

# MODERNE DEICHQUERSCHNITTE MIT INTEGRIERTEN SICHERUNGSMAßNAHMEN AUS GEOKUNSTSTOFFEN – ERGEBNISSE AUS MODELLVERSUCHEN ZUR ÜBERSTRÖMUNG

R. Haselsteiner

Th. Strobl

Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München

G. Heerten

Naue GmbH & Co. KG

K. Werth

Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG, Espelkamp

**KURZFASSUNG:** Die Überströmungssicherung von Hochwasserschutzdeichen kann entscheidende Vorteile mit sich bringen. Eine Verzögerung der Flutung eines Polders mit erheblichem Schadenspotential und/oder die Verhinderung eines Deichbruchs bei Überströmung können zur Schadens- und Risikominderung beitragen. Gleichzeitig können durch die Verwendung der Geokunststoffe als Bodenbewehrung steile Böschungen ausgeführt werden, was zu einem Ersparnis im Erdbau führen kann. Dieses Ersparnis kann je nach Ausführung und vor allem Höhe des Deiches die Kosten für den Einbau des Geokunststoffes decken, was bedeutet, dass ohne Mehrkosten eine Überströmungssicherung bewerkstelligt werden kann. In folgendem Beitrag werden die generellen Anwendungsgebiete von Geokunststoffen im Deichbau und die Möglichkeiten, eine Überströmungssicherung mit Geokunststoffen auszuführen, aufgezeigt. Weiter werden einige Hinweise zur Umsetzung solcher Konstruktionen im Zuge von Deichertüchtigungsmaßnahmen gegeben. Anschließend werden die Versuche zur Überströmungssicherung mit Geokunststoffen, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München durchgeführt wurden, erläutert. Der Beitrag endet mit einem Ausblick, nachdem die wesentlichen Erkenntnisse der Versuche zusammengefasst wurden.

## 1 EINLEITUNG

Hochwasserschutzdeiche sind, außer es handelt sich um dafür speziell bemessene Überlaufstrecken, auf eine Belastung durch Überströmung nicht ausgelegt. Ausreichend lange Überströmung mit entsprechender Überströmhöhe führt, sofern die schützende Vegetationsdecke die Erosion nicht verhindert, zur Erosion der landseitigen Deichböschung und ggf. in Kombination mit Rutschungsvorgängen zum Bruch des Deiches. Dazu kommt, dass überströmte Deiche praktisch nur unter Inkaufnahme eines nicht zu quantifizierenden, hohen (!) Risikos mittels Notsicherungsmaßnahmen zu verteidigen sind. Im Rahmen von Ertüchtigungsmaßnahmen können zur Erhöhung der Sicherheit des Bauwerkes bei Überströmung kostengünstig Geokunststoffe so angeordnet werden, dass die Standsicherheit des Deiches bis zu entsprechenden Überströmhöhen sichergestellt werden kann. Das sorgt gleichzeitig dafür, dass sich der hinter dem Deich befindliche Polder langsam füllt und ggf. mehr Zeit für Katastrophenschutzmaßnahmen zur Verfügung steht. Zahlreiche Überflutungsschäden während der letzten Hochwasserereignisse 1999, 2002 und 2005 hätten durch derartig ausgebildete Deiche vermieden oder zumindest verringert werden können.

## 2 ANWENDUNGEN VON GEOKUNSTSTOFFEN IM DEICHBAU

Geokunststoffe werden im Deichbau als flächige Dichtungs-, Filter- und Dränschichten, zum Erosionsschutz sowie zur Bewehrung eingesetzt. In den vergangenen Jahren wurden bei der Sanierung der Hochwasserschäden an den

Deichen der Oder, Elbe, Donau und deren Nebenflüssen geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD, Bentonitmatten) zur Ausbildung der wasserseitigen Oberflächendichtungen, Geogitter zur Erhöhung der Tragfähigkeit der Deichunterhaltungswege sowie zur Setzungsvergleichmäßigung bei unbelasteten Untergründen (Neudeiche) und Filtervliesstoffe zur erosionsfesten Ausbildung der luftseitigen Drän- und Auflastkörper erfolgreich eingesetzt.

Eine Übersicht der möglichen Anwendungen von Geokunststoffen im Deich- und Dammbau sind z. B. in Werth et al. (2007), Heerten & Werth (2006), Saathoff & Zitscher (2001), DVWK 76/1986 und DVWK 221/1992 zu finden.

Im Folgenden werden die speziellen Anwendungen kurz umrissen und die mögliche Anwendung und Auswirkungen bei Überströmungssicherungen aufgezeigt.

### 2.1 Abdichtung von Deichen mit geosynthetischen Tondichtungsbahnen

Geosynthetische Tondichtungsbahnen werden im 3-Zonen-Deich oder 2-Zonen-Deich als wasserseitig angeordnete Oberflächendichtung verwendet. Das zwischen zwei Geokunststofflagen gelagerte Bentonit sorgt für eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit und somit für eine Reduzierung der Durchsickerung. Hinweise zur Ausführung sind z. B. in DGGT EAG-GTD (2002), DWA (2005) und BAW EAO (2002) gegeben.

### 2.2 Anwendung von Vliesstoffen zum Filtern im Deichbau

Geokunststoffe in Form von Vliesstoffen können eine Filterfunktion beim Übergang von verschiedenen Erdstof-

fen übernehmen. Diese Übergänge treten in Deichbauwerken zwischen Dichtung und dem Stützkörper, zwischen unterschiedlichen Stützkörpermaterialien und verstärkt im Bereich von Dränelementen auf, wie z. B. zwischen Deichstützkörper und durchlässigen Anschüttungen (Bermen) auf der Landseite des Deiches. Da Deiche meist Erdbauwerke geringer Höhe sind, ist eine Anordnung von Kornfiltern aufgrund von beengten Platzverhältnissen im Deichquerschnitt in manchen Fällen schwierig. Beispielsweise einfach dagegen stellt sich – auch aus baubetrieblicher Sicht – die Einlage von Vliesstoffen dar, die im Einzelfall auch den gesamten zu filternden Erdstoff umschließen können (Saathoff & Werth 2003).

### 2.3 Einsatz von Geogittern

Geogitter werden vornehmlich zu Bewehrung von Böschungen verwendet und zur Erhöhung der Tragfähigkeit von setzungsempfindlichen Böden verwendet. Bei letzter genannter Anwendung werden Setzungen aufgrund von Spannungumlagerungen vergleichmäßig. Hinweise zur Bemessung von bewehrten Erdbauwerken sind z. B. in DGGT EBGeo (1997) enthalten.

Die Bewehrung von Erdstoffen mit Geogittern, aber auch mit anderen Geokunststoffprodukten, wie z. B. Vliesen, ermöglicht die Ausbildung von steilen Böschungen. Die Anwendung ist natürlich auch in Kombination mit z. B. der hangparallelen und mit Erdnägeln fixierten Sicherung (vgl. Punkt 3.2) möglich.

### 2.4 Einsatz von Geokunststoffen bei der Ausbildung von Deichwegen

Geogitter werden zur Verbesserung der Tragfähigkeit von ungebundenen Tragschichten im Wegebau eingesetzt. Die Verbesserung der Tragfähigkeit von Böden mit Geogittern beruht auf dem Grundprinzip, dass die in Analogie zur Plattentheorie durch Zug beanspruchten Bereiche der Tragschichten durch hochzugfeste Geogitter bewehrt werden. Als zweite Komponente der elastischen "geokunststoffbewehrten Platte" ist demnach auch eine Druckzone aus dem Korngerüst des Tragschichtmaterials erforderlich. Bei optimaler Abstimmung der Geogitter und der Kornverteilung des Tragschichtmaterials kommt es zu einer Verzahnung des Tragschichtmaterials in den Öffnungen des Geogitters. Eine Auflockerung des Korngerüsts unter Punkt- und Linienlasten wird verhindert und damit die Tragfähigkeit des Korngerüsts dauerhaft erhalten.

Hinweise zur Ausbildung von Wegen, insbesondere auf Deichen sind z. B. in Reincke 1980 und FGSV 2005 zu finden.

Bei der Überströmungssicherung spielt die Verstärkung von Deichwegen mit Geokunststoffen i. Allg. keine Rolle, da eine Befahrung bei Überströmung nicht erfolgt.

### 2.5 Anwendung von geotextilen Schläuchen und Containern im Küstenschutz

An sandigen und erosionsgefährdeten Küstenabschnitten werden geotextile sandgefüllte Container und Schläuche als Bauelemente zur Stabilisierung von Sandaufspülungen und Dünen sowie zur Herstellung von Schutzbauwerken wie z.B. Bühnen und Wellenbrechern. Die üblicherweise verwendeten vernadelten Vliesstoffe besitzen durch eine dreidimensionale Porenstruktur eine sehr gute Widerstandsfähigkeit gegen Sandschliff (Abrieb) und durch die rauhe Faseroberfläche ein gutes Reibungsver-

halten im Stapel und gegenüber dem anstehenden Untergrund (siehe auch Restall et al. 2004).

Ähnliche Konstruktionen werden auch zur Überströmungssicherung von Erdbauwerken an Fließgewässern von LfU BW (2004) verwendet.

Geschlossene Geokunststoffsysteme können sowohl für die Sicherung von besonders beanspruchten Bereichen, wie z. B. die Sicherung des Deichfußes (vgl. z. B. Abbildung 4.2-1), als auch in größerem Umfang gänzlich zur Herstellung eines überströmbareren Deiches, z. B. durch die Anordnung von Schläuchen auf der landseitigen Böschung (siehe z. B. Martini 2003).

## 3 ANWENDUNG VON GEOKUNSTSTOFFEN ZUR ÜBERSTRÖMUNGSSICHERUNG

Die Überströmungssicherung von Deichen für Wasserstände, die über den Bemessungshochwasserstand hinaus jenseits des Kronenstaus reichen, können entscheidende Vorteile sowohl beim Katastrophenschutz als auch bei der Durchführung von Ertüchtigungsmaßnahmen haben. 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.“*

Die Integration von Geokunststoffen in den Ablauf von Ertüchtigungsmaßnahmen, bei denen primär versucht wird, durch Maßnahmen im landseitigen Bereich den erhöhten technischen Anforderungen gerecht zu werden, ist je nach der Notwendigkeit von Maßnahmen innerhalb des erdbaulichen Schüttnetriebs möglich.

### 3.1 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 von Hochwasser Bedrohten und den Hochwasserschutzbehörden Zeit bieten, 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. Ein anschauliches Beispiel zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts ist in Werth et al. (2007) enthalten.

Durch die Überströmungssicherung wird auch die Deichbruchwahrscheinlichkeit vermindert, was daran liegt, dass bei seltener auftretenden Wasserständen die Standicherheit des Deiches gewährleistet bleibt.

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.

Durch die geringe Zuflussmenge im Falle einer Überströmung können auch Maßnahmen getroffen werden, wie z. B. die Errichtung einer zweiten Deichverteidigungslinie, die eine Überflutung von Schadensobjekten gänzlich verhindert. Der Zufluss in den Polder kann durch gezielte Maßnahmen umgeleitet oder ggf. unterstrom in den Vorfluter zurückgeleitet werden.

### 3.2 Möglichkeiten der Überströmungssicherung mit Geokunststoffen

Die Anwendung von Überströmungssicherungen mit Geokunststoffen muss mit den herkömmlichen Überströmungssicherungsmethoden, wie z. B. Lockerbauweisen oder kohärenten Deckwerken (Haselsteiner et al. 2007, LfU BW 2004) konkurrieren. 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)

Grundsätzlich existieren unterschiedliche Möglichkeiten zur Ausbildung von Überströmungssicherungen:

- Schlaufen
- Böschungsparrallele, mit Erdnägeln fixierte Bahnen
- Waagrecht verlegte Bahnen
- Container
- Schläuche

Die Sicherung des Deichfußes und die Befestigung der Krone erfordern u. U. spezielle konstruktive Maßnahmen. Ggf. sollte bei hoher hydraulischer Belastung auch ein Bauwerk zur Sicherstellung der Energieumwandlung und zur Vermeidung von Kolken im Unterwasser vorgesehen werden. Weitere Hinweise und Prinzipskizzen zur generellen Ausbildung von mit Geokunststoffen ausgebildeten Überströmstrecken sind in Werth et al. (2007) und Haselsteiner et al. (2007) enthalten.

Umfangreiche Untersuchungen zur Überströmungssicherungen wurden an den Universitäten Stuttgart und Karlsruhe durchgeführt (siehe z. B. Bieberstein 2003, Westrich et al. 2002). Zurzeit werden auch diesbezüglich Versuche an der Universität Darmstadt konzipiert und durchgeführt. Eine übersichtliche Betrachtung von derzeit gängigen Sicherungsmethoden bietet LfU BW (2004).

Weitere Hinweise zur Anwendung von Geokunststoffen im See- und Wasserbau und generell zu Überströmungssicherungen sind z. B. in Bosshard (1991), Powledge (1989) und Kortenhaus & Oumeraci (2002) enthalten.

### 3.3 Anwendung im Zuge von Deichertüchtigungen

Hinweise zur Umsetzung von Überströmungssicherungen mit Geokunststoffen im Zuge von Deichertüchtigungsmaßnahmen sind in Haselsteiner et al. (2007) zu finden. Die Möglichkeiten zur Deichertüchtigung sind in Haselsteiner & Strobl (2005) und Haselsteiner (2006) aufgezählt und erläutert.

Je nach angestrebter Überströmungssicherungsmethode (vgl. Punkt 3.2) ist die Ausbildung von steileren Böschungsneigungen trotz geplanter Überströmung möglich. Für den Fall, dass der böschungsparrallele Aufbau gewählt wird, ist der Aufwand relativ gering, weil auf eine fertig profilierte Böschung lediglich die Geokunststoffbahnen ver-

legt, ggf. über die Krone auf die wasserseitige Böschung geführt und mit Erdnägeln befestigt werden. Diese Maßnahme ermöglicht es, einen Deich mit sehr geringem Aufwand nachträglich überströmungssicher zu gestalten. Werden größere Maßnahmen zur Verbreiterung der Deichkrone, zur Erhöhung des Deiches oder zur Abflachung von Böschungen durchgeführt, ist es auch möglich, die Überströmungssicherungsmaßnahme mit Geokunststoffen darauf abzustimmen. Ist trotz der Ausbildung eines überströmungssicheren Deichbauwerkes ein Deichhinterweg, der ggf. auf einer landseitigen Berme zum Liegen kommt, geplant, können dort aufgrund der Strömungsumlenkung große hydraulische Kräfte auftreten, was u. U. konstruktive Sicherungsmaßnahmen, wie z. B. die Anordnung von Schläuchen im Bereich unter dem Deichhinterweg, notwendig macht.

## 4 VERSUCHE

An der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München in Obernach wurden Versuche zur Überströmungssicherung von Deichen mit Geokunststoffen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung einer bautechnisch einfachen und kostengünstigen Geokunststoff-Lösung (z. B. mit Geogitter-Vliesstoff-Kombinationen). In einem ersten Schritt wurde die Wirkung unterschiedlicher Sicherungsmethoden qualitativ bei variierender Belastung untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Modellversuchen und mögliche konstruktive Lösungen mit Geokunststoffen als integrierte Sicherungselemente in Deichen vorgestellt. In einem zweiten Schritt können nun die ermittelten „Vorzugslösungen“ genauer untersucht und zur bautechnischen Umsetzung Bemessungskriterien entwickelt werden.

### 4.1 Versuchsprogramm

Insgesamt wurden 17 Versuche zu den Überströmungssicherungsmethoden mit Geokunststoffen konzipiert (Tabelle 4.1-1). Davon wurden 15 bereits durchgeführt. Versuche, die das Zusammenwirken von Fertigrasen und Geokunststoffen testen sollen, werden im Laufe des Jahres 2007 durchgeführt (siehe Punkt 4.6). Das Versuchsprogramm wurde mit der Intention zusammengestellt, einige sichere Konstruktionen herauszufiltern und möglichst viele Einflussparameter qualitativ zu bewerten.

Die spezifischen Belastungen variierten von 50 bis 300 l/s\*m. Es wurden Böschungsneigungen von 1:1,5 und 1:2,5 untersucht. Die Versuche selbst dauerten im Mittel etwa 30 Minuten, es sei denn, die Verformungen und Schäden waren derart groß, dass ein vorzeitiger Abbruch notwendig wurde.

Die Bodenmaterialien, hauptsächlich Kies der Körnung 8/32 mm, wurden nicht speziell verdichtet, sondern angeschüttet und mit einer Baggerschaufel angedrückt.

Bei den Versuchen wurden ausschließlich Geokunststoffe der Fa. Naue GmbH & Co. KG verwendet. Neben einem Vliesstoff, der auch als Kolkenschutzmatte bezeichnet wird, kamen ein mit Vlies kombiniertes Geogitter und eine Sandmatte (Vlies mit Sandeinlage) zur Anwendung. Das häufig als Vegetationshilfe verwendete Wirrgelege wurde unter dem Fertigrasen im Oberboden der noch nicht durchgeführten Versuche 16 und 17 verlegt.

Tabelle 4.1-1: Übersicht der Versuche

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> ]
1	Vlies parallel ohne Nägel	50	10	1,0	2,5	-
2	Vlies parallel mit Nägel (3)	130	17	2,3	1,5	1,9
3	Schlaufen verpackt	50	10	1,0	1,5	-
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	-
7	Lagen horizontal	130	35	2,3	2,5	-
8	Gittervlies parallel mit Nägel (0)	50	10	1,0	2,5	3,5
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	-
16	Fertigrasen	in Vorbereitung				
17	Fertigrasen + Wirrgelege					

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> spez. 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)

## 4.2 Böschungsp parallele Bahnen

Die Versuche mit böschungsp parallelen Bahnen wurden ohne (Versuch 01) und mit Fixierung (Versuche 02 & 08 bis 14) mit Erdnägeln durchgeführt.

Der Aufbau des Versuches 01 ist Abbildung 4.2-1 dargestellt. Der gesamte Deichquerschnitt bestand aus Sand (0/4 mm) und es wurden keine Erdnägel zur Fixierung des Vlieses eingesetzt. Das Vlies wurde an der Kontaktfläche von Deich und Fußsicherung eingebunden, der Böschung entlang über die Krone geführt und auf der wasserseitigen Böschung mit der oberflächigen Kiesschüttung beschwert.

Bereits bei sehr geringer Überströmung waren an der Böschungskante bei der Krone Umlagerung des Erdkörpers deutlich zu erkennen. Nach ca. zwei Minuten stellte sich der Zustand in Abbildung 4.2-2 (mittig) ein. Der Versuch wurde abgebrochen, da ein komplettes Versagen des Deiches binnen kürzester Zeit zu befürchten war.

Die massiven Verformungen bzw. Umlagerungen des Deichkörpers führten zur Ausbildung einer Sandbeule am Deichfuß (Abbildung 4.2-2, rechts). Dort konnte der umgelagerte Sand aufgrund der Einspannung jedoch nicht entweichen.

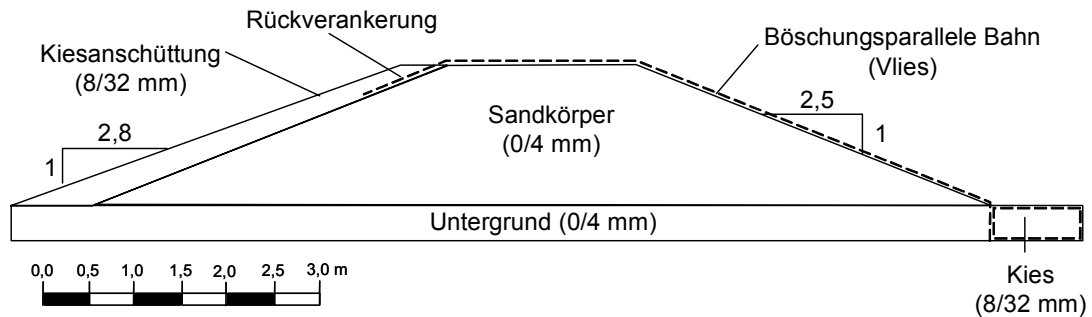


Abbildung 4.2-1 Aufbau von Versuch 01 mit böschungsp parallelem Vlies ohne Fixierung

Abbildung 4.2-2 Versuch 01 vor Überströmung (links), nach Überströmung (mittig) und Sandbeule am Deichfuß nach Überströmung (rechts)



Die Versuche Nr. 08 bis 14 besitzen den in Abbildung 4.2-3 dargestellten Querschnitt. Zur Fixierung wurden durchgängig Erdnägel aus Rundstahl ( $\varnothing = 8$  mm) verwendet, die zu einem U-Profil mit der Schenkellänge 40 cm gebogen wurden. Die Breite des U-Profiles betrug 10 cm. Im Kronenbereich wurden ebenfalls Erdnägel zur Fixierung eingesetzt. Die Rückverankerung erfolgte durch Einbindung der Geokunststoffbahn unter die wasserseitige Kiesanschüttung, teilweise auch unter Verwendung von Erdnägeln.

Repräsentativ wird hier Versuch 11 näher beschrieben. Die Belastung belief sich auf  $q = 130$  l/s\*m. Die Überströmbreite betrug 2,3 m (Abbildung 4.2-4). Die spezifische Nageldichte betrug  $n_{spez.} = 2,6/m^2$ . Der Zustand des Aufbaus nach der Überströmung zeigte, dass auch bei größeren Überströmbreiten keine Schäden an dieser Sicherungskonstruktion auftreten.

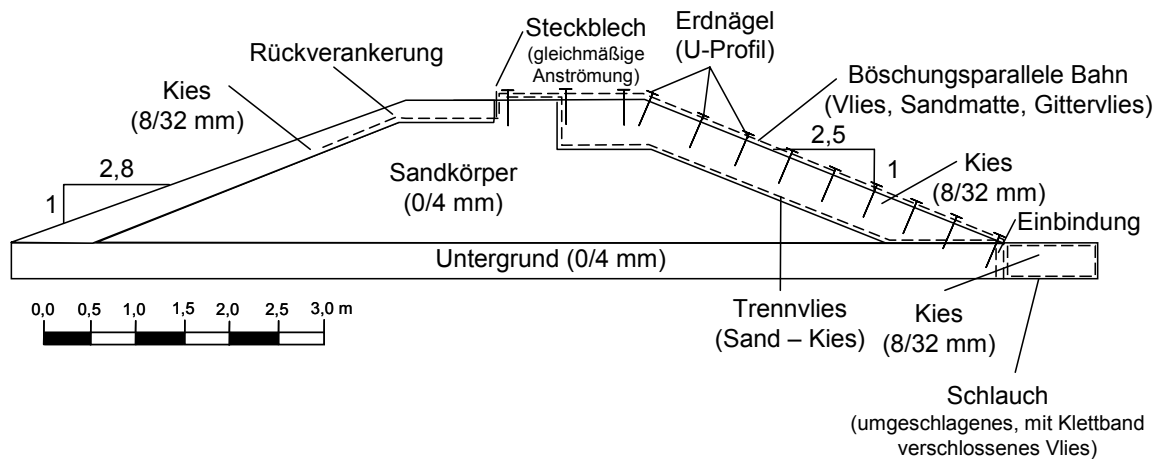


Abbildung 4.2-3 Aufbau der Versuche 08 - 14 mit böschungsparallelem Geokunststoff mit Fixierung mit Erdnägeln



Abbildung 4.2-4 Versuch 11 vor/nach Überströmung

### 4.3 Waagrechte Bahnen

Die Versuchsaufbauten der Versuche 06 und 07 mit waagrecht verlegten Bahnen hatten den in Abbildung 4.3-1 dargestellten Querschnitt. Der Abstand der Bahnen betrug in etwa  $a_B = 0,30$  m. Die Lagen wurden auf der Sandböschung überlappend verlegt. Das Füllmaterial zwischen den Lagen war Kies der Körnung 8/32 mm. Die oberste Lage auf der Krone wurde überlappend zurückverankert, wobei sie nach unterstrom offen verblieb. Die Böschungseigung betrug 1:2,5.

Der gleiche Aufbau von Versuch 06 wurde für Versuch 07 für eine Überströmbreite von 2,3 m hergestellt (Abbildung 4.3-2, links) und mit  $q = 130$  l/s\*m belastet (Abbildung 4.3-2, mittig). Wie schon bei Versuch 06 wurde annähernd das gesamte Material zwischen den Lagen erodiert. Die Erosion der Zwischenbereich wurde dort gestoppt, wo das Vlies den Sandkörper schützt. Der Versuch dauerte etwa 10 Minuten.

Beschädigung des Versuchsaufbaus von Versuch 07 mit einer Überströmbreite von  $b_U = 2,3$  m mit  $q = 130$  l/s\*m war im Vergleich zu der Beschädigung des Versuchs 06 mit  $b_U = 1,0$  m mit  $q = 80$  l/s\*m schwerwiegender.

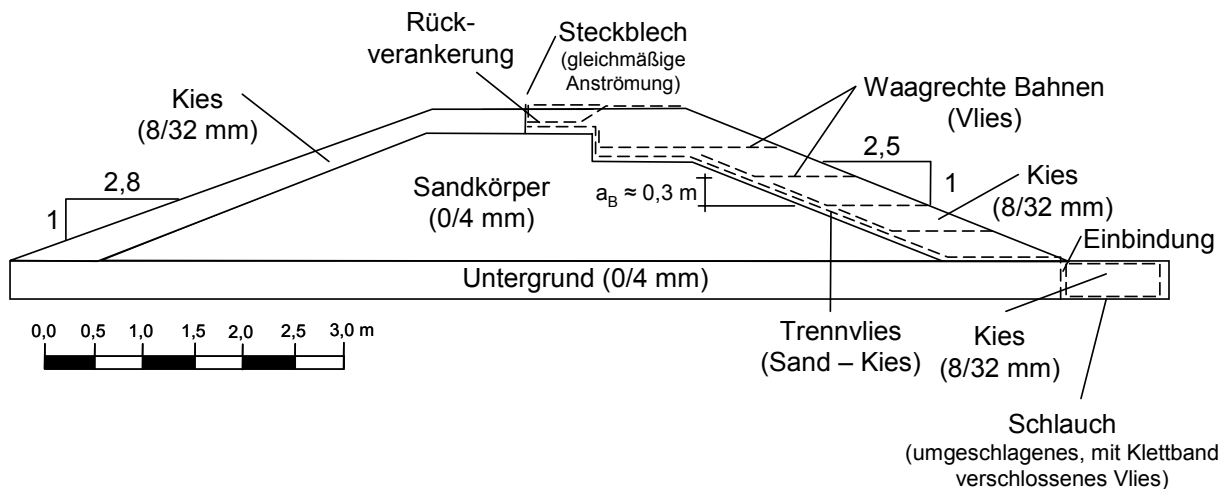


Abbildung 4.3-1 Aufbau der Versuche 06 und 07 mit waagrechten Geokunststoffbahnen



Abbildung 4.3-2 Versuch 07 vor Überströmung (links), während Überströmung (mittig), nach Überströmung (rechts)



#### 4.4 Schlaufenlösungen

Die Versuche 03 bis 05 hatten in etwa den in Abbildung 4.4-1 gezeigten Aufbau. Die Schlaufen der Versuche 03 und 04 wurden jedoch in Neigung der Böschung eingebaut. Die Neigung der landseitigen Böschung bei der Schlaufenkonstruktion betrug im Mittel 1:1,5. Die Vliesschlaufen wurden an der Sandböschung überlappend verlegt. Die oberste Schlaufe wurde unter die wasserseitige Kiesanschüttung eingebunden.

Der Aufbau der Versuche 03 und 04 waren identisch, sie unterschieden sich in der aufgetragenen Belastung von  $q = 50 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei Versuch 03 und  $q = 80 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bei Versuch 04. Der Abstand der einzelnen Schlaufen war in etwa mit  $a_{\text{Sch}} = 0,40 \text{ m}$  gleichmäßig verteilt.

Bei Versuch 05 hatten die unteren drei Schlaufen einen Schlaufenabstand von  $a_{\text{Sch}} = 0,25 \text{ m}$ , die oberste einen Abstand von  $a_{\text{Sch}} = 0,45 \text{ m}$  und die zweite von oben  $a_{\text{Sch}} = 0,40 \text{ m}$ . Das Füllmaterial war ein Kies der Körnung 8/32 mm. Die Schlaufen wurden umgeschlagen, so dass sich

bei der Überströmung ein kaskadenartiger Abfluss einstellen konnte.

Die Verformungen der einzelnen Schlaufen waren minimal. Die Belastungen reichten von  $q = 50 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  bis  $q = 130 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ . Das Umschlagen der Schlaufen sorgte bei den Versuchen 03 und 04 (nicht dargestellt) dafür, dass von Schlaufe zu Schlaufe kleine Abstürze auftraten, was bei den hier untersuchten spezifischen Abflüssen kaskadenartige Strömungsverhältnisse zur Folge hatte (siehe auch Abbildung 4.4-2, rechts).

Nach Verbreiterung der Überströmbreite auf 2,3 m und der senkrechten Ausbildung der Schlaufenabstürze (Abbildung 4.4-2, links) wurde der Deich mit  $q = 130 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  beaufschlagt (Abbildung 4.4-2, rechts). Es bildete sich ein deutlicher Kaskadenabfluss aus. Die verstärkte Energieumwandlung durch die Aneinanderreihung der vier kleinen Abstürze führte sichtlich dazu, dass die Strömung sich bereits nach ca. 3 bis 4 Metern hinter dem Deichfuß weitgehend beruhigt hat. Ein Wechselsprung bzw. ein konzentrierter Tauchstrahl, wie dies bei den Versuchen mit parallelem Böschungsaufbau auftrat, wurde hier nicht festgestellt (Abbildung 4.4-2, rechts).

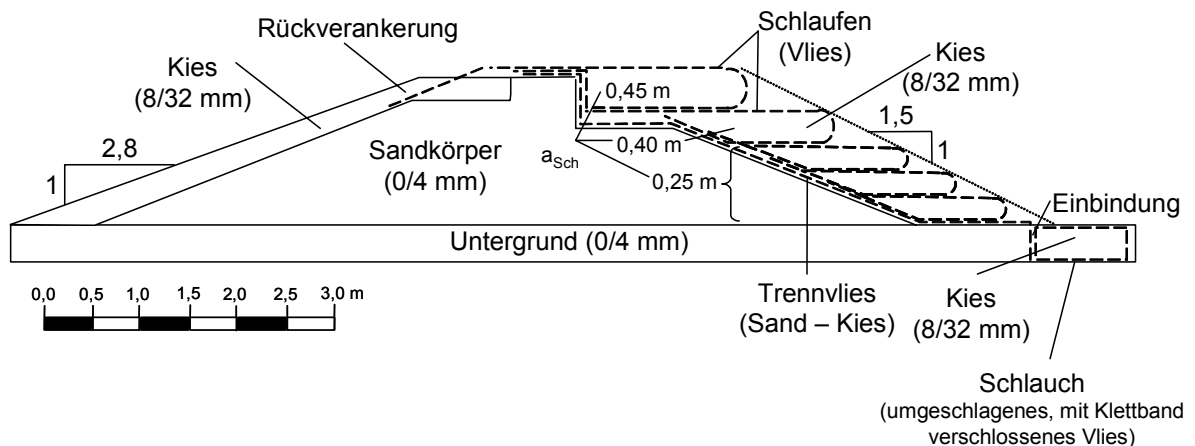


Abbildung 4.4-1 Aufbau der Versuche 03 – 05 mit Schlaufen

Abbildung 4.4-2 Versuch 05 vor/nach Überströmung (links), während Überströmung (rechts)



#### 4.5 Deich mit Hinterweg

Der Versuch Nr. 15 mit Deichhinterweg hatte den in Abbildung 4.5-1 dargestellten Aufbau. Die landseitige Deichböschung hatte eine Neigung von 1:1,5. Der Deichhinterweg war 0,4 m hoch und hatte eine Breite von 1,6 m. Während die Deichböschung mit einem böschungsparell geführten und mit Erdnägeln fixierten Gittervlies gesichert war, wurde der Deichhinterweg komplett mit einem Vlies ummantelt und dieses mit einem Erdnagel auf der Deichböschung geschlossen. Das verwendete Material an der Deichböschung bzw. das Füllmaterial des Deichhinterwegs war Kies mit einer Körnung von 8/32 mm. Es kamen die gleichen Erdnägeln zum Einsatz, die bereits bei den Versuchen 2 und 8 bis 14 verwendet wurden.

Die Versuchskonstruktion mit Deichhinterweg versagte bei einer Belastung von  $q = 130 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  und einer Überströmbreite von 2,3 m (Abbildung 4.5-2, links). Dies lag daran, dass die Böschung des Deichs sehr steil war (1:m = 1:1,5) und somit mit einer böschungsparellen Bahn mit Bodennägeln nicht ausreichend stabil ausgebildet wurde. Darüber hinaus war der Deichhinterweg nur mit einer Schlaufe befestigt, was tendenziell zu wenig war, da die Verformung so groß wurden und eine Rutschung nicht mehr zu verhindern war. Primär ist das Versagen dieser Konstruktion jedoch auf die unzureichende Böschungssicherung bzw. die zu steile Böschung von 1:1,5 zurückzuführen.

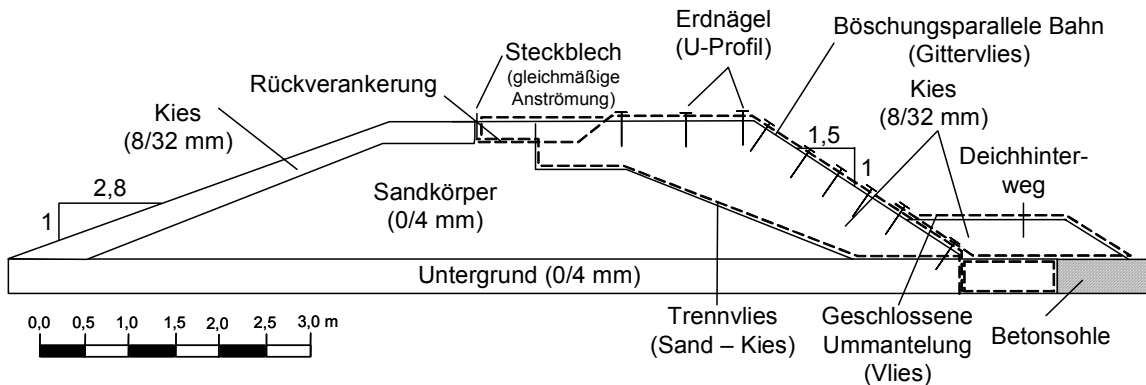


Abbildung 4.5-1 Aufbau von Versuch 15 mit Deichhinterweg und Böschungssicherung mit Erdnägeln

Abbildung 4.5-2 Versuch 15 während Überströmung (links) und nach Überströmung (rechts)



ten, was eine Zuwanderung von heimischen Arten zulässt.

#### 4.6 Geokunststoffverstärkte Vegetationsdecke

In den Versuchen 16 und 17 wird ein Fertiggras auf Oberboden mit und ohne Verstärkung mit einem Erosionsschutzsystem, bestehend aus einem 3-dimensionalen Wirrgelege getestet. Die Deichböschung wurde in drei Abschnitte von jeweils ca. 0,60 m untergliedert, zwei der Abschnitte weisen unter dem Fertiggras im Oberboden von 0,10 m Mächtigkeit im Abstand vom Fertiggras von 5 cm und 10 cm ein Wirrgelege auf (Abbildung 4.6-1). Die Anschüttung wurde mit einem Mischboden 0/32 mm durchgeführt. Die Böschung wurde anschließend auf eine Neigung von 1:2,5 profiliert, worauf der Erosionsschutz aufgesetzt wurde. Es wurde eine Ansaatmischung verwendet, die den Standortbedingungen an der Versuchsanstalt entspricht und von einem ortsansässigen Landschaftsgärtner als geeignet betrachtet wurde.

Es handelt sich dabei um keine „Sicherheitsmischung“, wie sie z. B. die Regelansaamischung RSM 7.4 (Landschaftsrasen - Halbschatten) nach FLL RSM (2006) darstellt, sondern um eine Mischung mit nur zwei Komponenten,

Am angewachsenen Fertiggras werden nach der nächsten Vegetationsperiode im August/September 2007 Überströmungsversuche durchgeführt. Nach den ersten Wochen war der Verbund von Fertiggras und Oberboden noch sehr unzureichend, was dazu führte, dass verstärkt Düngung und Mäharbeiten durchgeführt und direkte Sonneneinstrahlung zugelassen wurde.

Der Unterbau für den Fertiggras ist in Abbildung 4.6-2 (links) zu sehen. Zur Beschleunigung des Wachstums wurde ein spezieller Dünger in den Oberboden eingestreut. Anschließend wurde die Böschung mit Fertiggrasensoden (0,40 m x 0,40 m) eingedeckt (Abbildung 4.6-2, rechts). Nach 6 Wochen war der Fertiggras mit dem Oberboden aufgrund des Wurzelwachstums fest verbunden. Ebenso waren die Stöße bzw. Fugen zwischen den einzelnen Fugen fest miteinander verwachsen.

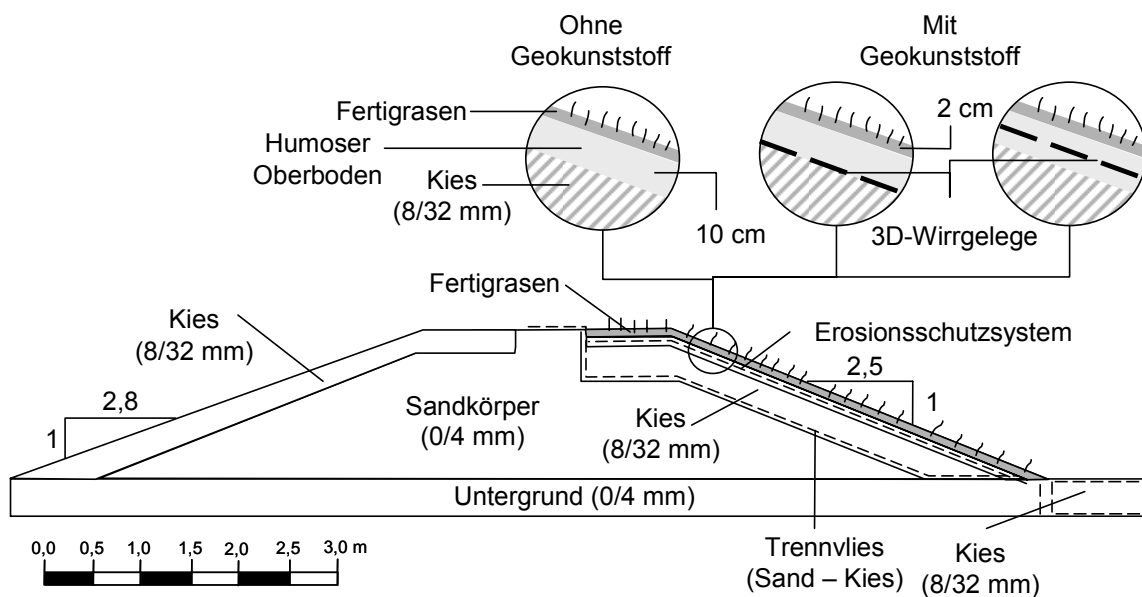


Abbildung 4.6-1 Aufbau der Versuche 16 und 17 mit Fertiggrasendeckung und bereichsweise 3D-Wirrgelege (Erosionsschutzsystem) im humosen Oberboden

Abbildung 4.6-2 Andecken des Deiches mit Oberboden inklusive Wirrgelege (links) und eingebrachte Fertiggrasensoden (rechts)





## 5 ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Insgesamt erwiesen sich die Systeme „Schlaufen“ und „Böschungsparrallele Bahnen mit Fixierung“ als widerstandsfähig. Die bei den Versuchen aufgetretenen Verformungen waren sehr gering. Die Schlaufenlösung ist als kostenintensiver zu beurteilen als die Sicherung mit böschungsparrallelen Bahnen mit Fixierung. Eine böschungsparrallele Auflage ohne zusätzliche Fixierung stellte sich, wie zu erwarten, als ungeeignet heraus. Der Aufbau mit waagrechten Bahnen stellte sich ebenfalls als ungeeignet heraus, was jedoch vornehmlich an der Verformbarkeit des verwendeten Vliesstoffes gelegen hat. Stalman (1980) führte ähnliche Versuche mit waagrechten Bahnen durch und erzielte bessere Ergebnisse.

Folgende Hinweise und Feststellungen können für zukünftige Betrachtungen von Überströmungssicherungen mit Geokunststoffen hilfreich sein:

- Die horizontalen Überlappungsbereiche bei den Schlaufenkonstruktionen waren bei den durchgeführten Versuchen ausreichend lang gewählt.
- Die Rückverankerungen, teilweise mit und teilweise ohne Erdnägel, erfüllten auch ebenfalls ihre Funktion. Die Stabilität der obersten Lage und der Krone war bei den entsprechenden Versuchen, bei welchen keine verstärkte Umlagerung im Böschungsbereich erfolgte, gewährleistet.
- Die Fußsicherung, welche aus Vlies bestand und als mit einem Klettverschluss verschlossene Kiespackung ausgeführt wurde, erwies sich während aller durchgeführten Versuche als stabil.
- Trat ein Versagen auf, war dies meist auf eine Erosion oder Umlagerung von Bodenmaterial im Böschungsbereich von oben nach unten zurückzuführen. Dabei rutschte bzw. verlagerte sich Material aus dem oberen Drittel der Böschung einschließlich Material aus dem Kronenbereich in Richtung Deichfuß und führte dort zu einer Ausbeulung. Bei den geschlossenen Systemen (außer bei Versuch 01) wurde das Material im System gehalten.
- Bei den steilen Böschungen von 1:1,5 mit Oberflächenschutz tritt das Versagen der Böschung durch Abrutschen der Böschung (globales oder lokales Versagen) ein und nicht durch erosive Umlagerung von Einzelkörnern.

Vor der baulichen Umsetzung von Überströmungssicherungen mit Geokunststoffen sollten die Standsicherheit der Konstruktion jedenfalls durch einen Modellversuch überprüft werden. Wünschenswert wäre es, zukünftig auf ein Bemessungskonzept für derartige Konstruktionen zurückgreifen zu können. Da sich bereits in zahlreichen Modellversuchen gezeigt hat, dass diese Art der Sicherung sehr effektiv ist und zudem je nach Randbedingung sich derartige Konstruktionen als sehr kostengünstig erweisen können, sollte diese Möglichkeit zur Ausbildung von Überströmstrecken verstärkt und zeitnah weiterentwickelt werden. Dies kann zum einen volkswirtschaftlich als auch betriebswirtschaftlich zu enormen Kosteneinsparungen führen.

## 6 LITERATUR

BAW EAO (2002): Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtung an Sohle und Böschung von Was-

serstraßen. Mittlungsblatt Nr. 85, 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

DGGT EAG-GTD (2002): Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst und Sohn, Berlin

DGGT EBGEO (1997): Empfehlungen zur "Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungseinlagen aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Verlag Ernst und Sohn, Berlin

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 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-Thema, Deutscher Verband für Wasser und Abfall e.V., Hennef

FGSV (2005): Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M GeoK E). FGSV-Nr. 535, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln

FLL RSM (2006): Regel-Saatgut-Mischungen Rasen RSM 2006. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn

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.; Werth, K. (2006): Anwendung von Geokunststoffen bei der Deichertüchtigung, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, Mitteilungsheft Nr. 107 zur Fachtagung Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern, Wallgau, 13. und 14. Juli 2006

Kortenhaus, A.; Oumeraci, H. (2002): Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche (ProDeich). Leicht-

weiß-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 877, Technische Universität Braunschweig

- LFU BW (2004): Überströmbare Dämme und Dammschar-  
ten. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-  
Württemberg (LfU BW), 1. Auflage, Karlsruhe
- Martini, J. (2003): Deichsicherungs- und Deichsanierungs-  
system mit geotextilen Schläuchen; Sicherung von  
Dämmen und Deichen. Handbuch für Theorie und Pra-  
xis, S. 31 - 35, Hrsg. Hermann und Jensen, Universi-  
tätsverlag Siegen – universi
- Powledge G. R.; Clopper, P. E.; Miller, P.; Ralstone, D. C.;  
Temple, D.M.; Chen, Y. H. (1989): Mechanics of over-  
flow erosion on embankments. Part I: Research activi-  
ties. & Part II: Hydraulic and design considerations.  
Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol.115, No.  
8, 1989, pp. 1040 - 1055 & 1056 - 1075
- Reincke, H. (1980): Erfahrungen beim Bau von Deichwe-  
gen, Planung und Ausführung. Wasser und Boden, Heft  
3, S. 114 – 118
- Restall, S.; Hornsey, W.; Oumeraci, H.; Hinz, M.; Saathoff,  
F.; Werth, K. (2004): Australian & German Experiences  
with Geotextile Containers for Coastal Protection. Pro-  
ceedings, Volume II, Eurogeo 3, p. 141 - 146, Zentrum  
Geotechnik, Technische Universität München, Munich
- Saathoff, F.; Zitscher, F.-F. (2001): Geokunststoffe in der  
Geotechnik und im Wasserbau. In: Baugrundtaschen-  
buch, Teil 2, Sechste Auflage, Hrsg. Smoltczyk, Ernst &  
Sohn Verlag, Berlin
- 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 – uni-  
versi
- Stalman, V. (1980): Überströmungssicherung von Dei-  
chen. Wasser und Boden 3, S. 109 – 112
- Werth, K.; Haselsteiner, R.; Heerten, G.; Strobl, Th.  
(2007): Deichquerschnitte mit integrierten Geokunststof-  
fen. 37. Internationales Wasserbau-Symposium (IWA-  
SA), Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasser-  
wirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische  
Hochschule Aachen (RWTH), 04./05. Januar 2007, Aa-  
chen
- Westrich, B.; Siebel, R.; Salden, D.; Zweschper, B. (2002):  
Neue naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme  
an dezentralen Hochwasserrückhaltebecken und Er-  
probung von Erkundungsmethoden zur Beurteilen der  
Sicherheit von Absperrdämmen. Zwischenbericht,  
BWPLUS, Institut für Wasserbau, Institut für Geotech-  
nik, Universität Stuttgart