



# Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE -

Ergebnisbericht Phase 1 – September 2015



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

Karsten Daedler e.K. – Konfektion von  
Planstoffen und Folien  
Geschäftsführer Karsten Daedler  
Bunsenstrasse 1, 22946 Trittau  
Telefon: 04154/ 79530-12  
Email: kd@daedler.de  
Web: www.daedler.de

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

## Inhalt

1	Problemstellung .....	1
2	Gegenstand und Zielsetzung des Projekts .....	2
3	Projektpartner.....	3
4	Flussdeiche .....	3
4.1	Historische Entwicklung von Flussdeichen .....	5
4.2	Beispielhafte Analyse von Deichquerschnitten .....	7
4.2.1	Elbdeiche und einige Nebenflüsse.....	7
4.2.2	Deiche an der Mulde .....	10
4.2.3	Deiche an der Mittelweser.....	14
4.2.4	Reedeich an der Ochtum in Bremen.....	15
4.2.5	Ausgewählte Querschnitte von Altdeichen im Vergleich .....	16
5	Hochwasserszenarien an Binnenflüssen .....	17
6	Allgemeine Grundlagen der Deichverteidigung .....	22
6.1	Vorwarnzeit .....	23
6.2	Bereitstellungszeit .....	24
6.3	Physikalische Grundlagen der Schwächung von Deichprofilen bei Hochwasser.....	25
6.4	Deichverteidigung per Aufkadung mit Sandsäcken .....	27
7	Anforderungen an wassergefüllte Schlauchkonstruktionen zur Deichaufkadung.....	33
8	Materialrecherche und Materialauswahl .....	38
9	Werkzeuge, Vorrichtungen, Maschinen .....	40
10	Testvorrichtungen und Teststände .....	41
11	Erprobung möglicher Materialverbindungen .....	43
12	Pflichtenhefte .....	46
13	Erarbeitung der Labormodelle.....	49
14	Technische Schnittstellen .....	55
15	Ideeller Aussteller auf der Feuerwehrmesse INTERSCHUTZ 2015.....	56
16	Zusammenfassung und Ausblick – Stand September 2015.....	57
17	Schrifttum .....	59

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufkudungen aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)	2
Abb. 2: Begriffe bei Deichen an Fließgewässern (DWA, 2011)	4
Abb. 3: Deichbauten vom Mittelalter bis heute (HASSELSTEINER, 2007)	6
Abb. 4: Drei-Zonen-Deich, Beispiel Regelprofil Rheindeich (SUK, 2002)	7
Abb. 5: Altdeich des Jeetzeldeichverbandes (Deich-km 21+740) (MÜLLER, 2006)	8
Abb. 6: Altdeich des Neuhauser Deich- und Unterhaltungsverbandes (Deich-km 31+000) (MÜLLER, 2006)	8
Abb. 7: Altdeichprofil an der unteren Mittelelbe und deren Rückstaudeichen (NLWKN, 2006)	8
Abb. 8: Elbedeichprofil Deich-km 3+200 bzw. Elb-km 441,2 (LUGV, 2014)	9
Abb. 9: Elbedeichprofil Deich-km 6+530 bzw. Elb-km 446,2 (LUGV, 2014)	10
Abb. 10: Elbedeichprofil Deich-km 13+625 bzw. Elb-km 451,5 (LUGV, 2014)	10
Abb. 11: Übersicht über den Verlauf des Greppiner Deich zum Schutz gegen Hochwasser der Mulde	11
Abb. 12: Regelprofil Greppiner Deich, Station 0+150.0 bis 0+900.0	11
Abb. 13: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+000.0 bis 1+060.0	12
Abb. 14: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+060.0 bis 1+200.0 <sup>4</sup>	12
Abb. 15: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+200.0 bis 1+450.0 <sup>4</sup>	13
Abb. 16: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+450.0 bis 1+675.0 <sup>4</sup>	13
Abb. 17: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+675.0 bis 2+075.0 <sup>4</sup>	13
Abb. 18: Regelprofil Greppiner Deich Station 2+075.0 bis 2+245.8 <sup>4</sup>	14
Abb. 19: Weserdeichabschnitt bei Ahsen-Oetzen Station 4+700 bis 5+00	14
Abb. 20: Der Reedeich bei Bremen (Woltmershausen) von Station 0+000 bis 0+800	15
Abb. 21: Der Reedeich bei Bremen (Woltmershausen) bei Station 0+305 (BDLW, 2015)	15
Abb. 22: Der Reedeich bei Bremen (Woltmershausen) bei Station 0+550 (BDLW, 2015)	16
Abb. 23: Niederschlagshöhen im Dresdener Elbe-Einzugsgebiet und Anstieg des Elbewasserstands in Dresden im Jahr 2002 (SLUG, 2006)	19
Abb. 24: Wasserstandsganglinien des Frühjahrshochwassers der Elbe des Jahres 2006 an den Pegeln Schöna, Dresden und Torgau (Reihenfolge von oberstrom nach unterstrom) (SLUG, 2006)	20
Abb. 25: Wasserstandsganglinien der Hochwasserereignisse der Jahre 1954, 1974 und 2002 der Vereinigten Mulde am Pegel Golzern sowie Richtwasserstände der Alarmstufen 1 bis 4 (SLUG, 2006)	20

Abb. 26: Wasserstandsganglinien der Oder und ausgewählter Nebenflüsse während des Sommerhochwassers 1997 (LUA, 1998).....	21
Abb. 27: Ganglinie des Eishochwassers 1987 am Pegel Artlenburg, Elbe (NLWKN, 2006) .....	22
Abb. 28: Zunahme der Unsicherheiten in der Wasserstandsvorhersage mit zunehmender Vorhersagezeit .....	23
Abb. 29: Sickerwasseraustritte an einem Deich (RD, 2006) .....	26
Abb. 30: Deichbruch bei Aurith, Ziltendorfer Niederung während des Oderhochwassers 1997 (Foto: Manfred W. Jürgens).....	27
Abb. 31: Aufkudungen mit Sandsäcken .....	28
Abb. 32: Aufkudungen aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe).....	29
Abb. 33: Erschwerte Deichverteidigung aufgrund fehlender Verteidigungswege während des Jeetzelhochwassers 2002.....	29
Abb. 34: Aufkudungshöhen mit Sandsäcken (RD, 2006).....	30
Abb. 35: Sandsackdamm, Verlegeart normale Stabilität (THW, 2007).....	30
Abb. 36: Berechnung des Kräfte- und Mittelbedarfs für einen 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackdamm.....	31
Abb. 37: Befüllung von Sandsäcken durch Soldaten der Bundeswehr während des Sommerhochwassers der Oder 1997 (Foto: Manfred W. Jürgens).....	32
Abb. 38: Einstau des 2008 erstellten Hochwasserschutzsystems Hitzacker am 12.06.2013 bei sinkenden Wasserständen – der Scheitelwasserstand wurde am 11.06.2013 erreicht (Foto: Bärbel Koppe) .....	35
Abb. 39: Allzweckförderpumpe MAST NP 12 B .....	40
Abb. 40: Zugstand zum Testen der Schweißnähte und des zu verarbeiteten Materials .....	41
Abb. 41: Materialtest zur Haftfestigkeit und Abrasion auf Untergründen, Tests von Ertüchtigungen zur Bodenhaftung .....	42
Abb. 42: Seecontainer Anlieferung (oben links) und Originalausstattung (oben links, unten rechts) sowie nach dem projektgerechten Umbau (unten rechts) – Betriebshof DAEDLER.....	43
Abb. 43: Beispielhafte Erprobungen und Versuche für mögliche Materialverbindungen, im Bereich der äußeren Behälterhülle, den kleinformatischen Bauteilen, Armaturen und technischen Applikationen .....	46
Abb. 44: PVC beschichtetes PES Gewebe mit einer Festigkeit von mindestens 3800/3800 N auf 5 cm .....	47
Abb. 45: Kupplungssystem STORZ .....	48
Abb. 46: Selbstdichtende Federdruckventile.....	48

Abb. 47: Transportsysteme .....	49
Abb. 48: Hochfrequenzschweißen der Innenkonstruktion der Außenhülle der trapezförmigen Behälterkonstruktion mit Haltetaschen für Karabinerhaken, Produktionshalle DAEDLER .....	49
Abb. 49: Konfektion des trapezförmigen Behälters hinsichtlich der Herstellung der inneren Haltekonstruktion, Produktionshalle DAEDLER.....	50
Abb. 50: Mit Luft gefüllter trapezförmiger Behälter, Produktionshalle DAEDLER.....	50
Abb. 51: Revisionsverschlüsse in Form von Reißverschlüssen (links), gesichert mit Zugaufnahmen . 51	
Abb. 52: Test zweier aus drei Schläuchen mit Befülltuben bestehender Segmente im Testcontainer, Betriebshof DAEDLER .....	53
Abb. 53: Labormodell Doppelkammerschlauch mit teildurchlässiger Mittelnah, Betriebsgelände DAEDLER .....	54
Abb. 54: Labormodell Doppelkammerschlauch teildurchlässiger Mittelnah mit aufgelegtem dritten Schlauch, Betriebsgelände DAEDLER .....	55
Abb. 55: Verpackung in Form von fahrbaren Kleinrollcontainern und multifunktionalen Logistikfahrzeugen im Euro-Maß .....	56
Abb. 56: Präsentation von Hochwasserschutzentwicklungen und dem Projekt DeichKADE auf der INTERSCHUTZ 2015 am Stand des Instituts für Wasserbau der Hochschule Bremen.....	56
Abb. 57: Stand der Firma OPTIMAL auf der INTERSCHUTZ 2015 .....	57

### **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Berechnungsgrundlagen Sandsäcke .....	31
Tab. 2: Zusammenfassung der obligatorischen und optionalen Forderungen an die zu entwickelnden wassergefüllten Konstruktionen zur Aufkantung von Deichstrecken .....	37

## 1 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 (z.B. PETOUKHOV ET AL., 2013).

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. Bisher basiert die Verteidigung durchbruchgefährdeter Deichlinien in erster Linie auf den Einsatz von Sandsäcken. Sandsäcke sind flexibel einzusetzen, problematisch sind jedoch der erforderliche enorme personelle, materielle und zeitliche Aufwand für deren Verlegung und Rückbau.

Beim Hochwasser 2013 waren in Deutschland bis zu 19.000 Soldaten zeitgleich in der Deichverteidigung im Einsatz (LÖRS, 2013), die Feuerwehren waren bundesweit mit mehr als 75.000 ehren- und hauptamtlichen Kräften im Hochwasserschutz tätig (DFV, 2013) und das Technische Hilfswerk THW mit mehr als 16.000 Helfern mit 1,6 Millionen Einsatzstunden (THW, 2013). Allein der Hochwassereinsatz des THW kostete 30,5 Millionen Euro; Kosten die vom Bund getragen werden (THW, 2013). Sind während des Hochwassers Sandsäcke Mangelware und steigen zur Beschaffung von Sandsack und Füllmaterial im Verlauf eines Großschadensereignisses kontinuierlich die Preise (MÜSSGENS, 2013), stellt sich mit sinkenden Wasserständen das Problem des Rückbaus der verbauten Sandsäcke und zwar in der Regel mit deutlich weniger Helfern als beim Aufbau (STEFFEN, 2013). Zudem können die verbauten Sandsäcke nicht wiederverwendet werden, egal ob sie mit Flusswasser oder nur mit Regenwasser in Berührung gekommen sind. Jute-Säcke verrotten innerhalb weniger Wochen und Kunststoff-Säcke werden durch UV-Einstrahlung soweit angegriffen, dass die Fasern brüchig werden. Zudem sind die Kosten für die Entsorgung der Sandsäcke hoch und liegen z.B. im Kreis Herzogtum Lauenburg nach dem Hochwasser 2013 bei rund 0,50 € pro Sandsack (GEORGE, 2013).

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist es von Vorteil, Konstruktionen zu entwickeln, die effektiver als Sandsäcke im abwehrenden Hochwasserschutz einsetzbar sind. Im von der Deutschen Bundesstiftung DBU finanziell unterstützten Forschungsprojekt DeichKade werden Prototypen wassergefüllter Schlauchkonstruktionen entwickelt, die zur Aufkadung überströmungsgefährdeter Deichabschnitte 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: Aufkadungen aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)

## 2 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 Aufkadung von überflutungsgefährdeten Deichabschnitten an Binnengewässern.

Mit den Konstruktionen zur Deichaufkadung sollen Deichbrüche und somit Überschwemmungen von tiefliegenden Gebieten verhindern werden. Bisher stehen zur Aufkadung von überflutungsgefährdeten Deichstrecken 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 Sandsackaufkadungen auf Deichen ersetzen.

Die zu entwickelnden Konstruktionen sollen die folgenden Funktionen aufweisen:

- Einzelsegmente unterschiedlicher Höhenmaße, die zu Deichaufkadungen beliebiger Länge kopplbar sind
- Geringe, auf die Breite von Deichkronen 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 einjährigen Phase des Forschungsprojekts DeichKade werden die theoretischen Grundlagen für die Entwicklungsarbeit gelegt und es werden erste Labormodelle von Schlauchkonstruktionen unterschiedlicher Höhenmaße zum Einsatz als Deichaufkadung entwickelt.

Die Labormodelle sollen in der zweiten einjährigen Phase des Projekts DeichKade optimiert und in Prototypen überführt werden, die hinsichtlich Material, Konstruktion, Funktion, Struktur, Design und Fertigung die Grundlage für eine nachfolgende Serienproduktion durch die Industriepartner bilden. Zudem sollen die Prototypen durch den TÜV für den Einsatz im Hochwasserschutz zertifiziert werden.

### 3 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. Zudem wird 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.

### 4 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 (siehe Abschnitt 4.2). 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 (siehe Abschnitt 4.1).

In Abb. 2 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.

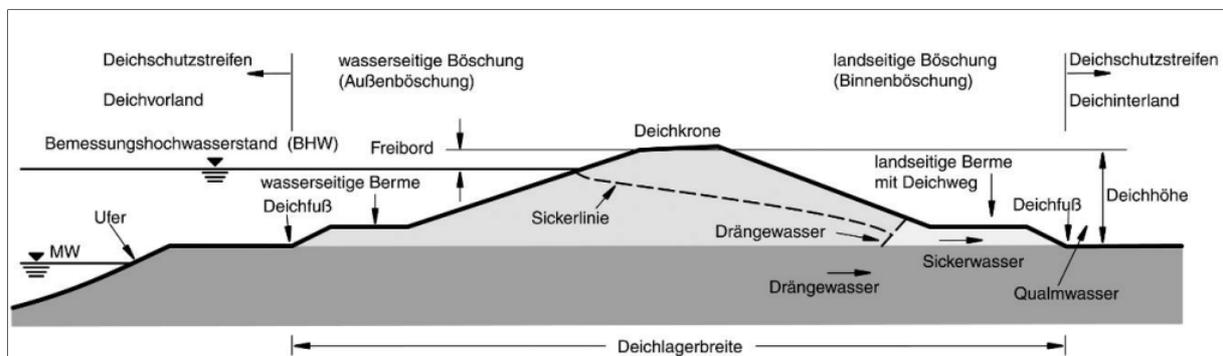


Abb. 2: Begriffe bei Deichen an Fließgewässern (DWA, 2011)

In Deutschland gibt es rund 400.000 km Fließgewässer, hiervon rund 20.000 km mit einem Einzugsgebiet von mehr als 1.000 km<sup>2</sup> (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.

#### 4.1 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. 3). 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 wurden bereits bei der Bauweise gegen Mitte des 19. Jahrhunderts entsprechende Vorkehrungen gegen diese Versagensart getroffen (HASELSTEINER, 2007), siehe Abb. 3, Baujahr 1947. Durch einen rund 1 bis 2 m tiefen, mit tonigem Bodenmaterial verfüllten Graben mittig unter dem Deichkörper konnte einer Unterströmung entgegengewirkt werden.

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

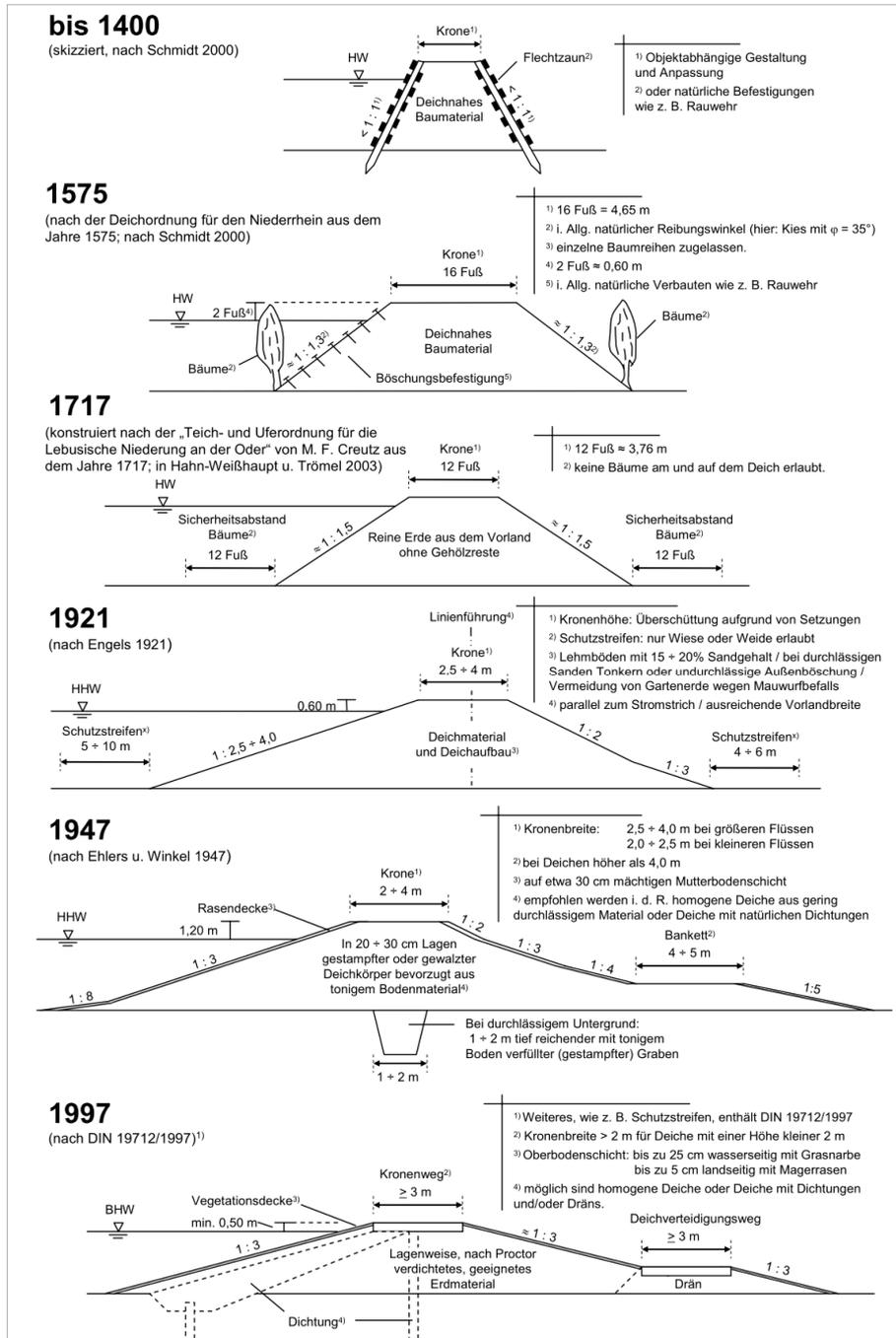


Abb. 3: Deichbauten vom Mittelalter bis heute (HASELSTEINER, 2007)

Moderne Deiche sind als sogenannter Drei-Zonen-Deich ausgeführt, siehe Abb. 3, Baujahr 1997 sowie Abb. 4. 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.

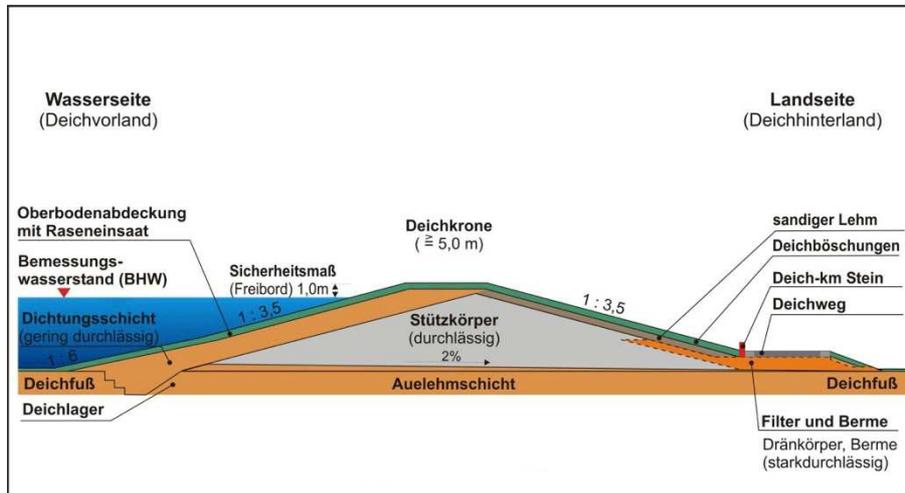


Abb. 4: Drei-Zonen-Deich, Beispiel Regelprofil Rheindeich (SUK, 2002)

## 4.2 Beispielhafte Analyse von Deichquerschnitten

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Bauweise und ihres unterschiedlichen Baujahrs kann kein allgemein gültiges 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.

### 4.2.1 Elbdeiche und einige Nebenflüsse

Ein Altdeichprofil der Jeetzel, einem Nebenfluss der Elbe, ist in Abb. 5 dargestellt. Der Deichkörper ist aus feinsandigem bis kiesigem Grobsand hergestellt und hat eine Böschungsneigung von 1:3 an der Wasser- sowie Landseite. Die unbefestigte Deichkronenbreite beträgt 2,50 m. Die Deichanlagen an der Jeetzel haben auf lange Strecken keinen Deichverteidigungsweg<sup>1</sup>.

In Abb. 6 ist ebenfalls ein Deichabschnitt an der Jeetzel dargestellt. Der Deichkern besteht aus Mittelsand und die wasserseitige Böschungsneigung verläuft zunächst flach im Verhältnis 1:3,25 im unteren Bereich des Deichkörpers und steigt dann steil zur Deichkrone hin im Verhältnis 1:2 an. Auch die landseitige Böschung fällt zunächst steil im Verhältnis 1:2 ab und läuft dann sehr flach ins Landesinnere 1:12,5 ab. Somit wird die Deichlagerbreite sehr breit.

<sup>1</sup>[http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/zulassungsverfahren/hochwasserschutz/jeetzel\\_2\\_planung\\_sabschnitt/45511.html](http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/zulassungsverfahren/hochwasserschutz/jeetzel_2_planung_sabschnitt/45511.html) (abgerufen im August 2015)

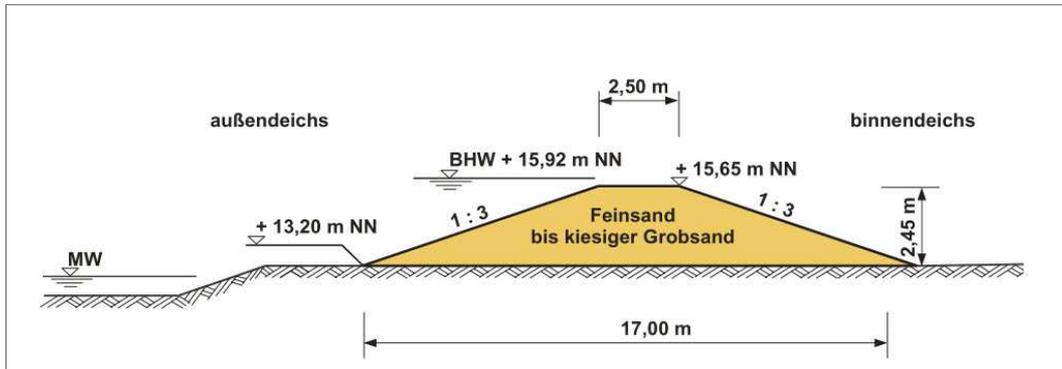


Abb. 5: Altdeich des Jeetzeldiichverbandes (Deich-km 21+740) (MÜLLER, 2006)

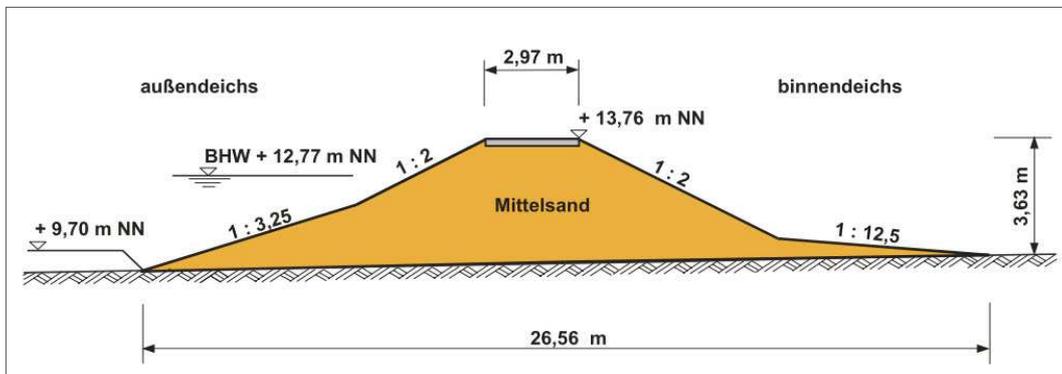


Abb. 6: Altdeich des Neuhauser Deich- und Unterhaltungsverbandes (Deich-km 31+000) (MÜLLER, 2006)

Die Deiche an den Elbnebenflüssen Aland, Seege, Sude, Krainke und Rögwitz weisen Profile auf, die dem einfachen Aufbau des bis zum Jahr 1965 ausgeführten Altdeichs nach Abb. 7 entsprechen (NLWKN, 2006). Der Deichkörper besteht aus einem Sandkern, der sowohl wasserseitig als auch landseitig eine Böschungsneigung von 1:1,5 bis 1:3 hat. Die Deichkrone weist eine Breite von 3,0 m bis 5,0 m auf (NLWKN, 2006).

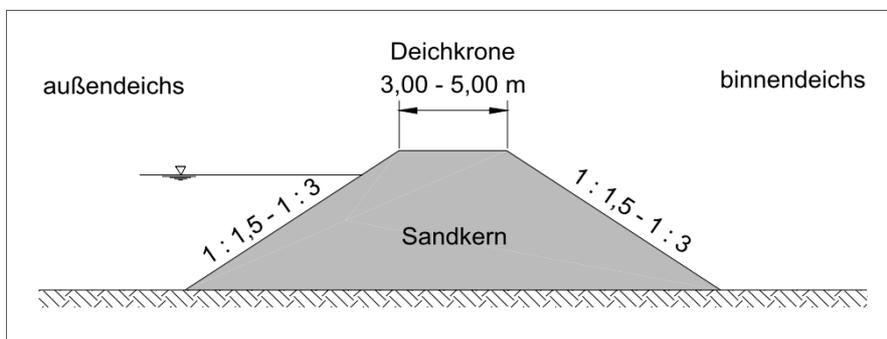


Abb. 7: Altdeichprofil an der unteren Mittel-elbe und deren Rückstaudeichen (NLWKN, 2006)

Zuwegungen zu den Deichen sind häufig nur unzureichend vorhanden. Die Deiche wurden ohne Deichverteidigungsweg ausgestattet, was die Deichverteidigung im Katastrophenfall zusätzlich er-

schwert. Im Bereich des Neuhauser Deich- und Unterhaltungsverbandes bestehen noch rund 31% der Elbedeiche aus Altdeichen, die teilweise noch über eine Kronenbreite von 2 bis 3 m verfügen (NLWKN, 2006).

Im Folgenden wird ein Altdeich an der Elbe näher beschrieben. Der Deich befindet sich im Landkreis Prignitz oberhalb von Wittenberge am Rühstädter Bogen. Der Deichabschnitt umfasst eine Länge von rund 12 km und reicht von Elb-km 440 bis Elb-km 452. Der betrachtete Deichabschnitt wird aktuell saniert; die Sanierungsarbeiten und die Erhöhung der brandenburgischen Elbedeich sollen bis 2020 abgeschlossen sein<sup>2</sup>. Für die Sanierung des Deichabschnitts wurde ein Bodengutachten auf der Basis von Bohrsondierungen im Altdeich erstellt. Durch die Bohrsondierungen an verschiedenen Lokationen konnte das dortige Deichquerschnittprofil konstruiert und Aufschluss über die dortigen Bodenkennwerte gegeben werden.

In Abb. 8 ist das Querschnittprofil an Deich-km 3+200 bzw. am Elb-km 441,2 dargestellt. Der Deich besteht überwiegend aus stark schluffigen, schwach wasserdurchlässigen Böden. Unterhalb des Deichkörpers wird der Deich von der Landseite bis zur Wasserseite von einer bindigen Sicht durchzogen, die aus leicht plastischen bis plastischen Ton besteht, teilweise ist diese Schicht von leicht plastischem Schluff durchsetzt. Die bindige Schicht geht in wasserseitiger Richtung in schluffigen Sand über. Unter der Deichkrone bis zur landseitigen Flanke befindet sich in 7,0 m Tiefe eine rund 0,5 m starke Torfschicht. Unterhalb der Torfschicht ist eine Schicht enggestufter Sand in ungestörter Lagerung vorhanden. Der Deich ist mit einem 2,5 m breiten Deichverteidigungsweg ausgerüstet, der aus einer ungebunden Schotterdecke mit Fahrspuren besteht. Die Böschungsneigung dieses Deichabschnitts beträgt einheitlich rund 1:3.

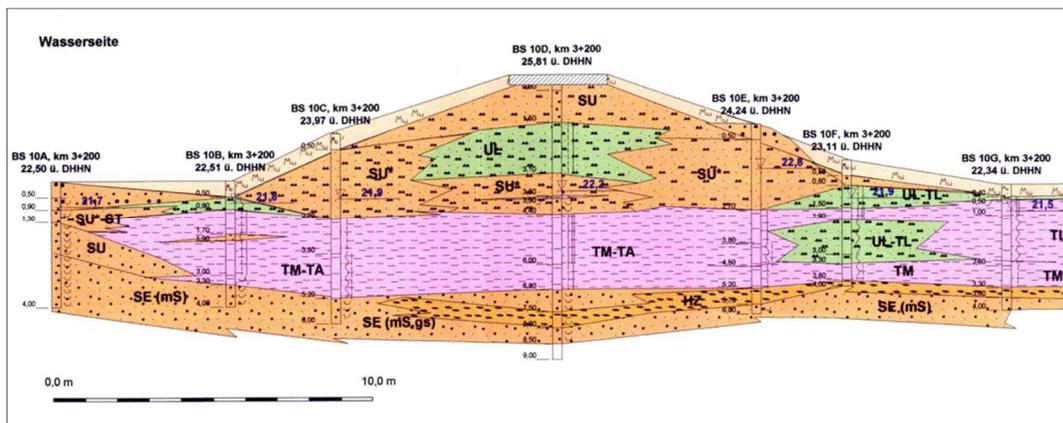


Abb. 8: Elbedeichprofil Deich-km 3+200 bzw. Elb-km 441,2 (LUGV, 2014)

Der Deichabschnitt in Abb. 9 bei Elb-km 446,2 besteht hauptsächlich aus stark schluffigen Sanden bis leicht plastischen Schluffen. In einer Tiefe von ca. 3,5 m unterhalb der Deichkrone wird der Deich von einer rund 1,0 m mächtigen leicht plastischen bis mittelpastischen Tonschicht durchzogen. Die Böschungsneigungen betragen auf der Wasserseite rund 1:3,5 und auf der Landseite ist im oberen Bö-

<sup>2</sup> <http://www.mlul.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.300897.de> (Stand: 15.02.2015)

schungsabschnitt eine starke Neigung von rund 1:1,3 vorhanden, die sich in Richtung Deichfuß zu einem Neigungsverhältnis von rund 1:3,5 abflacht. Auf der Deichkrone verläuft eine Kreisstraße mit einer Breite von ca. 5,50 m. Diese Straße wird im Fall eines Hochwassers auch als Deichverteidigungsweg genutzt (LUGV, 2014).

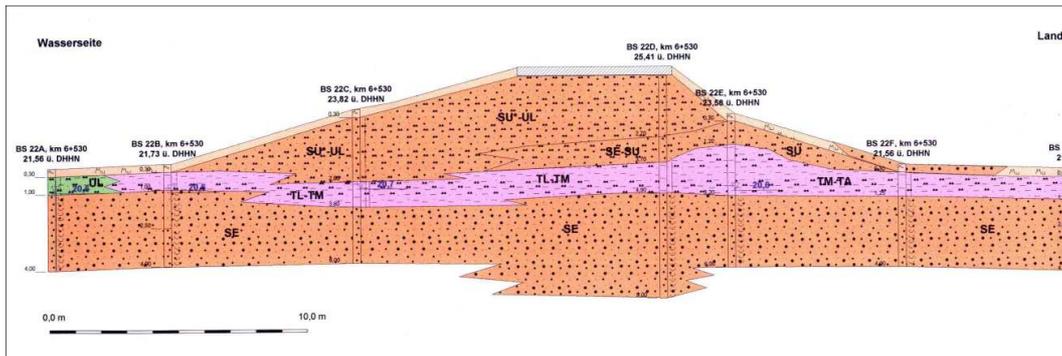


Abb. 9: Elbedeichprofil Deich-km 6+530 bzw. Elb-km 446,2 (LUGV, 2014)

Das Deichprofil bei Elbe-Km 451,5 (Abb. 10) war ursprünglich ein Leitdeich, der in den 1970-iger bis 1980-iger Jahren zum Winterdeich ausgebaut wurde. Der Deichkörper besteht überwiegend aus Sand, und zwar Mittelsand und Feinsand bis hin zu schluffigen, tonigen Sanden mit teilweise gestörter aber auch ungestörter Lagerung. Die Böschungsneigung an der Wasserseite hat das Verhältnis von 1:3,5 und steigt bis 1:3 zur Deichkrone hin an. Auf der Landseite hat die Böschung eine Neigung von rund 1:3,5. Auf der Deichkrone ist eine ungebundene Schotterdecke mit Fahrspuren als Deichverteidigungsweg mit einer Breite von 3,50 m vorhanden.

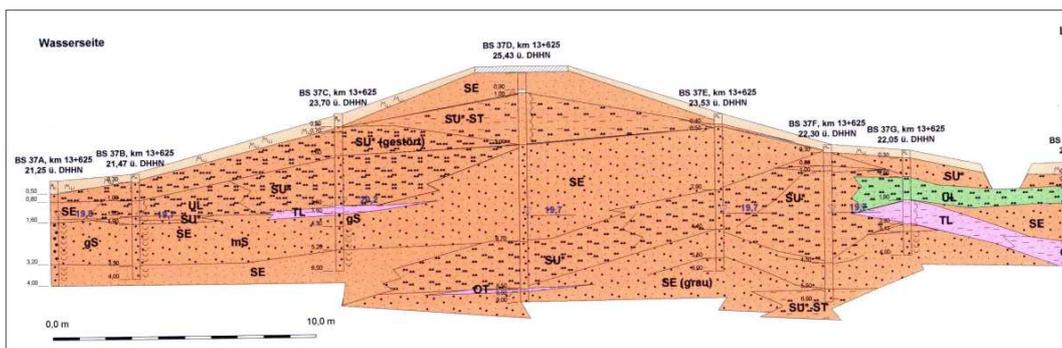


Abb. 10: Elbedeichprofil Deich-km 13+625 bzw. Elb-km 451,5 (LUGV, 2014)

#### 4.2.2 Deiche an der Mulde

Der Bestandsdeich bei Greppin (Bitterfeld-Wolfen) ist ca. 2,3 km lang und schützt die Ortschaft Greppin vor Hochwasser aus der Mulde (Abb. 11). Das Regelprofil des Greppiner Deiches variiert in seinem Aufbau bezüglich der Anordnung und Ausbildung des Deichverteidigungswegs sowie der Böschungsneigungen und Deichkronenbreite. Von der Station 0+150.0 bis 0+900.0 verläuft die ca. 3,0 m breite asphaltierte Deichverteidigungsstraße auf einer Berme an der Landseite entlang (Abb. 12). Das Böschungsverhältnis der landseitigen Berme beträgt 1:2,5. Die Deichverteidigungsstraße weist ein Gefälle von 3,5 % zur Landseite hin auf. Die landseitige Böschung von der Deichverteidigungsstraße

zur Deichkrone hin hat ein Steigungsverhältnis von 1:2,5. Die Deichkrone weist eine Breite von rund 2,0 m und ein leichtes Gefälle zur Wasserseite hin auf. Die wasserseitige Böschungsneigung hat ein Verhältnis von 1:4,5. Am wasserseitigen Deichfuß verläuft ein kleiner Schotterweg (Abb. 12).



Abb. 11: Übersicht über den Verlauf des Greppiner Deich zum Schutz gegen Hochwasser der Mulde

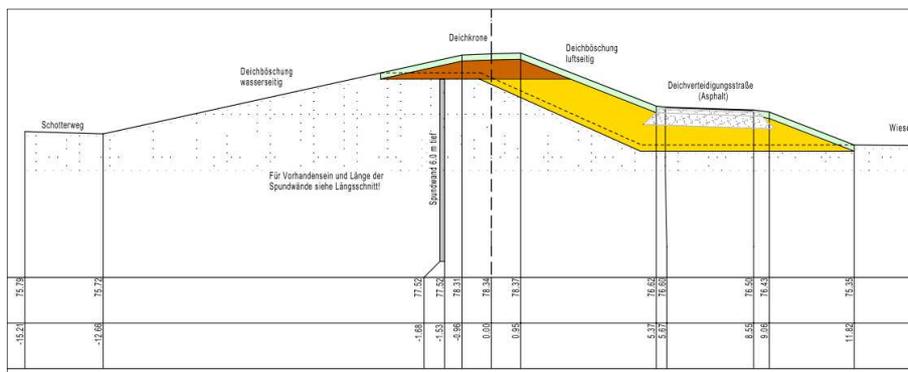


Abb. 12: Regelprofil Greppiner Deich, Station 0+150.0 bis 0+900.0<sup>3</sup>

Beim Deichprofil von Station 1+000.0 bis 1+060.0 (Abb. 13) verläuft die asphaltierte Deichverteidigungsstraße mit einer Breite von ca. 5.00m als Straße „Am Anlegerteich“ auf der Deichkrone. Die Deichverteidigungsstraße hat ein Gefälle von rund 2,5% bis 3,0% zur Wasserseite hin. Die wasserseitige Böschungsneigung hat ein Verhältnis von 1:3 und die landseitige Böschung von 1: 2,5. Unmittelbar hinter dem Deich befindet sich ein bebautes Wohngebiet. Der Belag der Deichverteidigungsstraße bei Station 1+060.0 bis 1+200.0 ändert sich von einer befestigten asphaltierten Straße zu einer unbefestigten Schotterstraße mit einer Breite von 3,50 m. Unmittelbar hinter dem Deich befindet sich das Wasserwerk der Region (Abb. 14). Die Lage der Deichverteidigungsstraße verlagert sich ab Station 1+200.0 bis zum Ende der Deichstrecke auf die Landseite und verläuft am Deichfuß entlang. Zunächst bis Station 1+450.0 als unbefestigte Schotterstraße (Abb. 15), die dann als befestigte asphaltierte 'Muldestraße' mit einer Breite von rund 3,0 m bis Station 1+675.0 verläuft (Abb. 16). Von Station

<sup>3</sup> Quelle: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt

1+675.0 bis 2+075.0 verfügt das Deichprofil über eine Kronenbreite von rund 2,0 m. Die Deichverteidigungsstraße verfügt in diesem Bereich über zwei asphaltierte Fahrstreifen von je 1,0 m breite, die auf einer Berme auf der Landseite angeordnet sind (Abb. 17). Das Böschungsverhältnis wasserseitig beträgt 1:3, dasjenige auf der Landseite 1:2,5 bis zur Berme und 1:3 von der Berme zum Deichfuß. Von Station 2+075.0 bis 2+245.8 ist kein Deichverteidigungsweg vorhanden. Die Deichkronenbreite beträgt hier ebenfalls 2,0 m. Die Böschungsneigungen haben auf der Land- wie auf der Wasserseite das Verhältnis von 1:3. Das Hinterland ist in diesem Bereich etwas erhöht, was sich positiv auf die Deichstabilität auswirkt (Abb. 18).

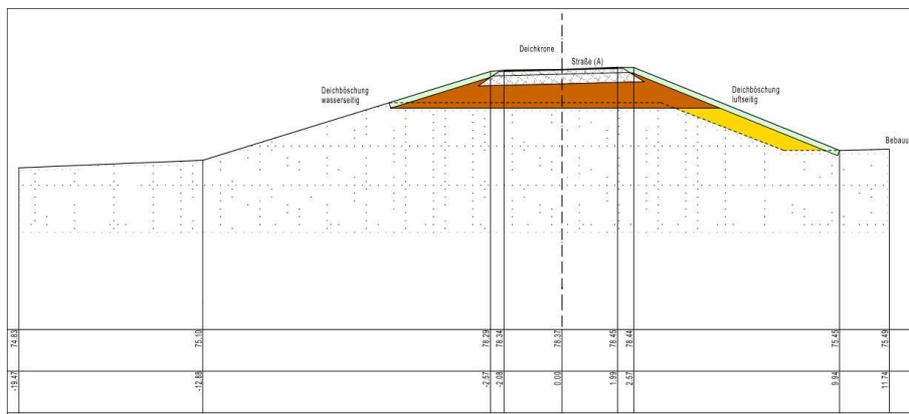


Abb. 13: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+000.0 bis 1+060.0<sup>4</sup>

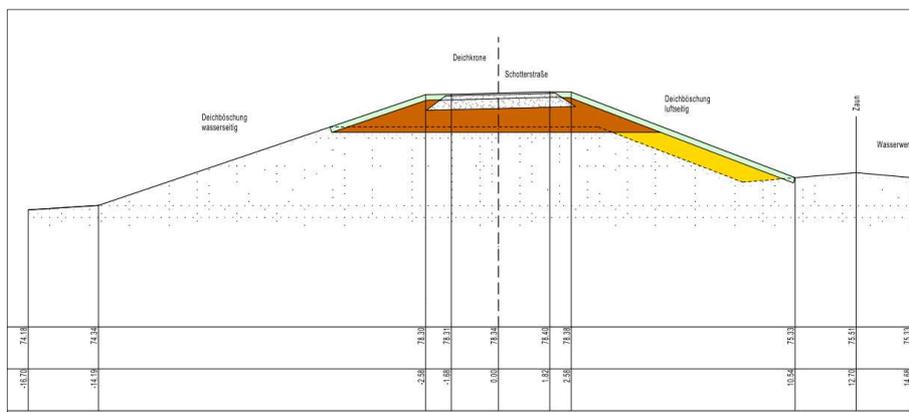


Abb. 14: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+060.0 bis 1+200.0<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Quelle: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkudung - DeichKADE

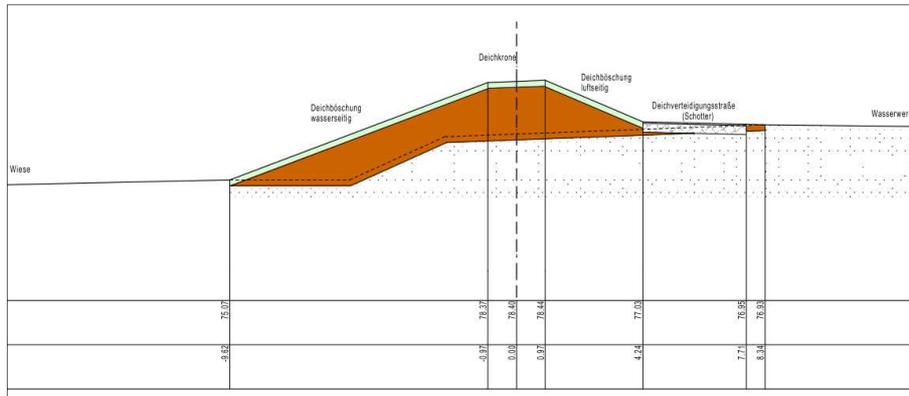


Abb. 15: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+200.0 bis 1+450.0<sup>4</sup>

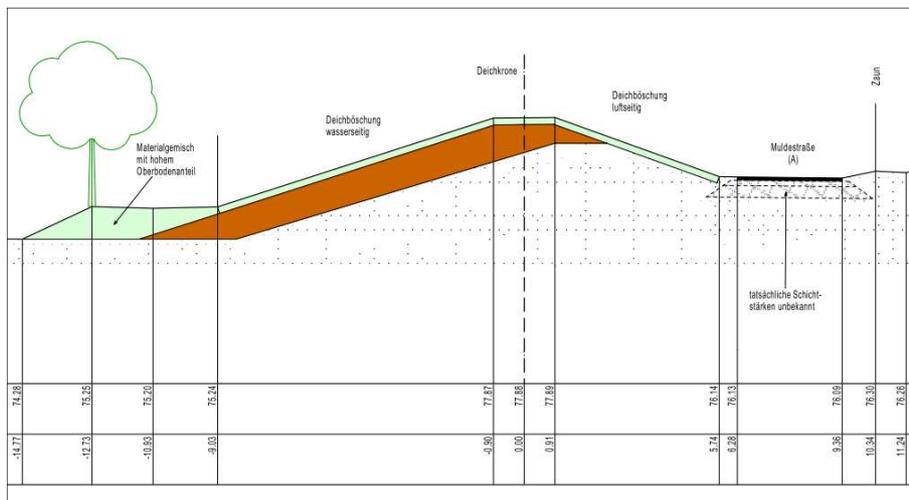


Abb. 16: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+450.0 bis 1+675.0<sup>4</sup>

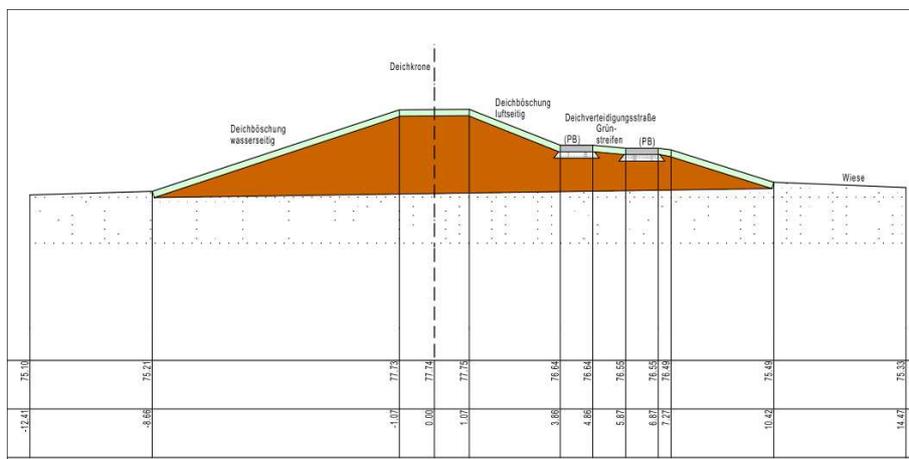


Abb. 17: Regelprofil Greppiner Deich Station 1+675.0 bis 2+075.0<sup>4</sup>

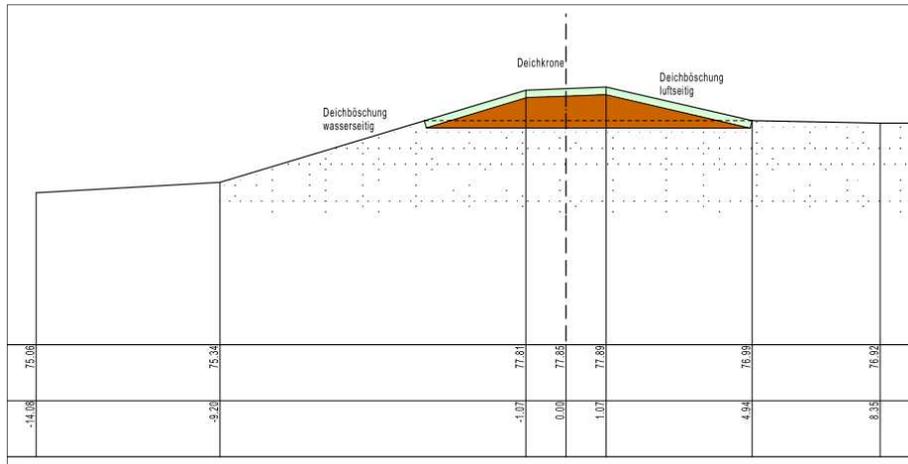


Abb. 18: Regelprofil Greppiner Deich Station 2+075.0 bis 2+245.8<sup>4</sup>

#### 4.2.3 Deiche an der Mittelweser

Der Weserdeich bei Ahsen-Oetzen wurde in den 1965 Jahren gebaut. Das seinerzeit verwendete Deichbaumaterial bestand aus einem Gemisch aus Schluff, Sand und Ton. Der Deichabschnitt (Abb. 19) hat an der Station 4,830 eine Deichkronenbreite von 2,0 m, die Böschungsneigungen auf der Wasser- wie auf der Landseite haben ein Verhältnis von 1:2,5. Unmittelbar hinter dem Deich befindet sich ein asphaltierter Weg, der zur Deichverteidigung befahren werden kann. An der Station 5,030 verändert sich das Profil dahingehend, dass die Deichkrone mit 2,5 m breiter wird. Die Böschungsneigung zur Wasserseite hin hat an dieser Stelle ein Verhältnis von 1:3. Auf der Landseite verläuft das Deichprofil beginnend vom Deichfuß aus in Richtung Deichkrone mit einer Berme, auf der sich ein 3,0 m breiter, asphaltierter Deichverteidigungsweg befindet. Die Böschungsneigung der Berme hat ein Verhältnis von 1:2. Im Anschluss an die Berme steigt die Böschung weiter im Verhältnis von 1:2 in Richtung Deichkrone an. (Domzig, 1965).



Abb. 19: Weserdeichabschnitt bei Ahsen-Oetzen Station 4+700 bis 5+00

#### 4.2.4 Reedeich an der Ochtum in Bremen

Der ca. 800m lange Reedeich bei Bremen-Woltmershausen (Abb. 20) ist Ende der 1980-iger und Anfang der 1990-iger Jahre erhöht worden. Der Reedeich schützt das Hinterland vor Hochwasser aus der Grollander Ochtum. An der Station 0+0635 hat die wasserseitige Böschung ein Steigungsverhältnis von 1:3. Die Deichkornbreite beträgt an dieser Stelle 5,0 m. Auf der Deichkrone befindet sich eine asphaltierte Straße, die zur Deichverteidigung genutzt werden kann. Auf der Landseite ist an dieser Stelle ebenfalls ein asphaltierter Weg angeschlossen, der von der Landseite über eine leichte Schräge auf den Deich führt. Bei Station 0+300 führt eine kleine Brücke über die Neuenländer Wasserlöse, in deren Verlängerung sich nach einem asphaltierten Deichverteidigungsweg ein kleiner Deich befindet, dessen Deichkronenhöhe bei 5,00m NN liegt. Die Böschungsneigung des Deiches hat in Richtung Brücke (zur Wasserseite hin) ein Steigungsverhältnis von 1:2. Die Deichkronenbreite beträgt an dieser Stelle 1,0 m und die landseitige Böschung neigt sich in Verhältnis von ca. 1:3 ins Hinterland (Abb. 21). Bei Station 0+550 beträgt die Böschungsneigung 1:2,5 auf der Wasser zugewandten Seite, die Deichkronenbreite beträgt 4,0 m. Auch an dieser Stelle ist auf der Deichkrone ein asphaltierter Deichverteidigungsweg vorhanden. Die zum Wasser abgewandte Böschung hat eine Steigungsverhältnis von 1:3. An dieser Stelle ist dem Deich eine 3,0 m breite Berme vorgelagert, an der sich ein Entwässerungsgraben anschließt (Abb. 22).



Abb. 20: Der Reedeich bei Bremen (Woltmershausen) von Station 0+000 bis 0+800

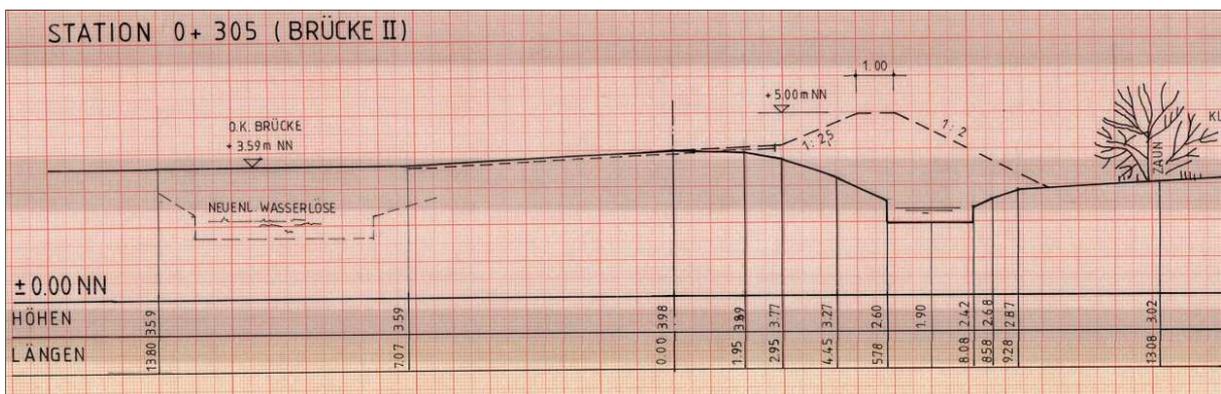


Abb. 21: Der Reedeich bei Bremen (Woltmershausen) bei Station 0+305 (BDLW, 2015)

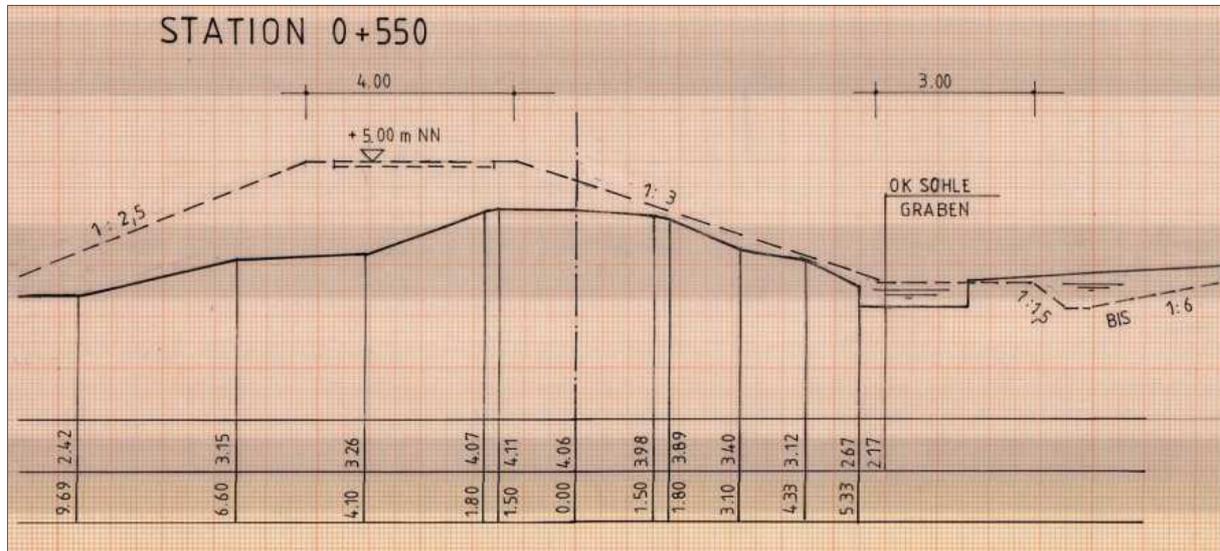


Abb. 22: Der Reedeich bei Bremen (Woltmershausen) bei Station 0+550 (BDLW, 2015)

#### 4.2.5 Ausgewählte Querschnitte von Altdeichen im Vergleich

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 Verbindung 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.

In Abschnitt 4.2 sind beispielhaft einige Deichquerschnitte aufgeführt, die einen Eindruck von den unterschiedlichen Deichaufbauten geben. 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.

## 5 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:

- Vorseuchte 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.

Anhand einiger Beispiele werden im Folgenden mögliche Hochwasserverläufe in deutschen Binnen-  
gewässern erläutert / vorgestellt. Hierzu werden Wasserstandsganglinien des Ober- und Mittellaufs  
der Elbe, des Ober- bis Unterlaufs der Oder und des Bodensees behandelt.

In Abb. 23 sind die Wasserstandsganglinie des Pegels Dresden im Jahr 2002, ausgewählte histori-  
sche Höchstwasserstände sowie die Niederschlagshöhen ausgewählter Niederschlagsstationen im  
Einzugsgebiet oberhalb Dresdens dargestellt. Im Jahr 2002 sind am Pegel Dresden sämtliche histori-  
schen Höchstwasserstände überschritten worden. Innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden erfolgte  
ein Wasserstandsanstieg von bis zu 180 cm und somit ein Wechsel im vierstufigen Alarmplan von der  
Alarmstufe 2 (Behördliche Kontrolle überschwemmungsgefährdeter Gebiete) zur Alarmstufe 4 (Kata-  
strophenfall).

Vergleichbare Wasserstandsanstiege sind an der Elbe auch im Frühjahr 2006 registriert worden (Abb.  
24), jedoch ist der Höchstwasserstand in Dresden 2006 um rund 2 m niedriger als 2002 aufgelaufen.  
Im Unteren Mittellauf der Elbe, z.B. in Hitzacker, wurden 2006 und 2013 dagegen höhere Höchstwas-  
serstände als 2002 erreicht (IKSE, 2007; IKSE, 2014).

Die Wasserstandsganglinien des Elbezuflusses Vereinigte Mulde der Jahre 1954, 1974 und 2002  
zeigen (Abb. 25), dass die Anstiegsraten sowie die erreichten Höchstwasserstände der betrachteten  
Hochwasserereignisse sehr unterschiedlich sind. Während zwischen Erreichen der Alarmstufen 1 und  
4 bei den beiden früheren Hochwasserereignissen zumindest ein Zeitraum von 24 Stunden verging,  
ist dies beim Hochwasser 2002 bereits nach 10 Stunden erfolgt.

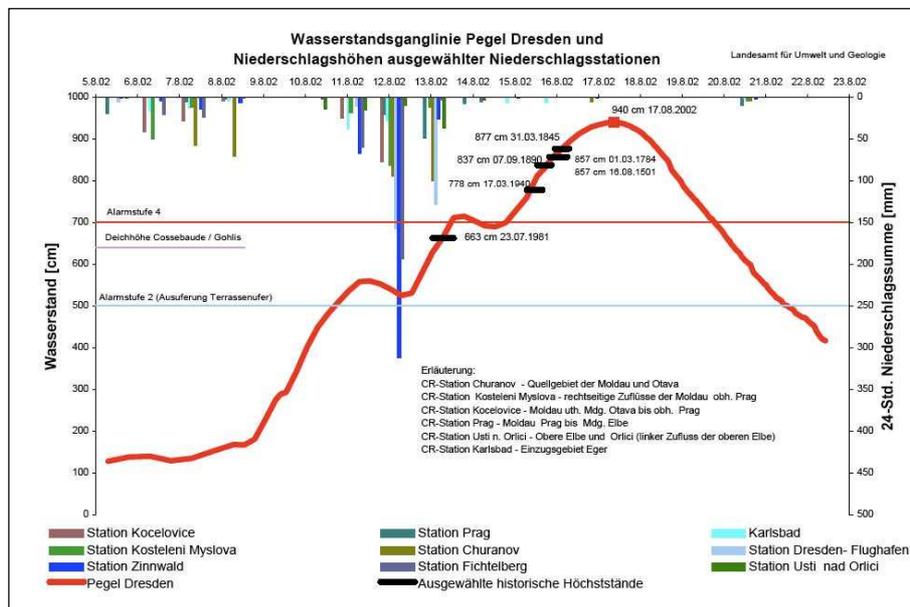


Abb. 23: Niederschlagshöhen im Dresdener Elbe-Einzugsgebiet und Anstieg des Elbewasserstands in  
Dresden im Jahr 2002 (SLUG, 2006).

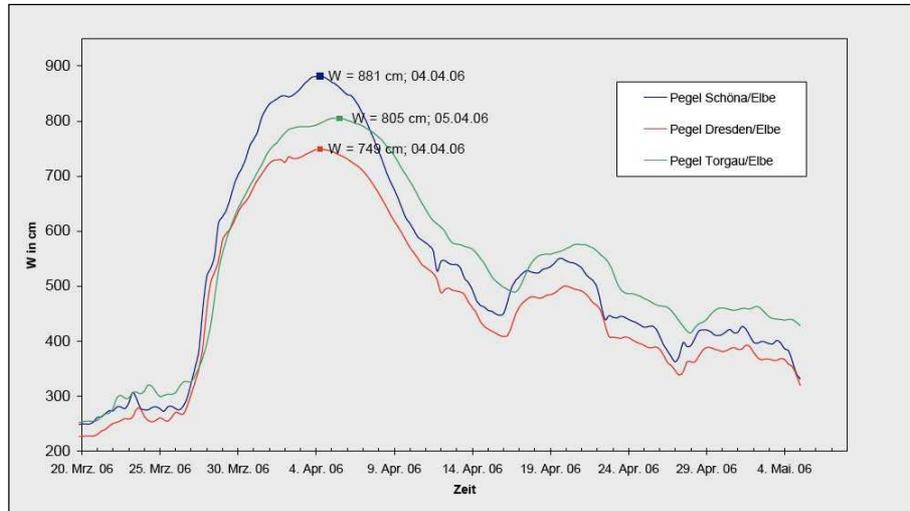


Abb. 24: Wasserstandsganglinien des Frühjahrshochwassers der Elbe des Jahres 2006 an den Pegeln Schöna, Dresden und Torgau (Reihenfolge von oberstrom nach unterstrom) (SLUG, 2006)

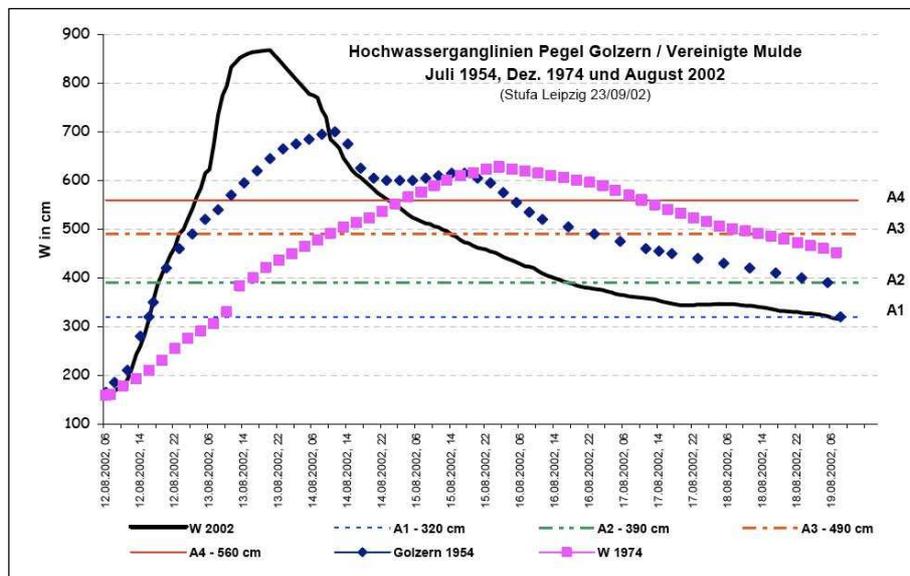


Abb. 25: Wasserstandsganglinien der Hochwasserereignisse der Jahre 1954, 1974 und 2002 der Vereinigten Mulde am Pegel Golzern sowie Richtwasserstände der Alarmstufen 1 bis 4 (SLUG, 2006)

Die beim Sommerhochwasser 1997 aufgenommenen Wasserstandsganglinien vom Oberlauf der Oder am Pegel Miedonia bis zum Unterlauf der Westoder am Pegel Gartz zeigen, dass die Wasserstandsanstiege im Oberlauf steiler als im Unterlauf verlaufen (Abb. 26). Dies gilt tendenziell für jedes Flusssystem in Deutschland.

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkudung - DeichKADE

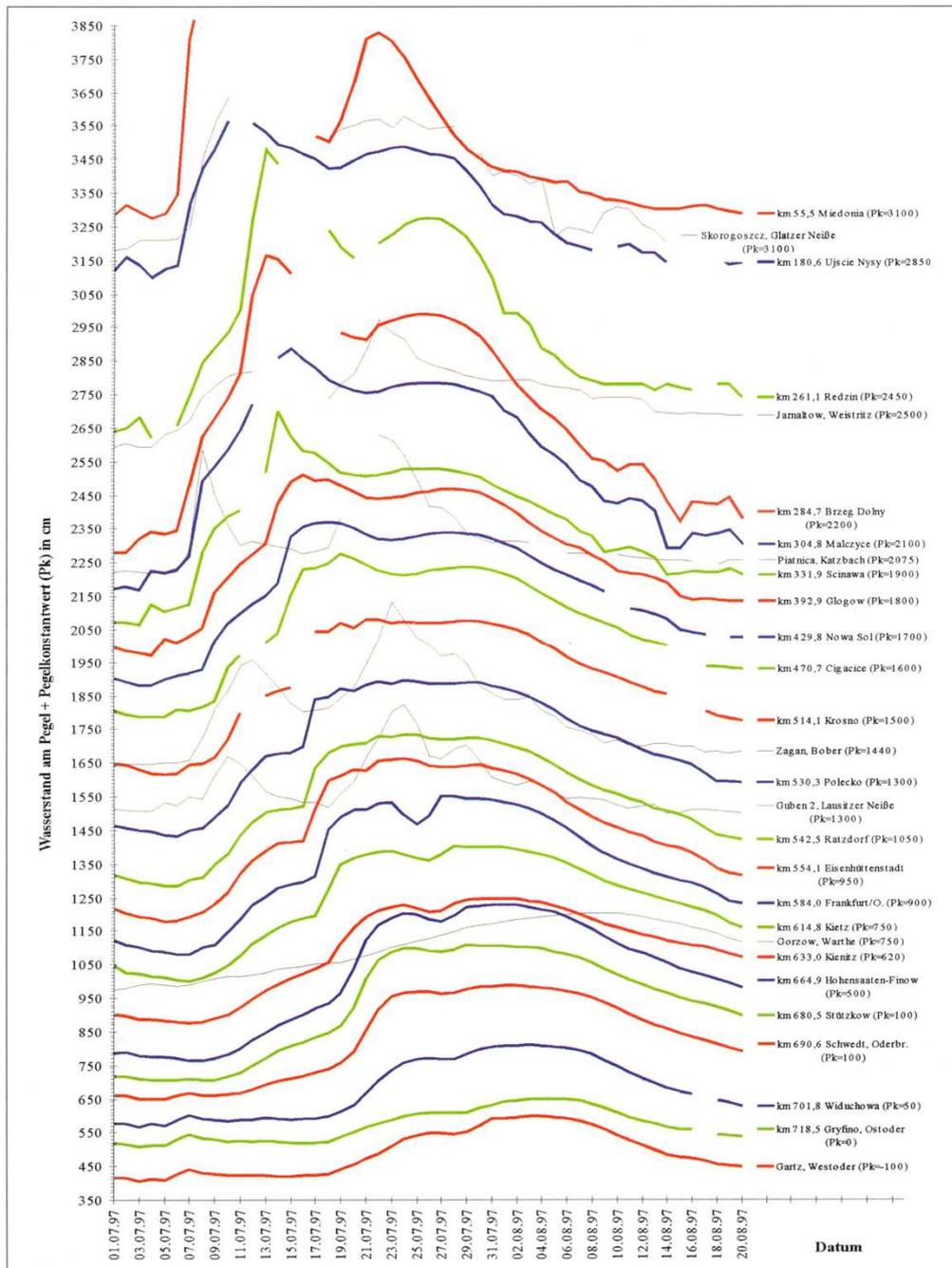


Abb. 26: Wasserstandsganglinien der Oder und ausgewählter Nebenflüsse während des Sommerhochwasser 1997 (LUA, 1998)

In Abb. 27 ist die Wasserstandsganglinie der Elbe am Pegel Artlenburg in der unteren Mittel-Elbe bei Eisstand (die Eisschollen fließen nicht nach unterstrom ab) dargestellt. Der Eisstand beginnt im ablaufenden Ast eines mittleren Hochwasserereignisses und führt zu einem steilen Anstieg des Wasserstands von 170 cm innerhalb von 26 Stunden.

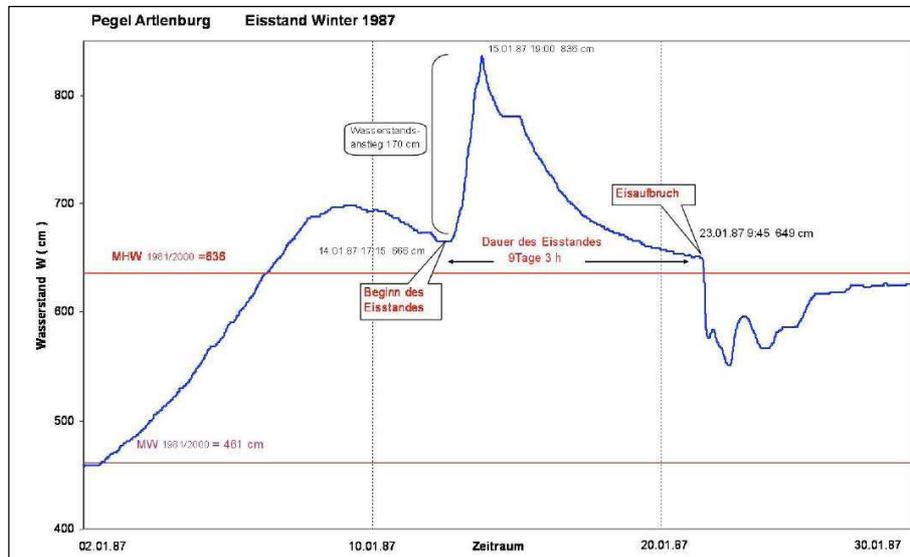


Abb. 27: Ganglinie des Eishochwassers 1987 am Pegel Artlenburg, Elbe (NLWKN, 2006)

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.

## 6 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.

## 6.1 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. 28).

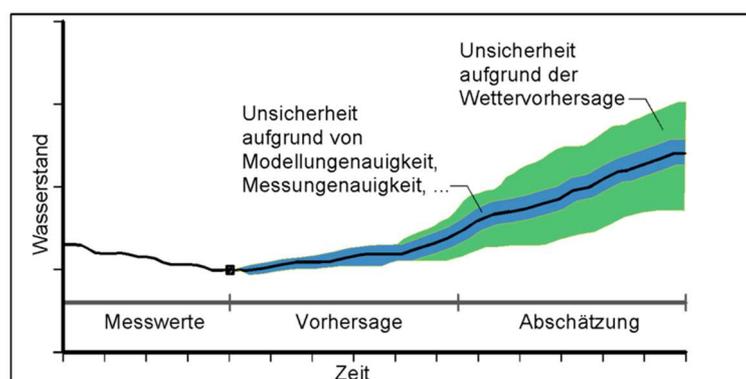


Abb. 28: Zunahme der Unsicherheiten in der Wasserstandsvorhersage mit zunehmender Vorhersagezeit

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.

## 6.2 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.

### 6.3 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
- Untergrundaufbau

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. 29), 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.

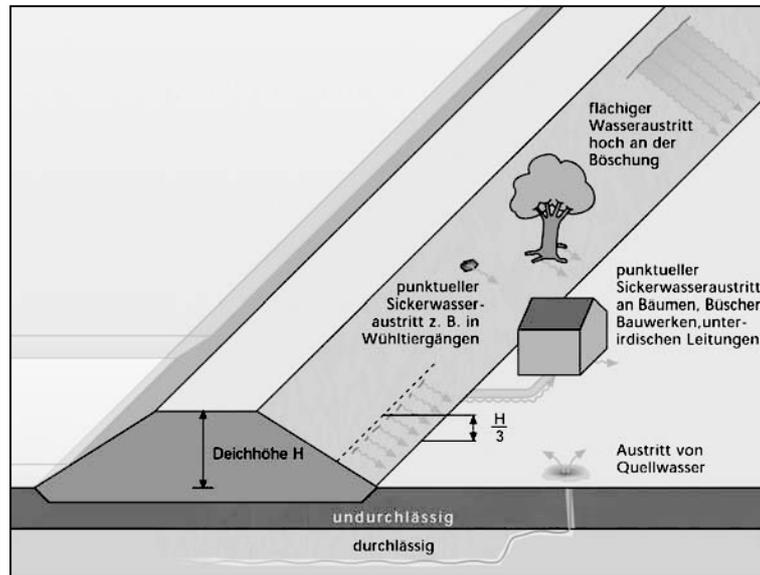


Abb. 29: Sickerwasseraustritte an einem Deich (RD, 2006)

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.

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 (Abb. 30). Somit müssen zur Sicherung eines Deichs bei drohender Überströmung der Deichkrone Deichaufkadungen, sogenannte Deichaufkadungen, zur Verhinderung eines Wasserüberlaufs eingesetzt werden.



Abb. 30: Deichbruch bei Aurith, Ziltendorfer Niederung während des Oderhochwassers 1997 (Foto: Manfred W. Jürgens)

#### 6.4 Deichverteidigung per Aufkantung mit Sandsäcken

Zur Aufkantung von Deichen bei Gefahr des Eintritts von über die Deichkrone tretenden Wasserständen werden bisher fast ausschließlich Sandsäcke eingesetzt; in seltenen Fällen werden Aufkantungen 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 Deichaufkantung 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 Aufkantung standhalten muss, verringert. Aus diesem Grund sind besiedelte Gebiete, die bei einem Deichbruch gefährdet sein könnten, vor Aufkantung zu evakuieren. Ebenfalls ist überzähliges Personal aus dem Gefährdungsbereich abzuführen und das für die Arbeiten erforderliche Personal ist ausreichend zu sichern und Rückzugswegen sind frei zu halten. Aufkantungen sind zudem immer von Fachleuten zu planen und zu begleiten, da sich grundsätzlich eine Gefahrensituation durch Aufkantung verschärfen kann.

Aufkantungen werden in der Regel mit Sandsäcken oder einer Kiesschüttung durchgeführt (Abb. 31). Letztere kann mit durch Sandsäcke beschwerte Folien gedichtet werden. In der Regel ist jedoch eine Sandsackaufkantung 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.

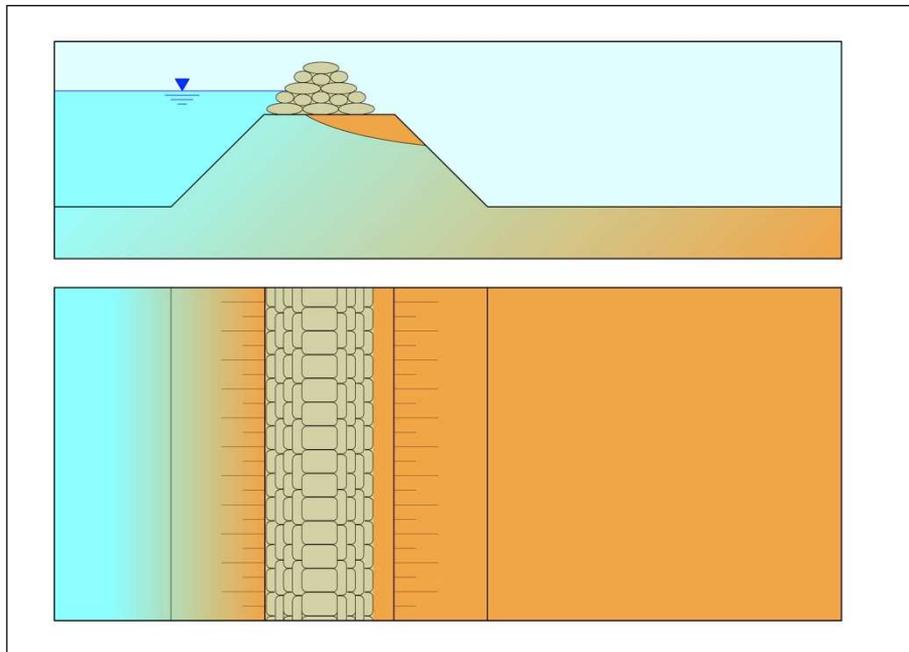


Abb. 31: Aufkadeungen mit Sandsäcken

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 Herausforderung 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 Deichverteidigung stellt die große Anzahl erforderlicher Helfer auf dem ohnehin schon geschwächten Deich ein Problem dar (Abb. 33). Die oft steilen Böschungen werden belastet und die Grasnabe wird geschwächt.

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 war<sup>5</sup> (Abb. 33).



Abb. 32: Aufkragungen aus Sandsäcken am Elbedeich bei Hitzacker im Juni 2013 (Foto: Bärbel Koppe)



Abb. 33: Erschwerte Deichverteidigung aufgrund fehlender Verteidigungswegen während des Jeetzelhochwassers 2002<sup>6</sup>

Bei einer Erhöhung mit Sandsäcken ist die Lage der Sandsackreihen ausschlaggebend für die Dichtigkeit und Standsicherheit der Deichkade. Mit drei Sandsackreihen lassen sich Aufkragungshöhen von rund 30 cm und damit eine Stauhöhe von 25 cm erreichen (Abb. 34). Kann der Deich die zusätzlichen Lasten infolge einer Deichaufkragung sicher aufnehmen, kann eine Aufkragungshöhe von 50 cm erreicht 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).

<sup>5</sup>[http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/zulassungsverfahren/hochwasserschutz/jeetzel\\_2\\_planung\\_sabschnitt/45511.html](http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/zulassungsverfahren/hochwasserschutz/jeetzel_2_planung_sabschnitt/45511.html) (Stand 28.04.2015)

<sup>6</sup>[http://www.nlwkn.niedersachsen.de/live/institution/mediadb/mand\\_26/psfile/zoombild/34/Jeetzel4d341a1aeda47.bmp](http://www.nlwkn.niedersachsen.de/live/institution/mediadb/mand_26/psfile/zoombild/34/Jeetzel4d341a1aeda47.bmp) (Stand 28.04.2015)

Die Breite eines Sandsackdamms entspricht etwas der doppelten Höhe des Damms (Abb. 35). 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 (Abb. 36). Dies entspricht einer Menge von 35.000 Sandsäcken je km Aufkadeungslänge und somit einem Transport von rund 70 LKW-Ladungen gefüllter Sandsäcke (Tab. 1).

Das Gewicht eines gefüllten Sandsacks beträgt rund 20 kg trocken bzw. rund 30 kg wassergesättigt (Tab. 1). Somit beträgt die zusätzliche Auflast auf einem Deich infolge Aufkadeung je laufendem Meter 600 kg (trockene Sandsäcke) bzw. 900 kg (nach Einbau z.B. infolge Niederschlag wassergesättigte Füllung).

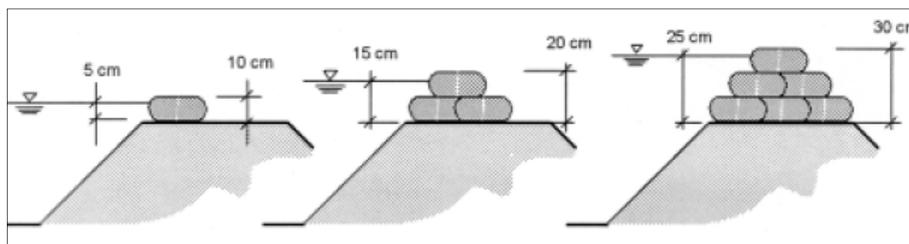


Abb. 34: Aufkadeungshöhen mit Sandsäcken (RD, 2006)

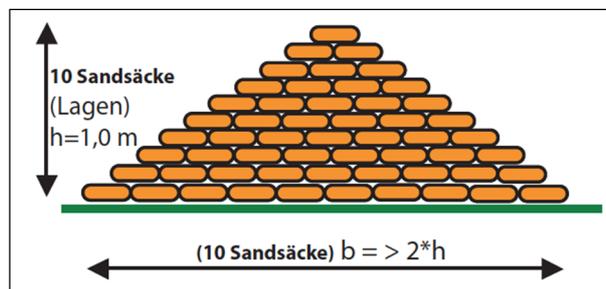


Abb. 35: Sandsackdamm, Verlegeart normale Stabilität (THW, 2007)

Allein für den Verbau der Sandsäcke am Einsatzort werden bei 50 zur Verfügung stehenden Helfern rund 12 Stunden bzw. bei einer Zeitvorgabe von 8 Stunden 55 Helfer an der Deichlinie benötigt (Abb. 36). Hinzuzurechnen ist der Transport der leeren Sandsäcke und des Sandes vom Vertriebsort bzw. vom Entnahmeort zur Füllstation, die Befüllung der leeren Sandsäcke sowie der Transport der befüllten Sandsäcke von der Füllstation zum Einsatzort. Für die Befüllung der Sandsäcke (Abb. 37) sowie für die Beladung der Transportmittel mit gefüllten Sandsäcken kann nochmals jeweils ein Einsatz von 80 Sandsäcken pro Person und Stunde und somit unter Einrechnung der erforderlichen Reservekräfte von jeweils 55 Helfern über eine Zeit von 8 Stunden ausgegangen werden. Hiermit sind ohne Einrechnung des Transports über Multicar oder LKW 165 Helfer über eine Zeit von 8 Stunden (entspricht 1.320 Arbeitsstunden) zur Befüllung, Beladung und Verlegung der erforderlichen 35.000 Sandsäcke für einen 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackdamm erforderlich.

### Berechnung des Kräfte- und Mittelbedarfs Hochwasserschutz - Sandsackverbau

#### Berechnung Sandsackbedarf für Sandsäcke ca. 40x70cm gefüllt zu 2/3

Datum/Zeit: **Dienstag 18.08.115 13:50:49** Einsatzort: **EOrt**

Damm	Sand		Sandsack - Standards	
Höhe in cm	Säcke pro m		Höhe	Stück
50	35		<p><b>Wichtig !</b> Die Sandsäcke müssen im Längs- und Querverbund gestapelt werden!</p>	30 cm
Länge in m	Säcke gesamt		50 cm	35 Säcke/m
1000	35000		100 cm	140 Säcke/m
Stärke	Menge gesamt im m <sup>3</sup>		200 cm	630 Säcke/m
100cm + 1Sack	875		300 cm	1260 Säcke/m
			400 cm	3500 Säcke/m

**Zeit- und Kräfteberechnung**    10Mann / Stunde = 800Sandsäcke    Reservekräfte ca.25%

Einsatzzeit	vorgabe Einsatzkräfte incl. 25% Reservekräfte		
Anzahl Einsatzkräfte 38	11.7 Stunden	13 Reservekräfte	50 Kräfte gesamt
Einsatzkräfte	vorgabe Einsatzzeit		
Anzahl Einsatzkräfte 55	8 Stunden	18 Reservekräfte	73 Kräfte gesamt

**Achtung !**  
Benötigte Kräfte zur Sandsackbefüllung sowie Zeiten für die Sandsackbefüllung und den Transport sind **nicht** berücksichtigt !

Abb. 36: Berechnung des Kräfte- und Mittelbedarfs für einen 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackdamm<sup>7</sup>

Tab. 1: Berechnungsgrundlagen Sandsäcke

Sandsackgewicht trocken <sup>8</sup>	rund 20 kg
Sandsackgewicht nass <sup>8</sup>	rund 30 kg
Sandsackvolumen <sup>8</sup>	rund 13 l
Sandsack pro Palette <sup>8</sup>	rund 70 Stück
Gewicht pro Palette <sup>8</sup>	rund 1,5 t
Ladekapazität LKW <sup>8</sup>	rund 10 t bzw. 500 Sandsäcke
Bewegen von Sandsäcken max. 10 m vom LKW <sup>8</sup>	80 Säcke pro Person und pro Stunde
Kosten pro Sandsack leer (MÜSSGENS, 2013)	0,10 bis 0,25 € (Kunststoff oder Jute), teilweise im Katastrophenfall bis zu 1,30 €
Kosten pro t Sand (Ansatz 1m <sup>3</sup> entspricht 1,8t) <sup>9</sup>	Rund 10 €/t exklusive Fracht
Frachtkosten Sand, Strecke 20 km <sup>9</sup>	Rund 0,50 €/t

<sup>7</sup> <http://www.thw-hamburg-nord.de/sandsackberechnung/>

<sup>8</sup> <http://www.thw-hamburg-nord.de/info/sandsack/sandsack.htm>

<sup>9</sup> laut Internetrecherche

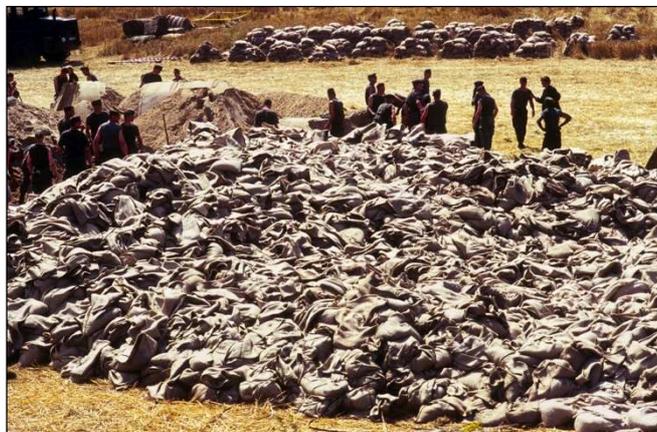


Abb. 37: Befüllung von Sandsäcken durch Soldaten der Bundeswehr während des Sommerhochwassers der Oder 1997 (Foto: Manfred W. Jürgens)

Für die Teilnahme organisierter Helfer wie diejenigen der Freiwilligen Feuerwehren, des THW oder der DLRG sind im Katastrophenfall Verdienstaufälle zu zahlen. Zur Berechnung wird der Brutto-Arbeitslohn zzgl. Arbeitgeberbeiträge herangezogen. Bei einem durchschnittlichen Bruttoarbeitslohn von 32.000 €<sup>10</sup> (Stand 2014) und einem Arbeitgeberanteil von rund 20%<sup>11</sup> beträgt der durchschnittliche Verdienstaufall pro Helfertag 155 €. Somit kostet der Bau eines 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackdamms unter Einsatz von Helfern mit Anrechnung des durchschnittlichen Verdienstaufalls rund 11.300 € (Ansatz 73 Helfer über 8 Stunden Einsatz, siehe Abb. 36). Nicht mit eingerechnet sind hierin Kosten für die Obere (Gesamtkoordination des Einsatzes) und Mittlere Führungsebene (Regelung des taktischen Einsatzes am Einsatzort) sowie für die Verpflegung und Unterkunft der Helfer. Unter Ansatz von 25 € pro Helfer und Tag Verpflegungs- und Unterkunftskosten und 5 € pro Helfer und Tag Organisationskosten betragen die Kosten für 73 Helfer rund 2.200 €.

Nach Tab. 1 sind als Materialkosten bei Ansatz von 0,20 €/Sandsack und 10,50 €/t gelieferter Sand für einen 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackdamm rund 23.500 € anzusetzen. Hinzu kommen die Transportkosten der Sandsäcke vom Füllplatz zum Einsatzort. In der Regel sind hier wegen der geringen Tragfähigkeit der Deichverteidigungswege kleine LKWs oder sogar Multicars einzusetzen. Ein Multicar weist eine Nutzlast von bis zu 2,9 t auf, womit rund 550 Fahrten per Multicar zum Transport der benötigten 35.000 Sandsäcke erforderlich wären. Beim Einsatz von LKWs mit 7,5 t Zuladung wären 210 Fahrten erforderlich und beim Einsatz von 12 t LKWs 130 Fahrten. Diese Frachtkosten betragen bei Ansatz einer Fahrtstrecke von 5 km und Frachtkosten von 5 €/t rund 8.000 €. In der Summe betragen die Kosten zum Bau eines 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackdamms somit gemäß der beschriebenen Abschätzung rund 45.000 €.

Sind während des Hochwassers Sandsäcke Mangelware und steigen zur Beschaffung von Sandsack und Füllmaterial im Verlauf eines Großschadensereignisses kontinuierlich die Preise (MÜSSGENS, 2013), stellt sich mit sinkenden Wasserständen das Problem des Rückbaus der verbauten Sandsäcke

<sup>10</sup> <http://de.statista.com/themen/293/durchschnittseinkommen/>

<sup>11</sup> <http://www.lohn-info.de/sozialversicherungsbeitraege2015.html>

und zwar in der Regel mit deutlich weniger Helfern als beim Aufbau (STEFFEN, 2013). Zudem können die verbauten Sandsäcke nicht wiederverwendet werden, egal ob sie mit Flusswasser oder nur mit Regenwasser in Berührung gekommen sind. Jute-Säcke verrotten innerhalb weniger Wochen und Kunststoff-Säcke werden durch UV-Einstrahlung soweit angegriffen, dass die Fasern brüchig werden. Darüber hinaus sind die Kosten für die Entsorgung der Sandsäcke hoch und lagen z.B. im Kreis Herzogtum Lauenburg nach dem Hochwasser 2013 bei rund 0,50 € pro Sandsack (GEORGE, 2013). Hiermit können die Entsorgungskosten ohne Berechnung der Lohnkosten für den Abbau für den betrachteten 0,5 m hohen und 1 km langen Sandsackwall 17.500 € kosten.

Auch bei geringeren Entsorgungskosten kann von Rückbaukosten in Höhe der Hälfte der Aufbaukosten von 45.000 € ausgegangen werden. Somit können die Kosten für den Bau und Rückbau einer 0,5 m hohen und 1 km langen Deichaufkantung aus Sandsäcken zu 67.500 € abgeschätzt werden unter Berücksichtigung von Material, Personal-, Transport und Entsorgungskosten. Hierbei kann je nach Einsatzort und Verfügbarkeit von freiwilligen Helfern von einer Spanne von 45.000 bis 120.000 € für den Bau und Rückbau des beschriebenen Sandsackdamms ausgegangen werden.

## 7 Anforderungen an wassergefüllte Schlauchkonstruktionen zur Deichaufkantung

Grundlage für die Analyse und Katalogisierung optimaler Produkteigenschaften zur Entwicklung einer mobil einsetzbaren Deichaufkantung 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.

Deichaufkantung, 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 Logistikressourcen 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 befüllte 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. 38).

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. 38: 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 vor-

handenen 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 6.4). 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 abschnittweisen 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 nicht überströmbar ausgeführt werden. 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 ( $45^\circ$ ) zur Deichlinie kleiner 200 m zu begrenzen (erste Schätzung, ist in Tests zu verifizieren).

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. 2 sind die an die zu entwickelnden wassergefüllten Konstruktionen zur Aufkantung von Deichen zu stellenden Forderungen und Restriktionen zusammengefasst.

Tab. 2: Zusammenfassung der obligatorischen und optionalen Forderungen an die zu entwickelnden wassergefüllten Konstruktionen zur Aufkantung 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	✓	

Forderung / Restriktion	obligatorisch	optional
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	✓	
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)	✓	

## 8 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 Synthetik kautschukbeschichtungen. 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 kleinformartige Applikationen wie Verstärkungen, Anbindungselemente für formgebende oder zugentlastende Konstruktionen an und im Behälter, Bestandteile von Armaturen und Beschlägen, 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

## 9 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
- Doppelelektroden 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. 39) 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. 39: Allzweckförderpumpe MAST NP 12 B

## 10 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. 40).
- 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. 41)
- Es wurden diverse Versuche zur Reißfestigkeit durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Geräte und Vorrichtungen verwendet (Zugmessgerät, Windenprüfstand, Prüfbecken)
- Zudem wurde ein vorhandener Prüfstand (Seecontainer wasserdicht) für die speziellen Projektanforderungen angepasst (Abb. 42). 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.
- Modelle der verschiedenen Baureihen wurden auf diesen Prüfständen aufgebaut und getestet.



Abb. 40: Zugstand zum Testen der Schweißnähte und des zu verarbeiteten Materials

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

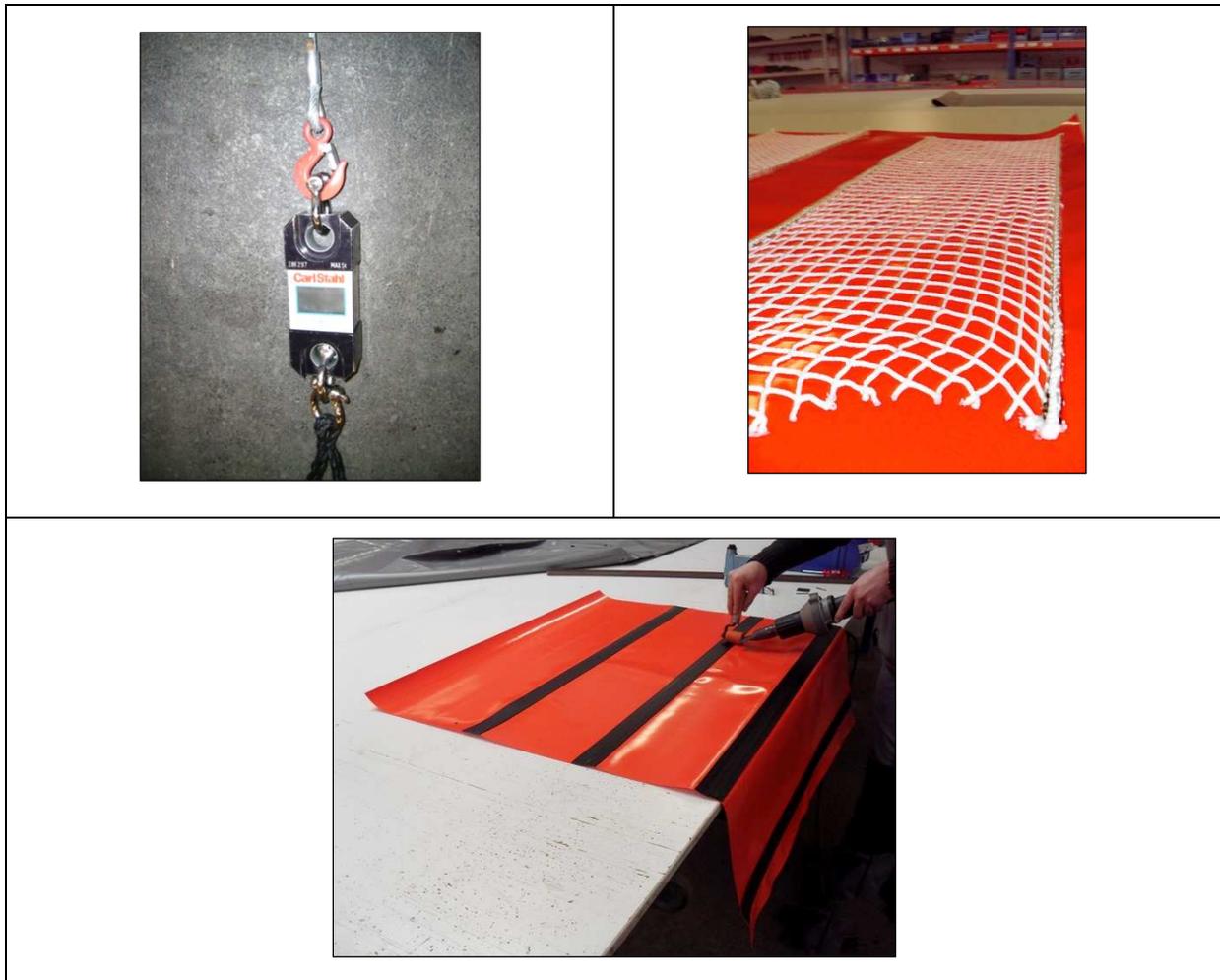


Abb. 41: Materialtest zur Haftfestigkeit und Abrasion auf Untergründen, Tests von Ertüchtigungen zur Bodenhaftung



Abb. 42: Seecontainer Anlieferung (oben links) und Originalausstattung (oben links, unten rechts) sowie nach dem projektgerechten Umbau (unten rechts) – Betriebshof DAEDLER

## 11 Erprobung möglicher Materialverbindungen

Technische Textilien werden in Standardbreiten und diversen Rollenlängen produziert. Für die Umsetzung jeglicher konstruktiver Formgebung werden Bahnen oder ausgeschnittene 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 Klebverfahren 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. 43):

- Schweißnähte und auch das verarbeitete Material selbst werden im Zugstand auf die im Datenblatt angegebenen Werte hin geprüft (Abb. 40). 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.

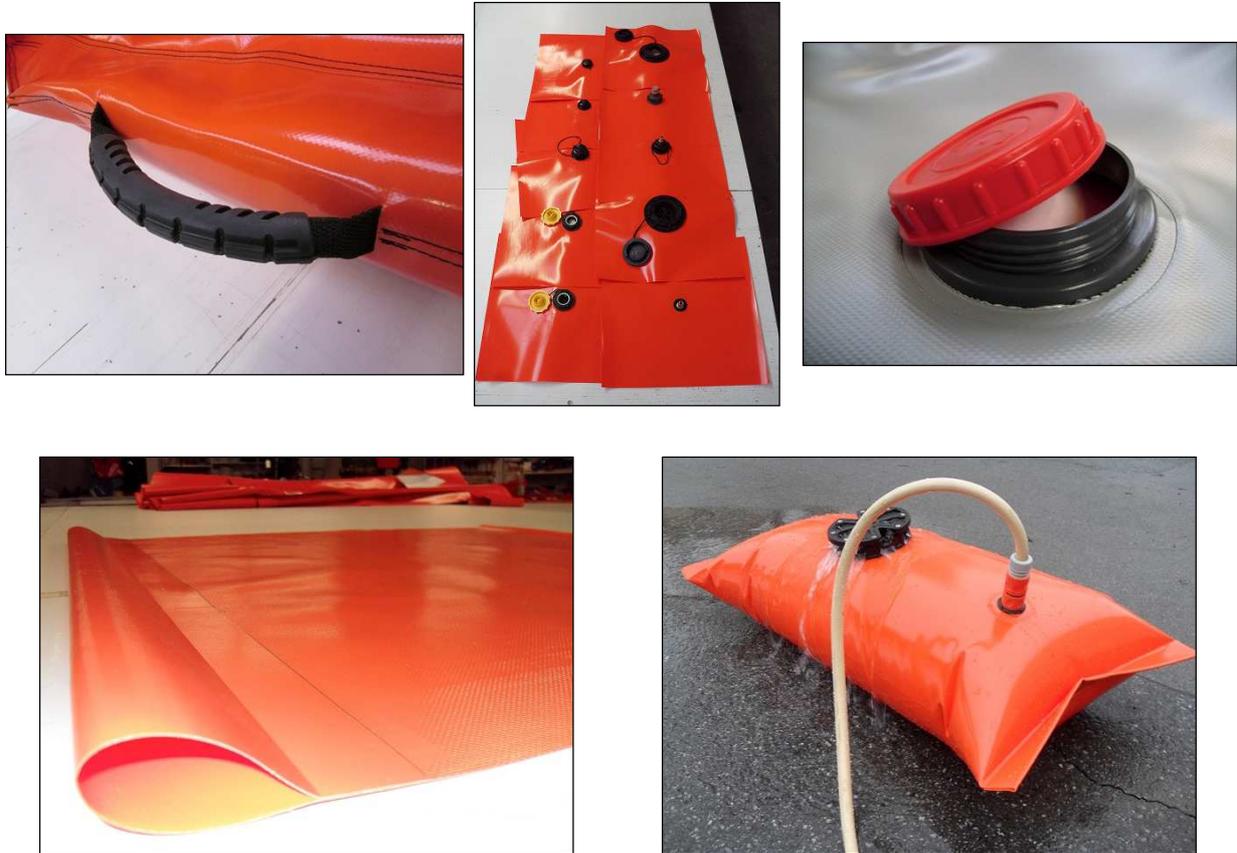


Abb. 43: Beispielhafte Erprobungen und Versuche für mögliche Materialverbindungen, im Bereich der äußeren Behälterhülle, den kleinformatischen Bauteilen, Armaturen und technischen Applikationen

## 12 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. 44). 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/m<sup>2</sup> 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 selbst erklärend 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. 45). 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. 46) 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. 47) 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 zuarbeitenden Dienstleistern eingestellt werden.



Abb. 44: PVC beschichtetes PES Gewebe mit einer Festigkeit von mindestens 3800/3800 N auf 5 cm

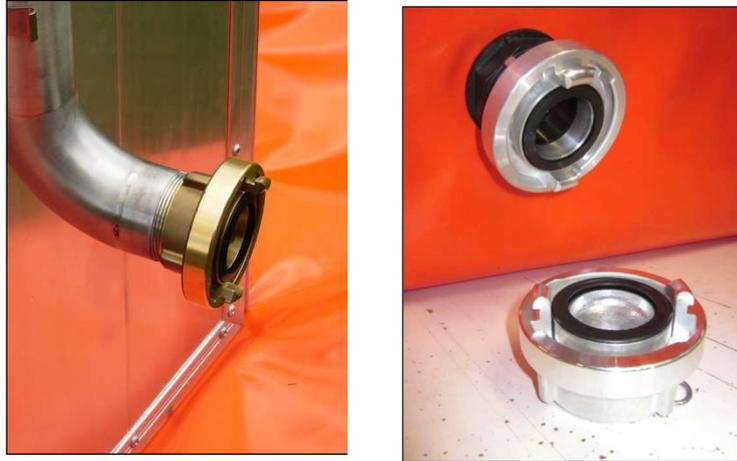


Abb. 45: Kupplungssystem STORZ



Abb. 46: Selbstdichtende Federdruckventile



Abb. 47: Transportsysteme

### 13 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. 48 dargestellt. Abb. 49 stellt einen Zwischenschritt bei der Konfektion des Behälters hinsichtlich der Herstellung der inneren Haltekonstruktion dar und in Abb. 50 ist der fertig konfektionierte Behälter mit Luftbefüllung dargestellt.



Abb. 48: Hochfrequenzschweißen der Innenkonstruktion der Außenhülle der trapezförmigen Behälterkonstruktion mit Haltetaschen für Karabinerhaken, Produktionshalle DAEDLER



Abb. 49: Konfektion des trapezförmigen Behälters hinsichtlich der Herstellung der inneren Haltekonstruktion, Produktionshalle DAEDLER



Abb. 50: Mit Luft gefüllter trapezförmiger Behälter, Produktionshalle DAEDLER

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 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 Schraubverschlüssen verformten sich unter Druck in der textilen Membranhülle und wurden undicht, Reißverschlüsse hielten bei Druckversuchen den Querkraften nicht stand (Abb. 51), 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. 51: 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 kleinformatischen 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. 52). Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- Formgebung ist vielversprechend. Gutes Verhältnis von Grundfläche zur Stauhöhe
- 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 Befüllungstuben versehen.

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE



Abb. 52: Test zweier aus drei Schläuchen mit Befülltüben bestehender Segmente im Testcontainer, Betriebshof DAEDLER

In einem nächsten Durchlauf wurden die gewonnenen Erkenntnisse verwertet und nochmals weiterentwickelt (Abb. 53, Abb. 54):

- Der untere Doppelkammerschlauch bekommt eine teildurchlässige Mittelnaht 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.

Aktuell steht eine weitere Modellreihe an, in die weitere Ideen und Anregungen der Projektpartner einfließen:

- 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 Befüllungsventile STORZ werden durch selbstschließende Federdruckventile ersetzt.
- Die Klemmschlösser werden durch Karabiner ersetzt.
- Die Entleerungstuben werden durch zusätzliche Klemmprofile verstärkt.

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

- Die Position der seitlichen Reißverschlüsse an den Verbindungsfahnen wird auf eine Linie oberhalb der maximalen Stauwasserlinie verlegt.



Abb. 53: Labormodell Doppelkammerschlauch mit teildurchlässiger Mittelnaht, Betriebsgelände DAEDLER



Abb. 54: Labormodell Doppelkammerschlauch teildurchlässiger Mittelnaht mit aufgelegtem dritten Schlauch, Betriebsgelände DAEDLER

#### 14 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. 55). 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. 55: Verpackung in Form von fahrbaren Kleinrollcontainern und multifunktionalen Logistikfahrzeugen im Euro-Maß

### 15 Ideeller Aussteller auf der Feuerwehrmesse INTERSCHUTZ 2015

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. 56). 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. 57).



Abb. 56: Präsentation von Hochwasserschutzentwicklungen und dem Projekt DeichKADE auf der INTERSCHUTZ 2015 am Stand des Instituts für Wasserbau der Hochschule Bremen



Abb. 57: Stand der Firma OPTIMAL auf der INTERSCHUTZ 2015

## 16 Zusammenfassung und Ausblick – Stand September 2015

Die bisherige Arbeit der Kooperationspartner OPTIMAL, DAEDLER und IWA in der Phase I des Projekts DeichKADE (Stand September 2015) umfasste 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 Deichaufkantung 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

Während die Arbeiten der ersten Punkte bereits abgeschlossen sind, sind die letzten beiden Punkte plangemäß weiterhin in Arbeit und sollen in der Projektphase II fortgeführt werden. Mit den bisher erarbeiteten Labormodellen konnten grundlegende Erfahrungen gesammelt und Weiterentwicklungen getätigt werden hin zu einem sicheren und einfachen System der Deichaufkantung. Diese Arbeit soll in der Projektphase II fortgesetzt werden. Bis zum Ende der Projektphase I wird die vierte Modellreihe der Drei-Schlauch-Konstruktion erstellt sein und kann Anfang Oktober 2015 zum geplanten Beginn der Projektphase II getestet werden. Die in Umsetzung befindlichen Modifikationen werden zu einem einfach koppelbaren und befüllbaren System führen, das zunächst im Testcontainer auf dem Be-

Entwicklung wassergefüllter Schlauchkonstruktionen zum Einsatz als Deichaufkantung - DeichKADE

---

triebsgelände DAEDLER eingestaut und somit auf Dichtigkeit gegen Untergrund, Seiten und Systemkopplung getestet werden soll. In der Folge ist ein Trockeneinsatz der Konstruktion auf einer Deichkrone und somit unter beengten seitlichen Verhältnissen geplant. Hieran anschließend sollen bei Bedarf weitere Modifikationen an der Konstruktion vorgenommen werden.

Bremen, 21. September 2015

Menden, 9. September 2015



Prof. Dr.-Ing. Bärbel Koppe

Armin Krebs

## 17 Schrifttum

- BDLW, 2015: Informationen vom Bremischen Deichverband am linken Weserufer (BDLW) über Bestandsaufnahmen von Altdeichen
- CONRAD, B., 2012: Handbuch Geotechnik, Grundlagen- Anwendungen- Praxiserfahrungen, Verlag Vieweg + Teubner
- DFV, 2013: Mehr als 75.000 Feuerwehrleute in der Flutabwehr. Pressemitteilung 09.06.2013, DFV-Pressedienst, Deutscher Feuerwehr Verband
- DIN 19712 (2013-01), 2013: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.)
- DOMZIG, H., 1965: Weserdeiche in den Gemarkungen Ahsen-Oetzen, Morsum und Magelsen. Niedersächsische Wasserwirtschaftsverwaltung, Bauabteilung Weserniederungen, 15.07.1965
- 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
- GEORGE, C., 2013: Teure Entsorgung: Sandsäcke der Flut sind Sondermüll. Hamburger Abendblatt, 26.06.2013
- 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
- IKSE, 2007: Hydrologische Auswertung des Frühjahrshochwassers 2006 im Einzugsgebiet der Elbe. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, Magdeburg
- IKSE, 2014: Hydrologische Auswertung des Hochwassers vom Juni 2013 im Einzugsgebiet der Elbe. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, Magdeburg
- 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

- LÖRS, R., 2013: Operation Sandsack – Bundeswehr im Flut-Einsatz. Spiegel-Online, 11.06.2013
- LUA, 1998: Das Sommerhochwasser der Oder 1997. Studien und Tagungsberichte. Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg (LUA), Band 16, LUA, Potsdam
- LUGV, 2014: Auszug aus dem Baugrundgutachten 'Sanierung rechter Elbdeich', GeoBerlin GmbH 07/2003, zur Verfügung gestellt durch das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Referat Ö5 – Baudienststelle – Brandenburg
- 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.
- MLUR, 2007: Generalplan Binnenhochwasserschutz und Hochwasserrückhalt Schleswig-Holstein. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Kiel.
- MLUV, 2009: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin
- MÜLLER, O., 2006: Die Verteidigung von Altdeichen an der Sickerfläche. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Dissertation
- MÜSSGENS, C., 2013: Nachschub erwünscht – Das Geschäft mit den Sandsäcken. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 06.06.2013
- NLWKN, 2007: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen und Bremen – Festland. Küstenschutz Band 1. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden
- NLWKN, 2006: Hochwasserschutzplan Untere Mittelelbe. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Lüneburg
- 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
- PETOUKHOV, V.; RAHMSTORF, F.; PETRI, S.; SCHELLNHUBER, H.J., 2013: Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes. Proc. National Academy of Science of the United States of America, PNAS, Band 110, Ausgabe 14, April 2013
- RD, 2006: Instruktion zur Deichverteidigung. – Hochwasser geht uns ALLE an... Regierungspräsidium Darmstadt, Abteilung Arbeitsschutz und Umwelt Darmstadt, Staatlicher Wasserbau, März 2006
- SCHMIDT, M., 2010: 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

SLUG, 2006: Meteorologische und hydrologische Analyse des Frühjahrshochwassers 2006 in den sächsischen Fließgewässern. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Stand Juli 2006.

STEFFEN, T., 2013: Flutregionen bleiben auf den Sandsäcken sitzen. ZEIT-Online, 08.07.2013

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)

THW, 2013: Flusshochwasser 2013 – Alle THW-Einsätze sind abgeschlossen. Pressemitteilung des Technischen Hilfswerks THW, 10.07.2013, Bonn