



Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE -

Abschlussbericht Phase 1 & 2



Gefördert von der Deutschen Stiftung Umweltschutz DBU
unter dem Aktenzeichen Az: 31761/02



von
Prof. Dr.-Ing. Bärbel Koppe, Armin Krebs & Karsten Daedler

August 2019



Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

Projektpartner:

optimal Planen- und Umwelttechnik GmbH
Geschäftsführer Armin Krebs
Horlecke 34-38, 58706 Menden
02373-770099-0 - akrebs@alles-optimal
www.optimal-umwelttechnik.de

Karsten Daedler e.K. – Konfektion von Planstoffen und Folien
Geschäftsführer Karsten Daedler
Benzstraße 24, 21423 Winsen/ Luhe
04171 84842-22 - kd@daedler.de
www.daedler.de

Hochschule Bremen
Institut für Wasserbau – IWA
Prof. Dr.-Ing. Bärbel Koppe
Neustadtswall 30, 28199 Bremen
0421 5905-2313 - koppe@hs-bremen.de
www.iwa-hs-bremen.de

Inhalt

1	Zusammenfassung	1
2	Problemstellung	2
3	Gegenstand und Zielsetzung des Projekts.....	3
4	Projektpartner	4
5	Einsatzgebiete	5
5.1	Flussdeiche.....	6
5.1.1	Historische Entwicklung von Flussdeichen	7
5.1.2	Analyse von Bestandsdeichen	9
6	Hochwasserszenarien an Binnenflüssen	10
7	Allgemeine Grundlagen der Deichverteidigung.....	12
7.1	Vorwarnzeit.....	12
7.2	Bereitstellungszeit	14
7.3	Physikalische Grundlagen der Schwächung von Deichprofilen bei Hochwasser	15
7.4	Deichverteidigung per Aufkädung mit Sandsäcken	16
8	Anforderungen an wassergefüllte Schlauchkonstruktionen zur Deichaufkädung	20
9	Materialrecherche und Materialauswahl.....	26
10	Werkzeuge, Vorrichtungen, Maschinen	27
11	Testvorrichtungen und Teststände	28
12	Erprobung möglicher Materialverbindungen	31
13	Pflichtenhefte	33
14	Iterative Erarbeitung der Labormodelle	36
15	Technische Schnittstellen.....	46
16	TÜV-Zertifizierung	47
17	Präsentation von Projektergebnissen.....	49
18	Zusammenfassung und Ausblick.....	52
19	Schrifttum.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufkadungen aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)	3
Abb. 2: Einteilung ortsungebundener mobiler Hochwasserschutzsysteme (MASSOLLE ET AL., 2019).....	5
Abb. 3: Begriffe bei Deichen an Fließgewässern (DWA, 2011)	6
Abb. 4: Deichbauten vom Mittelalter bis heute (HASELSTEINER, 2007).....	8
Abb. 5: Drei-Zonen-Deich, Beispiel Regelprofil Rheindeich (SUK, 2002).....	9
Abb. 6: Zunahme der Unsicherheiten in der Wasserstandsvorhersage mit zunehmender Vorhersagezeit	13
Abb. 7: Sickerwasseraustritte an einem Deich (RD, 2006).....	16
Abb. 8: Aufkadungen mit Sandsäcken	17
Abb. 9: Aufkadungen aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)	18
Abb. 10: Erschwerte Deichverteidigung aufgrund fehlender Verteidigungswege während des Jeetzelhochwassers 2002.....	18
Abb. 11: Aufkadungshöhen mit Sandsäcken (RD, 2006).....	19
Abb. 12: Sandsackdamm, Verlegeart normale Stabilität (THW, 2007).....	19
Abb. 13: Einstau des 2008 erstellten Hochwasserschutzsystems Hitzacker am 12.06.2013 bei sinkenden Wasserständen – der Scheitelwasserstand wurde am 11.06.2013 erreicht (Foto: Bärbel Koppe).....	22
Abb. 14: Allzweckförderpumpe MAST NP 12 B	28
Abb. 15: Zugstand zum Testen der Schweißnähte und des zu verarbeiteten Materials	29
Abb. 16: Materialtest zur Haftfestigkeit und Abrasion auf Untergründen, Tests von Ertüchtigungen zur Bodenhaftung.....	29
Abb. 17: Seecontainer Anlieferung (oben links) und Originalausstattung (oben links, unten rechts) sowie nach dem projektgerechten Umbau (unten rechts) – Betriebshof DAEDLER	30
Abb. 18: IWA-Teststand auf dem Gelände des THW-Ausbildungszentrums in Hoya	30
Abb. 19: Beispielhafte Erprobungen und Versuche für mögliche Materialverbindungen, im Bereich der äußeren Behälterhülle, den kleinformatischen Bauteilen, Armaturen und technischen Applikationen	33
Abb. 20: PVC beschichtetes PES Gewebe mit einer Festigkeit von mindestens 3800/3800 N auf 5 cm	34
Abb. 21: Kupplungssystem STORZ	35
Abb. 22: Selbstdichtende Federdruckventile.....	35

Abb. 23: Transportsysteme	35
Abb. 24: Hochfrequenzschweißen der Innenkonstruktion der Außenhülle der trapezförmigen Behälterkonstruktion mit Haltetaschen für Karabinerhaken (Trapezbehälter Baureihe I).....	36
Abb. 25: Konfektion des trapezförmigen Behälters hinsichtlich der Herstellung der inneren Haltekonstruktion (Trapezbehälter Baureihe I)	36
Abb. 26: Mit Luft gefüllter trapezförmiger Behälter (Trapezbehälter Baureihe I)	37
Abb. 27: Revisionsverschlüsse in Form von Reißverschlüssen (links), gesichert mit Zugaufnahmen .	38
Abb. 28: Test zweier aus drei Schläuchen mit Befülltuben bestehender Segmente im Testcontainer, Betriebshof DAEDLER	39
Abb. 29: Labormodell Doppelkammerschlauch teildurchlässiger Mittelnaht mit aufgelegtem dritten Schlauch.....	40
Abb. 30: Labormodell Trapezbehälter Baureihe II mit Sichtfenster	41
Abb. 31: Konstruktionszeichnung mit kraftschlüssig verschweißter Planenvorlage	42
Abb. 32: Labormodell Trapezbehälter Baureihe II mit wasserseitiger Plane und Dränmatte im Testcontainer.....	43
Abb. 33: Labormodell Trapezbehälter Baureihe II mit wasserseitiger Plane, Dränmatte und Kopplungsmodifikationen im großmaßstäblichen IWA-Testbecken	44
Abb. 34: Einstautest mit teilweiser Wasser- und Luftfüllung im IWA-Testbecken.....	45
Abb. 35: Verpackung in Form von fahrbaren Kleinrollcontainern und multifunktionalen Logistikfahrzeugen im Euro-Maß	47
Abb. 36: Aufbau und Volleinstau mit Überlauf der Prototypen bei der TÜV-Zertifizierung	49
Abb. 37: Präsentation von Hochwasserschutzentwicklungen und dem Projekt DeichKADE auf der INTERSCHUTZ 2015 am Stand des Instituts für Wasserbau der Hochschule Bremen.....	50
Abb. 38: Stand der Firma OPTIMAL auf der INTERSCHUTZ 2015	50
Abb. 39: Präsentation des Projekts DeichKADE auf der Woche der Umwelt 2016 in Berlin.....	51

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammenfassung der obligatorischen und optionalen Forderungen an die zu entwickelnden wassergefüllten Konstruktionen zur Aufkantung von Deichstrecken	25
--	----

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

DAEDLER	Karsten Daedler e.K. – Konfektion von Planstoffen und Folien
IWA	Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen
OPTIMAL	OPTIMAL Planen- und Umwelttechnik GmbH
SSES	Sandsackersatzsystem
TÜV Nord	TÜV Nord Systems GmbH & Co. KG

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des zweiphasigen Forschungsprojekts DeichKADE wurde eine ohne weitere Verankerungen ortsfest installierbare und mit Wasser befüllbare Schlauchkonstruktion für die sichere und ressourcenschonende Aufkadung von überflutungsgefährdeten Deichabschnitten an Binnengewässern sowie zum Bau von Verwallungen in tiefliegenden Gebieten entwickelt.

In Phase 1 erfolgten die Arbeiten, die zur Spezifizierung der Anforderungen an die Konstruktionen, zur Konzeption eines Test- und Entwicklungskonzepts sowie zum Bau von Labormodellen dienten. In Phase 2 wurden die entwickelten Labormodelle optimiert und in Prototypen überführt, die in ihrer Konstruktion für eine Serienproduktion geeignet sind. Zudem wurden die Prototypen für ihren Einsatz im operativen Hochwasserschutz vom TÜV Nord zertifiziert.

Der Antragsteller OPTIMAL koordinierte das Projekt und setzte seinen Arbeitsfokus auf die Entwicklung konstruktiver und produktionstechnischer Lösungsansätze, wobei auch die Überprüfung, Weiterentwicklung und Ausrichtung der Lösungsansätze auf praxistaugliche Ausrüstungen behandelt wurde. Der Projektpartner DAEDLER brachte seine langjährige praktische Erfahrung in Konstruktion und Verarbeitung textiler Materialien in das Projekt ein. Arbeitsschwerpunkte waren die Mitarbeit bei den Konstruktionsvorüberlegungen als praktische Ergänzung zu den theoretischen Lösungsansätzen des Hochschulpartners und die folgende Leitung der Muster- und Prototypenerstellung in Zusammenarbeit mit OPTIMAL. Der Projektpartner IWA erarbeitete Lösungen zu den ingenieurtechnischen Fragestellungen des Forschungsprojekts. Zudem wurden die Versuche und Tests während der Entwicklungsarbeit und für die Zertifizierung durch das IWA konzipiert, koordiniert und maßgeblich durchgeführt und das Berichtswesen inklusive Dokumentationen wurde federführend übernommen.

Die erfolgreiche Entwicklung von sicher einsetzbaren, wassergefüllten textilen Konstruktionen für die Deichaufkadung und den Bau temporärer Verwallungen allgemein ermöglicht große materielle, zeitliche und finanzielle Einsparungen und somit eine Verringerung des Deichbruch- und Überschwemmungsrisikos. Infolge der realisierbaren hohen Standsicherheit der Konstruktionen bei geringer Aufstandsfläche weist die Konstruktion einen weiten Einsatzbereich im abwehrenden Hochwasserschutz auf.

Aktuell wird vom Partner OPTIMAL ein Konzept zur Vermarktung der Konstruktion erarbeitet. Hier steht die Firma OPTIMAL in engem Austausch mit namhaften Vertretern des deutschen Feuerwehrwesens und des THW sowie den großen Feuerwehrausrüstern, die bereits großes Interesse an den Ausrüstungen signalisiert haben. Auch hier bietet sich für die Markteinführung die Fachmesse INTERSCHUTZ 2020 an. Diese Messe gehört zu den internationalen Leitmessen in den Bereichen Feuerwehr und Katastrophenschutz und zieht ein hochgradig internationales Publikum an.

2 Problemstellung

Extreme Hochwasserereignisse, wie das Hochwasser im Mai und Juni 2013 in Mitteleuropa, das in Deutschland zu Überschwemmungen in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern führte, zeigen, dass ein enormer materieller und personeller Aufwand zur Verteidigung bestehender Deichlinien gegen akutes Versagen im Hochwasserfall erforderlich sind. In vielen Gebieten sind mehrere katastrophale Hochwasserereignisse in kurzer Zeit aufgetreten, wie im Einzugsgebiet der Elbe in den Jahren 2002, 2006 und 2013. Extreme Hochwasserereignisse sind eine Folge extremer Wetterlagen, wobei davon auszugehen ist, dass deren Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem Klimawandel steigt.

Zur Minderung der Hochwasserstände können verschiedene strategische Maßnahmen ergriffen werden, die unter dem Oberbegriff 'Mehr Raum den Flüssen' zusammenzufassen sind, wie die Einrichtung von Polderflächen und Rückhaltebecken, die Rückverlegung von Deichen, die Renaturierung von Bächen sowie die Umsiedlung hochwassergefährdeter Bebauung. Die Praxis zeigt, dass die Umsetzung entsprechender Maßnahmen häufig an den Interessen der Anrainer scheitern, seien es Bewohner oder Nutzer wie landwirtschaftliche Betriebe, und bisher nur einzelne Projekte realisiert werden konnten. Nicht zuletzt unter Berücksichtigung der dichten Besiedlungsstruktur wird auch in Zukunft der technische Hochwasserschutz mit Deichen eine bedeutende Rolle im Schutz gegen Überflutungen spielen.

Eine vollständige Erneuerung bzw. Ertüchtigung des technischen Hochwasserschutzes ist jedoch auch künftig nicht zuletzt wegen der begrenzt zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel nicht zu erwarten. Insofern werden auch in Zukunft Deichverteidigungsmittel benötigt, und zwar unter Berücksichtigung der Wirkungen des Klimawandels ggf. häufiger und in größerem Umfang als in der Vergangenheit.

Das klassische Mittel der ortsungebundenen mobilen Hochwasserschutzsysteme ist der Sandsack. Daneben stehen seit einigen Jahrzehnten sogenannte Sandsackersatzsysteme (SSES) zur Hochwasserabwehr zur Verfügung. SSES werden in Schlauch-, Becken-, Klapp-, Bock-, Damm- oder Tafelsysteme bzw. Masseelemente unterschieden, die entweder über ihre Masse infolge des Materialeinsatzes von Wasser, Sand oder Beton oder über ihre Geometrie in Kombination mit dem hydrostatischen Wasserdruk den Einwirkungen des Hochwassers entgegenwirken. In Deutschland wurden beispielsweise während des Elbehochwassers 2013 vereinzelt ortsungebundene SSES eingesetzt (vgl. AQUARIWA¹, Mobildeich²). Der Einsatz von Sandsacksystemen zur operativen Hochwasserabwehr ist sehr zeit-, material- und personalintensiv. Ihr Vorteil liegt jedoch in der flexiblen Einsatzfähigkeit und langjährigen Praxiserfahrung. Demgegenüber kann mithilfe von SSES die operative Hochwasserabwehr wesentlich effizienter gestaltet werden, ihr Einsatz erfordert aber zunächst höhere Investitionskosten. Die höheren Investitionskosten können sich je nach System durch geringere Kosten für Helfer und Logistik beim ersten oder zweiten Einsatz ausgleichen. Dennoch werden SSES immer noch selten in der operativen Hochwasserabwehr eingesetzt. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Als Hauptgründe sind ein eingeschränktes Vertrauen in die Funktionalität insbesondere bei Konstruktionen, die direkt den Hochwasserständen ausgesetzt sind, sowie Hürden bei der Beschaffung - insbesondere der Finanzierung - der

¹ <http://www.AQUARIWA.de/die-einsaetze/AQUARIWA-in-gartow-juni-2013/#die-einsaetze/AQUARIWA-in-gartow-juni-2013/>

² <https://www.mobildeich.de/de/referenz.php#filme>

Systeme zu nennen. Ist letzteres nur politisch-administrativ lösbar, so kann eine sachgerechte technische Entwicklung unter Einbindung realitätsnaher Testreihen der Erstellung praxistauglicher Konstruktionen dienen.

Im von der Deutschen Bundesstiftung DBU finanziell unterstützten Forschungsprojekt DeichKade wurden Prototypen wassergefüllter Schlauchkonstruktionen entwickelt, die zur Aufkade überströmungsgefährdeter Deichabschnitte bzw. zur Erstellung einer Verwallung mit geringer Aufstandsfläche dienen. Wie das Hochwasserereignis im Frühsommer 2013 in Deutschland zeigte, ist der Bedarf an entsprechenden Konstruktionen im Hochwasserfall groß. So wurden während des Hochwassers 2013 viele zig Kilometer Deiche im Elbe-Einzugsgebiet mittels Sandsäcke erhöht (Abb. 1). Dies ist im Auf- und Abbau sehr material- und personalintensiv und kann ressourcenschonender und mit deutlich höherer Effizienz mit wassergefüllten Schlauchkonstruktionen erfolgen.



Abb. 1: Aufkaden aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)

3 Gegenstand und Zielsetzung des Projekts

Ziel des zweiphasigen Forschungsprojekts DeichKade ist die Entwicklung von mobilen, ohne weitere Verankerungen ortsfest installierbaren und mit Wasser befüllbaren Schlauchkonstruktionen für die sichere und ressourcenschonende Aufkade von überflutungsgefährdeten Deichabschnitten an Binnengewässern sowie zum Bau von Verwallungen in tiefliegenden Gebieten.

Bisher stehen im operativen Hochwasserschutz in erster Linie Sandsäcke zur Verfügung, die einen hohen Bedarf an Material und Personal beim Auf- und Abbau haben. Die zu entwickelnden Schlauchkonstruktionen sollen sicher und effizient und somit auch mit geringem Personal-, Material- und Transporteinsatz verwendbar sein und Sandsackaufkaden auf Deichen sowie Sandsackverwallungen ersetzen.

Die zu entwickelnden Konstruktionen sollen die folgenden Funktionen aufweisen:

- Einzelsegmente unterschiedlicher Höhenmaße, die zu Deichaufkaden oder Verwallungen beliebiger Länge koppelbar sind
- Geringe, auf die Breite von Deichkronen und auf begrenzte Platzverhältnisse im Gelände, z.B. entlang von Straßen, angepasste Aufstandsfläche
- Genau definierte, ortsfeste Lage durch Wasserfüllung ohne Bedarf an zusätzlichen Befestigungen
- Schneller, personal- und ressourcensparender Auf- und Abbau der Schutzkonstruktionen

- Platzsparende Lagerung

In der ersten Phase des Forschungsprojekts DeichKade wurden die theoretischen Grundlagen für die Entwicklungsarbeit gelegt und es wurden erste Labormodelle von Schlauchkonstruktionen unterschiedlicher Höhenmaße zum Einsatz als Deichaufkudung entwickelt. In der zweiten Projektphase wurden die Labormodelle optimiert und in Prototypen überführt, die hinsichtlich Material, Konstruktion, Funktion, Struktur, Design und Fertigung die Grundlage für eine nachfolgende Serienproduktion durch die Industriepartner bilden. Zudem wurden die Prototypen durch den TÜV für den Einsatz im Hochwasserschutz zertifiziert.

4 Projektpartner

Die am Forschungsprojekt DeichKade beteiligten Partner sind:

- Optimal Planen- und Umwelttechnik GmbH (OPTIMAL), Menden
- Karsten Daedler e.K. - Konfektion von Planenstoffen und Folien (DAEDLER), Trittau
- Hochschule Bremen, Institut für Wasserbau (IWA)

Die Zusammenarbeit der beiden Unternehmen OPTIMAL und DAEDLER in einem gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekt begründet sich in der Tatsache, dass beide Unternehmen als technische Konfektionäre das notwendige technische Grundverständnis für die anstehenden Entwicklungsaufgaben in das Projekt einbringen können. Gleichzeitig decken sie mit ihrer unterschiedlichen Aufstellung am Markt die für ein solches Projekt notwendigen Arbeitsbereiche Produktionsorientierung, Anwender- und Praxisorientierung sich einander sinnvoll ergänzend ab. Und nicht zuletzt ist der Transfer von Daten (Zeichnungen, Fertigungsangaben etc.) problemlos und unkompliziert möglich, da beide Unternehmen mit identischen Maschinenfabrikaten, wenn auch unterschiedlichen, den jeweiligen betrieblichen Aufgabenstellungen angepassten Maschinentypen arbeiten. Zudem arbeiten beide Projektpartner in einem europäischen Netzwerk technischer Konfektionäre und haben in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl von gemeinsamen Projekten erfolgreich bearbeitet, nicht zuletzt des Kooperationsprojekts HWS-Mobil.

Das IWA stellt die theoretische Expertise und die praktische Erfahrung in der Bekämpfung von Hochwasserereignissen, wie dem Oderhochwasser im Jahr 1997 und dem Elbehochwasser im Jahr 2013. Darüber hinaus ist das IWA in verschiedenen Forschungsprojekten zum operativen Hochwasserschutz, u.a. auch in Kooperation mit dem Technischen Hilfswerk THW, wie im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF von 2014 bis 2017 geförderten Forschungsprojekt DeichSCHUTZ und vom Bundesministerium für Umwelt BMU von 2016 bis 2018 geförderten Kooperationsprojekt HWS-Bildung tätig. Im Zuge der beiden genannten Projekte wurde u.a. eine Testanlage durch das IWA auf dem Gelände des THW-Ausbildungszentrums Hoya erstellt und es wurden darin umfangreiche Tests an Sandsackersatzsystemen durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sowie die Möglichkeit der Nutzung der IWA-Testanlage konnten im Projekt DeichKADE genutzt werden. Zudem wurde das Berichtswesen vom IWA übernommen.

Die vorhandene Expertise der Projektpartner bezieht sich auf die folgenden Bereiche: Hydrologie, Hydraulik, Wasserbau, Geotechnik, Hochwasser- und Katastrophenschutzmanagement gepaart mit technologischem Wissen hinsichtlich Materialkunde, Verbindungstechnik, Zuschnitt und praktischem Know-How bezüglich der Fertigung und des Tests von Konstruktionen.

5 Einsatzgebiete

Die im Projekt DeichKade zu entwickelnden Sandsackersatzsysteme sollen einerseits zur Aufkantung von Flussdeichen bei der Gefahr der Überspülung im Hochwasserfall eingesetzt werden. Andererseits sollen sie auch im ebenen Gelände als Verwallung dienen können, um tiefliegende, nicht durch Deiche oder andere technische Hochwasserschutzmaßnahmen geschützte Gebiete vor Überschwemmung zu schützen. Für letzteren Einsatzfall sind bereits unterschiedliche Sandsackersatzsysteme (SSES) auf dem Markt erhältlich, die in Schlauch-, Becken-, Klapp-, Bock-, Damm- oder Tafelsysteme bzw. Masselemente unterschieden werden können (Abb. 2). Die Systeme wirken den Belastungen durch Hochwasser entweder über ihre Masse infolge des Materialeinsatzes von Wasser, Sand oder Beton oder über ihre Geometrie in Kombination mit dem hydrostatischen Wasserdruck entgegen. Nachteilig ist hierbei ihre oft erhebliche Aufstandsfläche wie im Fall von üblichen Schlauchsystemen, die erheblichen zu transportierenden und zu platzierenden Massen bei Masselementen sowie die in weichen Untergründen wie wassergesättigten Rasenuntergründen einsinkenden Bauteile bei Bock- und Dammsystemen sowie die in den Untergrund einzubringenden Bauteile beim Tafelsystem. Für den Einsatz auf weichen Untergründen und beengten Platzverhältnissen ist es daher von Vorteil, Systeme zu entwickeln, die ohne hohen Transportaufwand mit Wasser zur Beschwerung befüllbar sind, die eine einheitliche Lastverteilung und keine konzentrierte Einbringung von Lasten in den Untergrund aufweisen und die mit einer geringen Aufstandsfläche ausreichende Bauhöhen generieren können. Ein entsprechendes System ist im Projekt DeichKade zu entwickeln.

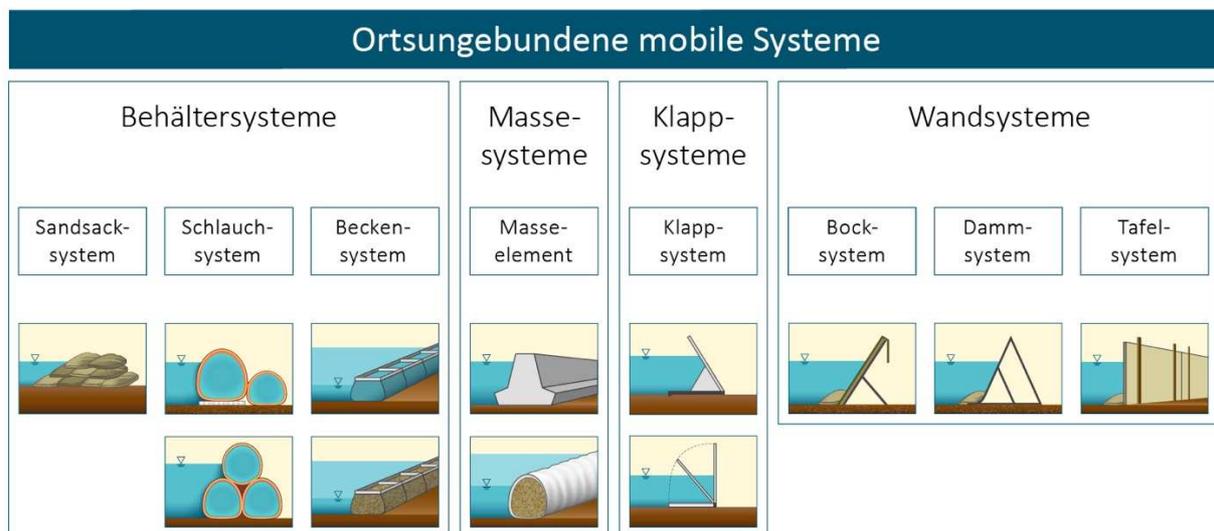


Abb. 2: Einteilung ortsungebundener mobiler Hochwasserschutzsysteme (MASSOLLE ET AL., 2019)

Zur Aufkantung auf Deichen sind die Systeme auf der Deichkrone zu platzieren. Hiermit ergeben sich eindeutige Restriktionen hinsichtlich Aufstandsweite und auch hinsichtlich Installation der Konstruktion. Insofern werden im Folgenden im Detail der Aufbau und die Geometrie von Deichen an Binnengewässern betrachtet. Die diesbezüglichen Restriktionen sind im ebenen Gelände weniger scharf, so dass die Konfektion einer Schutzkonstruktion für den Einsatz auf der Deichkrone einen Einsatz in der Ebene impliziert.

5.1 Flussdeiche

Flussdeiche sind zeitweilig eingestaute Dämme an Fließgewässern zum Schutz des Hinterlands gegen den Eintritt von Hochwasserständen. Deiche bestehen zumeist aus Erdbaustoffen (Bodenmaterial). Teilweise sind sie in stark belasteten Abschnitten mit einer Innendichtung in Form einer Spundwand oder Erdvermörtelung mit Beton ausgestattet.

Deiche werden nur bei Hochwasser durch Wassereinstau beansprucht und unterscheiden sich somit von Stauhaltungsdämmen an staugeregelten Flüssen und Dämmen an künstlichen Kanälen, deren Einstau dauerhafter Natur ist. Bei lang anhaltenden Hochwasserständen können jedoch auch an Flussdeichen, insbesondere am Unterlauf von Flüssen, langanhaltende Einstauperioden von mehreren Wochen auftreten.

Die äußere Gestalt bzw. Geometrie eines Deiches wird im Wesentlichen durch die Höhe des Deiches, die Böschungsneigungen an der Wasser- und Luftseite sowie die Kronenbreite bestimmt. Die Deichgeometrie bestimmt auch die Standfestigkeit des Deiches. Generell gilt, je breiter die Deichbasis und die Deichkrone sowie je flacher die Deichneigungen sind, desto stabiler ist der Deich.

Generell sollten die Böschungsneigungen nicht steiler als 1:2 ausgeführt und die Deichkrone sollte mindestens 3,0 m breit sein. Es existieren jedoch Altdeiche mit Böschungsneigungen von 1:1,5. Neben der Geometrie des Deiches spielt der innere Aufbau und die Wasserdurchlässigkeit des Deichbaumaterials eine wichtige Rolle. Dabei kann der Deichkörper ganz oder teilweise aus weitestgehend einheitlichem Erdstoff (sog. homogener Deichaufbau) bestehen oder es sind spezielle Dichtungszonen eingebaut. Ältere Flussdeiche weisen in der Regel keine Dichtungszonen auf, während moderne Deiche als sogenannte Drei-Zonen-Deiche mit Außendichtung auf der Wasserseite und Auflastfilter am luftseitigen Deichfuß ausgeführt sind.

In Abb. 3 ist ein Regelquerschnitt eines modernen Flussdeiches mit Bezeichnungen dargestellt. Die Hauptbestandteile sind der Deichkrone, die wasserseitige und landseitige Böschung, der Deichfuß sowie die wasserseitige und landseitige Berme.

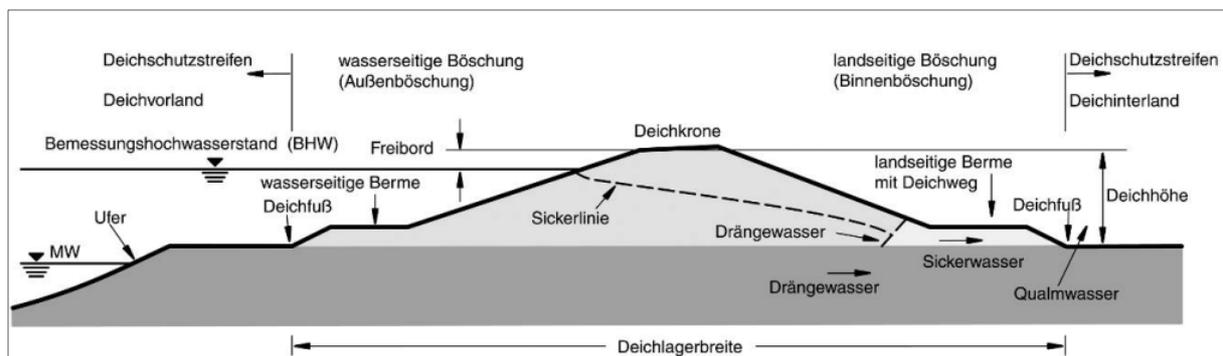


Abb. 3: Begriffe bei Deichen an Fließgewässern (DWA, 2011)

In Deutschland gibt es rund 400.000 km Fließgewässer, hiervon rund 20.000 km mit einem Einzugsgebiet von mehr als 1.000 km² (LAWA, 1995). Eine Abschätzung der Deichlängen rechts und links der größeren Gewässer, die in den Landeswassergesetzen erfasst sind, ergibt eine Länge von rund 7.500 km (LAWA, 1995).

Bundesweite Informationen zum Einsatz und Ausbaugrad des technischen Hochwasserschutzes liegen nicht zuletzt wegen der föderalen Verwaltungsstruktur des Hochwasserschutzes nicht vor. Oftmals sind die entsprechenden Informationen aber auch auf Länderebene nicht flächendeckend erfasst, sondern liegen nur für einzelne Flussgebiete oder Teile derselben vor. Eine gute und öffentlich zugängliche Datenlage ist allein für die Küstengebiete an Nord- und Ostsee vorhanden, in denen grundlegende Informationen insbesondere in den alle 10 bis 15 Jahre aktualisierten Generalplänen zum Küstenschutz zusammengestellt sind (MBLU, 1995; MLR, 2012; NLWKN, 2007; MLUV, 2009)

Mit Verabschiedung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie am 23. Oktober 2007 (EU, 2007) durch das Europäische Parlament und den Rat der Europäischen Union als Reaktion auf die extremen Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre, wurden die bestehenden Flussdeiche vielerorts einer umfangreichen Überprüfung unterzogen. Die Erkenntnisse dieser Überprüfungen haben zahlreiche Deichbau- und Deichinstandsetzungsprojekte nach sich gezogen (HEIMERL, MEYER, 2014). Allerdings existieren noch zahlreiche Deichanlagen, die nicht den aktuellen Regelwerken entsprechen. Dies betrifft Hauptdeichlinien und in besonderem Maße Rückstaudeiche.

5.1.1 Historische Entwicklung von Flusdeichen

Eine der ältesten Methoden des Hochwasserschutzes ist der Bau von Deichen. Die ersten Deichbauten bzw. Erdverwallungen errichteten holländische Siedler in Deutschland am Niederrhein. Die ersten Anfänge lassen sich bis ins 9. Jahrhundert zurückverfolgen. Eine verstärkte Zunahme des Deichbaus fand im 12. Jahrhundert an der Elbe statt. (SCHMIDT, 2000)

Die ersten Deiche ähnelten aufgrund ihrer Bauweise unter Verwendung von Flechtzäunen eher mit Erde gefüllten Mauern, da durch die Verwendung der Zäune sehr steile Böschungen gebaut werden konnten (HASELSTEINER, 2007). Aufgrund von Erfahrungen durch Deichbrüche und immer wiederkehrenden Hochwasserereignissen wurden die Deichprofile im Versuch-und-Irrtum-Verfahren fortwährend weiterentwickelt (Abb. 4). Als Baumaterial für die Deichkörper wurden verschiedenste Bodenarten verwendet, und zwar zumeist der Boden, der sich in unmittelbarer Nähe des zu errichtenden Deiches befand. Aus heutiger Sicht war das seinerzeit verwendete Material für den Deichbau gänzlich ungeeignet. Diese Materialien waren sehr inhomogen und wiesen durch den hohen Anteil an organischen Stoffen Gefügestörungen auf. Die Verdichtungstechnik war während den Anfängen des Deichbaus noch nicht so weit vorgeschritten wie heute, so dass die Deichkörper nur unzureichend verdichtet waren. Dies hatte Auswirkungen auf die Standsicherheit und die Durchlässigkeit des Deichkörpers.

Im Laufe der Jahre wurde die aufwendige Bauweise mit Flechtzäunen nicht mehr praktiziert. Stattdessen wurde dazu übergegangen den Deichfuß breiter auszuführen, um so die Böschungen sowohl zur Wasserseite als auch zur Binnenseite flacher gestaltet zu können (HASELSTEINER, 2007). Mit der breiteren Ausbildung des Deichkörpers konnte dem anstehenden Sickerwasser im Hochwasserfall positiv entgegengewirkt werden. Die breitere Deichform hatte somit im Gegensatz zur Flechtwandbauweise eine bessere Standsicherheit und konnte das Hochwasser besser wehren und diesem länger standhalten. Auch die Deichkronen wurden breiter ausgebildet, um im Hochwasserfall ausreichend Platz für die Deichverteidigung zu bieten. Zudem bietet eine breite Deichkrone im Falle eines Versagens der Böschungen mehr Sicherheit im Hinblick auf eine Überströmung des Deichkörpers.

Neben dem Überströmen des Deichkörpers führt auch das Unterströmen des Deichfußes zum Versagen. Daher ist der Deich gegen eine Unterströmung zu sichern. Gerade bei durchlässigen Bodenarten

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

wurden bereits bei der Bauweise gegen Mitte des 19. Jahrhunderts entsprechende Vorkehrungen gegen diese Versagensart getroffen (HASELSTEINER, 2007), siehe Abb. 4, Baujahr 1947. Durch einen rund 1 bis 2 m tiefen, mit tonigem Bodenmaterial verfüllten Graben mittig unter dem Deichkörper konnte einer Unterströmung entgegengewirkt werden.

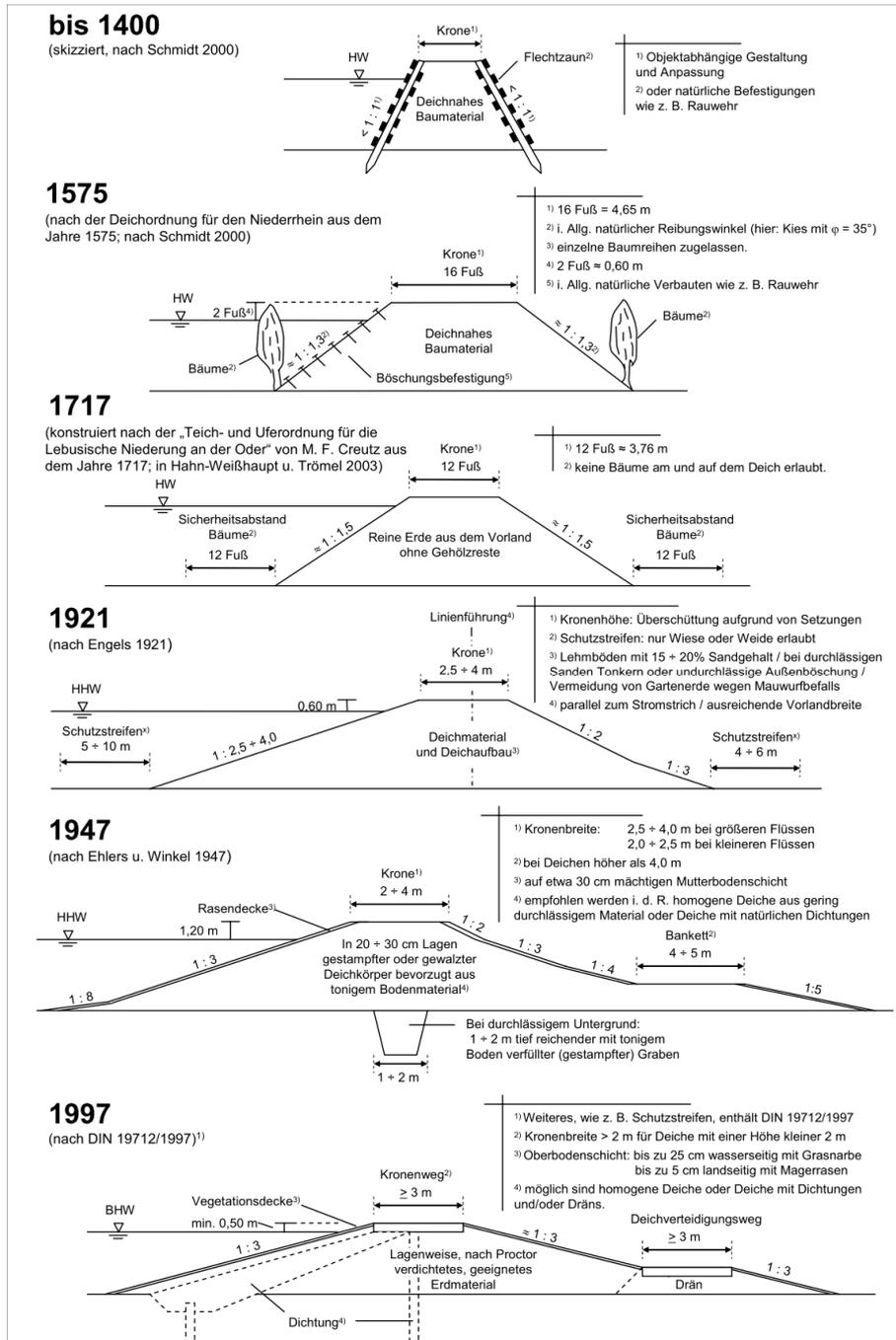


Abb. 4: Deichbauten vom Mittelalter bis heute (HASELSTEINER, 2007)

Moderne Deiche sind als sogenannter Drei-Zonen-Deich ausgeführt, siehe Abb. 4, Baujahr 1997 sowie Abb. 5. Der Drei-Zonen-Deich weist an der wasserseitigen Böschung eine Dichtungsschicht auf, darauf

folgt der eigentliche Stützkörper, woran sich landseitig eine Filter- und Dränschicht, der sogenannte Auflastfilter, anschließt. Die wasserseitige dichtende Schicht aus Lehm oder Ton erschwert das Eindringen des Flusswassers in den Stützkörper und über die an der Landseite angebrachte, gut wasserdurchlässige aber relativ schwere Drainageschicht kann das dennoch eingedrungene Wasser abgeführt werden. Hiermit wird die Höhe der Sickerlinie im Deich und somit der Auftrieb verhältnismäßig eingegrenzt.

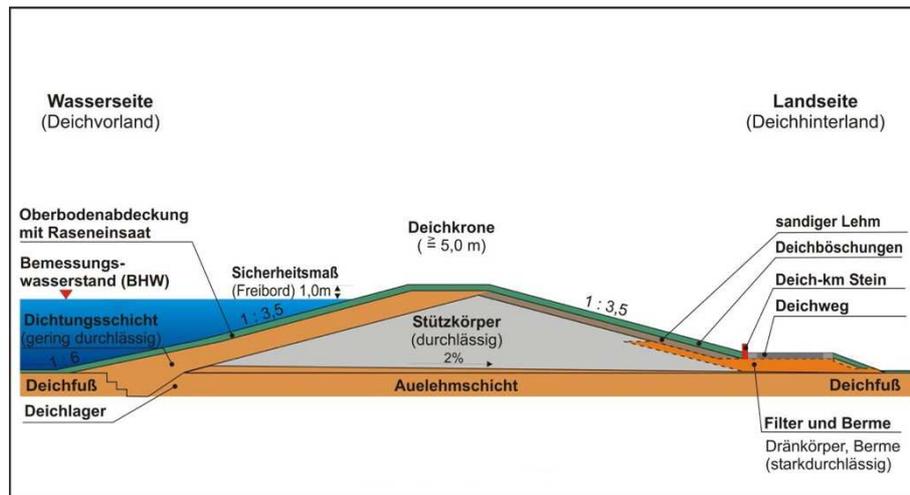


Abb. 5: Drei-Zonen-Deich, Beispiel Regelprofil Rheindeich (SUK, 2002)

5.1.2 Analyse von Bestandsdeichen

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Bauweise und ihres unterschiedlichen Baujahrs kann kein allgemeines Regelprofil für Flussdeiche in Deutschland angegeben werden. Während eines Hochwasserereignisses sind im Regelfall nicht die neu errichteten oder sanierten Drei-Zonen-Deiche durch akutes Versagen gefährdet, sondern vor allem die bestehenden älteren homogen aufgebauten Deiche. Historische Deiche und Deiche, deren Aufbau nicht dem Stand der heutigen Technik entsprechen, werden häufig als Altdeiche bezeichnet. Im Folgenden werden beispielhaft Altdeichprofile der Elbe und einiger Nebenflüsse, der Mulde, Mittelweser und der Ochtum bei Bremen vorgestellt.

Eine genaue Beschreibung vom Aufbau eines Altdeichs kann nicht getroffen werden, da diese zum größten Teil mit örtlich vorhandenen Bodenmaterial errichtet worden sind und hinsichtlich Querschnitt, Aufbau und Konstruktion teilweise bereits auf Längen von wenigen 100 m variieren. Ein Großteil der heutigen Deichbauten sind keine Neubauten, sondern Ertüchtigungen und Erhöhungen vorhandener Deiche, die über mehrere Bauphasen historisch gewachsen sind (CONRAD, 2012).

Ein Deichkörper kann ganz oder teilweise aus einem weitgehend einheitlichen Erdstoff (homogener Deichaufbau) bestehen, wobei insbesondere ältere Deiche ohne Dichtungszonen gebaut wurden. Ebenfalls sind Altdeiche vielerorts ohne Deichverteidigungsweg errichtet worden und auch das kontrollierte Abführen von Sicker- und Qualmwasser durch einen Deichseitengraben am luftseitigen Deichfuß ist vielerorts nicht vorgesehen. Teilweise sind steile Deichneigungen von bis zu 1:1,5 zu verzeichnen. Zudem sind an nicht wenigen Deichanlagen Bäume, Sträucher und Hecken mit dem Deichkörper verwachsen. Dies ist grundsätzlich unzulässig und wirkt sich nachteilig auf die Standsicherheit des Deiches aus (DIN 19712), da Bäume insbesondere bei aufgeweichten Böden infolge Sickerwassereintritt in Verbin-

dung mit Windeinwirkung entwurzelt werden können und somit schwerwiegende Schäden an Böschungen und Deichkrone entstehen können. Darüber hinaus begünstigt das absterbende Wurzelwerk die Ansiedlung von Wühltieren, deren Gänge im Hochwasserfall eine Durchsickerung und einen Austrag von Bodenmaterial aus dem Deichinneren beschleunigen.

Im Projekt wurden Planunterlagen einer Vielzahl an Bestandsdeichen analysiert. Teilweise sind die Deiche mit einem asphaltierten oder gepflasterten Deichkronenweg ausgestattet, in vielen Fällen sind die Deichverteidigungswege jedoch unbefestigt bzw. verfügen in Einzelfällen auch über schotterbefestigte Fahrspuren. In manchen Fällen ist der Deichverteidigungsweg in andere Infrastrukturen integriert, wie z.B. eine auf der Deichkrone verlaufende Kreisstraße.

Die Mehrzahl der untersuchten Deichquerschnitte weisen Böschungsneigungen von 1:1,5- 1:3 sowohl auf der Landeseite als auch auf der Wasserseite auf. Die Deichkronenbreiten liegen bei den untersuchten Deichquerschnitten zwischen 2,00 - 5,00 m. Bei nahezu allen untersuchten Deichen handelt es sich um Gründeiche.

6 Hochwasserszenarien an Binnenflüssen

Hochwasser in Binnenflüssen entstehen durch hohe Niederschläge und / oder Schmelze von Schnee und Eis. Einen Sonderfall stellt der Eisstau dar. Bei einem Zusammentreffen von hohen Abflussraten und Eisgang kann auf dem Gewässer gebildetes Oberflächeneis aufgebrochen werden und sich beim Abfluss verkeilen und auftürmen, und zwar insbesondere an Engstellen oder an Brückenpfeilern. Hierdurch entstehen Barrieren, hinter denen sich das zufließende Wasser aufstaut, der sogenannte Eisstau.

Bei der Entstehung von Hochwasserereignissen können die Abflussbildung und die Abflusskonzentration unterschieden werden. Unter Abflussbildung werden die Prozesse zusammengefasst, die in einem Einzugsgebiet zur Bildung des sogenannten abflusswirksamen Niederschlags führen. Die Abflusskonzentration beinhaltet die Prozesse, die zur Transformation des abflusswirksamen Niederschlags in eine Ganglinie des Direktabflusses aus einem oberirdischen Einzugsgebiet führen.

Der Prozess der Abflussbildung setzt sich zusammen aus den hydrologischen Prozessen, die sich auf der Landfläche abspielen:

- Interzeption
- Verdunstung
- Infiltration (ggf. behindert durch künstliche - z.B. Pflasterung - oder natürliche Versiegelung - z.B. bindige Böden, gefrorener Boden)
- Schneeschmelze
- Speicherung an der Oberfläche, im Boden und im Grundwasser

Diese Prozesse sorgen für die Bildung des Abflusses und dessen zeitliche Intensitätsverteilung. Der Ablauf der hydrologischen Prozesse wird hingegen beeinflusst durch folgende Faktoren:

- geomorphologische (Oberflächenrelief, insbesondere Oberflächengefälle; Bodenmaterial, also Fels, Geröll, rollige und bindige Böden)
- klimatische (Niederschlagsintensität, Verdunstung, Frost)
- anthropogene (wie künstliche Versiegelung)

Das Niederschlagswasser, das nicht verdunstet oder in der Vegetation gespeichert wird, erreicht die Bodenoberfläche und wird in den Boden infiltriert (Bodenfeuchteanreicherung, Grundwasserneubildung). Ist die Niederschlagsintensität jedoch größer als die vom jeweiligen Boden aufnehmbare Infiltration, fließt das Wasser oberflächlich in Richtung Vorfluter ab oder sammelt sich in Vertiefungen (Muldenrückhalt).

Nach ingenieurhydrologischer Sicht kann die Abflussbildung wie folgt skizziert werden: Der Gesamtniederschlag wird aufgeteilt in einen Verlustanteil, der nicht unmittelbar (ereignisbezogen) zum Abfluss beiträgt, und in einen abflusswirksamen Anteil, den effektiven Niederschlag, der direkt abfließt. Diese effektive Abflusskomponente setzt sich zusammen aus dem Oberflächenabfluss und dem direkten Zwischenabfluss (oberhalb der Grundwasseroberfläche als unterirdischer Abfluss den Wasserläufen zufließend).

Der Prozess der Abflusskonzentration besteht darin, dass der flächenmäßig sehr unterschiedlich verteilte effektive Niederschlag durch ober- und unterirdisch stattfindende Fließvorgänge zum nächstgelegenen Vorfluter abgeleitet wird. Diese Fließvorgänge hängen in ihrem zeitlichen Verlauf und in ihrer quantitativen Ausprägung stark von der Beschaffenheit der Landoberfläche und des Untergrundes ab. Die Abflusskonzentration wird wesentlich bestimmt durch

- Größe des Einzugsgebiets
- Oberflächengefälle im Einzugsgebiet
- Gewässerdichte im Einzugsgebiet
- Form des Einzugsgebiets, hier insbesondere der längste Laufweg im Einzugsgebiet

Hinzu kommen hydrologische und meteorologische Einflussfaktoren wie:

- Vorgeuchte des Bodens infolge voriger Niederschlagsereignisse
- Versiegelung des Bodens infolge Frost
- Zugbahn des zum Hochwasser führenden Niederschlagsereignisses – mit oder entgegen der Fließrichtung im Gewässersystem
- Strömungsgeschwindigkeit im Gewässersystem – Sohlgefälle in den Gewässern

Die Fließzeiten des Zwischenabflusses sind wesentlich länger als die des Landoberflächenabflusses, während dessen der Basisabfluss über das Grundwasser im Allgemeinen am längsten dauert. Bereits während eines länger anhaltenden Niederschlagsereignisses steigt der Gesamtabfluss an. Der direkte Abfluss kennzeichnet das zusätzlich zu der schon vorher vorhandenen Wasserführung abfließende Volumen, welches mit nur geringer Zeitverzögerung den Vorfluter erreicht.

Der Direktabfluss setzt sich aus dem direkt auf das Gewässer fallenden Niederschlag, dem Oberflächenabfluss und einem Anteil des Zwischenabflusses zusammen. Der Basisabfluss besteht im Wesentlichen aus dem verzögerten Zwischenabfluss, dem Grundwasserabfluss und dem zeitweise im Uferbereich gespeicherten Wasservolumen. In Hoch- und Mittelgebirgsgebieten bildet der Basisabfluss die kleinste Abflusskomponente, im Flachland dagegen kann er die anderen Komponenten übertreffen.

Generell kann festgestellt werden, dass Extremhochwasser in kleinen Einzugsgebieten durch kleinräumige Starkniederschlagsereignisse (sogenannte Sturzregen) hervorgerufen werden, wobei wegen der geringen Flächenausdehnung des Einzugsgebiets, der sehr hohen Niederschlagsintensität und der in der Regel einheitlichen Beregnung des gesamten Einzugsgebiets im betrachteten Zeitraum sehr kurze

Konzentrationszeiten und sehr steile Wasserstandsanstiege im Flussgebiet erreicht werden. Nach Beendigung des Hochwasser erzeugenden Niederschlags- oder Schmelzereignisses sinkt der Wasserstand im Gewässersystem ebenfalls schnell wieder ab.

In Hauptgewässern mit großen Einzugsgebieten führen hingegen großflächige und lang andauernde Niederschlagsereignisse (sogenannte Landregen), ggf. in Verbindung mit Schmelzereignissen im Oberlauf, zu Extremhochwässern. Der Anstieg des Wasserstands im Gewässer ist deutlich flacher, die Hochwasserwelle hält jedoch länger als in kleinen Einzugsgebieten an, ggf. über Wochen.

Die Ausbildung von Hochwasserereignissen und hier insbesondere die zu erreichenden Höchstwasserstände, die Anstiegsgeschwindigkeiten sowie die Dauer hoher Wasserstände hängen einerseits vom betrachteten Einzugsgebiet und Gewässersystem ab und andererseits vom jeweiligen meteorologischen Ereignis. Einschätzungen zu den zu erwartenden Hochwasserszenarien in einem Gewässersystem sind grundsätzlich möglich, Unsicherheiten bestehen aber immer hinsichtlich der anzusetzenden meteorologischen Situation. Hochwasserereignisse im Sommer verlaufen in der Regel anders als im Winter, weil die Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit im Sommer oftmals größer sind, es jedoch zu keiner Überlagerung mit Schneeschmelzen oder Eisversetzungen kommt. Zudem ist es nicht möglich, eine sichere zeitliche Eingrenzung von Starkniederschlägen vorzunehmen, so dass insbesondere in großen Einzugsgebieten ungünstige Überlagerungen von Hochwasserwellen in Neben- und Hauptflüssen möglich sind, die in der Vergangenheit ggf. noch nicht zum Tragen gekommen sind.

Die Abschätzung von Hochwasserszenarien kann nur ortsbezogen bzw. flussabschnittsbezogen durchgeführt werden. Hierfür ist die Historie örtlicher Hochwasserereignisse detailliert, auch unter Betrachtung der meteorologischen Bedingungen, zu analysieren und, wenn möglich, sind Hochwasserszenarien numerisch zu modellieren. Generelle Aussagen können nur mit großer Unschärfe gegeben werden. So sind Hochwasserwellen im Oberlauf von Flusssystemen in der Regel steil und kurz während über den Mittellauf bis zum Unterlauf die Wasserstandsanstiegsraten abnehmen und die Dauern hoher Wasserstände zunehmen.

7 Allgemeine Grundlagen der Deichverteidigung

Bei der Verteidigung von Deichen bei langanhaltenden und/ oder extrem hohen Hochwasserständen sind der limitierende Faktor der zur Verfügung stehenden und der zur Verteidigung benötigten Zeit sowie die physikalischen Grundlagen für die Schwächung der Standsicherheit des Deiches und mögliche erforderliche Gegenmaßnahmen zu betrachten.

7.1 Vorwarnzeit

Der Begriff Vorwarnzeit beschreibt die zur Verfügung stehende Zeit zwischen der Vorhersage eines erhöhten Wasserstands und dessen Eintritt. Die Länge der verfügbaren Vorwarnzeit ist abhängig von der Schnelligkeit des Wasserstandsanstiegs und der Zuverlässigkeit der Hochwasserstandsvorhersage unter extremen Witterungsbedingungen. Hierbei ist zu beachten, dass die Wasserstandsvorhersage von der Güte des verwendeten hydrodynamischen Modells, der Messnetzdichte (meteorologische und hydrologische Daten) sowie von der Güte der Wettervorhersage abhängig ist. Hierbei gilt im Allgemeinen: Je größer die geforderte Genauigkeit der Wasserstandsvorhersage ist, desto kürzer ist die Vorwarnzeit.

Wasserstandsvorhersagen sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet, die sich durch eine Verbesserung der zugrunde liegenden Daten und Vorhersagemodelle zwar reduzieren, jedoch nie vollständig ausräumen lassen. Eingangsdaten in die Wasserstandsvorhersagemodelle sind Wetterdaten und Wettervorhersagen sowie gemessene Wasserstände an unterschiedlichen Pegelstandorten. Insofern bilden sich in den Wasserstandsvorhersagen einerseits Mess- und Übertragungsfehler der Wetter- und Wasserstandsmessdaten ab. Andererseits können die Wasserstandsvorhersagen aber auch nie besser als die Wettervorhersagen sein. Gerade bei der Betrachtung kleinräumiger Flussgebiete können geringe Abweichungen in der vorhergesagten und der eingetretenen Zugbahn eines Tiefdruckgebietes einen erheblichen Einfluss auf die Niederschlagsmengen im betrachteten Gebiet und damit auf die Abflussmengen und Wasserstände ausüben.

Hinzu kommt, dass die mathematischen Modelle zur Vorhersage von Abflussmengen und Wasserständen die natürlichen Vorgänge nur in vereinfachter Form nachbilden können. Dies gilt für die hydrodynamische Berechnung der Strömung im Gewässernetz und im Besonderen für großräumige Niederschlag-Abfluss-Modelle in den Einzugsgebieten.

In Flussgebieten hängen mit zunehmender Vorhersagezeit die vorhergesagten Wasserstände mehr und mehr von der Niederschlagsvorhersage ab. Abweichungen der Niederschlagsvorhersage, sei es bei der Menge oder der räumlichen und zeitlichen Verteilung, führen somit zu Ungenauigkeiten in der Wasserstandsvorhersage. Da sich die einzelnen Fehler addieren, nimmt die Unsicherheit in der Vorhersage und damit die mögliche Abweichung der Vorhersage vom tatsächlich eintretenden Messwert mit zunehmenden Vorhersagezeiten zu (Abb. 6).

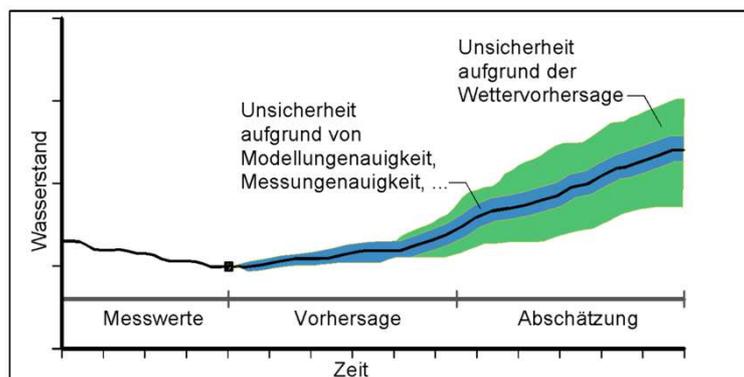


Abb. 6: Zunahme der Unsicherheiten in der Wasserstandsvorhersage mit zunehmender Vorhersagezeit

Generell ist im Oberlauf von Flüssen infolge des in der Regel wasserundurchlässigen Untergrunds (Fels), des steilen Reliefs (Hanglage), der vollständigen gleichzeitigen Beregnung des kleinräumigen Einzugsgebiets (kurzzeitige, kleinräumige Starkniederschläge sind Hochwasser erzeugend) sowie des Fehlens eines Hochwasserabflussbettes (enge Flussquerschnitte, häufiger Wasserstandsanstieg über das Flussbett hinaus) ein schneller Wasseranstieg bei Hochwasser erzeugenden Niederschlägen oder Schneeschmelzen zu erwarten. Auch in Kleingewässern kann der Wasserstandsanstieg infolge des kleinen Einzugsgebiets, in dem kleinräumige Starkniederschläge Abfluss bestimmend sein können, schnell erfolgen.

Im Unterlauf von Flüssen kommt ein Teil des Niederschlags infolge Versickerung und Verdunstung nicht zum Abfluss (durchlässige Böden, großräumige Einzugsgebiete), die Geländeneigungen sind flach (langsamer Transport des Niederschlags in das weitmaschige Flusssystem), die Beregnung des großräumigen Einzugsgebiets erfolgt nur partiell (lang andauernde, großräumig wirkende Niederschläge - Landregen - sind Hochwasser erzeugend) und dem Fluss steht mit Ausnahme von dicht besiedelten Gebieten ein Hochwasserbett sowie Vorländer zur Abführung größerer Wassermassen zur Verfügung (seltener Wasserstandsanstieg über die Höhe des Vorlandes hinaus).

Im Oberlauf von Flüssen kann die Wasserstandsvorhersage häufig nur ungenaue Ergebnisse liefern, da kurzfristige, lokale Starkregenereignisse oft nur ungenügend von der Wettervorhersage beschreibbar und damit in der Wasserstandsvorhersage nicht erfassbar sind. Im Mittellauf und Unterlauf von Flüssen kann die Wasserstandsvorhersage dagegen vergleichsweise gute Ergebnisse liefern und somit zu einer frühen Situationserfassung führen.

Diese Randbedingungen resultieren in sehr kurzen Vorwarnzeiten im Oberlauf von Flüssen. In Kleingewässern betragen die Vorwarnzeiten oft nur wenige Minuten und steigen in den Hauptgewässern auf eine halbe bis wenige Stunden an. Im Mittellauf von Flüssen stehen Vorwarnzeiten von mehreren Stunden bis wenigen Tagen zur Verfügung, während im Unterlauf erhöhte Wasserstände bis zu einer Woche im Voraus vorhergesagt werden können.

Der Einsatz von Deichverteidigungsmitteln basiert auf der Verfügbarkeit ausreichender Zeit zur Sicherstellung der Einsatzbereitschaft des Personals, des Transports von Material an die Schutzlinie und des Aufbaus des Schutzsystems.

Die verfügbare Vorwarnzeit in Kleingewässern und im Oberlauf von Flüssen in der Größenordnung von Minuten bis zu wenigen Stunden schließt im Regelfall den Einsatz von Deichverteidigungsmitteln aus. Bei kurzen Vorwarnzeiten von unter 24 Stunden können Deichverteidigungsmittel nur in geringem Umfang eingesetzt werden. Bei längeren Vorwarnzeiten ist eine Mobilisierung von Hilfskräften und Transporten zur Kontrolle auch größerer Belastungssituationen möglich.

7.2 Bereitstellungszeit

Die für die Bereitstellung der Katastrophenschutzmaßnahmen benötigte Zeitspanne setzt sich zusammen aus der:

- Alarmierungszeit – Zeit zwischen Ausgang der Alarmmeldung und Einsatzbereitschaft des Aufbaupersonals
- Beladungszeit – Zeit für das Beladen der Transportfahrzeuge mit den mobilen Systemen und der zur Installation erforderlichen Ausrüstung
- Transportzeit – Fahrzeit vom Lagerstandort zum Einsatzort
- Sicherungszeit / Entladung – Zeit um den Verteidigungsweg verkehrlich zu sichern und die Transportfahrzeuge zu entladen und die Lager-/Transportbehälter an der Verteidigungslinie zu verteilen
- Aufbauzeit – die Zeit für die Vorbereitung der Aufstandslinie und der Installation des mobilen Systems inklusive der für die Kontrolle des ordnungsgemäßen Aufbaus erforderlichen Zeitspanne

Die Bereitstellungszeit variiert in Abhängigkeit vom Systemtyp, von den Längen und der Ausbildung der Transportwege sowie von der Anzahl und der Ausbildung des verfügbaren Personals.

7.3 Physikalische Grundlagen der Schwächung von Deichprofilen bei Hochwasser

Beim Einstau infolge Hochwasser dringt Wasser in den Deich und den darunter befindlichen Untergrund ein. Die Durchsickerung beginnt an der Wasserseite und kann bei länger andauerndem Einstau am Fuß der luftseitigen Böschung sowie im Deichhinterland zu Wasseraustritten führen.

Das Ausmaß der Durchsickerung von Deichen ist abhängig von den folgenden Parametern:

- Aufbau des Deiches – homogener oder zonaler Aufbau mit oder ohne Oberflächendichtung oder Innendichtung
- Dauer und Höhe des Einstaus
- Untergundaufbau

Die sich bei Durchsickerung ausbildende Sickerlinie im Deich steigt bei Wasserstandsanstieg bis auf einen nicht mehr veränderlichen und somit stationären Zustand an. Bei langem Einstau, hohen Durchlässigkeiten und geringen Deichkörperbreiten kann die Sickerlinie auf der luftseitigen Böschung austreten.

Das aus einem Deich an der luftseitigen Böschung, am Deichfuß oder binnenseitig des Deichfußes austretende Sickerwasser ist aufmerksam zu beobachten und nach Ort des Austritts, Menge und Art des Sickerwassers zu beurteilen. Ein flächiger Austritt von klarem, also nicht mit Bodenpartikeln durchsetztem Sickerwasser am Deichfuß ist in der Regel ungefährlich.

Sickerwasseraustritte im oberen Bereich eines Deiches deuten auf eine hohe Sickerwasserlinie und damit auf eine weitgehende Wassersättigung des Deiches hin. Somit stehen weite Teile des Deiches unter Auftrieb und ein schlagartiges Aufbrechen oder Abrutschen der Böschung ist möglich.

Zudem sind alle Sickerwasseraustritte, die zu einem Ausspülen von Boden und damit von Deichmaterial führen, egal ob der Austritt flächig oder lokal konzentriert erfolgt (Abb. 7), als kritisch zu betrachten und sofern möglich zu unterbinden. Werden keine Gegenmaßnahmen getroffen ist eine weitere Verstärkung des Sickerwasseraustritts und des Ausspülens von Bodenmaterial möglich, so dass kurzfristig eine Verschlechterung der Standsicherheit des Deiches eintreten kann. Hierbei ist zu beachten, dass bereits entstandene Hohlräume im Deichkörper von außen nicht erkennbar sein müssen, doch können diese zu einem plötzlichen Deichversagen führen.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass durchweichte Deiche empfindlich gegen Erschütterungen und zusätzlichen Belastungen z.B. aus der Befahrung mit Fahrzeugen oder aus dem Überflug mit Hubschraubern sind.

Bei einem schnellen Absinken hoher Wasserstände bei Ablauf einer Hochwasserwelle oder infolge eines benachbarten Deichbruchs können Probleme an der Deichaußenböschung auftreten, da der Wasserstand innerhalb des Deiches langsamer sinkt und somit ein hydrostatischer Druck von innen auf die wasserseitige Böschung wirkt. Dies kann zu Abrutschungen der wasserseitigen Böschung führen, so dass bei einem möglichen Wiederanstieg des Wasserstands nur noch ein geschwächter Deichkörper zur Verfügung steht.

Weitere negative Einwirkungen an der wasserseitigen Böschung können durch Treibgutstoß, Eisbildung, Eisversetzung sowie Wellenauflauf aus Wind und hohe Strömungsgeschwindigkeiten insbesondere an der Außenseite von Kurven entstehen. Problematisch ist hierbei, dass Schäden an der Außenböschung nur oberhalb des Wasserspiegels zu sehen sind, während Verformungen und Rutschungen

unterhalb des Wasserspiegels in der Regel nicht erkennbar sind. Ein Indiz für entsprechende verborgene Schäden kann ein erhöhter Sickerwasseraustritt an der Binnenböschung sein.

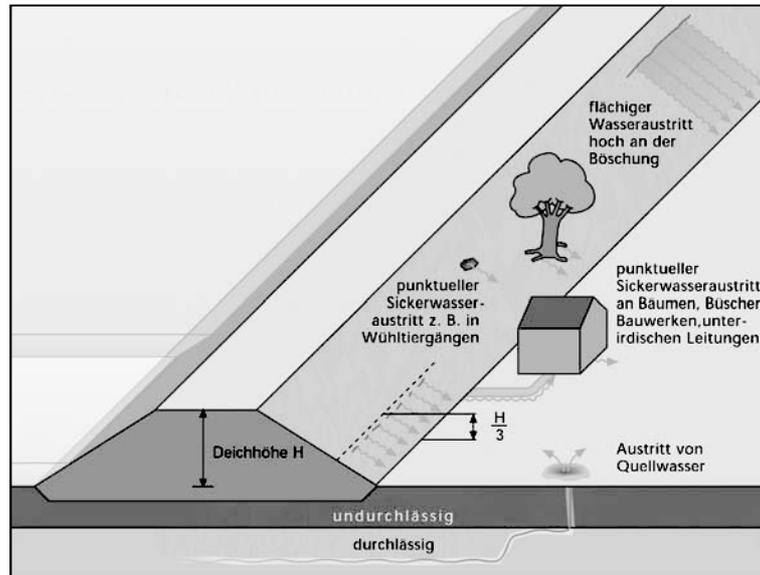


Abb. 7: Sickerwasseraustritte an einem Deich (RD, 2006)

Steigt der Hochwasserstand über die Höhe der Deichkrone an oder befindet er sich nahe der Deichkronenlage und sind dynamische Belastungen aus Wellen vorhanden, kann es zu einem Überströmen des Deiches kommen. Dies muss zur Sicherung des Deiches auf jeden Fall verhindert werden, da ein maßgebendes Überströmen eines Deiches, sofern er nicht als überströmbarer Deich mit landseitiger Böschungs- und Deichfußsicherung ausgebaut ist, zwangsläufig zu einem schnellen Ausspülen von Deichmaterial am binnenseitigen Deichfuß und an der Binnenböschung und somit zu einem plötzlichen Deichbruch führt. Die Bresche, die durch das schnell einströmende Wasser in den Deich gerissen wird, kann mehrere hundert Meter breit sein und es können im Deichhinterland mehrere zehn Meter tiefe Kolke entstehen. Somit müssen zur Sicherung eines Deichs bei drohender Überströmung der Deichkrone Deicherhöhungen, sogenannte Deichaufkragungen, zur Verhinderung eines Wasserüberlaufs eingesetzt werden.

7.4 Deichverteidigung per Aufkragung mit Sandsäcken

Zur Aufkragung von Deichen bei Gefahr des Eintritts von über die Deichkrone tretenden Wasserständen werden bisher fast ausschließlich Sandsäcke eingesetzt; in seltenen Fällen werden Aufkragungen mit Hilfe von Paletten, Folien und Sandsäcken vorgenommen (LHW, 2011). Diese Konstruktionen sind mit großem Aufwand an Personal, Material, Transporten und Zeit auf- und abzubauen. Zudem reicht oftmals die zur Verfügung stehende Vorwarnzeit nicht zur zeitgerechten Ausbringung der Schutzsysteme aus, so dass Deichbrüche ggf. nicht verhindert werden können.

Im Fall einer Deichaufkragung ist generell in Betracht zu ziehen, dass hiermit zwar die Deichhöhe, nicht aber die Standfestigkeit des Deiches erhöht wird. Im Gegenteil wird die Standsicherheit wegen der höheren Lasten und höheren hydraulischen Gradienten, denen ein Deich mit Aufkragung standhalten muss, verringert. Aus diesem Grund sind besiedelte Gebiete, die bei einem Deichbruch gefährdet sein

könnten, vor Aufkadeung zu evakuieren. Ebenfalls ist überzähliges Personal aus dem Gefährdungsbe-
reich abzuziehen und das für die Arbeiten erforderliche Personal ist ausreichend zu sichern und Rück-
zugswege sind frei zu halten. Aufkadeungen sind zudem immer von Fachleuten zu planen und zu beglei-
ten, da sich grundsätzlich eine Gefahrensituation durch Aufkadeung verschärfen kann.

Aufkadeungen werden in der Regel mit Sandsäcken oder einer Kiesschüttung durchgeführt (Abb. 8).
Letztere kann mit durch Sandsäcke beschwerte Folien gedichtet werden. In der Regel ist jedoch eine
Sandsackaufkadeung zweckmäßiger, weil der hoch eingestaute und somit durchsickerte Deichkörper
nicht mehr mit schwerem Gerät befahrbar ist und eine Kiesschüttung somit nur schwer aufgebracht
werden kann.

Die Aufkadeung ist immer auf der Wasserseite der Krone zu errichten und sollte eine Höhe von 50 cm
nicht überschreiten. Bei höheren Aufkadeungen erhöht sich die Gefahr des hydraulischen Grundbruchs
und der Rutschung der Binnenböschung. Gegebenenfalls ist sicherheitshalber eine Stützung auf der
Luftseite am Deichfuß und an der Böschung vorzunehmen.

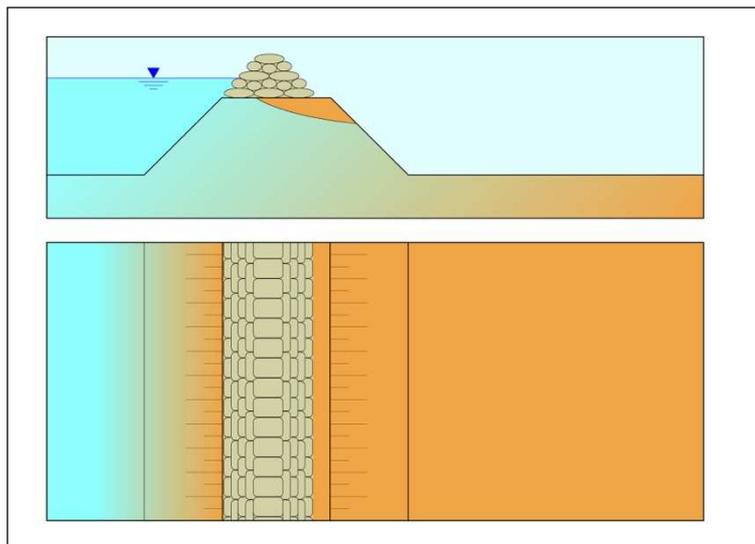


Abb. 8: Aufkadeungen mit Sandsäcken

Bei der Verteidigung des Deichs mit Sandsäcken, egal ob Maßnahmen an der Binnenböschung oder
auf der Deichkrone vorgenommen werden, ist schweres Gerät und eine Vielzahl von Helfern zur Füllung
der Sandsäcke und zum Transport derselben erforderlich. Insbesondere Altdeiche stellen aufgrund ihrer
zumeist schmalen Deichkrone und des oftmals fehlenden Deichverteidigungswegs eine besondere Her-
ausforderung an die Deichverteidigung dar. Der Einsatz von schwerem Gerät ist nur bedingt bis gar
nicht möglich. Die Deiche sind im Hochwasserfall bei hohem Einstau stark durchweicht, die schmale
Deichkrone kann nicht befahren werden, die Flächen unmittelbar hinter dem Deich sind infolge des
Sickerwasser überflutet bzw. aufgeweicht und können ebenfalls nicht befahren werden. Infolge dessen
kann die Deichverteidigung oft ausschließlich von Hand erfolgen, doch auch bei der händischen Deich-
verteidigung stellt die große Anzahl erforderlicher Helfer auf dem ohnehin schon geschwächten Deich
ein Problem dar (Abb. 10). Die oft steilen Böschungen werden belastet und die Grasnabe wird ge-
schwächt.

Bei unzureichend vorhandenen oder im Hochwasserfall infolge der Vernässung des Untergrunds nicht mehr standfesten Deichverteidigungswegen gestaltet sich der Materialtransport ausgesprochen schwierig bis unmöglich. Während des Hochwasserereignisses an der Elbe im Jahr 2002 konnten Deichbrüche z.B. an der Jeetzel nur mit großem logistischem und finanziellem Aufwand verhindert werden, was insbesondere auf das Fehlen von Deichverteidigungswegen zurückzuführen war³ (Abb. 10).



Abb. 9: Aufkaden aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)



Abb. 10: Erschwerte Deichverteidigung aufgrund fehlender Verteidigungswegen während des Jeetzelhochwassers 2002⁴

Bei einer Erhöhung mit Sandsäcken ist die Lage der Sandsackreihen ausschlaggebend für die Dichtigkeit und Standsicherheit der Deichkade. Mit drei Sandsackreihen lassen sich Aufkadehöhen von rund 30 cm und damit eine Stauhöhe von 25 cm erreichen (Abb. 11). Kann der Deich die zusätzlichen Lasten infolge einer Deichaufkade sicher aufnehmen, kann eine Aufkadehöhe von 50 cm erreicht

³http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/zulassungsverfahren/hochwasserschutz/jeetzel_2_planungsabschnitt/45511.html (Stand 28.04.2015)

⁴http://www.nlwkn.niedersachsen.de/live/institution/mediadb/mand_26/psfile/zoombild/34/Jeetzel4d341a1aeda47.bmp (Stand 28.04.2015)

werden (LHW, 2011). Bei Deichen mit einer landseitigen Neigung von 1:2 und einer Kronenbreite von kleiner als 3,0 m sollten die Deiche landseitig gestützt werden (LFU, 2010).

Die Breite eines Sandsackdamms entspricht etwa der doppelten Höhe des Damms (Abb. 12). Für einen Sandsackdamm mit einer Höhe von 0,5 m und einer Basisbreite von 1,0 m werden pro laufendem Dammmeter rund 35 Sandsäcke benötigt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dies entspricht einer Menge von 35.000 Sandsäcken je km Aufkudungslänge und somit einem Transport von rund 70 LKW-Ladungen gefüllter Sandsäcke (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Das Gewicht eines gefüllten Sandsacks beträgt rund 20 kg trocken bzw. rund 30 kg wassergesättigt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Somit beträgt die zusätzliche Auflast auf einem Deich infolge Aufkudung je laufendem Meter 600 kg (trockene Sandsäcke) bzw. 900 kg (nach Einbau z.B. infolge Niederschlag wassergesättigte Füllung).

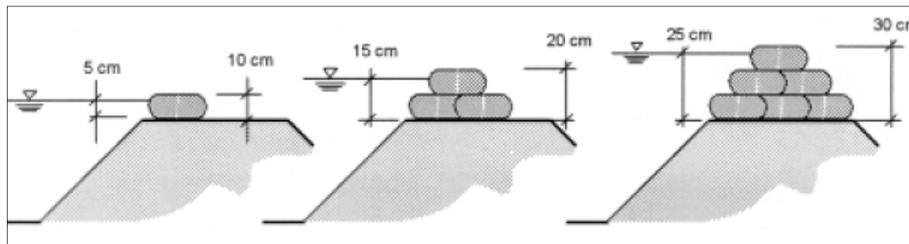


Abb. 11: Aufkudungshöhen mit Sandsäcken (RD, 2006)

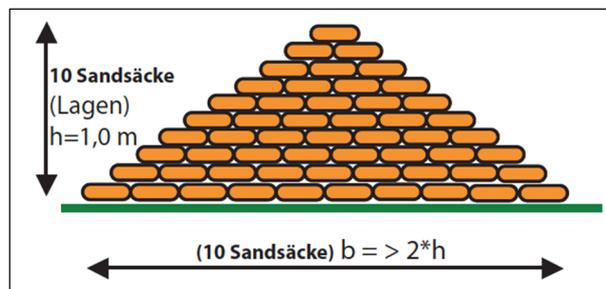


Abb. 12: Sandsackdamm, Verlegeart normale Stabilität (THW, 2007)

Eine detaillierte Betrachtung des personellen, logistischen und finanziellen Aufwands des Auf- und Rückbaus von Sandsacksystemen und verschiedenen auf dem Markt befindlichen Sandsackersatzsystemen (SSES) ist in LANKENAU, KOPPE (2019) aufgeführt. Hiernach kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtkosten für Auf- und Rückbau der Hochwasserschutzsysteme beim einmaligen Einsatz der SSES rund 30 % – 50 % höher sind als für ein vergleichbares Sandsacksystem. Da die SSES im Gegensatz zu den Sandsacksystemen größtenteils wiederverwendbar sind, amortisieren sich die höheren Investitionskosten der SSES bereits beim zweiten Einsatz. Die Kosten für den Auf- und Rückbau eines 1 m hohen und 1.000 m langen temporären Sandsackdamms betragen gemäß LANKENAU, KOPPE (2019) rund 34 T. In der Kalkulation nicht berücksichtigt wurden die Kosten für obere Führung sowie Anfahrt, Verpflegung, Übernachtung und Sanitärbedarf der Helfer. Für die obere Führung, d.h. die Katastrophenschutzleitung, technische Einsatzleitung bzw. Züge können pro Helfer und Tag 5 € angenommen werden. Setzt man für Übernachtung, Verpflegung und Sanitärbedarf der Helfer 25 € pro Tag an,

ergeben sich bei einem Helfertag von 12 Stunden pro Sandsacksystem ca. 6 % und pro SSES < 1 % mehr Kosten (LANKENAU, KOPPE, 2019).

Die Kosten für den Aufbau der Systeme übersteigen jeweils die Kosten für den Rückbau. Dabei betragen die Kosten für den Rückbau des Sandsackdamms ca. 70 % der Kosten des Aufbaus. Bei den SSES liegen die Rückbaukosten im Vergleich zum Aufbau im kleinen einstelligen Prozentbereich.

Im Falle der Sandsacksysteme müssen zunächst Sand und Sandsäcke beschafft werden. Diese werden zumeist nur in geringen Mengen vorrätig gehalten und bei einer Beschaffung im Hochwasserfall muss damit gerechnet werden, dass die Preise stark ansteigen. Die Sandsäcke müssen anschließend mit großem Zeit- und Helferaufwand gefüllt und verlegt werden. Demgegenüber stehen die Investitionskosten für die jeweiligen SSES, die jedoch mehrfach verwendbar sind. Um nach einem Einsatz beschädigte Systeme zu ersetzen, wird innerhalb der Systemlebensdauer ein durchschnittlicher Neubeschaffungsbedarf von 5 % angenommen (LANKENAU, KOPPE, 2019). Die für SSES mit vorgelagerter Plane notwendigen Sandsäcke zum Dichten und Beschweren der Plane fallen vergleichsweise gering ins Gewicht. Die Logistikkosten für den Auf- und Rückbau sind aufgrund der gleich langen Fahrtstrecke identisch und für die Sandsacksysteme im Vergleich zu SSES aufgrund des größeren Materialbedarfs höher. Grundsätzlich sind die Ausgaben für Logistik für alle Systeme vergleichsweise gering, was auf die vergleichsweise geringen Kostensätze für den Einsatz von in der Kalkulation berücksichtigten THW-Fahrzeugen zurückzuführen ist. Beim Rückbau fallen für die Sandsacksysteme durch den Helferbedarf und die Entsorgung der Sandsäcke höhere Kosten als für die SSES an. Der Rückbau eines Sandsackdamms kann bei geeigneten Untergründen ggf. mit schwerem Gerät erfolgen, wodurch der notwendige Helfer- und Zeitbedarf deutlich geringer sein kann als in der vorliegenden Kalkulation angesetzt. Insgesamt stellen die größten Kostenpositionen für die Sandsacksysteme die Kosten für den Einsatz der Helfer sowie die Beschaffung des Materials und für die SSES die Beschaffung der Systeme dar. Werden neben den Kosten für den Aufbau auch die Kosten für den Rückbau berücksichtigt, rechnet sich allein aus finanzieller Sicht unter den angenommenen Voraussetzungen die Anschaffung eines SSES beim zweiten Einsatz. Bei den Investitionskosten wurde in LANKENAU, KOPPE (2019) kein Mengenrabatt für die Abnahme größerer Systemlängen berücksichtigt.

Der Zeit-, Material- und Helfervorteil der SSES ist deutlich zu erkennen. Beim Einsatz von SSES im Vergleich zum Sandsackdamm werden ca. 25 % - 30 % der Zeit, ca. 5 % - 7 % der Helferstunden und ca. 5 % der LKW benötigt (LANKENAU, KOPPE, 2019). Beim Einsatz von Sandsacksystemen kann bei schlechter Zuwegung und somit einer Weitergabe der Sandsäcke über längere Strecken mittels Sandsack-Kette bzw. einem Einsatz alternativer Transportmittel wie Hubschrauber oder Boote zudem ein großer zusätzlicher Helfer- bzw. Transportbedarf erforderlich werden. Hierdurch können der Zeitbedarf für den Transport wie auch die Kosten beim Einsatz von Sandsacksystemen ebenfalls erheblich erhöht werden.

8 Anforderungen an wassergefüllte Schlauchkonstruktionen zur Deichaufkadung

Grundlage für die Analyse und Katalogisierung optimaler Produkteigenschaften zur Entwicklung einer mobil einsetzbaren Deichaufkadung als Ersatz bzw. Ergänzung zu den herkömmlichen Sandsackdämmen sind die spezifischen Bedingungen eines notfallmäßigen Hochwassereinsatzes unter denen eine solche Ausrüstung zum Einsatz kommt. Daraus leiten sich Anforderungen an Material, Design und konstruktive Rahmenbedingungen unmittelbar ab.

Ein notfallmäßiger Hochwassereinsatz ist nur mit sehr kurzer Vorlaufzeit planbar. Die Einsatzbedingungen sind oft witterungsbedingt schwierig, das Einsatzgebiet ist nicht fest lokalisierbar, sondern kann ganze Regionen und verschiedene Bundesländer umfassen. Die Schutzmaßnahmen finden zudem unter enormem Zeitdruck statt. Die freiwilligen Helfer haben oft keine oder nur eine geringe Praxiserfahrung. Bei den professionellen Helfern der Feuerwehren, THW und anderen Hilfsorganisationen liegen oft einige Praxiserfahrungen im Hochwasserschutz vor, doch sind sie oft nicht in der Lage, das notwendige Personal über einen längeren Zeitraum beizustellen.

Deichaufkadungen, also Erhöhungen der Deichkrone, werden aktuell fast immer mit Sandsäcken unterschiedlicher Form und Größe ausgeführt. Sandsäcke sind zwar vordergründig leicht auch von Laien zu verlegen, benötigen aber erhebliche Material- und Logistikkressourcen von der Bereitstellung der Materialien, über die Befüllung, den Transport, Personal inklusive Verpflegung und Unterkunft am Einsatzort und nicht zuletzt auch zur Entsorgung nach dem Einsatz. Zudem kann auch bei diesen 'einfachen' Ausrüstungen falsche Handhabung zum Versagen der Schutzmaßnahme führen. Außerdem benötigen diese material- und personalintensiven Maßnahmen sehr viel Zeit. Zeit die aufgrund der kurzen Vorwarnzeiten meist nicht gegeben ist.

Ausrüstungsalternativen müssen also gerade diesen aktuellen Entwicklungen verstärkt Rechnung tragen. Sie müssen von wenigen Einsatzkräften in kürzester Zeit ohne größeren logistischen Aufwand einzusetzen und wieder zurückzubauen sein. Transport und Lagerung muss möglichst platzsparend möglich sein. Die Handhabung muss einfach und selbsterklärend sein. Die Verwendungsmöglichkeiten müssen vielseitig und sehr flexibel auch an schwierige Einsatzbedingungen angepasst sein. Es muss eine größtmögliche Stauhöhe bei gleichzeitig geringstmöglicher Auflagefläche erzielt werden. Dabei muss die feste Lage auf dem Untergrund rein durch die Konstruktion selbst erfolgen; zusätzliche Befestigungen im Untergrund sind nicht möglich. Die Ausrüstung muss sich in beliebigen Längen koppelbar, über längere Deichabschnitte verlegen lassen und eine größtmögliche Einsatzsicherheit gewährleisten.

Diese Vorgaben lassen sich, wenn man großformatige, mit Sand gefüllte Behälter (Big-Bags etc.) einmal außer Acht lässt - hoher logistischer Aufwand und hohe, oft nicht realisierbare Belastung des Deichs mit schwerem Gerät) - nur mit wassergefüllten Behälterkonstruktionen realisieren. Diese müssen sich zusätzlich zu den bereits ausgeführten Einsatzanforderungen aber auch an speziellen Anforderungen des praktischen Einsatzes orientieren. Diese Behälter müssen den Belastungen (Druck, Abrasion auf dem Untergrund, Korrosion etc.) sicher standhalten; gleiches gilt für alle Armaturen und sonstigen Beschläge. Die Befüllung der Ausrüstungen mit Wasser muss auch bei schwierigen Einsatzbedingungen mit den Standardausrüstungen der Einsatzkräfte möglich sein. Nach Beendigung eines Einsatzes muss die Entleerung und abschließende Reinigung der Konstruktionen so unkompliziert wie möglich auszuführen sein.

Die Aufgabe des Projekts DeichKade besteht in der Entwicklung von Prototypen von mit Wasser befüllbaren Schlauchsystemen unterschiedlicher Höhenmaße, die als Deichaufkadung eingesetzt werden können und die folgenden Merkmale besitzen:

- Hohe Einsatzsicherheit
- Hohe Funktionalität
- Problemloser, schneller, einfacher und sicherer Auf- und Abbau
- Geringer Beschaffungs-, Lager-, Transport- und Personalaufwand
- Geringer Verbrauch an Ressourcen

Zur Erreichung der Entwicklungsziele sind die zu erwartenden Einsatzbedingungen für die zu entwickelnden Konstruktionen zu beschreiben. Hierzu gehört auch die Definition von zu beachtenden Restriktionen beim Einsatz wassergefüllter Konstruktionen zur Deichaufkadung.

Deichaufkadungen können grundsätzlich an Altdeichen wie auch an neu erbauten Deichen erforderlich werden. Zum Beispiel haben die maßgebenden Hochwasserereignisse der letzten 13 Jahre an der Elbe von Schnackenburg bis Neu Darchau gezeigt, dass bei den Hochwassern im August 2002, April 2006, Januar 2011 und Juni 2013 jeweils Extremwasserstände mit steigender Tendenz aufgetreten sind. So wurde in Hitzacker bei einem Mittelwasserstand von 2,67 m PN (Pegelnul) in 2002 ein Scheitelwasserstand von 7,50 m PN und 2013 ein Scheitelwasserstand von 8,17 m PN erreicht (PINZ, 2014). Letzterer führte beinahe zur Überflutung des erst nach dem Hochwasserereignis 2006 geplanten und 2008 fertiggestellten Hochwasserschutzsystems Hitzacker bestehend aus Schöpfwerk, Hochwasserschutzwänden und Anschlussdeichen (Abb. 13).

Ungünstigere Bedingungen für den Bau von Aufkadungen liegen jedoch in der Regel bei den Altdeichen vor, da sie ggf. steile Deichböschungen, eine schmale Deichkrone und unzulängliche bzw. keine Deichverteidigungswege aufweisen. Insofern stellen die Einsatzsituationen an Altdeichen die für die Planung der Prototypen maßgebenden Bedingungen dar.



Abb. 13: Einstau des 2008 erstellten Hochwasserschutzsystems Hitzacker am 12.06.2013 bei sinkenden Wasserständen – der Scheitelwasserstand wurde am 11.06.2013 erreicht (Foto: Bärbel Koppe)

Bieten die zu entwickelnden Konstruktionen verglichen mit den Standardsystemen aus Sandsäcken maßgebende Vorteile hinsichtlich des Transportaufwands und der Belastung der Deichböschungen durch Helfer und Transporte, können die begrenzt zur Verfügung stehenden Standflächen auf der Deichkrone zu Schwierigkeiten führen. Hieraus ergibt sich die folgende Forderung hinsichtlich der Standflächenbreite der Konstruktionen:

Forderung 1: Die Konstruktionen sind möglichst so zu entwickeln, dass eine Kronenbreite von 2,0 m (entspricht ungünstigen Bedingungen an Altdeichen) als Aufstandsfläche mit Sicherheitsmarge von 0,5 m ausreichend ist. Sollte dies konstruktiv nicht möglich sein, ist eine Kronenbreite von 3,0 m abzüglich einer Sicherheitsmarge von 0,5 m als maßgebend anzusehen.

Deiche variieren in Querschnitt, Aufbau und Konstruktion teilweise schon auf einer Länge von wenigen 100 m. Teilweise sind die Deiche mit einem asphaltierten oder (selten) gepflasterten Deichkronenweg ausgestattet, auf dem das Schutzsystem zu errichten ist. Hier sind Unterläufigkeiten in Fugen und auch spitze Steine oder Gegenstände auf dem festen Untergrund als problematisch anzusehen. Oftmals ist eine Grasnabe auf der Deichkrone vorhanden, die insbesondere bei Nässe rutschig ist. Zudem ist die Deichkrone nicht immer ebenflächig, sondern es können Senken und Hügel vorhanden sein, die durch das System auszugleichen sind. Zudem treten an Wechseln von Gründeichbereichen und befestigten Wegen zur Deichquerung größere Übergangsbereiche auf. Aus diesen Punkten ergibt sich Forderung Nr. 2:

Forderung 2: Die Konstruktion muss Unebenheiten auf der Deichkrone infolge Senken und Hügel im Gründeich und Übergängen zwischen befestigten und unbefestigten Bereichen ausgleichen können und eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eventuell auf dem Untergrund befindliche spitze Gegenstände aufweisen. Zudem muss sie eine ausreichende Haftreibung auch auf nassen und rutschigen Untergründen aufweisen. Vorteilhaft wäre auch ein dichtender Ausgleich von vorhandenen Fugen in Pflasterungen, wobei diese Bedingung wegen der vergleichsweise seltenen Ausführung von Pflasterungen als optional angesehen werden kann.

Hohe Wasserstände an Deichen insbesondere am Mittellauf und Unterlauf von Flüssen können über Tage extrem hohe Werte aufweisen.

Forderung 3: Die Konstruktion muss auch bei langanhaltenden hohen Wasserständen ohne Wartungsaufwand sicher im Einsatz sein.

Übliche Deichaufkadungen aus Sandsäcken sind aus Standsicherheitsgründen bis maximal 0,5 m Dammhöhe und somit 0,45 m Stauhöhe auszuführen (Abschnitt 7.4). Wassergefüllte Systeme haben wegen der geringen Dichte des Füllmediums ein ungünstigeres Verhältnis Aufbauhöhe zu Stauhöhe. Gemäß Erfahrungen aus Testreihen von Prototypen wassergefüllter linienförmiger Hochwasserschutzsysteme können entsprechende Systeme auf glatten Estrichböden je nach Material und somit Haftreibungskoeffizient zu 70% bis 97% eingestaut werden, bevor sie seitlich verrutschen (KOPPE ET AL., 2014). Zudem ist zu beachten, dass Hochwasserstände lediglich mit begrenzter Genauigkeit vorhersagbar sind und wassergefüllte Konstruktionen generell nicht überströmbar sind. Hieraus ergibt sich bei höher steigenden Wasserständen die Gefahr des plötzlichen Versagens. Bei einer maßgebenden dynamischen Belastung durch Wellen, die an größeren Wasserflächen infolge Windsee auftreten können, kann ein plötzliches Versagen wegen des abschnittswisen Verlustes der Standsicherheit auch bei noch nicht erreichter Bemessungstauhöhe nicht ausgeschlossen werden.

Forderung 4: Die Konstruktion muss einem Einstau von mindestens 0,45 m zzgl. einer Sicherheitsmarge von mindestens 0,25 m sicher standhalten können. Insofern ist die Konstruktion bei einem Bemessungseinstau von 0,45 m für einen sicheren Einstau von 0,70 m auszulegen. Die hierfür erforderliche Konstruktions- und somit Füllhöhe auf Untergründen wie nasses Gras, Asphalt, Beton, ggf. Pflasterung ist in Testreihen nachzuweisen.

Restriktion 1: Die wassergefüllte Konstruktion kann zwar überströmbar ausgeführt werden, hält dann aber wegen der begrenzten Massewirkung im System 'mit Wasser Wasser sperren' nur geringfügigen dynamischen Zusatzlasten, wie sie aus Wellengang entstehen können, stand. Insofern ist eine maßgebende dynamische Belastung durch Wellen im Einsatz auszuschließen. Ein Einsatz der Konstruktionen an Standorten, an denen signifikante Wellenhöhen größer $H_s=0,2$ m zu erwarten sind,

ist grundsätzlich auszuschließen. Bei Ansatz des Seegangsvorhersageverfahrens nach SPM 1984 (gemäß EAK, 2002) können entsprechende signifikante Wellenhöhen ab Windstreichlängen von 200 m und Stürmen mit Geschwindigkeiten von 25 m/s auftreten. Insofern ist der Einsatz der Konstruktionen auf Standorte mit Windstreichlängen senkrecht bzw. schräg (45°) zur Deichlinie kleiner 200 m zu begrenzen.

Die mit Aufkadungen zu schützenden Deichstrecken sind häufig mehrere Kilometer oder auch zig Kilometer lang. Der Verlauf des Deiches kann Kurven aufweisen.

Forderung 5: Die Konstruktion muss in beliebiger Länge aus wasserdicht koppelbaren Einzelsegmenten erstellbar sein und muss eine ausreichende Anpassungsfähigkeit an den Verlauf der Deichlinie aufweisen.

Die Zuwegungen zu den Einsatzorten sind oftmals wenig leistungsfähig und können zumeist im Hochwasserfall nicht mit schwerem Gerät befahren werden. Vor Ort steht in der Regel keine E-Versorgung zur Verfügung.

Forderung Nr. 6: Die Konstruktion muss aus wenigen, leicht zu transportierenden Teilen bestehen, die per Personenkraft auf die Deichkrone gebracht werden können. Die zur Befüllung erforderlichen Geräte müssen ebenfalls händisch transportiert werden können und müssen eine eigene Energieversorgung aufweisen.

Bei Hochwasserereignissen ist die zur Verfügung stehende Zeit für den Aufbau von Schutzkonstruktionen einer der maßgebenden limitierenden Faktoren. Daneben ist die Anzahl der Helfer und des Transportgeräts begrenzt und es stehen nur wenige für den Hochwasserschutz ausgebildete Helfer zur Verfügung.

Forderung 7: Die Konstruktion muss einfach, schnell und mit wenigen Helfern aufbaubar sein.

Die im Katastrophenschutz üblicherweise eingesetzten Sandsäcke sind nach dem Einsatz aufwendig hinsichtlich Helferzahl und Kosten abzubauen und zu entsorgen. Für den Abbau stehen in der Regel nicht mehr die im Katastrophenfall mobilisierte Anzahl an Helfern zur Verfügung, sondern es ist mit einer deutlich verringerten Anzahl an professionellen wie freiwilligen Helfern durchzuführen.

Forderung 8: Die Konstruktionen sollten einfach und mit wenigen Helfern und geringem Transportaufwand rückzubauen sein. Zudem sollten sie möglichst mehrfach verwendbar und insofern nach dem Einsatz für die anschließende Lagerung einfach und effektiv zu reinigen sein.

Die Schutzkonstruktionen müssen aus den Katastrophenschutzlagern schnell und einfach an den Einsatzort gebracht werden können. Zudem müssen sie über lange Zeiten ohne Lagerschäden aufzuweisen lagerbar sein.

Forderung 9: Die Konstruktionen sollten einen geringen Platzbedarf in der Lagerung aufweisen. Zudem sollten sie bei realistischen Lagerbedingungen (trockene Hallenlagerung ohne direkte UV-Einstrahlung) nur geringe Alterungserscheinungen bei möglicherweise langen Lagerzeiten aufweisen. Die Konstruktionen sollten in Form von Kompaktmodulen lagerbar und transportabel sein.

Katastrophenschutzmittel stellen eine Massenware, die in großer Stückzahl kostengünstig zur Bestückung von Katastrophenschutzlagern zu beschaffen sein müssen.

Forderung 10: Die Konstruktionen müssen in hoher Stückzahl produzierbar sein und der Verkaufspreis muss gering sein.

In Tab. 1 sind die an die zu entwickelnden wassergefüllten Konstruktionen zur Aufkudung von Deichen zu stellenden Forderungen und Restriktionen zusammengefasst.

Tab. 1: Zusammenfassung der obligatorischen und optionalen Forderungen an die zu entwickelnden wassergefüllten Konstruktionen zur Aufkudung von Deichstrecken

Forderung / Restriktion	obligatorisch	optional
Eine Kronenbreite von 3,0 m muss als Aufstandsfläche mit Sicherheitsmarge von 0,5 m ausreichend sein	✓	
Eine Kronenbreite von 2,0 m (entspricht ungünstigen Bedingungen an Altdeichen) muss möglichst als Aufstandsfläche mit einer Sicherheitsmarge von 0,5 m ausreichend sein		✓
Unebenheiten auf der Deichkrone infolge Senken und Hügel im Gründeich und Übergängen zwischen befestigten und unbefestigten Bereichen müssen ausgeglichen werden können	✓	
Ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eventuell auf dem Untergrund befindliche spitze Gegenstände	✓	
Ausreichende Haftreibung auch auf nassen und rutschigen Untergründen	✓	
Dichtender Ausgleich von vorhandenen Fugen in Pflasterungen ist wünschenswert		✓
Einsatzsicherheit auch bei langanhaltenden hohen Wasserständen ohne Wartungsaufwand	✓	
Bei einem Bemessungseinstau von 0,45 m ist die Konstruktion unter Berücksichtigung unterschiedlicher Untergründe wie nasses Gras, Asphalt, Beton für einen sicheren Einstau von 0,70 m auszulegen	✓	
Bei einem Bemessungseinstau von 0,45 m ist die Konstruktion unter Berücksichtigung eines gepflasterten Untergrunds für einen sicheren Einstau von 0,70 m auszulegen		✓
In beliebiger Länge aus wasserdicht koppelbaren Einzelsegmenten erstellbar	✓	
Ausreichende Anpassungsfähigkeit an den Verlauf der Deichlinie	✓	
Aus wenigen, leicht zu transportierenden Teilen bestehend, die per Personenkraft auf die Deichkrone gebracht werden können	✓	
Die zur Befüllung erforderlichen Geräte müssen händisch transportierbar sein und eine eigene Energieversorgung aufweisen	✓	
Einfach, schnell und mit wenigen Helfern aufbaubar	✓	
Einfach, schnell und mit wenigen Helfern rückbaubar	✓	
Möglichst mehrfach verwendbar und somit nach dem Einsatz für die anschließende Lagerung einfach und effektiv zu reinigen		✓
Geringer Platzbedarf in der Lagerung	✓	
Geringe Alterungserscheinungen bei realistischen Lagerbedingungen (trockene Hallenlagerung ohne direkte UV-Einstrahlung)	✓	
Lagerbar und transportierbar in Form von Kompaktmodulen	✓	

Forderung / Restriktion	obligatorisch	optional
In hoher Stückzahl produzierbar	✓	
Geringer Verkaufspreis	✓	
Die Konstruktion kann nur bei geringen zu erwartenden dynamischen Lasten - Belastungen durch Wellen – eingesetzt werden; eine Windwirklänge senkrecht bzw. schräg (45°) zur Konstruktion von maximal 200 m ist einzuhalten (erste Schätzung, ist in Tests zu verifizieren)	✓	

9 Materialrecherche und Materialauswahl

Abgeleitet aus den erarbeiteten Anforderungen an wassergefüllte Deichaufkadungen können für entsprechende Behälterkonstruktionen textile Membrane eingesetzt werden. Starre Konstruktionen aus Metall oder Kunststoff bieten zwar konstruktiv viele Vorteile, sind aber aufgrund der Gewichte und Transportvolumina nicht diskutabel. Textile Membranen sind den Einsatzkräften von Feuerwehr und THW bereits aus anderen Einsatzgegebenheiten mit den ihnen innewohnenden Vorteilen bekannt. Zur Zwischenlagerung von Flüssigkeiten werden z.B. vielfach flexible Schnelleinsatzbehälter verwendet, sei es zur Bereitstellung von Löschwasser bei Waldbränden oder zur temporären Zwischenlagerung von wassergefährdenden Flüssigkeiten (Öl, Chemie etc.).

Textile Membranen zeichnen sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Gewebe und Beschichtungen aus, die nahezu beliebig miteinander kombiniert werden können. Das Spektrum reicht dabei von einfachen Polyestergeweben mit PVC-Beschichtung über PU-Beschichtungen bis hin zu hochwertigen Polyamidgeweben mit Neopren und Synthetikgummi-Beschichtungen. Textile Membranen verbinden dabei geringes Flächengewicht mit hoher Reißfestigkeit. Zudem können die genannten Kunststoffe bis auf Neopren miteinander verschweißt werden. Ohne Probleme können auch Materialien kombiniert werden, die auf die chemischen Belastungen (kontaminierte Abwässer etc.) eines Hochwassereinsatzes hin ausgelegt sind.

Im Rahmen der Materialrecherchen wurden für die einzelnen Teilkomponenten eines solchen Behälters folgende Mindestanforderungen definiert.

Textile Membran: Die eigentliche Behälterhülle, also alle großformatigen Bauteile, aber auch in Verwendung für viele kleinformige Applikationen wie Verstärkungen, Anbindungselemente für formgebende oder zugentlastende Konstruktionen an und im Behälter, Bestandteile von Armaturen und Beschlügen, Materialdurchlässe zur Befüllung / Entleerung, Belüftung und Reinigung

- Gewebe, vorzugsweise Polyester (Preis)
- Beschichtung beidseitig, wasserdicht
- Mindestreißfestigkeit des Gewebes / Haftkraft der Beschichtung
- Verschweißbarkeit mit gängigen Schweißverfahren / Heißluft u. Hochfrequenz
- Reparatur möglich
- Minimales Gewicht
- Schadstoffresistenz für schwach kontaminierte Abwässer
- UV Beständigkeit
- Einfach zu reinigen
- Vorzugsweise industrielle Standardware eines europäischen Herstellers

Armaturen: Anschlüsse zur Befüllung der Behälter mit verschiedenen Medien (Luft, Wasser, Reinigungsmittel), automatisch wirkende Sicherungen gegen unsachgemäße Bedienung durch die Einsatzkräfte (Überdruck), Revisionsöffnungen für Entleerung, Reinigung und Trocknung (Zug- und Reißverschlüsse, Roll- und Klemmverschlüsse, Schraubverschlüsse)

- Geringes Gewicht und Aufbau
- Mechanisch belastbar
- Verschweißbar mit der Membran
- Einfach manuell einsetzbar (verpressen, verschrauben)
- Schadstoffresistenz für schwach kontaminierte Abwässer
- Unempfindlich gegen Verschmutzung
- Einfach zu reinigen
- Korrosionsfrei
- Einfacher Austausch

Beschläge: Innere und äußere Hilfskonstruktionen zur Applikation formgebender, konstruktiver oder funktionaler Elemente an die Membran (Verschnürungen, Verstagungen, Verspannungen zur Formgebung, Lastaufnahmen, Segmentverbindungen, Transportgriffe, Halterungen etc.)

- Beständig gegen Wasser und Kontamination
- UV Beständigkeit
- Korrosionsfrei
- Mechanisch belastbar
- Verschweißbar mit der Membran
- Einfach manuell einsetzbar (verpressen, verschrauben)
- Geringes Gewicht und Aufbau

10 Werkzeuge, Vorrichtungen, Maschinen

Für verschiedene HF-Schweißmaschinen wurden Vorrichtungen für die Fertigung der eigentlichen Behälterhülle, aber auch der kleinformatischen Bauteile gebaut und spezielle Schweißelektroden zugekauft bzw. im Auftrag speziell gefertigt:

- Rundelektrode für großformatige Schraubverschlüsse
- Winkelförmige Elektrode für vereinfachte Fertigung der Endtuben
- Gliederelektroden zum Einschweißen runder Deckel und für die Verarbeitung kurvenförmiger Schweißnähte in der Behälterhülle
- Schweißelektroden für CARMO Überdruckventile
- Doppелеlektroden zum Verschweißen von Reißverschlüssen mit beidseitig beschichteten Fahnen.
- Fahrbare Hochfrequenzschweißmaschine FIAB im mittleren Leistungssegment (10 KW Leistung) zur Herstellung kleinformatischer Bauteile.

Zur Befüllung der Labormodelle im Test wurde eine zur Förderung von Schmutzwasser geeignete Allzweckpumpe MAST NP 12 B (Abb. 14) beschafft. Das Pumpengehäuse besteht aus robuster Aluminiumlegierung, die Pumpe ist wartungsfrei und trockenlaufsicher. Der Antrieb erfolgt über einen 4Takt-Benzinmotor mit 7,5 kW Leistung, der Förderstrom liegt bei 1.000 l bei einem Förderdruck von 1 bar bzw. bei 250 l bei 3 bar. Der Anschluss erfolgt über einen B-STORZ.



Abb. 14: Allzweckförderpumpe MAST NP 12 B

11 Testvorrichtungen und Teststände

Folgende Testvorrichtungen wurden bisher im Projekt DeichKADE eingerichtet und Material- wie Konstruktionstests wurden durchgeführt:

- Für die Prüfung der Herstellerangaben zur Haftfestigkeit der Beschichtungen wurden Reißversuche mit vorab gefertigten Schweißnähten durchgeführt (Abb. 15).
- Materialtest zur Haftfestigkeit und Abrasion auf Untergründen. Abrasion wurde mit einfachen Zugbewegungen auf verschiedenen Untergründen (Beton, Asphalt, Pflaster, Kies, Grasboden) simuliert und ausgewertet. In diesem Zuge wurden auch Ertüchtigungen zur Bodenhaftung (Gurte, rutschhemmende Verstärkungen am Membranboden, Netzunterlagen etc.) getestet. (Abb. 16)
- Es wurden diverse Versuche zur Reißfestigkeit durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Geräte und Vorrichtungen verwendet (Zugmessgerät, Windenprüfstand, Prüfbecken)
- Es wurde ein vorhandener Prüfstand (Seecontainer wasserdicht) für die speziellen Projektanforderungen angepasst (Abb. 17). Es handelt sich um einen 20-Fuß-Open-Side-Container, der am Boden und an den Seiten mit 1,5 bzw. 3,0 mm Schwarzblech ausgekleidet wurde, wobei die Schweißnähte durchgehend versiegelt wurden. Zum Korrosionsschutz wurde das Schwarzblech mit grauer Schutzfarbe lackiert.
- Großmaßstäbliche Versuche unter Realbedingungen wurden im IWA-Teststand auf dem Gelände des THW-Ausbildungszentrums in Hoya durchgeführt (Abb. 18)

Modelle der verschiedenen Baureihen wurden auf diesen Prüfständen aufgebaut und getestet.



Abb. 15: Zugzustand zum Testen der Schweißnähte und des zu verarbeiteten Materials

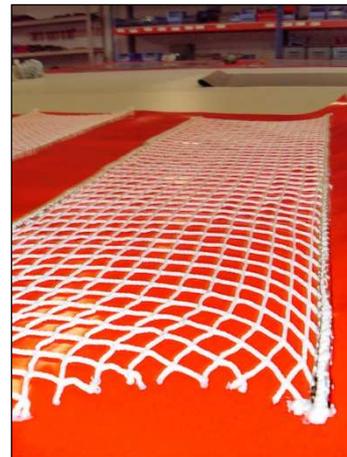


Abb. 16: Materialtest zur Haftfestigkeit und Abrasion auf Untergründen, Tests von Ertüchtigungen zur Bodenhaftung

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE



Abb. 17: Seecontainer Anlieferung (oben links) und Originalausstattung (oben links, unten rechts) so wie nach dem projektgerechten Umbau (unten rechts) – Betriebshof DAEDLER



Abb. 18: IWA-Teststand auf dem Gelände des THW-Ausbildungszentrums in Hoya

12 Erprobung möglicher Materialverbindungen

Technische Textilien werden in Standardbreiten und diversen Rollenlängen produziert. Für die Umsetzung jeglicher konstruktiver Formgebung werden Bahnen oder Zuschnitte miteinander verbunden. Diese Verbindungen können in verschiedenen Schweißverfahren erfolgen und die Materialien können geklebt oder miteinander vernäht werden:

- Beim Schweißen wird die Beschichtung erhitzt und miteinander verpresst
- Beim Kleben wird ein Kleber beidseitig aufgetragen und die Flächen werden kurzzeitig miteinander verpresst
- Beim Nähen werden die beiden Textilien durch einen Faden miteinander verbunden

Diese Verfahren finden in der Formgebung der äußeren Hülle ebenso Anwendung wie bei der Applikation von kleinteiligen Bauteilen wie Verstärkungen, Armaturen, äußeren und inneren Beschlägen.

Für wasserdichte Verbindungen kommen nur Schweiß- und Klebeverfahren zur Anwendung. Nahtverbindungen sind nicht wasserdicht, sie können jedoch gegebenenfalls bei bestimmten kleinteiligen Applikationen sinnvoll sein, bei denen nicht schweißbare Materialien zum Einsatz kommen (Gurte etc.).

Auf Tests mit Verklebungen wurde im Verlauf der Arbeiten zunächst einmal verzichtet. Alle thermoplastischen Elastomere lassen sich durch Verschweißung mit mindestens gleicher Ergebnisqualität verarbeiten. Lediglich Neopren und andere Kautschukmaterialien lassen sich nicht verschweißen, sondern nur kleben und vulkanisieren. Diese Materialien haben zwar für den Einsatzzweck Hochwasserschutz hervorragende physikalische und chemische Produkteigenschaften (mechanische Belastbarkeit, Abrasion, UV Beständigkeit, Chemikalienresistenz), liegen aber preislich deutlich über vergleichbaren PVC, PVC/PU Blend oder PU Materialien. Aufbauend auf die Markt- und Materialrecherchen und eine spätere Serienfertigung schon in diesem frühen Stadium der Entwicklungsarbeit berücksichtigend, wurde von daher aus technischer und kaufmännischer Hinsicht auf die Einbeziehung dieser Kautschukmaterialien in die durchzuführenden Tests und Versuche zu möglichen Materialverbindungen verzichtet.

Aufbauend auf eigene Erfahrungen, Kompetenzen und der vorhandenen technischen Ausstattung wurden drei gängige Schweißverfahren für die Erprobung möglicher Materialverbindungen ausgewählt:

- Heißluftschweißen: Über heiße Luft wird die Kunststoffbeschichtung der Membranen angeschmolzen und durch eine Andruckrolle miteinander verpresst. Verwendet werden automatische und teilautomatische Maschinen wie auch Handgeräte. Diese kommen gerade bei komplizierten Schweißstellen, bei denen ein Maschineneinsatz nur mit erheblichem Aufwand oder gar nicht möglich ist, zum Einsatz. Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Einsatzflexibilität (vielfältige Formen, freihändige Konturen etc.), die relativ geringen Investitionskosten und eine relativ hohe Produktivität. Nachteilig, zumindest bei den manuell bedienbaren Geräten, ist die Schwierigkeit einer kontinuierlichen Qualitätskontrolle und die teils erheblichen Emissionen durch Schweißabluft.
- Heizkeilschweißen: Erhitzt wird bei diesem Verfahren ein metallischer Heizkeil. Ansonsten entspricht das Verfahren im Wesentlichen dem Schweißen mit heißer Luft.
- Hochfrequenzschweißen (HF-Schweißen): Durch elektromagnetische Wellen werden die Moleküle der kunststoffbeschichteten Membranen in Schwingung versetzt. Durch die dabei entstehende Reibung entsteht Wärme, die die zu verschweißenden Membranen mit einer großen Homogenität verbindet. Der notwendige Anpressdruck erfolgt bei diesem Verfahren über entsprechende Schweißelektroden aus Messing oder Aluminium. Vorteil dieses Verfahrens ist die geringe Emission von

Schadstoffen beim Schweißen, der hohe Automatisierungsgrad des Verfahrens und ausgereifte Möglichkeiten zur Gewährleistung und Kontrolle kontinuierlich verlässlicher Schweißnahtqualitäten.

Die Vorteile des Hochfrequenzschweißens wiegen den Nachteil der geringeren Produktivität gegenüber den beiden erstgenannten Verfahren Heißluft- und Heizkeilschweißen auf. Zudem sind speziell auf die Fertigung von großformatigen Bauteilen hin ausgelegte Serienschweißmaschinen vorhanden. Bei den kleinformatischen Bauteilen und auch bei komplizierten Verbindungen, z.B. hinsichtlich spezieller Applikationen, ist der Aspekt der Produktivität im Vergleich zu anderen Verfahren ausgeglichen. Mit dem Hochfrequenzschweißverfahren lässt sich im Unterschied zu diesen sogar ein deutlich besseres Arbeitsergebnis erzielen. Dementsprechend wird dem Hochfrequenzverfahren oberste Priorität zugeordnet, dies auch im Hinblick auf eine spätere Zertifizierung und Serienfertigung und ihren Anforderungen hinsichtlich einer angemessenen Qualitätssicherung und -kontrolle. Die anderen Schweißverfahren sollen nur bei untergeordneten Verbindungen und bei mit der Hochfrequenztechnik nicht zu bearbeitenden Anwendungen zum Einsatz kommen. Bei beiden Firmenprojektpartnern, OPTIMAL und DAEDLER, sind die entsprechenden Maschinenausrüstungen vorhanden.

Die Anwendung genähter Verbindungen beschränkt sich auf Bauteile, die losgelöst von der wasserdichten Außenmembran nicht verschweißbare Materialien (Gurte, Seile, etc.) miteinander oder mit textilen Membranelementen verbinden. Die technische Ausrüstung beim Projektpartner OPTIMAL ermöglicht Nähverbindungen auf standardmäßigen Industrienähmaschinen (Dürkopp-Adler, Pfaff) und Nähautomaten mit programmierbaren Nähbildern und definiert berechenbaren Kraftaufnahmen. In den vom Projektpartner DAEDLER verantworteten Arbeitsbereichen zur Entwicklung und Fertigung der großformatigen Bauteile, insbesondere der äußeren Behälterhülle, kommen genähte Verbindungen nicht zur Anwendung.

Beispielhafte Erprobungen und Versuche wurden für mögliche Materialverbindungen, im Bereich der äußeren Behälterhülle, den kleinformatischen Bauteilen, Armaturen und technischen Applikationen zugeordnet, durchgeführt (Abb. 19):

- Schweißnähte und auch das verarbeitete Material selbst werden im Zugstand auf die im Datenblatt angegebenen Werte hin geprüft (Abb. 15). Anhand dieser Prüfungen können auch die Einstellungen an den HF-Schweißmaschinen überprüft und ggf. nachjustiert werden.
- Formgebende und konstruktive Elemente und Anschlüsse: Eckausbildungen, Innenschotten und deren Anschlüsse an die Membranhülle, Gurt- und Seilverstärkungen und deren Anbindung an textile Membranelemente, verschiedene Lösungen zur Entleerung wie Klemm-, Schraub- und Reißverschlüsse. Kupplungssysteme der Einzelsegmente. Ebenfalls diverse Versuche für die Findung der idealen Form, Materialbeschaffenheit und Verarbeitung.
- Armaturenanschlüsse und deren Einbindung in die Membranhülle: Versuche mit verschiedenen Armaturen an kleinformatischen Kissentanks, wassergefüllt mit 0,2 bar Überdruck zum Testen der Dehnung der Membranhülle. Versuche mit unterschiedlich ausgebildeten Verstärkungen und Dichtungselementen. Versuche mit Schutzhüllen für die Armaturen zur Vermeidung von Schäden an der Armatur selbst aber auch an der Membranhülle.
- Applikationen für Handling und Transport der Elemente wie Tragegriffe, Trageschlaufen etc. an der Membranhülle.

Diese Arbeitsschritte erfolgten und erfolgen weiterhin in enger Abstimmung und Kooperation der Projektpartner, insbesondere unter den Projektpartnern OPTIMAL und DAEDLER.

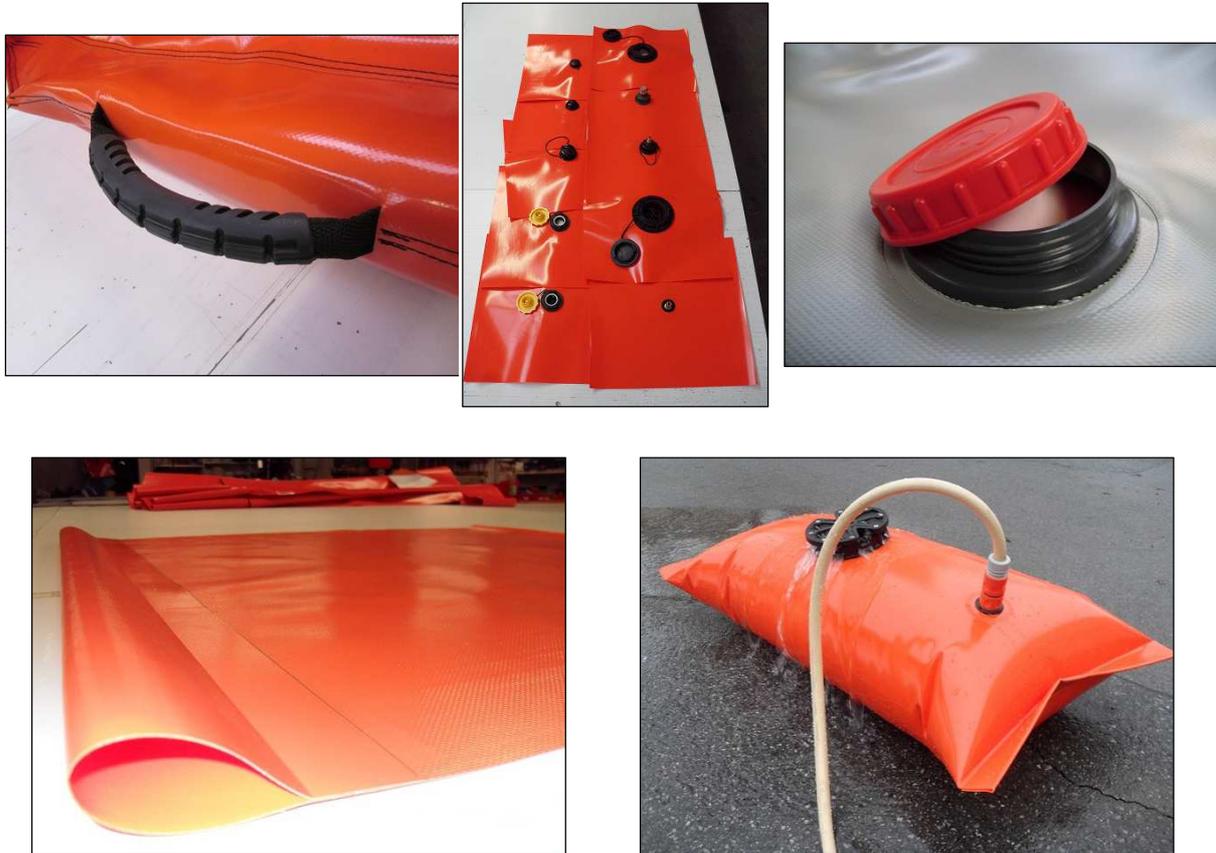


Abb. 19: Beispielhafte Erprobungen und Versuche für mögliche Materialverbindungen, im Bereich der äußeren Behälterhülle, den kleinformatischen Bauteilen, Armaturen und technischen Applikationen

13 Pflichtenhefte

Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Konstruktionen im Einsatz und der Materialrecherche sowie der Tests der Materialverbindungen ergeben sich die folgenden Vorgaben für die Pflichtenhefte zu den Themen 'Großformatige Bauteile, Schlauchhülle / Produktionsoptimierung' (DAEDLER) und 'Kleinformatische Bauteile und Einbindung in die Technik der Schutzorganisationen' (OPTIMAL):

- Membran: Festlegung auf PVC beschichtetes PES Gewebe mit einer Festigkeit von mindestens 3800/3800 N auf 5 cm (Abb. 20). Dieser Mindeststandard orientiert sich an den Recherchen zum technischen Standard ähnlicher Ausrüstungen von mobilen Hochwasserschutzsystemen und den im Projekt definierten Anforderungen an die notwendige Belastbarkeit des Materials. Als Arbeitsmaterial für die Erarbeitung von Labormodellen wird eine Membranqualität eines deutschen Herstellers mit einem Flächengewicht von 900g/m² beidseitig PVC beschichtet definiert. Als Farbe wird eine deutlich erkennbare Warnfarbe - gelb, orange oder rot und alternativ eine Zweifarbcodierung 'Wasser / Land' definiert. Alle kraftaufnehmenden Verbindungen müssen mit Hochfrequenzschweißmaschinen verarbeitet sein. Die Elemente sollen hinsichtlich der späteren Praxistauglichkeit und somit dem Aufbau durch unerfahrene oder gering qualifizierte Helfer aus möglichst wenigen Bauteilen bestehen und hinsichtlich ihrer Formgebung möglichst nicht richtungsweisend festgelegt sein. Falls die Definition einer Wasser- und Landseite notwendig sein sollte, ist diese klar zu kennzeichnen.

Die Handhabung der Elemente muss quasi selbsterklärend sein. Der Einsatz sollte in maximal drei Arbeitsschritten als Piktogramm auf der Konstruktion selbsterklärend sein.

- **Armaturen:** Grundsätzlich müssen die Armaturen für mit Sand, Feinmaterial und Schwebstoffen verunreinigtes Wasser ausgelegt sein. Eine problemlose Selbstreinigung der Armaturen im Einsatz und durch die Einsatzkräfte muss gewährleistet sein. Für die Wasserbefüllung wird vorzugsweise das bei den Schutzorganisationen am weitesten verbreitete deutsche Kupplungssystem STORZ gewählt (Abb. 21). Als Material wird Aluminium für ausreichend erachtet. Größenmäßig werden wahlweise die gängigen Typen STORZ C und STORZ B definiert. Da je nach Formgebung der Konstruktion die STORZ-Kupplungen ggf. mit einem zusätzlichen Absperrhahn einzusetzen sind, wird als zweite Option die Verwendung selbstdichtender Federdruckventile (Abb. 22) in das Pflichtenheft aufgenommen. Bei der Wahl von Federventilen muss ihre Funktionstüchtigkeit bei Beschickung mit verunreinigtem Wasser in Testreihen nachgewiesen werden. Um Beschädigungen durch Fehlbedienungen der Einsatzkräfte zu vermeiden, sollen zudem Überdruckventile integriert werden, die ein Bersten der Elemente durch unbeabsichtigte Überfüllung vermeiden. Die Entleerung der Elemente muss unkompliziert, schnell und möglichst restlos möglich sein. Ebenfalls ist eine einfache Reinigung und anschließende Trocknung mit den technischen Möglichkeiten der Einsatzkräfte zu garantieren, wie z.B. in Schlauchtürmen der Feuerwehren.
- **Technische Applikationen / Lagerung / Transport:** Die Elemente müssen im Gelände von zwei Einsatzkräften bewegt werden können. Dafür sind entsprechende Trage- und Transporthilfen (Abb. 23) vorzusehen. Die Verbindung der Elemente untereinander muss ähnlich wie die Formgebung unkompliziert und möglichst nicht richtungsweisend ausgeführt sein. Falls infolge der Formgebung eine richtungsweisende Kopplung unumgänglich sein sollte, ist diese klar und einfach zu kennzeichnen. Hierbei sind insbesondere die Einsatzbedingungen im Außengelände und unter teils extrem schwierigen Wetterbedingungen zu berücksichtigen. Die Verpackung der Elemente sollte auf den gängigen Euro-Maßen oder deren Teilgrößen basieren (600x400, 800x600, 1200x800 mm). Hiermit können Transport und Logistik so weit wie möglich auf die gängigen Systeme bei Einsatzkräften und den ihnen zurarbeitenden Dienstleistern eingestellt werden.



Abb. 20: PVC beschichtetes PES Gewebe mit einer Festigkeit von mindestens 3800/3800 N auf 5 cm

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkudung - DeichKADE

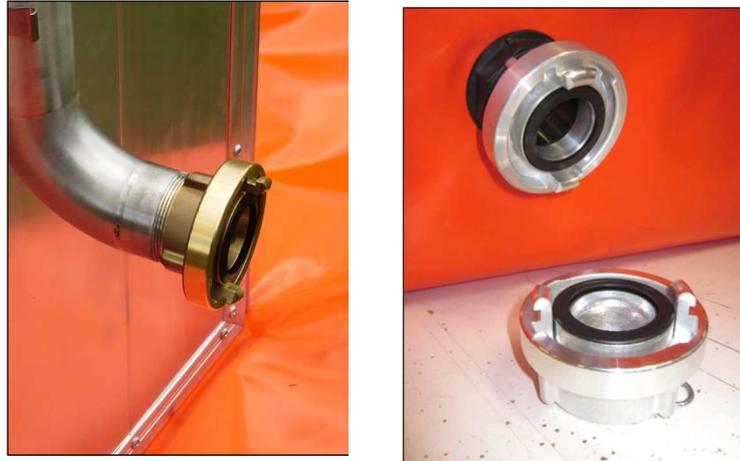


Abb. 21: Kupplungssystem STORZ



Abb. 22: Selbstdichtende Federdruckventile



Abb. 23: Transportsysteme

14 Iterative Erarbeitung der Labormodelle

Die ersten Arbeiten konzentrierten sich auf die bereits beim Projektpartner DAEDLER vorhandenen Modelle einer trapezförmigen Konstruktion. Die bisherigen Modelle waren sehr arbeitsintensiv und von daher entsprechend teuer. Somit war die Zielsetzung, durch Modifikationen einfachere Produktionsabläufe und eine erhöhte Haltbarkeit zu erreichen. Hierzu wurden komplizierte Teilstücke modifiziert produziert und es wurde in der Folge eine modifizierte Gesamtkonstruktion hergestellt. Es wurde insbesondere versucht, die erforderlichen Arbeiten in schwer unzugänglichen Bereichen innerhalb der Konstruktion zu minimieren, z.B. durch den Einsatz von Karabinerhaken als Verbindungselement. Das Hochfrequenzschweißen der Innenkonstruktion der Außenhülle mit Haltetaschen für Karabinerhaken ist in Abb. 24 dargestellt. Abb. 25 stellt einen Zwischenschritt bei der Konfektion des Behälters hinsichtlich der Herstellung der inneren Haltekonstruktion dar und in Abb. 26 ist der fertig konfektionierte Behälter mit Luftbefüllung dargestellt.



Abb. 24: Hochfrequenzschweißen der Innenkonstruktion der Außenhülle der trapezförmigen Behälterkonstruktion mit Haltetaschen für Karabinerhaken (Trapezbehälter Baureihe I)

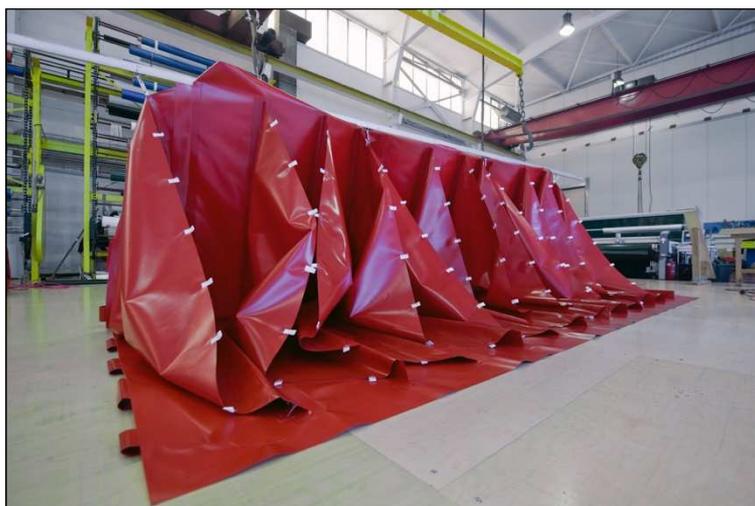


Abb. 25: Konfektion des trapezförmigen Behälters hinsichtlich der Herstellung der inneren Haltekonstruktion (Trapezbehälter Baureihe I)



Abb. 26: Mit Luft gefüllter trapezförmiger Behälter (Trapezbehälter Baureihe I)

Die folgenden Schritte zur Optimierung des trapezförmigen Behälters wurden durchgeführt:

- Minimierung der konstruktiven Applikationen innerhalb der Membranhülle bei gleichzeitiger Beibehaltung der bisherigen Trapezform
- Reduktion der verschweißten Zwischenschotten, Befestigung der Zwischenschotten mit Karabinern an einem vorab angeschweißtem Ösensaum, Versuche mit Gurt und Seilverspannungen zur Formgebung
- Optimierung der Armaturen und ihrer Einbindung in die Membranhülle
- Versuche mit Schraubverschlüssen und Reißverschlüssen für eine unproblematische Restentleerung und abschließende Reinigung der Elemente

Trotz modifizierter Konstruktion ist der Bau des trapezförmigen Behälters weiterhin sehr aufwendig. Dies liegt in der Hauptsache an einer sehr komplizierten Formgebung innerhalb der Konstruktionen, aber auch an letztlich nicht praxistauglichen und sehr komplizierten Armatureinbindungen etc. Es ist z.B. unumgänglich unzugängliche Eckbereiche mit Heißluft- statt mit Hochfrequenzschweißverbindungen herzustellen. Neben dem hohen Arbeitsaufwand und den hieraus resultierenden hohen Arbeitskosten für das Produkt ist die Einhaltung von Qualitätsstandards infolge der Verwendung des Heißluftschweißens für kraftaufnehmende Teile somit problematisch.

Weiterhin bestehen noch Probleme hinsichtlich Unterspülungen infolge konstruktionsbedingter Einschnürungen der Membranhülle und Undichtigkeiten zwischen den aneinandergeschlossenen Elementen. Auch die Entleerung durch auf der Oberseite angebrachte Befüllungsventile ist kompliziert und konnte durch unten seitlich angebrachte zusätzliche Anschlüsse zwar verbessert aber nicht vollständig optimiert werden. Die Restwasserentleerung ist somit nur in Nacharbeit möglich. Überzeugend ist trotz allem die Formgebung, die eine größtmögliche Stauhöhe bei gleichzeitig geringer Standfläche gewährleistet, die positiven Erfahrungen mit den bereits beschriebenen STORZ – Kupplungen, gute Ideenansätze für die Verbindung der einzelnen Elemente untereinander und ein einfaches Handling der mit Luft befüllten Konstruktionen.

Trotz vieler Vorteile dieser formstabilen Konstruktion aus textiler Membran wird eine weitere Verfolgung dieser Bauform im Projekt nach intensiver Diskussion der Projektpartner zunächst verneint. Auch wenn

die aufwendige formgebende Konstruktion des trapezförmigen Behälters nicht erheblich vereinfacht werden konnte, führten die Arbeiten zu neuen Erkenntnissen hinsichtlich der Belastbarkeit verschiedener Beschläge und Verspannungskonstruktionen. Auch wurden Optimierungen bei den Armaturen erreicht. Zusätzliche Revisionsöffnungen allerdings erwiesen sich als kompliziert und letztendlich unbrauchbar. Großformatige Schraubverschlüsse verformten sich unter Druck in der textilen Membranhülle und wurden undicht, Reißverschlüsse hielten bei Druckversuchen den Querkraften nicht stand (Abb. 27), Zugentlastungen verkomplizierten wiederum die Fertigung. Zudem waren sie bereits bei einer einmaligen Beschädigung unbrauchbar und undicht. Dies würde in der Praxis ein zu hohes Ausfallrisiko der gesamten Konstruktion bedeuten. Nach wie vor ungelöst blieb zudem eine einfache Entleerung und Reinigung, auch konnten die konstruktionsbedingten Einschnürungen am Boden und die Undichtigkeiten an den Verbindungsbereichen der einzelnen Elemente nicht wesentlich verringert werden.

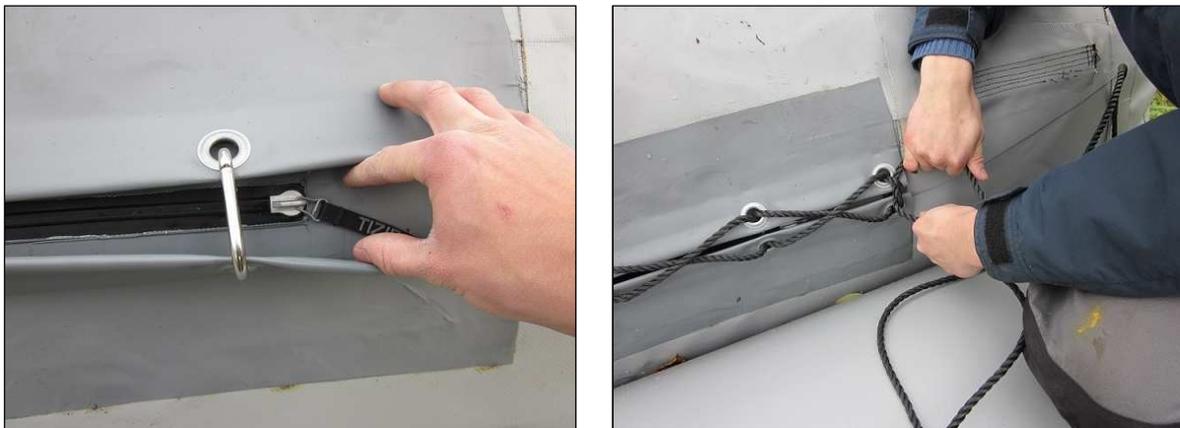


Abb. 27: Revisionsverschlüsse in Form von Reißverschlüssen (links), gesichert mit Zugaufnahmen

Von daher konzentrierten sich die folgenden Arbeiten auf die Erzielung einer größtmöglichen Stauhöhe bei gleichzeitig geringstmöglicher Auflagefläche durch eine Konstruktion aus mehreren, miteinander verbundenen kleinformigen Schläuchen:

- Eine Schlauchpyramide aus drei Schläuchen
- Einzelfläche mit relativ kleinem Durchmesser
- Formgebung über eine außen liegende zusätzliche Hülle; mit durchgehenden Reißverschlüssen miteinander koppelbar.
- Alle drei Schlauchkammern in identischer Bauweise für ein einfaches Handling im Einsatz.
- Befüllung / Entleerung über tubenförmige Abschlüsse mit STORZ Kupplungen beidseitig
- Verbindung der Elemente und Abdichtung über eine lose aufgezoogene Schlauchmanschette mit Durchlassöffnung für die Schlauchtuben nach oben.

In gemeinsamen Workshops wurden von OPTIMAL und DAEDLER mehrere Modelle gefertigt und in Testdurchläufen auf Ihre Funktionalität unter Einbindung des IWA geprüft (Abb. 28). Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- Formgebung ist vielversprechend. Gutes Verhältnis von Grundfläche zur Stauhöhe

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkudung - DeichKADE

- Die außen liegende Hülle hält bei Luftbefüllung die gewünschte Form hervorragend, bei Befüllung mit Wasser drückt der obere Schlauch die unteren aber zu sehr auseinander. Der gewünschte Effekt der geringen Auflagefläche geht verloren.
- Die Schlauchtüten haben sich als grundsätzlich geeignet gezeigt. Umständlich ist allerdings die Bündelung, da im Verbindungsbereich zweier Elemente immerhin sechs Schlauchtuben vorhanden sind. Auch drücken die Schlauchtuben sich gegenseitig ab. Eine Befüllung der einzelnen Kammern nacheinander ist dadurch stark erschwert und kann im Hochwassereinsatz als nicht praktikabel angesehen werden.
- Die lose Verbindungsmanschette verrutscht während des Befüllvorganges und bildet dadurch massive Falten, die im Auflagebereich zu Undichtigkeiten führen würden.

In weiteren Workshops wurden Ideen zur Optimierung umgesetzt und weiterentwickelte Modelle gefertigt und getestet:

- Die beiden unteren Schläuche werden zu einem Doppelschlauch (Mittelsteg) mit nur einem Befüllungsanschluss verbunden. Die zweite Tube wird ohne Armaturen ausgebildet. Sie wird aufgerollt und mit zwei Steckschlössern gesichert.
- Der obere Schlauch wird in gleicher Weise optimiert.
- Die seitlichen Fahnen bleiben, werden aber versetzt zum Schlauch ausgeführt, so dass eine Überlappung der Verbindungsstellen zwischen den Elementen erreicht wird. Beim oberen Schlauch wird diese Fahne mit einem Durchlass für die Befülltuben versehen.



Abb. 28: Test zweier aus drei Schläuchen mit Befülltuben bestehender Segmente im Testcontainer, Betriebshof DAEDLER

In einem nächsten Durchlauf wurden die gewonnenen Erkenntnisse verwertet und nochmals weiterentwickelt (Abb. 29):

- Der untere Doppelkammerschlauch bekommt eine teildurchlässige Mittelnahat zur besseren und vor allem gleichzeitigen Befüllung der beiden Kammern.
- Es wird nur noch eine Tube zur Entleerung, allerdings ohne Armatur vorgesehen. Diese wird aufgerollt und mit zwei Steckschlössern (optimierte Positionierung) an der Membranhülle gesichert. Die andere Seite wird stumpf verschweißt.
- Die Befüllung erfolgt über seitlich angebrachte STORZ-Armaturen.
- Die Kopplung der Elemente erfolgt über Gurte aus Polyester und angenähte Gurtschnallen aus PP.

Auf Basis der Versuchsergebnisse wurden weitere Modellreihen an Dreischlauchsystemen erstellt und getestet, die die folgenden Merkmale aufwiesen:

- Form und Ausführung der Schläuche werden beibehalten.
- Die seitlichen Fahnen werden beibehalten, allerdings in einer verkürzten Form. Die versetzte Bauweise zur Überlappung der Einzelelemente hat sich nicht bewährt.
- Diese Funktion soll eine einfache Schlauchmanschette als eigenständiges Bauteil übernehmen.
- Die Befüllventile STORZ werden durch selbstschließende Federdruckventile ersetzt.
- Die Klemmschlösser werden durch Karabiner ersetzt.
- Die Entleerungstuben werden durch zusätzliche Klemmprofile verstärkt.
- Die Position der seitlichen Reißverschlüsse an den Verbindungsfahnen wird auf eine Linie oberhalb der maximalen Stauwasserlinie verlegt.



Abb. 29: Labormodell Doppelkammerschlauch teildurchlässiger Mittelnahat mit aufgelegtem dritten Schlauch

Trotz dieser Anpassungen konnten keine einfache Installation und keine ausreichende Lagestabilität der Konstruktion erreicht werden. Zudem war die Konfektion der Elemente kompliziert und maschinenwie personalintensiv. Es zeigte sich, dass insbesondere die Kopplung der Elemente über Schlauchmanschetten mit mehreren versetzt angeordneten Spanngurten und teils nur schwer erreichbaren Befüllventilen in der Handhabung schwierig war.

Im Rahmen einer Krisensitzung wurde von den Projektpartnern der Beschluss gefasst, vom Dreischlauchbehälter zurück zur einteiligen geschlossenen Beckenform mit Innenverstreben zu gehen. Zunächst wurde eine oberseitig offene Trapezform in Anlehnung an das Prinzip der selbstaufrichtenden Faltbehälter geplant. In der Ausführungsplanung stellten sich jedoch Zweifel hinsichtlich der zu erzielenden Standsicherheit einer offenen Konstruktion ein. So wurde im Detail eine geschlossene Trapezform durchgeplant, die hinsichtlich der zu Projektbeginn bereits realisierten Trapezbehälter (Abb. 26) die folgenden Ähnlichkeiten bzw. Änderungen aufwies:

- Übernahme der Trapezform und der äußeren Abmessungen der zuvor entwickelten Trapezbehälter
- Radikale Vereinfachung der inneren Stabilisierung durch deutlich weniger Trennschotten (somit größere Zwischenabstände)
- Die Trennschotten werden zudem nicht mehr mit der Außenhülle verschweißt, sondern als Einzelelemente gefertigt und mit Karabinern an der Außenmembran eingehakt
- Als gegenseitig wirkende Befestigung werden doppelagige geöste Saumstreifen längsseitig von innen auf die Membranhülle geschweißt

Mit diesen Vorgaben konnte die Fertigung der Labormodelle deutlich vereinfacht werden, da hiermit nur noch einfache, gerade verlaufende Schweißnähte ohne komplexe Formen gefertigt werden mussten. Hiermit sind in der Summe zwar mehr Meter Schweißnaht zu erstellen, doch können diese signifikant einfacher, schneller und von weniger hoch spezialisiertem Personal gefertigt werden. Auch ist die Arbeit mit deutlich geringerem Fehlerrisiko ausführbar. Abb. 30 zeigt ein entsprechend gefertigtes Labormodell mit Sichtfenster. Letzteres leistete gute Dienste bei der Prüfung des Verhaltens der Innenkonstruktion in Belastungstests.



Abb. 30: Labormodell Trapezbehälter Baureihe II mit Sichtfenster

In der Folge wurden mehrere Serien Labormodelle mit kleinen Modifikationen erstellt:

- Es wurde eine weitere produktionstechnische Vereinfachung hinsichtlich einer vereinfachten Schweißung der oberseitigen Schließnaht als einfache Kappnaht vorgenommen, da an der Oberseite der Konstruktion nur sehr wenig Spannung anliegt, die von der vereinfachten Nahtkonstruktion schadlos aufgenommen werden kann
- Ebenfalls wurde wasserseitig eine Dichtungsplane bei einigen Modellen lose und bei anderen fest an der Konstruktion angebracht (Abb. 31)

- Eine weitere Änderung betraf die Einführung einer Dränmatte (Produkt SECUDRAIN von Naue Fasertechnik⁵) unterhalb der Konstruktion zur Verbesserung der Standfestigkeit

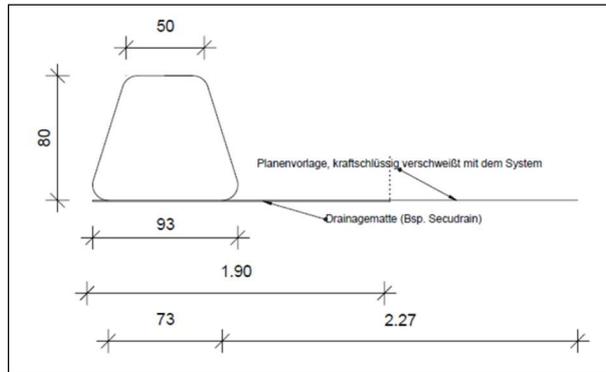


Abb. 31: Konstruktionszeichnung mit kraftschlüssig verschweißter Planenvorlage

Mithilfe der genannten Modifikationen konnte einerseits die Konfektion der Modelle vereinfacht werden und andererseits konnte die Stauhöhe bei Versuchen im Testcontainer auf dem Betriebshof DAEDLER von 90% der Aufbauhöhe auf Volleinstau mit Überströmung gesteigert werden. Einer der Tests im Testcontainer ist in Abb. 32 dargestellt.

Im Anschluss an mehrere Testreihen im Testcontainer wurden weitere Modifikationen an den Konstruktionen vorgenommen:

- Optimierung der Lage und der Anschlüsse der Dichtungsbahnen zur Minimierung des Wasserdurchtritts an den Koppelstellen der Einzelelemente; hierbei Verwendung und Test verschiedener Verbindungsmittel wie Flausch- und Hakenband, Reißverschluss und Magnetverschluss
- Bau einer offenen Konstruktion in Trapezform, die jedoch aufgrund fehlender Trennschotten eine deutlich verminderte Stabilität aufweist und keine Sicherheit insbesondere bei Treibgutprall liefern kann; insofern wurde diese Lösung final verworfen
- Weitere Optimierung der Konstruktion hinsichtlich einer vereinfachten Konfektion der Elemente unter Einhaltung bzw. Verbesserung der Formstabilität und Standfestigkeit der Gesamtkonstruktion

Die optimierte und in Aufstell- und Einstauversuchen im Testcontainer getestete Baureihe wurde nachfolgend im großmaßstäblichen IWA-Testbecken getestet (Abb. 33) und zeigte sehr gute Funktionalitäten. Ein Volleinstau der Konstruktion mit Teilüberlauf konnte realisiert werden, jedoch erfolgte versuchsbedingt wegen der vorhandenen Unebenheiten im Testbecken kein Wasserüberlauf über die gesamte Systembreite.

⁵ <https://www.naue.com/de/geokunststoffe/drainagematte-secudrain/>

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE



Abb. 32: Labormodell Trapezbehälter Baureihe II mit wasserseitiger Plane und Dränmatte im Testcontainer

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

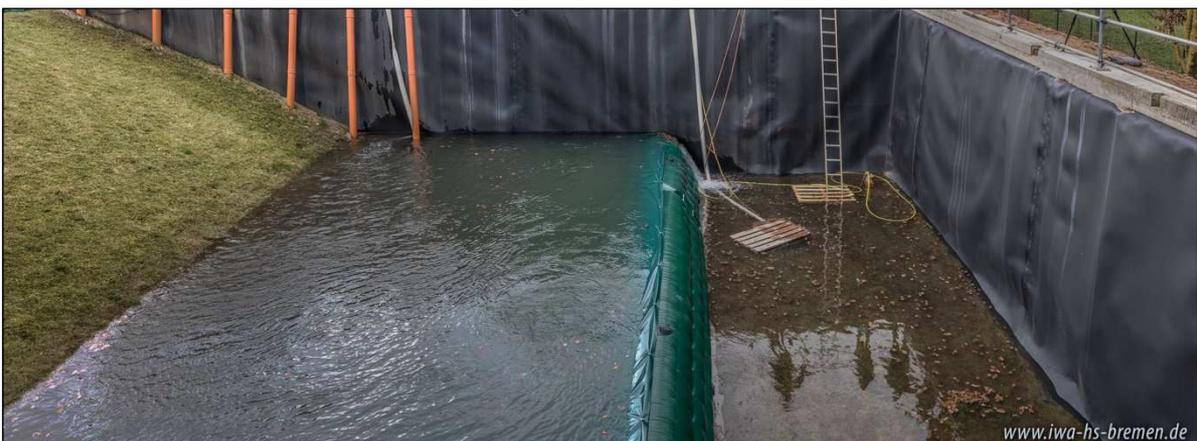


Abb. 33: Labormodell Trapezbehälter Baureihe II mit wasserseitiger Plane, Dränmatte und Kopplungsmodifikationen im großmaßstäblichen IWA-Testbecken

Im Nachgang zu den ersten großmaßstäblichen Tests wurden Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Funktion und der Handhabung der Konstruktionen getestet, die im Folgenden kurz erläutert sind:

- Ersatz der bisherigen Kopplung der Segmente mit aufgenähten Ratschengurten durch ein bzw. zwei horizontal verlaufende Hohlsäume mit eingelegtem Gurt bzw. Klemmschloss – kein positiver Effekt, da der eingelegte Gurt und insbesondere die Zurratsche beim Verpacken zu Beschädigungen der

Membranhülle führen kann; zudem wird die Handhabung durch entsprechende Zusatzkomponenten erschwert wird; hier Rückkehr zu den kurzen Gurten in der bisherigen Anwendung

- Alternativ zum durchgehenden Hohlraum wurde auch die Verwendung einzelner Schlaufen getestet, so dass eine Lagerung des Verbindungsgurtes separat von der eigentlichen DEICHKADE ermöglicht wird – auch diese Änderung wurde nach dem Test verworfen, insbesondere um den Einsatz zusätzlicher Komponenten zu vermeiden
- Anbringen von Beschwerungen im unteren Saum der wasserseitigen Dichtungsbahn – keine positive Wirkung
- Entwurf einer Abrollvorrichtung für den Einsatz auf dem Deich – wurde wegen des Verhakens der Planen beim Abrollen und der hieraus resultierenden unsauberen Dichtung gegen den Untergrund verworfen
- Einstautest bei einer begrenzten Wasserfüllung der Konstruktion mit einer Füllhöhe von lediglich 100 mm und restlicher Luftfüllung und einem einseitigen Einstau auf der wasserseitigen Dichtungsbahn (Abb. 34) – dies stellt eine gute Möglichkeit des Aufbaus dar, wenn ein schneller Aufbau wegen schnell steigender Wasserstände gefordert wird; ein Einstau funktioniert auch bei nur teilweiser Wasserfüllung, allerdings sollte aus Sicherheitsgründen im Nachgang zum Teilfüllungsaufbau die Vollfüllung erfolgen, da eine größere Sicherheit gegen seitliches Verrutschen bei Vollfüllung mit Wasser gegeben ist
- Versuch ohne Drainmatte – Staufunktion vorhanden, jedoch bei geringerer Lagestabilität



Abb. 34: Einstautest mit teilweiser Wasser- und Luftfüllung im IWA-Testbecken

Neben der Staufunktion im Hochwasserfall wurde ebenfalls der Einsatz des Labormodells als Sperrkonstruktion bei der Inspektion oder Wartung wasserbaulicher Konstruktionen im IWA-Testbecken getestet. Dieser Einsatz zeichnet sich dadurch aus, dass zunächst die Drainmatte positioniert wird, dann die Konstruktion mit Luftfüllung eingeschwommen und in der Folge im Wasser schwimmend mit Wasser

befüllt wird, wobei sie sich mit zunehmender Füllmenge im Wasser ablegt und so eine Sperre darstellt, hinter der dann das anstehende Wasser im rückwärtig gesperrten Bereich abgepumpt werden kann. Schwierigkeiten traten jedoch im Test bei der genauen Positionierung der eingeschwommenen Konstruktion bei zunehmender Wasserfüllung auf. Zudem ist es nicht möglich, im Wasser die Dichtungsebene so zu positionieren, dass eine gute Dichtung und somit eine stabilisierende Wirkung unter Nutzung der Wasserauflast auftritt.

Zur Vorbereitung der TÜV-Zertifizierungstests fanden in der Folge mehrere Einstauversuche im Testcontainer sowie im IWA-Testbecken mit einer hinsichtlich der Abmessungen vergrößerten Konstruktion statt, die jeweils erfolgreich verliefen.

15 Technische Schnittstellen

Folgende Schnittstellen zu den Standardausrüstungen der Einsatzkräfte (Feuerwehr und THW) werden als wesentlich analysiert und sollen in den weiteren Entwicklungsschritten der Deichkade unbedingt berücksichtigt werden:

- Die DeichKADE ist kein Ersatz, sondern eine sinnvolle Ergänzung der bisher verwendeten Sandsacksysteme. Gerade in der Strecke kann sie ihre Vorteile der schnellen, personal- und ressourcenschonenden Installation positiv einbringen. Problematische Anschlussbereiche sollten nach wie vor eine Schnittstellenmöglichkeit für Sandsackkonstruktionen und / oder andere improvisierte Schutzsysteme ermöglichen. Damit gewinnt die DeichKADE an Flexibilität und ist in keiner Weise richtungsweisend festgelegt. Beginn und Ende können von den Einsatzkräften situationsbedingt, ohne Rücksichtnahme auf die Konstruktion selbst festgelegt werden.
- Das komplette Handling der Elemente ist so einfach wie möglich auszuführen. Befüllung und Entleerung muss selbsterklärend, sicher und verlässlich funktionieren. Alle Beschläge und Armaturen sind auf einen möglichst werkzeuglosen Einsatz hin auszurichten und abgesehen von der notwendigen statischen Auslegung so groß zu dimensionieren, dass ein Arbeiten mit Schutzhandschuhe problemlos möglich ist.
- Die Segmentlänge der Einzelelemente muss sich an den Gewichtsvorgaben der Einsatzkräfte ausrichten. Der Transport sollte von maximal zwei bis vier Personen durchführbar sein. Das Gewicht einer solchen Verpackungs- und Transporteinheit sollte dabei nicht über 100 kg liegen.
- Die Verpackung muss die aktuellen Trends der Einsatzkräfte hin zu fahrbaren Kleinrollcontainern und multifunktionalen Logistikfahrzeugen im Euro-Maß berücksichtigen (Abb. 35). Gleichzeitig sollten die Ausrüstungen auch per Hubschrauber verlastbar sein, um auch in möglichen Extremfällen noch am Deich abgesetzt werden zu können, wenn ein Transport mit Fahrzeugen aufgrund der Einsatzgegebenheiten nicht mehr möglich ist.



Abb. 35: Verpackung in Form von fahrbaren Kleinrollcontainern und multifunktionalen Logistikfahrzeugen im Euro-Maß

16 TÜV-Zertifizierung

Zur TÜV-Zertifizierung wurde von den Projektpartnern ein Pflichtenheft mit detaillierter Auflistung der einzelnen in den Prototypen verbauten Elementen und Materialien sowie einer Bedienungsanleitung zum Auf- und Abbau der Konstruktion erstellt. Anhand dieses Pflichtenhefts hat der TÜV-Nord die Anforderungen an die TÜV-Zertifizierungstests spezifiziert.

In Abb. 36 ist der Aufbau und der Volleinstau der Prototypen mit Überlauf im IWA-Testbecken im Rahmen der TÜV-Zertifizierung am 08. und 09.11.2018 dokumentiert. Die Tests liefen erfolgreich und der TÜV-Nord erteilte die Zertifizierung der Prototypen für den Einsatz im Hochwasserschutz (TÜV NORD, 2019).

Die Aufbauzeit der Konstruktion inklusive Verlegen der Drainmatte, Positionierung, Luftbefüllung, anschließende Wasserbefüllung und Verlegung einer Sandsackreihe zur Beschwerung der Dichtungsebene über eine Schutzlänge von 15 m unter Einsatz zweier Einzelelemente der Länge 7,5 m betrug 55 Minuten beim Einsatz von 2 Personen. Die Sickerwassermenge betrug bei einer Stauhöhe von 20 cm 5,9 l/(m*min), bei einer Stauhöhe von 60 cm 9,5 l/(m*min) und bei einer Stauhöhe von 80 cm 10,2 l/(m*min). Die Konstruktion konnte bis zum Überlauf eingestaut werden und verblieb in allen Einstufen in lagestabiler Position.

Zusätzlich zur Funktionsprüfung wurde eine Druckprüfung durchgeführt, obwohl die Konstruktion im Einsatz nahezu drucklos gefüllt wird. Die Druckprüfung hat eine Festigkeit bis zu einem Überdruck von 0,25 bar gezeigt. Die Öffnung bei diesem Druck erfolgte am oberen, per Reißverschluss realisierten Abschluss. Eine zusätzliche Festigkeitsprüfung der Schweißnahtausführung zeigte einen Kurzzeitfugfaktor von 0,9 gegenüber dem Grundmaterial. Alle ausgeführten Schweißnähte sind konstruktiv als Schernähte ausgeführt und wiesen eine Überlappungslänge ≥ 40 mm auf.

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE





Abb. 36: Aufbau und Volleinstau mit Überlauf der Prototypen bei der TÜV-Zertifizierung

17 Präsentation von Projektergebnissen

Über das Projekt DeichKADE wurden regelmäßige Kurzinforos auf den firmeneigenen Webseiten von DAEDLER, aber insbesondere von OPTIMAL berichtet. Auf der Unternehmenswebsite erschienen diese Infos unter dem Bereich 'AKTUELL', auf dem regelmäßig über innovative Lösungen, Einsätze und neue Ausrüstungen berichtet wird. Erfahrungsgemäß wird gerade dieser Bereich regelmäßig von vielen Kunden wahrgenommen. Auch auf der eigens für den Geschäftsbereich 'FEUERWEHR' eingerichteten Facebook-Account wurden in unregelmäßigen Abständen über das Projekt berichtet. Diese Seite wird von Feuerwehrleuten und Fachbehörden im gesamten deutschsprachigen Raum wahrgenommen.

Die INTERSCHUTZ ist die alle fünf Jahre stattfindende Leitmesse des internationalen Brand- und Katastrophenschutzes, die 2015 vom 8. bis 13. Juni auf dem Messegelände Hannover stattfand. Das Entwicklungsprojekt DeichKADE hatte über das Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen die Möglichkeit als Ideeller Aussteller und somit zu stark vergünstigten Konditionen die Projektarbeit auf der Messe vorzustellen (Abb. 37). Neben der Darstellung der Projektarbeit konnten Verbindungen zu Feuerwehren, Landesämtern für Wasserwirtschaft und Katastrophenschutz und zu anderen Entwicklern technischer Systeme geknüpft werden. Die Firma OPTIMAL war zudem mit einem eigenen Stand auf der INTERSCHUTZ 2015 vertreten (Abb. 38). Auch auf der nächsten INTERSCHUTZ im Jahr 2020 wird

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

die Firma OPTIMAL wieder mit einem eigenen Messestand vertreten sein. Das Thema Hochwasserschutz und insbesondere die Ergebnisse des DeichKADE-Projekts werden als eigener Schwerpunkt präsentiert werden.



Abb. 37: Präsentation von Hochwasserschutzentwicklungen und dem Projekt DeichKADE auf der INTERSCHUTZ 2015 am Stand des Instituts für Wasserbau der Hochschule Bremen



Abb. 38: Stand der Firma OPTIMAL auf der INTERSCHUTZ 2015

Zudem wurde das Projekt DeichKADE zur fünften Woche der Umwelt eingeladen, die im Juni 2016 im Schlosspark Bellevue in Berlin stattfand. Neben der Präsentation auf einem Messestand wurden Labormodelle auch auf der Bühne und im Programm des Deutschlandfunks vorgestellt (Abb. 39).



Abb. 39: Präsentation des Projekts DeichKADE auf der Woche der Umwelt 2016 in Berlin

Im Folgenden sind die im Rahmen der Projektarbeit insbesondere in der Projektphase II durchgeführten Präsentationen der Arbeitsergebnisse und Labormodelle im Rahmen von Workshops, Konferenzen, Ausstellungen/ Messen und Kundenterminen aufgelistet. Die Vorträge waren auch jeweils mit einer intensiven Fachdiskussion mit Fachkollegen und Anwendern verbunden.

- Juni 2015: Präsentation von Labormodellen auf einem eigenen Messestand auf der Fachmesse Interschutz in Hannover unter Wahrnehmung von Sonderkonditionen für Forschungs- und Entwicklungsprojekte
- Januar 2016: Vortrag mit Diskussion zum Thema Operativer Hochwasserschutz mit wassergefüllten Konstruktionen im Rahmen der Vortragsreihe 'Bremer Tagebuch' im Haus der Wissenschaften Bremen
- April 2016: Vortrag und Präsentation der Labormodelle im Rahmen der Veranstaltung 'Hochwasserschutz und Deichverteidigung' der Feuerwehrschiele Bremen
- Juni 2016: Präsentation des Projekts im Rahmen der Woche der Umwelt im Schloss Bellevue Berlin
- November 2016: Vortrag zum Projekt im Rahmen des deutsch-niederländischen Workshops zum Operativen Hochwasserschutz in Tiel, Niederlande
- Januar 2017: Vortrag zum Projekt im Rahmen des Workshops des Fachverbands BWK zur Forschung an der Hochschule Bremen in Bremen
- Februar 2017: Teilnahme am deutsch-niederländischen Workshop zum Hochwasserschutz in Grimma und Diskussion der Projektergebnisse
- April 2017: Vortrag und Präsentation von Labormodellen im Rahmen der Hochwasserschutzübung der Institutionen Bundeswehr / THW / DLRG und Feuerwehr beim WSV Wesel am Rhein
- Mai 2017: Vortrag zum Projekt im Rahmen des Workshops Wasserbau und Küsteningenieurwesen an der Polnischen Akademie der Wissenschaften, Abteilung Wasserbau IBW PAN in Gdansk
- September 2017: Vortrag und Präsentation von Labormodellen im Rahmen der Maritimen Woche in Bremen
- November 2017: Teilnahme am deutsch-niederländischen Workshop zum Operativen Hochwasserschutz in Köln und Diskussion der Projektergebnisse
- November 2017: Vortrag zum Projekt im Rahmen der Fachtagung 'Neue Strategien für das THW' am THW-Ausbildungszentrum Hoya

- Januar 2018: Präsentation der Projektideen bei der Stadtentwässerung Lippstadt im Rahmen der Vorstellung verschiedener Möglichkeiten für den mobilen Hochwasserschutz.
- Februar 2018: Präsentation der Projektideen und weiterer Hochwasserschutzsysteme vor mehreren Fachbehörden aus Lichtenstein, Österreich und der Schweiz (Verbund Hochrhein) in Widnau / Schweiz
- Dezember 2018: Vortrag zum Projekt im Rahmen des Nürnberger Wasserbau Symposiums
- Juni 2018, Präsentation der Projektideen und weiterer Hochwasserschutzsysteme vor Vertretern der Region Bangkok und Pattaya (Thailand) im Zusammenhang mit Planungen für ein Hochwasserschutzkonzept der beiden Regionen
- Juni 2019: Vorstellung von Projektergebnissen beim Workshop 'Kooperation in der Forschung' beim THW in Bonn

18 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit der Kooperationspartner OPTIMAL, DAEDLER und IWA im Projekt DeichKADE umfassten in erster Linie die folgenden Punkte:

- Analyse und Katalogisierung von Regelquerschnitten von Deichen sowie von Hochwasserszenarien an Binnenflüssen
- Erarbeitung und Darstellung von Grundlagen der Deichverteidigung
- Erarbeitung eines Anforderungskatalogs an wassergefüllte Konstruktionen zur Deichverteidigung
- Materialrecherche und Materialauswahl für die Erarbeitung der Labormodelle und Prototypen
- Erprobung möglicher Materialverbindungen und Auswahl der Vorzugsverbindungen
- Erstellung des Pflichtenhefts zur Erarbeitung der wassergefüllten Konstruktion zur Deichaufkadung und dessen Schnittstellen zur Ausrüstung der Katastrophenschutzeinheiten und Überarbeitung desselben im Zuge der Entwicklungsarbeit
- Iterative Erarbeitung von Labormodellen inklusive Erarbeitung von angepassten Testständen und Test der Konstruktionen
- Optimierung der Labormodelle und Überführung der Modelle in für die Serienproduktion geeignete Prototypen
- Konzeption und Erstellung von praxistauglichen Verlastungs- und Logistikkonzepten
- Erstellung von Bedienungsanleitungen zum Auf- und Abbau der Konstruktionen inklusive erforderlicher Infografiken
- Erstellung eines Pflichtenheftes für die TÜV-Zertifizierung und Vorbereitung der Tests
- Durchführung der TÜV-Zertifizierung
- Dokumentation der Arbeiten, hierbei auch fotografische und videotechnische Dokumentation
- Vorstellung der Projektarbeiten, Labormodellen und Prototypen und Diskussion der Ergebnisse mit Fachkollegen im Rahmen verschiedener Veranstaltungen
- Erstellung des Abschlussberichts

Die Entwicklungsarbeit konnte trotz einiger zwischenzeitlicher Rückschläge durch eine stetige Fortführung der Arbeiten an den Labormodellen und kurzfristig nach erfolgten Modifikationen durchgeführten Material-, Funktions- und Handhabungstests erfolgreich abgeschlossen werden. Mit den entwickelten Prototypen im Projekt DeichKADE liegen für den Einsatz im abwehrenden Hochwasserschutz zertifi-

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

zierte, wasserbefüllbare Konstruktionen vor, die eine geringe Aufstandsfläche und eine hohe Standsicherheit aufweisen. Aktuell wird vom Partner OPTIMAL ein Konzept zur Vermarktung der Konstruktion erarbeitet. Hier steht die Firma OPTIMAL in engem Austausch mit namhaften Vertretern des deutschen Feuerwehrwesens und des THW sowie den großen Feuerwehrausrüstern, die bereits großes Interesse an den Ausrüstungen signalisiert haben. Auch hier bietet sich für die Markteinführung die Fachmesse INTERSCHUTZ 2020 an. Diese Messe gehört zu den internationalen Leitmesse in den Bereichen Feuerwehr und Katastrophenschutz und zieht ein hochgradig internationales Publikum an.

Bremen, 19. August 2019



Prof. Dr.-Ing. Bärbel Koppe

Menden, 19. August 2019



Armin Krebs

19 Schrifttum

- CONRAD, B., 2012: Handbuch Geotechnik, Grundlagen- Anwendungen- Praxiserfahrungen, Verlag Vieweg + Teubner
- DIN 19712 (2013-01), 2013: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.)
- DWA, 2011: Deiche an Fließgewässern - Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Merkblatt DWA-M 507-1. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- EAK, 2002: Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzwerke EAK. Die Küste, Heft 65. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. Verlag Boyens& Co., Heide in Holstein
- EU, 2007: Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union, 06.11.2007
- HASELSTEINER, R., 2007: Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft im Institut für Wasserwesen der Technischen Universität München
- HEIMERL, S., MEYER, H., 2014: Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz. Springer Fachmedien Wiesbaden
- KOPPE, B.; KREBS, A.; DAEDLER, K., 2014: Water-Filled Tube Constructions for the Use in Emergency Flood Control- 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, 2014, Porto
- LAWA, 1995: "Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz". Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Stuttgart.
- LFU, 2010: Hinweise zur Deichverteidigung und Deichsicherung. Bayerisches Landesamt für Umwelt
- LHW, 2011: Anleitung für den operativen Hochwasserschutz – Teil 2. Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), Magdeburg
- MASSOLLE, C.; LANKENAU, L.; KOPPE, B.; SCHLURMANN, T., 2019: Operativer Hochwasserschutz - Eignung, Einsatz und Leistungsfähigkeit von Sandsackersatzsystemen in praxisorientierten Versuchsreihen. Wasser und Abfall 09/2019 (im Druck), Springer Professional, Wiesbaden
- Lankenau, L.; Koppe, B., 2019: Sandbagging versus Sandbag Replacement Systems: Costs, Time, Helpers, Logistics. Natural Hazards and Earth System Sciences, im Reviewverfahren.
- MBLU, 1995: "Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern". Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- MLR, 2012: "Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2012. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- MLUV, 2009: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin

- NLWKN, 2007: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen und Bremen – Festland. Küstenschutz Band 1. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden
- PINZ, K., 2014: Rückblick auf das Juni-Hochwasser 2013 an der Elbe aus gewässerkundlicher Sicht. Informationstermin Hochwasserschutzplanungen an der Elbe am 14.01.2014 im Schloss Bleckede. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz NLWKN, Lüneburg
- RD, 2006: Instruktion zur Deichverteidigung. – Hochwasser geht uns ALLE an... Regierungspräsidium Darmstadt, Abteilung Arbeitsschutz und Umwelt Darmstadt, Staatlicher Wasserbau, März 2006
- SCHMIDT, M., 2000: Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 - Eine Auswertung der Quellen und Karten. Oldenbourg Industrieverlag, München
- SPM, 1984: Shore Protection Manual, Volume I. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, 1984
- SUK, 2002: Regelprofil Rheindeich – Drei-Zonen-Deich. Staatliches Umweltamt Krefeld, Dezernat 55, September 2002.
- THW, 2007: Taschenkarte Deichverteidigung (Stand 12/2007). Technisches Hilfswerk, Deichverteidigung und Hochwasserschutz (THW)
- TÜV-NORD, 2019: Bestätigung der Prüfung Mobile Schutzausrüstung Deichkade Flutschutz, Prüfbericht-Nr. 1326KU01880-8116405289. TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG, 12.03.2019, Hamburg