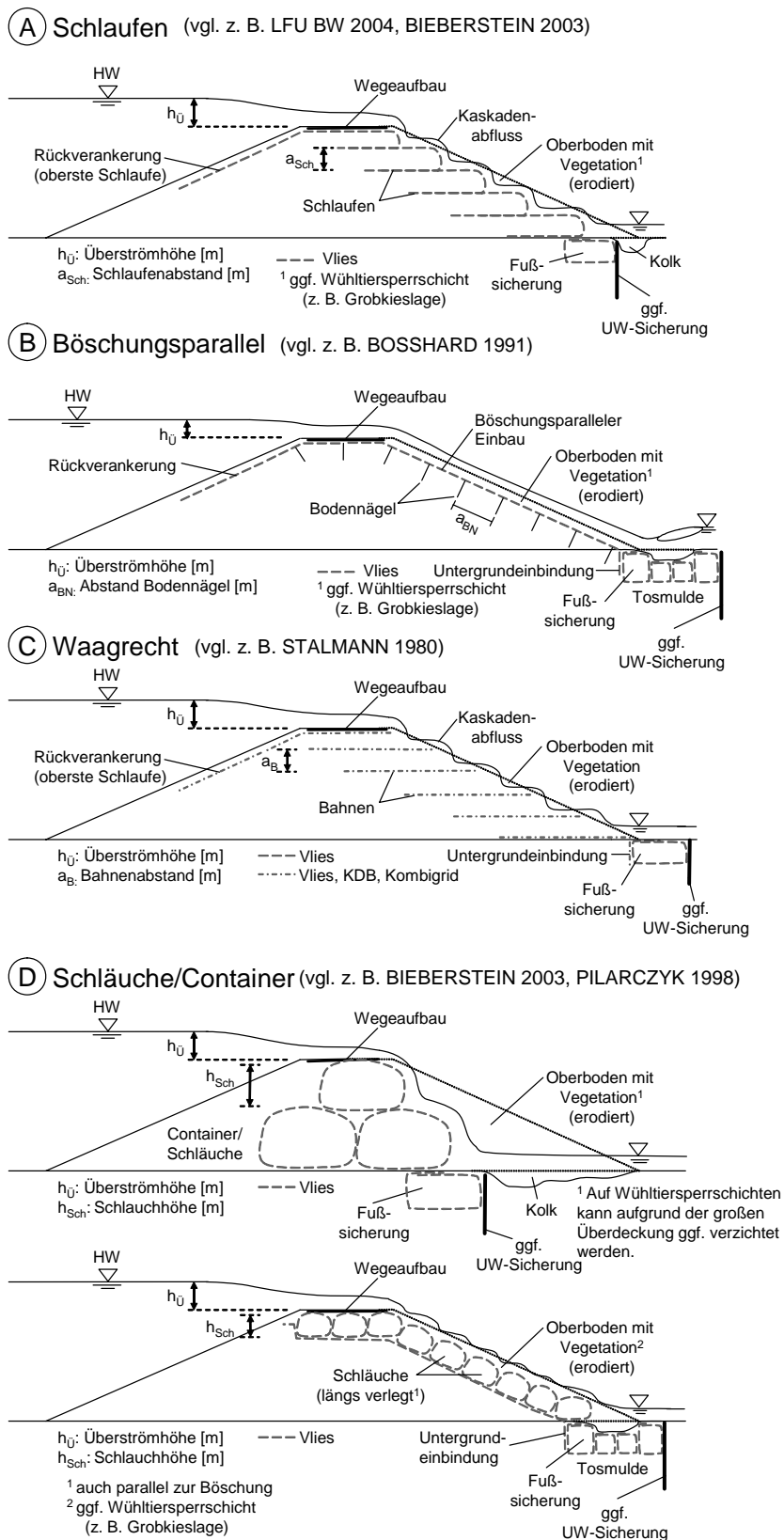


Abb. 8: Möglichkeiten der Überströmungssicherung von Deichen mit Geokunststoffen (aus HASELSTEINER ET AL., 2007)

### 3.3.3 Eigene Untersuchungen

Im Rahmen des von der Fa. Naue GmbH & Co. KG und der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung geförderten Projekts „Geodeich“ wurde das in Tab. 3 angegebene Versuchsprogramm entwickelt. Zwei der 17 Versuche werden im Laufe des Jahres 2007 in der Versuchsanstalt Oberrach (VAO) durchgeführt. Dabei handelt es sich um mit Geokunststoffen verstärkte Vegetationsdecken. Um einen guten Verbund bzw. eine gute Verwurzelung von den in unterschiedlichen Tiefen unter dem aufgetragenen Fertiggras verlegten Wurzeln und dem Oberboden zu erreichen, wird die nächste Vegetationsperiode abgewartet, bevor die Überströmungsversuche durchgeführt werden.

Tab. 3: Versuchsübersicht (aus HASELSTEINER ET AL., 2007)

Nr.	Bezeichnung/Aufbau	q [l/s*m]	h <sub>Ü</sub> [cm]	b <sub>Ü</sub> [cm]	1:m [-]	n <sub>spez.</sub> [1/m <sup>2</sup> ]	Kurzbewertung / Ergebnisbeschreibung
1	Vlies parallel ohne Nägel	50	10	1.0	2.5	-	Sofortiges Versagen
2	Vlies parallel mit Nägel (3)	130	17	2.3	1.5	1.9	Instabile Konstruktion / deutliche Verformung
3	Schlaufen verpackt	50	10	1.0	1.5	-	Stabile Konstruktion / geringe Verformungen
4	Schlaufen verpackt	80	15	1.0	1.5	-	
5	Schlaufen verpackt	130	17	2.3	1.5	-	
6	Lagen horizontal	80	15	1.0	2.5	-	Instabile Konstruktion / deutliche Verformung
7	Lagen horizontal	130	35	2.3	2.5	-	
8	Gittervlies parallel mit Nägel (0)	50	10	1.0	2.5	3.5	Stabile Konstruktion / geringe Verformungen
9	Gittervlies parallel mit Nägel (1)	300	35	1.0	2.5	2.6	
10	Gittervlies parallel mit Nägel (2)	300	35	1.0	2.5	1.3	
11	Gittervlies parallel mit Nägel (1)	130	17	2.3	2.5	2.6	
12	Sandmatte parallel mit Nägel (1)	300	35	1.0	2.5	2.6	
13	Sandmatte parallel mit Nägel (2)	300	35	1.0	2.5	1.3	
14	Sandmatte parallel mit Nägel (1)	130	17	2.3	2.5	2.6	
15	Aufbau mit Deichhinterweg	130	17	2.3	1.5	-	Abrutschen des Deichhinterwegs
16	Fertigrasen	in Vorbereitung					-
17	Fertigrasen + Maschenware	in Vorbereitung					-

Erklärung:

q: spezifische Belastung [l/s\*m]

h<sub>Ü</sub>: Überströmhöhe [m]

b<sub>Ü</sub>: Überströmbreite [m]

m: Neigung der Böschung 1:m [-]

n<sub>spez.</sub>: spezifische Anzahl der Erdnägel pro m<sup>2</sup> [1/m<sup>2</sup>]

Nagelraster:

(0) 100% (Raster 0)

(1) 75% (Raster 1)

(2) 37.5% (Raster 1)

(3) 55% (Raster 2)

Der Versuchsdeich an der VAO ist 1,60 m hoch, ca. 2,5 m breit und hat eine Kronenbreite von über 2,0 m. Die Böschungsneigungen variierten bei den Versuchen zwischen 1:1,5 und 1:2,5, die spezifische Belastung zwischen q = 50 ÷ 300 l/sm. Stellvertretend für die anderen Konstruktionen ist der Modelldeich mit der Schlaufensicherung in Abb.

9 dargestellt. Als Deichmaterialien wurden Sand (0/4 mm) und Kies (0/32 mm) verwendet. Zwischen die landseitigen Kiesaufbauten und dem aus Sand bestehenden Deich wurde ein Vliesstoff gelegt, das gleichzeitig die Filterstabilität in diesem Bereich herstellte. Die Sicherung der Krone erfolgte i. d. R. über eine Rückverankerung der obersten Bahn auf der wasserseitigen Böschung ggf. mit zusätzlicher Fixierung durch Erdnägeln. Die Geokunststoffe zur Böschungssicherung wurde i. d. R. am wasserseitigen Deichfuß konstruktiv fixiert. Der Deichfuß selbst wurde mit einer mit Vlies ummantelten und mit Klettband verschlossenen Kiespackung gesichert. Am Deichfuß traten während aller Versuche keinerlei Schäden auf.

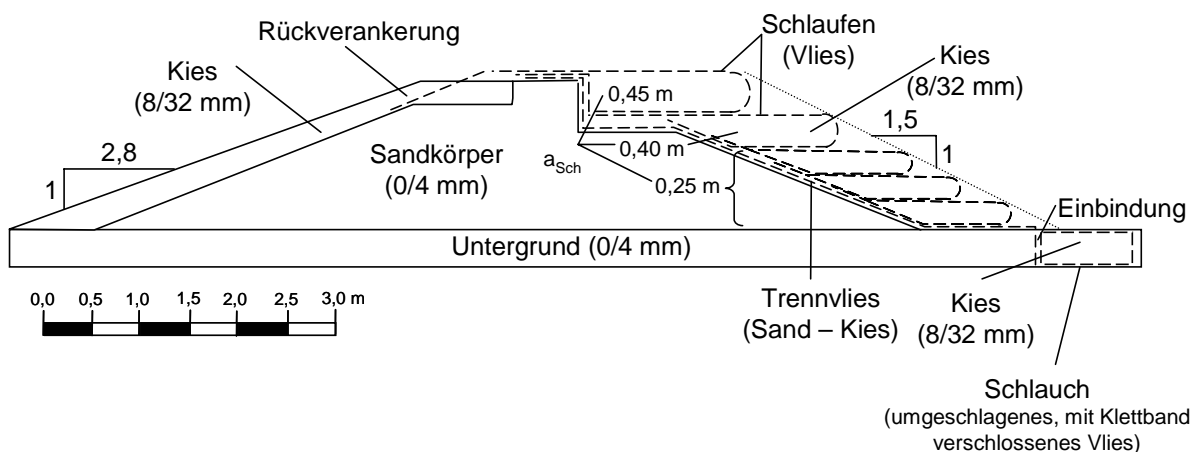


Abb. 9: Möglichkeiten der Überströmungssicherung von Deichen mit Geokunststoffen (aus HASELSTEINER ET AL., 2007)

Während sich die Schlaufenlösung (Versuche 3 bis 5), wie zu erwarten war, als äußerst stabil herausstellte, war die Standsicherheit des Deichmodells bei Konstruktionen mit waagrechten (Versuche 6 und 7) sowie bei nicht fixierten böschungsp parallelen Bahnen (Versuch 1) höchst instabil. Entgegen der Versuchsergebnisse von STALMANN (1980) zeigten die eigenen Versuche, dass die Konstruktionsart mit waagrechten Bahnen erhebliche Risiken bergen kann. In den Versuchen von STALMANN (1980) wurden aber relativ starre Kunststoffbahnen verwendet, während in den eigenen Versuchen Vliesstoffe eingelegt wurden, was dazu führte, dass sich die Lagen stark verformten und die Erosion des Deichkörpers zwar gebremst, jedoch nicht gestoppt werden konnte. Das böschungsp parallel verlegte Vlies wurde unverzüglich angehoben und der darunter liegende Deichkörper erodiert, was dazu führte, dass sich eine Sandbeule am Deichfuß

bildete und sich die Erosion sehr rasch bis fast zur Hälfte der Kronenbreite fortentwickelte. Erschwerend kam bei Versuch 1 noch hinzu, dass zur Auffüllung des wasserseitigen Deichkörpers nicht Kies (8/32 mm) sondern erosionsanfälliger Sand (0/4 mm) verwendet wurde. Mit Erdnägeln (U-Profil,  $\varnothing = 8$  mm, Schenkellänge 30 cm) fixierte böschungsparelle Geokunststoffe verhielten sich auch bei einer Reduktion des Nagelrasters relativ stabil (Versuche 2, 8 bis 14). Versuch 15 mit relativ steiler Böschungseigung und Deichhinterweg führte zu einem Abrutschen des eingepackten Deichhinterwegs, was vornehmlich auf das Versagen der böschungsparellen Sicherung der mit 1:1 sehr steil ausgeführten Deichböschung zurückzuführen war. Die Versuche 16 und 17 werden Laufe des Jahres 2007 durchgeführt.

Weitere Querschnitte, Fotos zu den einzelnen Versuchsaufbauten und Fotos während der Versuchsdurchführung sowie weitere Ergebnisse der Versuche sind in HASELSTEINER ET AL. (2007) enthalten.

### 3.3.4 Umsetzung im Zuge von Deichertüchtigungen

Eine besondere Gelegenheit zur Umsetzung von hier besprochenen überströmungssicheren Deichen bieten sich, wenn Deiche aufgrund von Abweichungen von den a.a.R.d.T. mit hoher Priorität ertüchtigt werden müssen. Ertüchtigungsmaßnahmen an Deichbauten sind in z. B. HASELSTEINER & STROBL (2005) und HASELSTEINER (2006) ausreichend beschrieben, so dass auf die grundlegenden Möglichkeiten, Deiche zu ertüchtigen, hier nicht eingegangen werden muss. In nicht wenigen Fällen von Deichertüchtigungsmaßnahmen muss die Krone verbreitert und ein Deichhinterweg bzw. Deichverteidigungsweg auf einer landseitigen Berme angeordnet. Die Ausbildung von überströmungssicheren Deichstrecken bietet sich besonders an, wenn durch eine Verteilung der Böschung Querschnittsfläche, sprich Material und Einbaukosten gespart, werden kann. Dabei wirkt der Geokunststoff bewehrend und verhindert z. B. durch geschlossene Schlaufen Erosionen. Da bestehende Hochwasserschutzdeiche äußerst inhomogen aufgebaut sein können, müssen für jeden Einzelfall spezielle Lösungen entwickelt werden, so dass ggf. der bestehende „Altdeich“ integriert und bei Minimierung des Aufwands der landseitige Bereich des Deichs entsprechend gesichert wird

(vgl. Abb. 8). Hinweise und Skizzen möglicher Ausführungsvarianten sind in HASELSTEINER ET AL. (2007) enthalten.

## 4 Zusammenfassung & Ausblick

Die Überströmungssicherung von Deichen hat zwei Punkte, die bei der Ertüchtigung oder der Eindeichung von Gebieten mit hohem Schadenspotential beachtet werden sollten. Zum einen wird die Bauwerkssicherheit auch bei Überströmung sichergestellt, was dazu führt, dass ein Deichbruch wesentlich unwahrscheinlicher eintritt oder überhaupt verhindert wird. Dies bewirkt i. d. R., dass die Überflutung des Polders erheblich verzögert eintritt. Tatsache ist auch, dass Wasserstände nahe vom Scheitel je nach Gewässer unterschiedlich lang auftreten. Deshalb kann bei Gewässern mit Hochwasserereignissen mit kurzen Dauern eine Überströmungssicherung aufgrund des sich dann niedriger einstellenden Wasserstandes im Polder wesentlich zur Schadensreduktion beitragen. Dies erfolgt zusätzlich durch die Möglichkeit aufgrund der Verzögerung noch Maßnahmen zur Schadensminderung und/oder Hochwasserabwehr zu treffen. Diese Maßnahmen können ebenso an Gewässern mit lang anhaltenden Hochwasserereignissen eine Schadensreduktion bewirken.

Für die Anwendung von Geokunststoffen spricht im Vergleich zu den herkömmlichen Sicherungsarten von überströmten Dammbauwerken die Wirtschaftlichkeit. Geokunststoffe können als Bewehrung eingesetzt werden und somit können steile Böschungen ausgebildet werden. Das Ersparnis beim Erdbau bzw. die Verwendung von Geokunststoffen als Alternative zu den Ausführung mit anderen Sicherungsmaßnahmen, die oft sehr flache Böschungen benötigen, die i. d. R. flacher als 1:4 sind, kann somit sehr wirtschaftlich sein. Im Einzelfall kann dies im Rahmen von Deichertüchtigungsmaßnahmen bedeuten, dass im Zuge einer wirtschaftlichen „Nulllösung“ ein mit Geokunststoffen für die Überströmung gesicherter Deich bewerkstelligt werden kann.

Wie aufgrund der einschlägigen Literatur zu vermuten war, verhielt unter den untersuchten Konstruktionen die Schlaufenlösung am stabilsten. Aber auch die böschungsparell fixierte Lösung stellte sich als widerstandsfähig heraus, wobei sie baubetrieblich,

da sie nur auf eine profilierte Böschung aufgelegt und fixiert wird, sicherlich einfach in den Bauablauf von Ertüchtigungsmaßnahmen integriert werden kann.

Zur baupraktischen Umsetzung fehlen noch konkrete Bemessungsregeln und –ansätze. Deshalb besteht auf diesem Gebiet weiterhin Forschungsbedarf, um für den Planer, Hersteller und die ausführenden Bauunternehmungen Hinweise zur Wahl der Materialien und konstruktiven Ausbildung zur Verfügung stellen zu können. Bei Bedarf ist es natürlich auch möglich, Einzellösungen in Modellversuchen zu testen und auf diesem empirischen Weg die Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit nachzuweisen.

Aktuell bearbeiten u. a. die Universitäten in Karlsruhe, in Stuttgart und in Darmstadt auch Forschungs- und/oder Entwicklungsvorhaben, die sich mit Überströmungssicherungen mit und ohne Geokunststoffe beschäftigen. Ziel muss es sein, zeitnah eine oder mehrere realisierbare Lösungen zu entwickeln, so dass unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten das durch diese Art der Sicherung mögliche Mehr an Sicherheit nicht zuletzt für den Katastrophenschutz zur Verfügung gestellt werden kann.

## Literatur

- ARMBRUSTER-VENETI, H. (1999): *Über das Versagen von Erddämmen*. Wasserwirtschaft 89, Heft 10, S. 504 – 511
- BAW EAO (2002): *Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtung an Sohle und Böschung von Wasserstraßen*. Mittelungsblatt Nr. 85, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- BAW MAG (1993): *Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG)*. Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- BAW RPG (1994): *Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG)*, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe



- BAW RPW (2006): *Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW)*. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- BIEBERSTEIN, A. (2003): *Überströmbare Dämme – Landschaftsverträgliche Ausführungsvarianten für den dezentralen Hochwasserschutz in Baden-Württemberg*. Zwischenbericht anlässlich des Staatsseminars von BWPLUS am 11./12.03.2003, Forschungszentrum Karlsruhe
- BOSSHARD, M. (1991): *Überflutbarkeit kleiner Dämme*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich
- BROICH, K. (2003): *Verfahren zur hydraulischen Berechnung von Deich- und Dammbrüchen*. Sicherung von Dämmen und Deichen: Handbuch für Theorie und Praxis, S. 321 – 343, Hrsg. Hermann und Jensen, Universitätsverlag Siegen – universi
- BROICH, K. (2006): *Deichertüchtigung unter besonderer Berücksichtigung des Gehölzbewuchses*. Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen. Handbuch für Theorie und Praxis. S. 117 – 127, Hrsg. Hermann und Jensen, Universitätsverlag Siegen – universi, Siegen
- DGGT EAK (2002): *Die Küste - Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke*" Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) und Hafenbautechnische Gesellschaft (HGT), Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide
- DGGT EBGEO (2005): *Empfehlungen zur "Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungseinlagen aus Geokunststoffen*. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Verlag Ernst und Sohn, Berlin
- DGGT EAG-GTD (2002): *Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen (EAG-GTD)*. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- DIN 19712 (1997): *Flussdeiche*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- DISSE, M.; KAMRATH, P.; WILHELMI, J.; KÖNGETER, J. (2003): *Simulation des Hochwasserwellenablaufes und der Ausbreitung von Überflutungsflächen unter der Berücksichtigung von Deichbrüchen*. Wasserwirtschaft, Jahrgang 93, Heft 5, S. 24 – 29
- DVWK 76 (1986): *Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erdbau und Wasserbau*. Schriften zur Wasserwirtschaft, Heft 76, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- DVWK 215 (1990): *Dichtungselemente im Wasserbau*. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 215, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- DVWK 221 (1992): *Anwendung von Geotextilien im Wasserbau*. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 221, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- DWA (2005): *Dichtungssysteme in Deichen*. DWA-Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef 2005

- FGSV (2005): *Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaues* (M GeoK E). FGSV-Nr. 535, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- FGSV (2005): *Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaues* (TL Geok E-StB 05). FGSV-Nr. 549, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- HARMS, M.; HUBER, N.P.; KÖNGETER, J. (2004): *Numerische Simulation der Flutwellenausbreitung im Risk Assessment Verfahren für Stauanlagen*. Dresdner Wasserbaukolloquium 2004: Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen, Wasserbauliche Mitteilungen 2004, Heft 27, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, ISSN 0949-5061
- HASELSTEINER, R.; STROBL, TH. (2005): *Deichsanierung. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben*. Endbericht, im Auftrag vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW), Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München (Erhältlich beim Bayerischen Landesamt für Umwelt: <http://www.bayern.de/lfu>)
- HASELSTEINER, R. (2006): *Deichertüchtigung in Bayern - Eine Übersicht*. Tagungsband zur Fachtagung "Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern", Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Band Nr. 107, S. 13 - 28, 13./14. Juli 2006, Wallgau
- HASELSTEINER, R.; METT, M.; STROBL, TH. (2007): *Überströmungssicherung von Deichen mit Geokunststoffen*. 5. Naue-Geokunststoffkolloquium, 25./26.01.2007, Bad Lauterberg
- HEERTEN, G. & HORLACHER, H.-B. (2002): *Konsequenzen aus den Katastrophenhochwässern an Oder, Donau und Elbe*. Geotechnik 25, Nr. 4, 231ff, Verlag Glückauf
- KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H. (2002): *Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche (ProDeich)*. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 877, Technische Universität Braunschweig
- LFU BW (2004): *Überströmbare Dämme und Dammscharten*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU BW), 1. Auflage, Karlsruhe
- MARTINI, J. (2003): *Deichsicherungs- und Deichsanierungssystem mit geotextilen Schläuchen*. Sicherung von Dämmen und Deichen. Handbuch für Theorie und Praxis, S. 31 - 35, Hrsg. Hermann und Jensen, Universitätsverlag Siegen – universi
- MERZ, B. (2006): *Hochwasserrisiken – Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart
- OUMERACI, H.; BLECK, M.; HINZ, M.; KÜBLER, S. (2002): *Großmaßstäbliche Untersuchungen zur hydraulischen Stabilität geotextiler Sandcontainer unter Wellenbelastung*. Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 878, Technische Universität Braunschweig
- PATT, H. (2001): *Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York

- PERZLMAIER, S.; HASELSTEINER, R. (2006): *Die prozessorientierte Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation*. Geotechnik 29, Nr. 4, S. 335 - 349
- RESTALL, S.; HORNSEY, W.; OUMERACI, H.; HINZ, M.; SAATHOFF, F.; WERTH, K. (2004): *Australian & German Experiences with Geotextile Containers for Coastal Protection*. Proceedings, Volume II, Eurogeo 3, p. 141 - 146, Zentrum Geotechnik, Technische Universität München, Munich
- SAATHOFF, F.; WERTH, K. (2003): *Geokunststoffe in Dämmen und Deichen*. Sicherung von Dämmen und Deichen: Handbuch für Theorie und Praxis, S. 221 – 237, Hrsg. Hermann und Jensen, Universitätsverlag Siegen – universi