

**BAU, AUSRÜSTUNG UND BETRIEB  
EINES LABORDEICHES IM NATURMAßSTAB**

***INSTALLATION, EQUIPMENT AND OPERATION  
OF A PROTOTYPE LEVEE UNDER  
LABORATORY CONDITIONS***

von

Christoph Paesler



## **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>125</b>
<b>1 DEICHE ALS SCHUTZSYSTEM GEGEN HOCHWASSER</b>	<b>127</b>
<b>2 AUSFÜHRUNG VON FLUSSDEICHEN</b>	<b>129</b>
2.1 Funktion	129
2.2 Bemessungsgrundlagen	129
2.3 Aufbau des Deichkörpers	130
2.4 Deichuntergrund und Standsicherheit	132
<b>3 BAU DER VERSUCHSDEICHANLAGE</b>	<b>133</b>
3.1 Planung des Modelldeiches	133
3.2 Unterkonstruktion	135
3.3 Foliendichtung aus Kunststoffdichtungsbahn	137
3.4 Minimierung der Randumläufigkeit durch Betonmatten	138
3.5 Aufbau des Deiches	139
3.5.1 Einbau des Sandkerns	139
3.5.2 Einbau der Tondichtung	140
3.5.3 Oberflächenabdeckung	142
3.5.4 Luftseitige Dränage im Deichfuß	142
3.6 Steuerung der Durchsickerung	144
<b>4 MESSTECHNIK</b>	<b>145</b>
4.1 Messparameter	145
4.2 Messung der Sickerlinie	146
4.3 Messung der Sickerwassermenge	147
4.4 Bodenfeuchtemessung	147
4.5 Messung der Bodentemperatur	149
4.6 Meteorologische Daten	150
<b>5 BETRIEB DES LABORDEICHES</b>	<b>155</b>
<b>6 SCHRIFTTUM</b>	<b>157</b>
<b>HERSTELLERINFORMATIONEN ZUR MESS- UND BAUTECHNIK</b>	<b>158</b>



## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1:	Deichentwicklung zwischen 1900 und 1980 an der Ems bei Leer [Kramer, 1989]	127
Abbildung 2-1:	Definition der Einzelanteile der Freibordbemessung [nach: DVWK 210]	130
Abbildung 2-2:	Begriffsdefinition der Querschnittselemente [nach: DVWK-M 210]	130
Abbildung 2-3:	Schematischer Aufbau „Drei-Zonen-Deich“ [nach: DVWK-M 210]	130
Abbildung 2-4:	Schematische Darstellung von Oberflächendichtung (links) und Kern- bzw. Innendichtung (rechts) bei Hochwasserschutzdeichen	131
Abbildung 3-1:	Körnungslinien Sand 1 (blau) und Sand 2 (rot)	133
Abbildung 3-2:	Grundriss und Schnitt des Modelldeiches	134
Abbildung 3-3:	Querschnitt Modelldeich	135
Abbildung 3-4:	Detailansicht Querschnitt	135
Abbildung 3-5:	Unterkonstruktion aus Kanthölzern (links) und Kontrollsteg (rechts)	136
Abbildung 3-6:	Anbau der Seekieferplatten an die Unterkonstruktion	136
Abbildung 3-7:	Herstellung des Planums aus Mineralgemisch 0/32	137
Abbildung 3-8:	Wannendichtung aus verschweißten Kunststoffdichtungsbahnen	137
Abbildung 3-9:	Heizkeilschweißnaht (links) und Extrusionsschweißnaht (rechts)	138
Abbildung 3-10:	Anschluss der Dichtungsbahnen an Wandelemente im wasserseitigen Bereich	138
Abbildung 3-11:	Bentonitmatten im Kronenbereich des Deiches vor (links) und während des Einbaus (rechts)	139
Abbildung 3-12:	Ausgleichsschicht über den Dichtungsbahnen	139
Abbildung 3-13:	Schichtweiser Aufbau des Sandkerns; Probenahme	140
Abbildung 3-14:	Einbau der unteren (rechts) und oberen (links) Vliesschicht auf der Wasserseite	141
Abbildung 3-15:	Dichtungselemente aus Naturton	141
Abbildung 3-16:	Verdichtung der Dichtungselemente mittels Schafffußwalze	142
Abbildung 3-17:	Verlegung und Anwalzen des Rollrasens	142
Abbildung 3-18:	Böschungsfußdränage mit Vliesummantelung und Kontrollschächten	143
Abbildung 3-19:	Fertiger Labordeich (Füllstand ca. 1,5 m)	143

---

Abbildung 3-20:	Öffnungen in der wasserseitigen Böschung des Deichs während des Einstaus bzw. während des Einbaus	144
Abbildung 3-21:	Öffnungen auf der wasserseitigen Böschung des Deiches	144
Abbildung 4-1:	Lage der Messprofile der Druckmessdosen	146
Abbildung 4-2:	Lagefester Einbau der Druckmessdosen auf Kunststoffgitter	147
Abbildung 4-3:	Foto der Sickerwasser-Druckmessdose (links) und verwendete Wasseruhr (rechts)	147
Abbildung 4-4:	Lage der Messprofile der Feuchtigkeitssensoren	148
Abbildung 4-5:	Lage der Kunststoffrohre zur Messung der Bodenfeuchte (links) und schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Bodenfeuchtesensoren	149
Abbildung 4-6:	Windgeber zur Messung der Windgeschwindigkeit	150
Abbildung 4-7:	Windrichtungsgeber zur Messung der Windrichtung	151
Abbildung 4-8:	Hygro-Thermogeber zur Messung der relativen Luftfeuchte und -temperatur	151
Abbildung 4-9:	Hygro-Thermogeber zur Messung der relativen Luftfeuchte und -temperatur	152
Abbildung 4-10:	Niederschlagsgeber zur Messung der Niederschlagshöhe, -intensität, -menge	153
Abbildung 4-11:	Barogeber zur Messung barometrischen Umgebungsdrucks	153
Abbildung 4-12:	Beispielhafte Darstellung der Messergebnisse - Komplette Durchsickerung - 15 h nach Beginn des Einstaus	155
Tabelle 2-1:	Erläuterungen und einzuhaltende Sicherheiten nach Lastfall 2 und 3 für Wasser- und Landseite ( $\eta$ = Sicherheitsbeiwert)	129
Tabelle 3-1:	Optimaler Verdichtungsgrad der Materialien in Abhängigkeit vom Wassergehalt	140
Tabelle 4-1:	Kurzübersicht der Messparameter und eingesetzter Messtechnik	145

## 1 Deiche als Schutzsystem gegen Hochwasser

Wälle aus Erdmaterial und mit Gras abgedeckt, die so genannten Deiche sind das wohl älteste System zum Schutz von Siedlungen und Kulturlächen gegen zeitweilig erhöhte Wasserstände von Flüssen und der Meere, Abbildung 1-1. Ständige Erhöhungen und Verbesserungen der Standfestigkeit, Erosionssicherheit und der Durchsickerung gegenüber Strömung und Wellen haben in den vergangenen Jahrhunderten das Risiko von Überflutungen drastisch reduziert (Kramer 1989, DVWK, 1992).

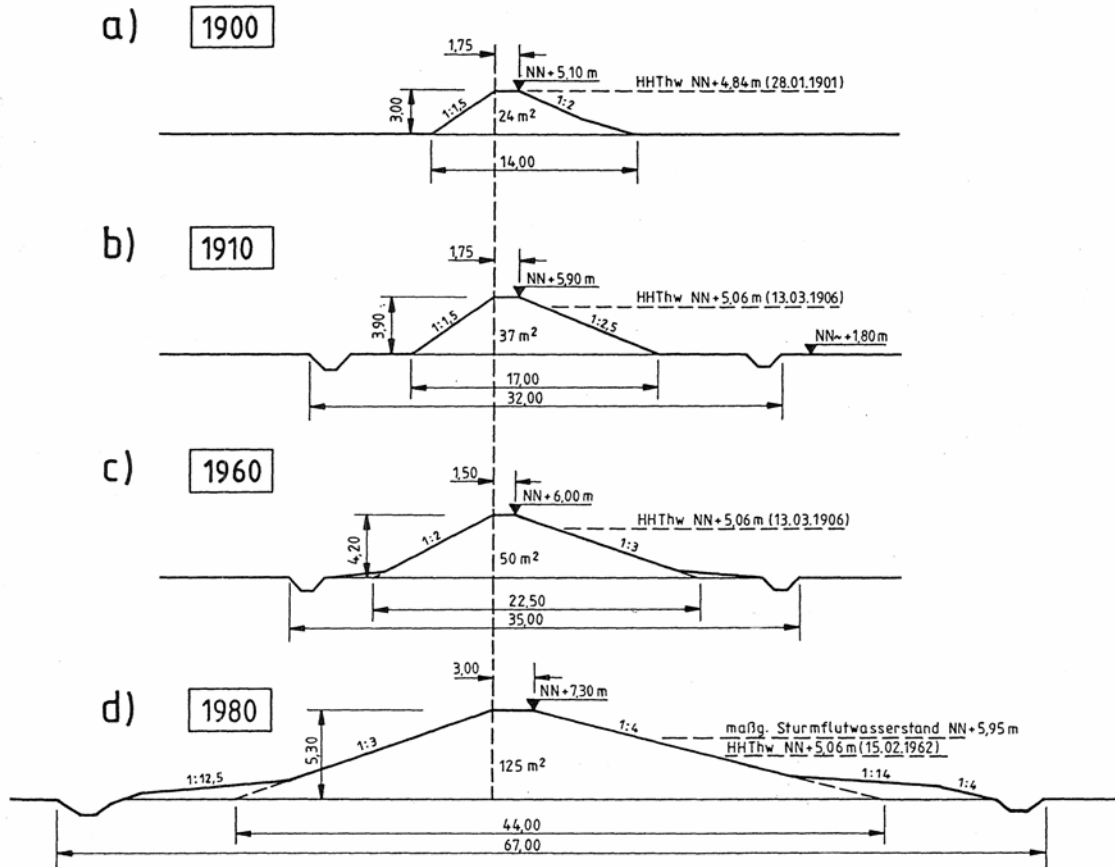


Abbildung 1-1: Deichentwicklung zwischen 1900 und 1980 an der Ems bei Leer [Kramer, 1989]

Heute leben und arbeiten große Teile der Weltbevölkerung und auch in Deutschland an Küsten und Flüssen weitgehend sicher im Schutz dieser weiterentwickelten Technik. Gleichwohl kommt es bei extremen Niederschlägen und Abflüssen oder Sturmfluten an Flüssen, Küsten und Ästuaren zu Deichbrüchen und folgeschweren Überschwemmungen mit Milliarden Schäden, wie die vergangenen Hochwässer an der Oder 2000 und der Elbe 2002 zeigten.

Bei der Auswertung von Schadensbildern während und nach Hochwassersituationen an Deichbauwerken wurde deutlich, dass vor allem ältere Deiche aus unterschiedlichen Baumaterialien und zum Teil auf wenig tragfähigem Untergrund errichtet wurden. Lokale Änderungen des Baumaterials bzw. der geotechnischen Materialeigenschaften im Deich und im Untergrund können zur Bildung von Schwachstellen und in der Folge zu Deichbrüchen führen.

Für drei im FRANZIUS-INSTITUT für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover durchgeführte und laufende Forschungsvorhaben zum Thema Deichsicherheit, Schadenserkennung und Deichsanierung,

- "DEICHMONITORING - Entwicklung und Verifizierung von Einsatzvarianten zur Aufklärung von Schwachstellen an Deichen mit luftgestützten multisensoralen Fernerkundungstechnologien zur Verbesserung des Hochwasserschutzes" (Förderkennzeichen: 02WH0410)
- "DEICHSANIERUNG - Bau eines Versuchsdeiches und Untersuchung der Praxistauglichkeit der Dichtwand aus dem neuen Stoffsystem" (FKZ: 16IN0237)
- "SENSORBASIERTE GEOTEXTILIEN - Entwicklung von multifunktionalen, sensorbasierten Geotextilien zur Deichertüchtigung für räumlich ausgedehntes Deichmonitoring sowie für die Gefahrenerkennung im Hochwasserfall bei der Deichverteidigung", (FKZ: 02WH0574)

wurde auf dem Versuchsgelände in Hannover Marienwerder ein Labordeich im Naturmaßstab errichtet. Hier wurden und werden u. a. unter definierten und reproduzierbaren Randbedingungen folgende Fragestellungen untersucht:

- Simulation des Einflusses von Deichaufbau, Vegetation, Witterung und Wasserstand (Durchsickerung) im Deichmonitoring auf die Erkundbarkeit von Schäden beim Einsatz von Fernerkundungssensoren
- Einsatzmöglichkeiten, Langzeitwirkung und Beständigkeit von neuen Kunststoffen zur Deichsanierung
- Entwicklung und Prinziplösungen für die Ankopplung von sensorbasierten Messwertsystemen an Textilmaterialien im Deichbau

Die Anlage wurde 2003 errichtet. Zur Entwicklung von neuen Möglichkeiten der Deichüberwachung und –sanierung sind definierte und reproduzierbare Laborbedingungen erforderlich. An den Labordeich werden daher hinsichtlich Aufbau und Messtechnik folgende Anforderungen gestellt:

- Naturnaher Aufbau einer Deichstrecke im Maßstab 1:1 mit definierten Materialparametern, teilweise mit definierten Schädigungen
- Einstau verschiedener Wasserstände und Messung der Durchfeuchtung bzw. Durchsickerung an definierten Querschnitten
- Aufnahme von Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Porenwasserdruck im Profil
- Erfassung der Klimadaten während der Laufzeit der Untersuchungen

Ziel des Vorhabens „Deichmonitoring“ war es, Fernerkundungsdaten für die Erfassung von Deichzuständen sowie potentiellen Schwachstellen zu nutzen. Die Auswertung von Fernerkundungsdaten eröffnet die Möglichkeit, Gebiete großräumig qualitativ und quantitativ in Hinblick auf physikalische, chemische und biologische Prozesse zu bewerten. Die korrekte Interpretation der Daten unterschiedlicher Fernerkundungssensoren erfordert eine exakte, parallele Messung von Klimadaten, Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Porenwasserdruck.

Mit dem Projekt „Deichsanierung - Entwicklung eines innovativen Stoffsystems“ förderte das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) die Entwicklung eines neuartigen Sanierungskonzeptes für Deiche. Ziel des Projektes war die Stabilisierung und Abdichtung bestehender Deichanlagen durch eine Dichtwand auf der Basis von aufbereitetem Deichbau- oder Recyclingmaterial und porenfüllenden, hydrophobierenden und quellfähigen Zusatzstoffen. Nachfolgend wird über Auslegung, Planung, Bau und Messtechnische Ausrüstung des Labordeiches berichtet.



## 2 Ausführung von Flussdeichen

Da die genannten Forschungsvorhaben sich auf Flüsse und Ästuar konzentrieren, erfolgt hier eine Beschränkung auf Flussdeiche, die nicht schweren Wellenbelastungen ausgesetzt sind und daher etwas anderen Bemessungskriterien unterliegen.

### 2.1 Funktion

Der technische Hochwasserschutz an Flüssen wird nahezu ausschließlich durch Deiche sichergestellt. Diese Anlagen trennen den Fluss von seinem Überschwemmungsgebiet und verhindern somit eine Ausbreitung des Wassers und damit eine Abflachung des Hochwasserscheitels. Im Gegensatz zu Sturmfluten haben Hochwasser oft Standzeiten von mehreren Tagen bis Wochen. Die Flussdeiche müssen den hieraus resultierenden Belastungen für die Dauer des Hochwassers standhalten.

Eine erfolgreiche Deichüberwachung und Deichverteidigung sind für ein sicheres Leben und Wirtschaften in Flussauen und Niederungen unverzichtbar. Die Kenntnis der Schwachstellen im Deichkörper kann eine gezielte Deichsanierung ermöglichen und damit die Belastbarkeit eines Deiches bei Hochwasser erheblich erhöhen.

Flussdeiche sind aus geeigneten Erdbaustoffen geschüttete Dämme, die das Hinterland gegen Hochwasser schützen. Sie werden, im Gegensatz zu Stauhaltungsdämmen an Wehren oder Staudämmen von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken, nur während eines abfließenden Hochwassers und in Abhängigkeit von der Höhe der Wasserspiegellage an der Wasserseite des Deiches mehr oder minder stark belastet.

### 2.2 Bemessungsgrundlagen

Der Bau von Flussdeichen erfolgt auf Grundlage der aktuellen DIN-Normen, DVWK-Merkblätter und nach den Allgemein Anerkannten Regeln der Technik. Für Flussdeiche sind das DVWK-Merkblatt 210 und DIN 19712 maßgebend. Notwendige Sicherheitsnachweise werden für die Lastfälle 2 und 3 nach DIN 1054 durchgeführt.

**Tabelle 2-1: Erläuterungen und einzuhaltende Sicherheiten nach Lastfall 2 und 3 für Wasser- und Landseite ( $\eta$  = Sicherheitsbeiwert)**

Lastfall 2 ( $\eta=1,3$ )	Lastfall 3 ( $\eta=1,2$ )
Eigenlast	Eigenlast
Verkehrslast auf Krone und Berme	Verkehrslast auf Krone und Berme
Wasserstand nicht höher als BHW	Wasserstand bis Deichkrone
	Ggf. Versagen der Dränung

Die Höhe des Deiches hängt im Wesentlichen von der Wahl des Bemessungshochwassers und der Deichsicherheitshöhe, dem „Freibord“, ab Abbildung 2-1. Das Bemessungshochwasser wird als Hochwasser einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. Jährlichkeit mit Hilfe von Abfluss- oder Niederschlagsbeobachtungen statistisch bestimmt. Nur in seltenen Fällen muss ein Deich einen (fast) hundertprozentigen Schutz vor jedem erdenklichen Hochwasser (z.B. 10.000-jährig bei Kernkraftwerken) bieten. In der Regel wird eine Entscheidung getroffen, die auch wirtschaftliche, ökologische, technische, landschaftliche und städtebauliche Aspekte berücksichtigt. Die Gültigkeit des Bemessungs-

hochwassers ist in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. Bauliche und meteorologische Veränderungen im Einzugsgebiet oder am eigentlichen Gewässer können es erforderlich machen, das Bemessungshochwasser zu aktualisieren.

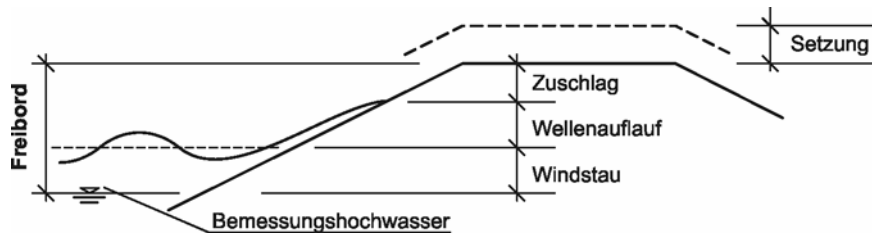


Abbildung 2-1: Definition der Einzelanteile der Freibordbemessung [nach: DVWK 210]

### 2.3 Aufbau des Deichkörpers

Auf der Grundlage langjähriger Erfahrungen sind Flussdeiche im Laufe der Zeit höher und die Neigungen der Böschungen immer flacher geworden. Die Form eines Deiches ergibt sich aus der Neigung der Böschungen, der Kronenbreite, der Deichhöhe sowie der Anordnung von Bermen (vgl. Abbildung 2-2). Die Form ist zudem abhängig von der Lage des Deichs, den Untergrundverhältnissen, der Art und Größe der Belastungen sowie den gewählten Baustoffen. Falls im Deich Sickerwasser vorhanden ist, hat dies ebenfalls Auswirkungen auf die Deichform, da das Sickerwasser schadlos abgeleitet werden muss.

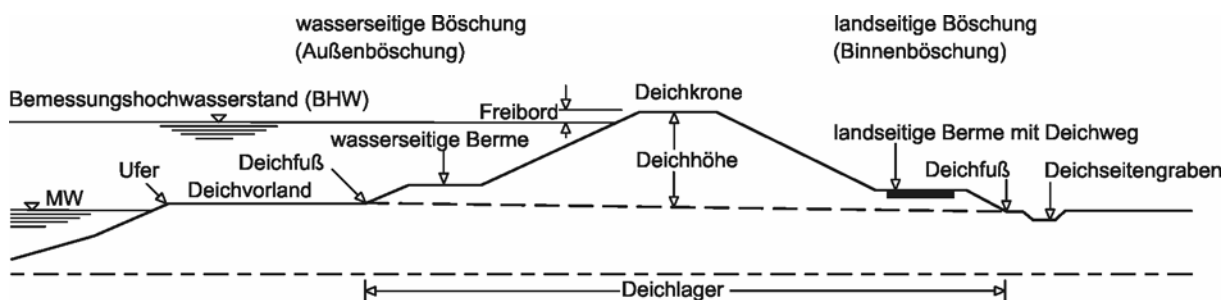


Abbildung 2-2: Begriffsdefinition der Querschnittselemente [nach: DVWK-M 210]

Hinsichtlich des Deichaufbaus erfolgte ein Wandel vom früher verwendeten homogenen Deichaufbau hin zum sog. „Drei-Zonen-Aufbau“, der gegenwärtig bei Neubauten und Vollsaniierungen überwiegend eingesetzt wird, Abbildung 2-3.

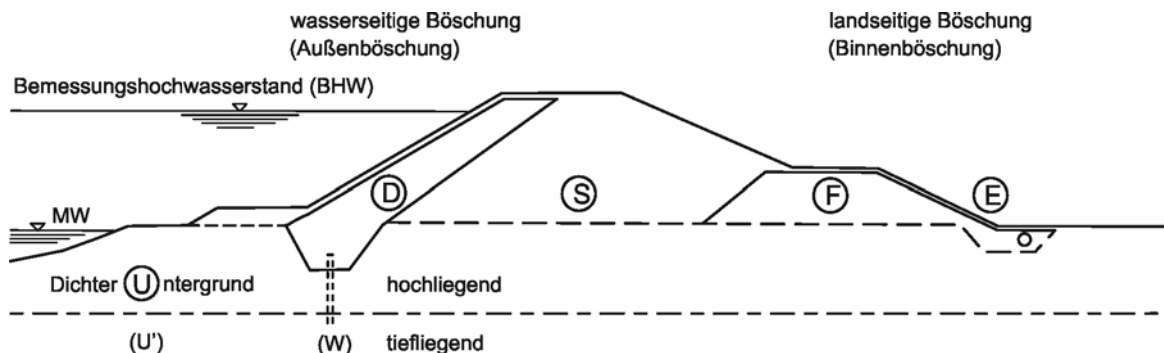
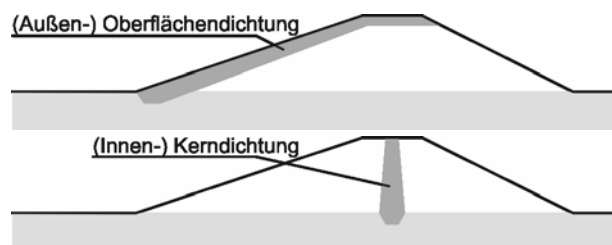


Abbildung 2-3: Schematischer Aufbau „Drei-Zonen-Deich“ [nach: DVWK-M 210]

Der Querschnitt des Deiches besteht hiernach aus den drei Zonen: Durchlässiger Deich- oder Stützkörper (S); wasserseitig abdichtende Böschungszone (D), die möglichst an dichten Untergrund (U) anschließt; landseitig stark durchlässiger Filterkörper (F), der den Austrag von Deichmaterial bei gewünschter Entwässerung des Deichs verhindert. Dabei erfolgt die Entwässerung am Fuß durch eine Dränung (E). Der Vorteil des Drei-Zonen-Aufbaus ist einerseits die gute Abführung von Sickerwasser durch leicht durchlässiges, landseitiges Material und andererseits die Verhinderung eines wasserseitigen Zutritts durch eine abdichtende Böschungszone.

Grundsätzlich ist die Neigung der Deichböschungen abhängig von der Standsicherheit, der Unterhaltung sowie ökologischen Aspekten, wobei sich eine Neigung von 1:3 bewährt hat, da dadurch die Böschung einer vergleichsweise geringen hydraulischen Belastung durch Wellen ausgesetzt ist. Flacheren Deichböschungen fügen sich zudem besser in das Landschaftsbild.

Die Dichtung eines Deichkörpers kann nicht verhindern, dass Wasser in den Deich eindringt. Sie hat die Aufgabe, den Sickerwassereintritt grundsätzlich zu verzögern bzw. eine Vernässung der luftseitigen Deichböschung zu verhindern. Erzielte Durchlässigkeitskoeffizienten ( $k_f$ -Werte) von  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s gelten nach dem heutigen Stand der Technik als ausreichend.



**Abbildung 2-4: Schematische Darstellung von Oberflächen- (links) und Kern- bzw. Innendichtung (rechts) bei Hochwasserschutzdeichen**

Es wird zwischen Oberflächen- (z.B. Außendichtung, Böschungsdichtung) und Innendichtung (z.B. Kerndichtung) unterschieden (Abbildung 2-4). Der Anschluss sollte in beiden Fällen an eine geringdurchlässige Unterschicht erfolgen.

Die Oberflächen- dichtung verhindert den Wasserzutritt in die wasserseitige Böschung. Bei natürlichen Dichtungsmaterialien ergibt sich die Neigung aus den jeweiligen bodenmechanischen Eigenschaften. Zusätzlich kann bei einem grobkörnigen Stützkörper die Anordnung einer Filterschicht notwendig werden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass der Dichtungsmaterial in den Stützkörper gespült wird. Die Dichtung ist durch eine geeignete Deckschicht gegen mechanische und atmosphärische Schäden zu schützen. Diese Schutzschicht muss gleichzeitig Träger der Wachstumsschicht sein. Bei dicken Schutzschichten von 1 – 1,5 m die gleichzeitig eine Dichtfunktion übernehmen, ist der atmosphärische Schutz auf jeden Fall gegeben, so dass für den Schutz gegen mechanische Beschädigung eine Rasendecke ausreichend ist. Als Feuchtigkeitsspeicher verhindert die Schutzschicht das Austrocknen der Dichtung.

Innendichtungen haben gegenüber Oberflächen- dichtungen den Vorteil, dass sie einen geringeren Flächenbedarf aufweisen. Überdies sind sie durch die beidseitige Überdeckung gut geschützt und können Wasserüberdruck von beiden Seiten aufnehmen. Als Innendichtungen kommen grundsätzlich Schlitz- oder Spundwände in Frage, die in der Deichmitte angeordnet werden. Innendichtungen können im Sanierungsfall besonders vorteilhaft eingesetzt werden, wenn eine Verbesserung der Dichtungswirkung des Deiches gefordert ist aber die räumlichen Gegebenheiten keine Verbreiterung der Deichbasis erlauben.

Bei der Beurteilung der Funktionsweise wird davon ausgegangen, dass der Wasserstand im Flussbett steigt und der Sickervorgang von der Böschungsoberfläche zum Sandkern, bzw. von der Wasser- zur

Luftseite gerichtet ist. Bei einem flächigen Anstieg des Grundwasserspiegels ist die Oberflächendichtung folglich ohne Funktion. Eine Kerndichtung verringert aber auch in diesem Fall eine binnenseitig gerichtete Sickerströmung. Die Dichtung führt zu einem durch Potentialabbau zum Absenken der Sickerlinie und somit zur Aufrechterhaltung der Standsicherheit. Zum anderen wird die Sickerwasser-rate reduziert, wodurch sich die Gefahr des Materialaustrages verringert.

Mit Hilfe von Dränungen wird das Sickerwasser aus dem Deich gesammelt und abgeleitet. Sie werden im Bereich der landseitigen Böschung angeordnet. Mögliche technische Lösungen zur Dränung sind Dränrohre, Filterschichten oder Sickerpackungen. Das Dränwasser wird über Gräben abgeführt, die aus Gründen der Standsicherheit in einem Abstand von mind. 2,5 m vom Deichfuß angelegt werden.

## **2.4 Deichuntergrund und Standsicherheit**

Die maßgebenden Parameter für die Tragfähigkeit und Standsicherheit des Deichuntergrundes sind die Durchlässigkeit, Scherfestigkeit sowie die Zusammendrückbarkeit. Vorteilhaft ist ein Untergrund mit möglichst dicker und geschlossener Deckschicht aus bindigem Boden. Wichtig ist ferner eine ausreichende Tragfähigkeit. Diese ist abhängig von der Beanspruchung durch den Deich, insbesondere vom Gewicht und der Scherbeanspruchung an der Sohle. Bei weichen, bindigen Böden sowie bei organischen Böden ist zusätzlich der durch die Belastung auftretende Porenwasserüberdruck bei der Ermittlung der Tragfähigkeit zu berücksichtigen. Der Untergrund muss hinsichtlich seiner Zusammendrückbarkeit ein homogenes Verhalten aufweisen, da es ansonsten zu schädlichen Setzungsunterschieden kommen kann.

Bei der Betrachtung der Standsicherheit sind Deich und Untergrund als Einheit anzusehen. Es müssen also nicht nur Gleitflächen durch den Deichkörper allein untersucht werden, sondern auch solche, die sowohl den Deichkörper als auch den Untergrund durchstoßen. Auf einen Standsicherheitsnachweis kann allerdings in den folgenden Fällen verzichtet werden:

Wenn bereits ein Nachweis für eine gleichartige Deichkonstruktion mit vergleichbaren Bodenmaterialien und Untergrundaufbau vorliegt, kann ein Nachweis der Standsicherheit entfallen. Gleiches gilt für Flussdeiche mit einer Höhe von weniger als 2 m und einer Kronenbreite von 3 m, wobei die Böschungen eine Neigung von 1:3 oder weniger aufweisen müssen.

In allen anderen Fällen ist die Betrachtung der folgenden Gesichtspunkte erforderlich: Die statische Sicherheit muss gewährleistet werden, wobei sowohl eine Berücksichtigung der Gewichtskräfte (Schwerkraftwirkung) als auch der hydraulischen Kräfte (Strömungskräfte) zu erfolgen hat. Der Nachweis der hydraulischen Sicherheit soll der Erosion und Suffosion vorbeugen, d.h. es soll verhindert werden, dass das Sickerwasser Einzelkörner aus dem Kornverband löst.

### 3 Bau der Versuchsdeichanlage

#### 3.1 Planung des Modeldeiches

Basierend auf den beschriebenen Anforderungen an einen Labordeich, wurde ein Drei-Zonen-Deich mit einer luftseitigen Böschungsneigung von 1 : 2 und einer wasserseitigen Böschungsneigung von 1 : 3 geplant. Aus statischen Gründen bilden drei Wände aus Betonfertigteilen, die rückwärtig mit Erdboden hinterfüllt sind, das Widerlager für die Unterkonstruktion der eigentlichen Wasserhaltung. Mit dem Einbau des Deiches als vierte Seite entstand ein Becken, das die Wasserseite darstellt. Der Grundriss sowie zwei Schnitte sind in Abbildung 3-2 dargestellt: Durch den Einbau in einen bereits bestehenden Anlagenteil beträgt die Kronenhöhe ca. 3 m (maximale Einstauhöhe ca. 2,75 m).

Der Stützkörper des Labordeiches besteht aus zwei verschiedenen Materialien (Sand 1 und Sand 2), die in zwei je 7,5 m breite Messprofile eingebaut wurden. Die Körnungslinien der Sande sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

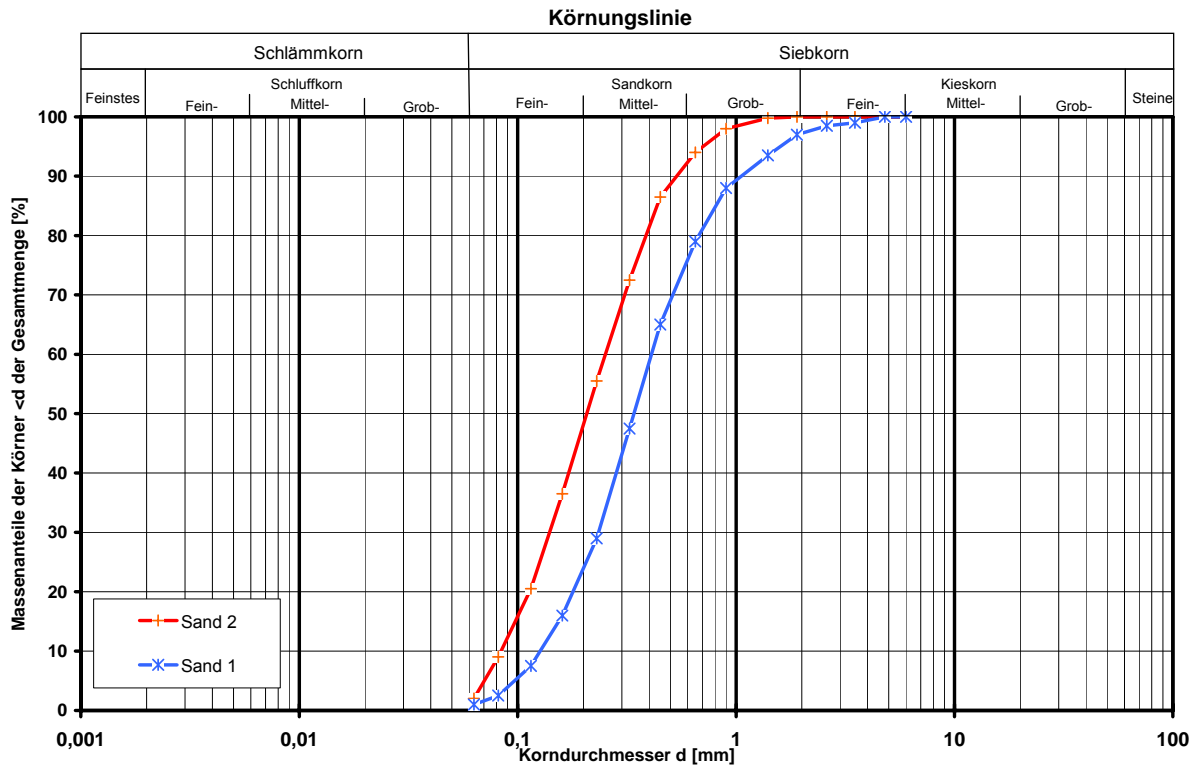


Abbildung 3-1: Körnungslinien Sand 1 (blau) und Sand 2 (rot)

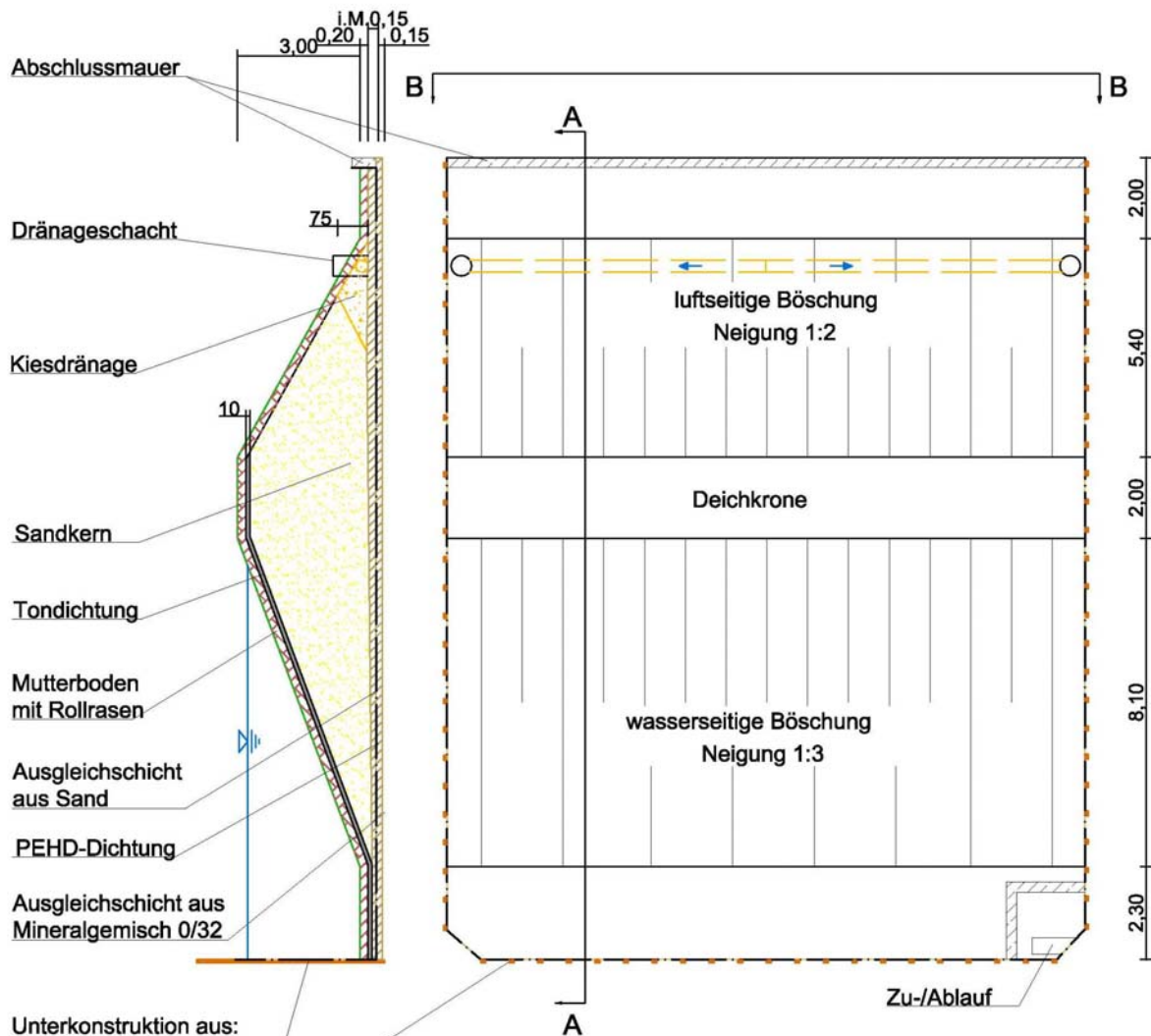
Als Abdichtung wurde eine 10 cm dicke Oberflächendichtung aus Ton mit einer Durchlässigkeit von 1·10<sup>-11</sup> m/s in der Böschung gewählt, die auf der wasserseitigen Böschung aus natürlichem bindigen Boden hergestellt und bis über die Krone gezogen wurde. Am wasserseitigen Böschungsfuß wurde die Dichtung wie ein Dichtungsteppich bis an die seitlich begrenzende Wand verlängert. Schutz vor Austrocknung bietet eine 20 cm starke, mit Rollrasen abgedeckte Mutterbodenschicht.

Am luftseitigen Böschungsfuß wurde zur Ableitung von Dränagewasser eine Dränageschicht mit Pumpschächten angeordnet. Die Deichlänge beträgt 15 m und ist mit der Länge der Querwand des Wandbestandes identisch.

Unter Berücksichtigung der Verwendung in verschiedenen Forschungsprojekten, wurde der Labordeich ohne weitere Bermen und Unterhaltungswege mit den dargestellten Abmessungen angelegt.

### Schnitt A-A

### Grundriss



### Ansicht B-B

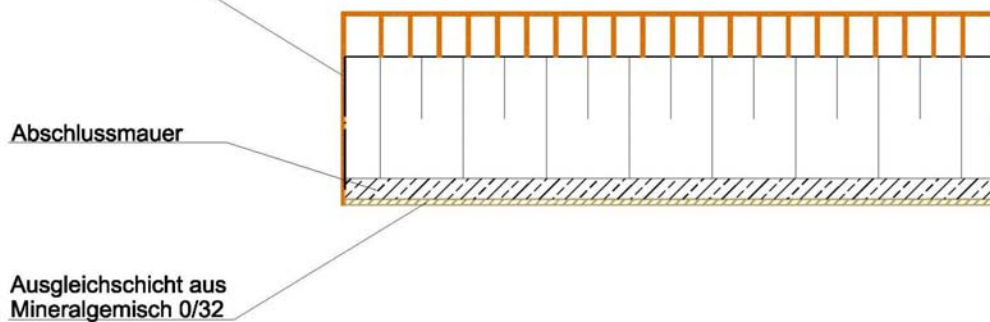
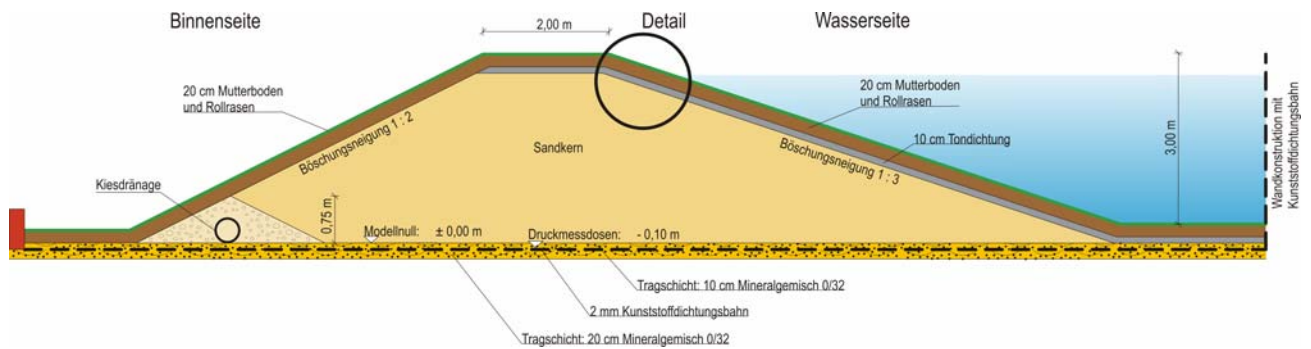


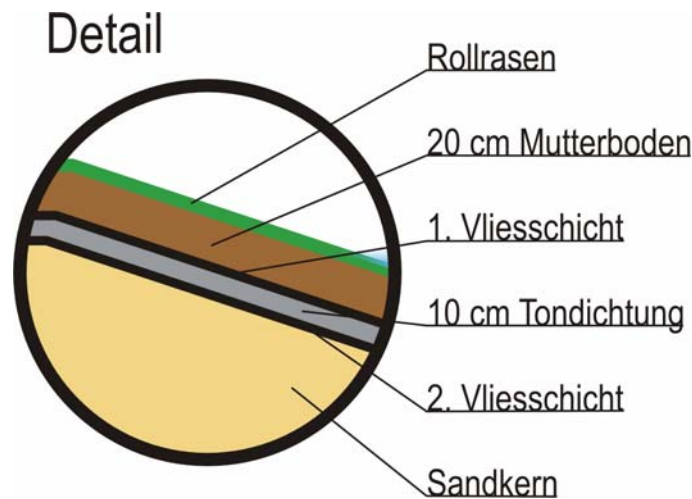
Abbildung 3-2: Grundriss und Schnitt des Modelldeiches

Im Detail stellt sich der Querschnitt in Abbildung 3-3 dar:



**Abbildung 3-3: Querschnitt Modelldeich**

Um eine Vermischung der Schichten Sand-Ton-Oberboden zu verhindern, wurde jeweils unter- und oberhalb der Tondichtung ein Geotextilvlies, angeordnet, Abbildung 3-4). Das Vlies gewährt die Filterstabilität zwischen den einzelnen Materialien.



**Abbildung 3-4: Detailansicht Querschnitt**

### 3.2 Unterkonstruktion

Im ersten Arbeitsgang wurden Kanthölzer (Maße 8 x 12 cm) senkrecht ausgerichtet und an die Betonringe angedübelt, Abbildung 3-5 links. Durch die vorhandenen Ringe ergab sich ein Rastermaß von ca. 0,75 m. Die Unterkonstruktion musste durch Unterfütterung vertikal ausgerichtet werden, damit beim Anbringen der Seekieferplatten keine Spannungen auftraten, die die Unterkonstruktion hatten lösen können. Die Kanthölzer ragten über die Ringwand hinaus und wurden aus sicherheitstechnischen Gründen mit einem Handlauf versehen. Gemäß den Sicherheitsrichtlinien dient die Unterkonstruktion zudem als Absturzsicherung. Auf der Oberkante der Ringe aus Betonfertigteilen wurde ebenfalls aus Sicherheitsgründen ein begehbare Kontrollsteg gebaut, Abbildung 3-5 rechts.





**Abbildung 3-5: Unterkonstruktion aus Kanthölzern (links) und Kontrollsteg (rechts)**

Im zweiten Arbeitsgang wurden 21 mm starke Seekieferplatten (Maße 2,5 x 1,25 m) auf die Kanthölzer geschraubt, deren Oberkante den geraden Abschluss der Unterkonstruktion bildet. Da das Rastermaß der Unterkonstruktion mit den Seekieferplatten nicht fortgeführt werden konnte, wurden die vertikalen Stöße mit Brettlaschen von der Rückseite verstärkt.



**Abbildung 3-6: Anbau der Seekieferplatten an die Unterkonstruktion**

Zur sicheren Tragfähigkeit der Sohle wurde eine i. M. 15 cm dicke Ausgleichsschicht aus Mineralgemisch 0/32 eingebracht, eben abgezogen und verdichtet. Zwangshöheniveau stellte die Betonoberkante der Sohlplatte des Einlaufbauwerks dar.





**Abbildung 3-7: Herstellung des Planums aus Mineralgemisch 0/32**

### **3.3 Foliendichtung aus Kunststoffdichtungsbahn**

Das Becken wurde an der Sohle und den Wänden mit einer Kunststoffdichtungsbahn (PEHD - Polyethylen hoher Dichte) gedichtet. Grundsätzlich ist diese Dichtungsbahn in verschiedenen Dicken und unterschiedlich geprägten Oberflächen erhältlich. Sie ist für die Bauwerks- und Kanaldichtung einsetzbar und kommt auch im Trinkwasserbereich zur Anwendung. Zur dauerhaften Verbindung der Dichtungsbahnen wurden die einzelnen Bahnen mittels Heizkeilschweißung bzw. Extrusionsschweißung verbunden. Zum Einsatz kam eine Kunststoffdichtungsbahn mit 2,0 mm Stärke in strukturierter Ausführung.



**Abbildung 3-8: Wannendichtung aus verschweißten Kunststoffdichtungsbahnen**

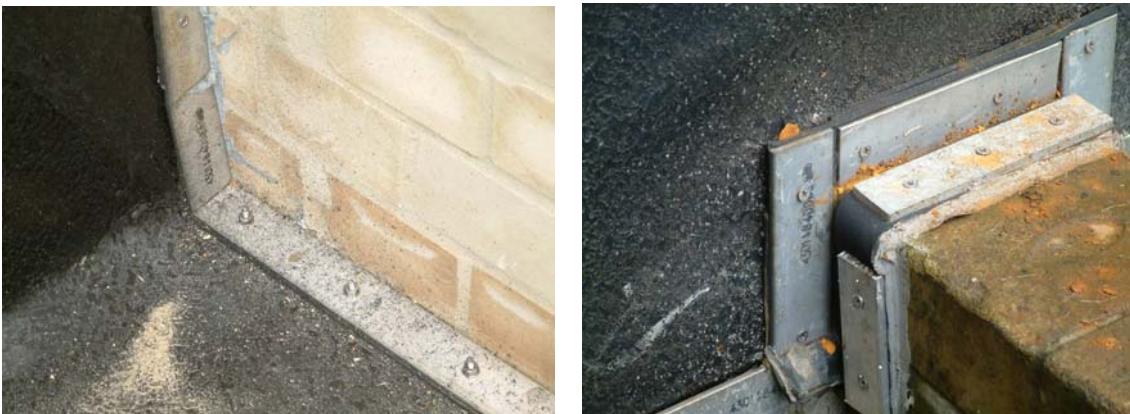
Zunächst wurden die Dichtungsbahnen an den Wänden verschweißt und mittels Stahlschienen, die einen dichten Verbund zwischen starren Elementen ermöglichen, an der Unterkonstruktion ange-

schlossen. Im Anschluss daran erfolgten die Verschweißung der Dichtungsbahnen der Sohle und zuletzt die Verbindung der Dichtungsbahnen zwischen Wand und Sohle.



**Abbildung 3-9: Heizkeilschweißnaht (links) und Extrusionsschweißnaht (rechts)**

Um einen dichten Übergang zwischen der beweglichen Holzunterkonstruktion und einer starren Mauer im Ablaufbereich zu erzielen, wurden zwischen Wand und Stahlschiene Zellkautschukplatten angeordnet, die eine Bewegung zwischen den verschiedenen Materialien infolge der Ausdehnung des Kautschuks abpuffern.



**Abbildung 3-10: Anschluss der Dichtungsbahnen an Wandelemente im wasserseitigen Bereich**

Nach dem Einbau des Deiches und der luftseitigen Böschungfußdränage ist eine ca. 50 cm hohe Abschlussmauer an der Luftseite errichtet worden. Die Foliendichtung wurde an der Mauer hochgezogen, angedübelt und bildet hiermit einen Abschluss der wasserdichten Wannendichtung.

### **3.4 Minimierung der Randumläufigkeit durch Betonitmatten**

Bentonitmatten bestehen aus quellfähigem Tonmineral. In feuchter Umgebung quellen die Matten auf und bilden einen dichtenden Vorhang. Die eingebaute Dichtschürze aus Bentonitmatten minimiert die Sickerströmung in der Fuge zwischen Deichkörper und Folie. Der dichtende Anschluss des Deichkörpers an die Folie der Außenwand bewirkt eine Ablenkung der Wasserteilchen und somit eine Verlängerung des Sickerweges, so wie die Erosionsminimierung an der Kontaktfläche zwischen Außendichtung und Deichkörper.





**Abbildung 3-11: Bentonitmatten im Kronenbereich des Deiches vor (links) und während des Einbaus (rechts)**

## 3.5 Aufbau des Deiches

### 3.5.1 Einbau des Sandkerns

Zunächst wurde eine ca. 10 cm dicke Schutzschicht aus dem Material des Sandkerns über den auf der Dichtung angeordneten Druckmessdosen (s. Kap. 4) eingebracht. Zur weiteren Sicherung der Messtechnik wurde im Bereich der späteren Deichkrone Kunststoffgitter ausgelegt, zusätzlich wurde die Lage der Messprofile durch gelbes Signalband gekennzeichnet. Dies gewährleistet im Falle eines Deichrückbaus den Schutz der Messtechnik.

Diese Ausgleichsschicht stellte das Planum für den zu errichtenden Deich dar und bildet zugleich den Modellnullpunkt.



**Abbildung 3-12: Ausgleichsschicht über den Dichtungsbahnen**

Der Sandkern wurde profilgerecht entlang vorgezeichneter Markierungen eingebaut. Die Verdichtung mittels Rüttelplatte erfolgte lagenweise bei einer maximalen Schichtdicke von 0,3 m. Im ersten Profil wurde ein Feinsand fS, mS (Sand 1), im zweiten Profil ein etwas gröberes Material mS, fS (Sand 2) (vgl. Abbildung 3-1) eingebaut. Die Druckmessdosen befinden sich jeweils ca. 3,5 m von der Außenwand entfernt, also in der Mitte der Profile.



**Abbildung 3-13: Schichtweiser Aufbau des Sandkerns; Probenahme**

Zu mehreren Bauphasen wurde der Verdichtungsgrad überprüft, indem ungestörte Proben aus dem Sandkern entnommen wurden. An diesen Proben wurden zunächst die Körnungslinie (siehe Abbildung 3-1) und die Proctordichte in Abhängigkeit vom optimalen Wassergehalt bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-1 dargestellt:

**Tabelle 3-1: Optimaler Verdichtungsgrad der Materialien in Abhängigkeit vom Wassergehalt**

Material	Proctordichte $p_{Pr}$ in $g/cm^3$	opt. Wassergehalt $w_{Pr}$ in %
Sand 1	1,723	13,5
Sand 2	1,676	15,5

Als Verdichtungsanforderung wurde eine Proctordichte  $D_{Pr}$  von  $\geq 95$  % gestellt, die durchschnittlich in allen Sandschichten erreicht wurde.

### 3.5.2 Einbau der Tondichtung

Aus bautechnischen Gründen erfolgte der Einbau der Tondichtung in zwei Bauphasen. Der erste Teil (wasserseitige Sohle und Böschung) wurde bereits bei einer Kronenhöhe von ca. 1,5 m ausgeführt, der zweite Teil (zweite Böschungshälfte und Krone) nach Fertigstellung des Sandkerns). Unter- und oberhalb der Dichtung wurde ein Geotextilvlies in Bahnen von 4,5 m Breite verlegt, das eine Vermischung der verschiedenen Materialien, Sand – Ton – Mutterboden im Falle der Durchsickerung und während der Verdichtung vermeidet.

Verwendet wurde ein Geotextilvlies mit  $270 g/m^2$  und einer Stärke von 1,4 mm. Dies entspricht der Vliesklasse 4.



**Abbildung 3-14: Einbau der unteren (rechts) und oberen (links) Vliesschicht auf der Wasserseite**

Als Dichtung wurde eine mineralische Tondichtung verwendet. Ton zeichnet sich insbesondere durch folgende Merkmale und Eigenschaften aus:

- die Tondichtung ist keinen Alterungserscheinungen unterworfen
- der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  liegt bei  $1 \cdot 10^{-11}$  m/s
- eine spätere Erweiterung bzw. Anbau an die vorhandene Dichtung ist problemlos möglich
- eventuell auftretende Schäden sind schnell und einfach zu reparieren
- Dichtungsdurchdringungen z. B. von Rohren oder Leitungen sind problemlos durchführbar

Die verwendeten Tonelemente sind bis zu einem Steigungsverhältnis von 1 : 3 einsetzbar, dies entspricht der Neigung der wasserseitigen Böschung.



**Abbildung 3-15: Dichtungselemente aus Naturton**

Die Dichtungselemente bestehen aus aufbereitetem, vakuumverdichteten Naturton. Ein Element hat eine Größe von  $0,37 \text{ m}^2$  mit den Abmessungen  $87 \times 42 \times 10 \text{ cm}$  (L x B x H) und wiegt  $65 \text{ kg}$ . Der Einbau erfolgte aus diesem Grund mit einer Verlegeklammer. Die Längsseiten der Elemente weisen ein Nut-Feder-System auf, das beim Verlegen der Elemente bündig aneinander schließt. Durch den schrägen Anschnitt der kurzen Seiten entsteht der bündige Anschluss zur Querrichtung.

Nach dem Einbau der Dichtungselemente war das Verketten erforderlich, wodurch die Einzelelemente zu einer Gesamtdichtung verbunden wurden. Das Verketten erfolgte mit einer Hydraulikwalze (hier:



Schafffußwalze) zu einer homogenen Schicht. Beim Befahren der Böschung wurde bereits eine zweite Vliesschicht aufgelegt, um ein Abrutschen der Walze zu verhindern.



**Abbildung 3-16: Verdichtung der Dichtungselemente mittels Schafffußwalze**

### 3.5.3 Oberflächenabdeckung

Die oberflächliche Abdeckung bildet eine Mutterbodenschicht, die mit Rollrasen abgedeckt wurde. Der Mutterboden wurde in einer Stärke von 20 cm aufgetragen und feinnivelliert, bevor der Rollrasen verlegt wurde. Zur Verhinderung von Nahtstellen wurden die einzelnen Bahnen des Rollrasens versetzt aneinander gelegt. Nach dem Verlegen des Rollrasens wurde dieser zum besseren Verbund an den Mutterboden angewalzt.



**Abbildung 3-17: Verlegung und Anwalzen des Rollrasens**

Im weiteren Verlauf wurden alle Arbeitsschritte auf der Krone und der luftseitigen Böschung wiederholt. Die unmittelbare Abfolge der beschriebenen Arbeitsschritte war erforderlich, da die verlegte Dichtung nicht austrocknen durfte und am gleichen Tag mittels Oberboden und Rollrasen abgedeckt werden musste.

### 3.5.4 Luftseitige Drainage im Deichfuß

Zum Auffangen des Sickerwassers wurde an der luftseitigen Böschung im Fußbereich eine Drainageleitung DN 300 in einer Sickerpackung aus Kies verlegt, die das Wasser, welches den Deichkörper durchsickert, auffängt und ableitet. An den Enden der Drainageleitung wurden Kontrollschächte mit Pumpen angeordnet (siehe Abbildung 3-18), die das anfallende Wasser sammeln und auf die Was-

serseite zurückpumpen. Je nach Material im Sandkern (Sand 1 und Sand 2) wurde ein separates Dränagesystem angeordnet. Die Filterstabilität gegenüber dem anstehenden Material wurde durch Verwendung eines Geotextilvlieses gewährleistet.



**Abbildung 3-18: Böschungfußdränage mit Vliesummantelung und Kontrollschächten**



**Abbildung 3-19: Fertiger Labordeich (Füllstand ca. 1,5 m)**



### 3.6 Steuerung der Durchsickerung

Die durchgängige Tonschicht des Versuchsdeiches wies nach dem beschriebenen Einbau eine sehr hohe Wasserundurchlässigkeit auf, da das Material ursprünglich für Bereiche in denen eben die Wasserhaltung gewünscht ist entwickelt wurde. Um eine kontrollierte und möglichst komplette Durchsickerung des Deichs mit einem Sickerwasseraustritt auf der binnenseitigen Böschung zu erzielen, wurden definierte Öffnungen in die wasserseitige Böschung des Deichs eingebaut (Abbildung 3-20).

Insgesamt wurden je drei Öffnungen in einer Höhe von 1,0 m, 1,5 m und 2,0 m über der Sohle angeordnet. Eine Öffnung lässt sich von der Deichkrone aus während des Versuches regulieren. Die übrigen Öffnungen können lediglich mit einem Deckel verschlossen werden. Die Rohre sind senkrecht zur Böschungsneigung ausgerichtet und stehen direkt auf dem Sandkern. Ein Geotextil vor der unteren Öffnung verhindert den Austrag von Kernmaterial.

Im horizontalen Bereich vor dem wasserseitigen Böschungsfuß sind zwei weitere Rohre mit Ventilen abgeordnet. Diese dienen nicht dem Wassereintritt in den Deich sondern zur Entlastung des von unten wirkenden Wasserdrucks beim schnellen Entleeren der Anlage.



Abbildung 3-20: Öffnungen in der wasserseitigen Böschung des Deichs während des Einstaus bzw. während des Einbaus



Abbildung 3-21: Öffnungen auf der wasserseitigen Böschung des Deiches



## 4 Messtechnik

### 4.1 Messparameter

Zur Beobachtung des Sickervorganges und der Ausbildung von feuchten Bereichen an der Deichoberfläche ist die Anordnung unterschiedlicher Messgeräte erforderlich. Die Signale aller elektronischen Messgeräte werden mit Hilfe von Messverstärkern in ihrer spezifischen, physikalischen Messgröße dargestellt und von einem zentralen Messrechner kontinuierlich gespeichert. Stromversorgung und Messrechner sind winterfest in einem Container neben dem Labordeich untergebracht. Um eine leichte Anlagenunterhaltung zu gewährleisten verlaufen alle Kabel in Schutzrohren unterhalb der Deichoberfläche oder in Kabelkanälen außerhalb der Anlage.

**Tabelle 4-1: Kurzübersicht der Messparameter und eingesetzter Messtechnik**

Freier Wasserspiegel	Druckmessdose, Pegellatte
Sickerlinie im Deich	Druckmessdosen
Sickerwassermenge	Konventionelle Wasseruhren
Bodenfeuchtigkeit	Feuchtesensor (basierend auf Zeitbereichsreflektometrie)
Bodentemperatur	Platin-Widerstandsthermometer
Wassertemperatur	Platin-Widerstandsthermometer
Klimadaten	Digitale Wetterstation

Der eingestaute Wasserstand wird elektronisch mit einer Druckmessdose gemessen. Zur optischen Kontrolle ist im Bereich des Einlaufbauwerks zusätzlich eine konventionelle Pegellatte installiert. Die Lage der Sickerlinie wird in zwei Profilen von jeweils 10 exakt vermessenen und auf der Anlagensohle fixierten Druckmessdosen registriert. Zwei weitere Druckmessdosen erfassen den Wasserstand in der Drainageleitung. Anhand dieser Messwerte werden automatisch zwei Tauchpumpen angesteuert die ein „Überlaufen“ der Anlage verhindern in dem das Sickerwasser bei Bedarf wieder auf die Wasserseite zurück gepumpt wird. Die geförderte Wassermenge wird mit zwei Wasseruhren ermittelt. Die Messung der Wassertemperatur erfolgt als Tiefenprofil in fünf Tiefen.

Für das Projekt „Deichmonitoring“ ist insbesondere die oberflächennahe Bodenfeuchtigkeit und Bodentemperatur von Bedeutung. Beide Parameter werden auf der luftseitigen Deichböschung lotrecht über der Position der Druckmessdosen aufgenommen. Die Temperaturfühler sind direkt unterhalb der Grasnarbe installiert. Die Messung der Bodenfeuchtigkeit erfolgt berührungslos in Form von Tiefenprofilen. Dabei werden die Sonden in spezielle Kunststoffrohre eingeführt die nach Fertigstellung des Labordeiches in den Deichkörper eingebracht wurden.

Bei der Durchsickerung eines Erdkörpers stellt sich erst nach einiger Zeit ein stationärer Zustand ein (Abhängig von Deichabmessung, Bodenaufbau und -durchlässigkeit innerhalb weniger Stunden oder nach bis zu 40 Tagen und mehr). Die Versuche dauern daher in der Regel mehrere Tage. Daher ist es erforderlich, die klimatischen Bedingungen während des Versuchszeitraumes zu berücksichtigen. Um Niederschlagsspenden und Verdunstungsverluste zu erfassen, wurde eine digitale Wetterstation neben dem Labordeich installiert. Die gemessenen Parameter umfassen Windgeschwindigkeit, Wind-

richtung, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Erdbodentemperatur, Wassertemperatur, Erdoberflächentemperatur, Globalstrahlung, Niederschlagssumme und barometrischer Luftdruck.

## 4.2 Messung der Sickerlinie

Druckmessdosen wurden direkt auf der Sohlabdichtung angeordnet und mit Hilfe der Rasterstruktur eines Kunststoffgitters lagestabil befestigt. Für die zwei unterschiedlichen Deichabschnitte wurden in zwei Messquerschnitten (siehe Abbildung 4-1) jeweils 10 Druckmessdosen verteilt. Auf der Wasserseite wurde wegen der flacheren Böschungsneigung ein Abstand von 1,50 m zwischen den Messdosen angeordnet, auf der Luftseite ein Abstand von je 1,0 m.

Da die Druckmessdosen nur durch einen kompletten Rückbau der Anlage wieder erreichbar sind und folglich bei einem Defekt nicht ausgetauscht werden können, wurde bei der Wahl auf eine robuste Verarbeitung geachtet. Es wurden Druckmessdosen der PDCR/PTX 1830 Serie mit einem Messbereich von 1 Bar der Fa. GE Druck verwendet. Die Pegelsonde wurde als tauchfähige Sonde zur Messung des hydrostatischen Druckes in Flüssigkeiten entwickelt. Typische Anwendungen sind Pegelmessungen im Oberflächengewässer und Grundwasser sowie Tankinhaltsmessungen. Die Messzelle aus Edelstahl ist hermetisch dicht gekapselt, mit Elektronenstrahl geschweißt und heliumleckgeprüft. Ein spezielles Sondenkabel mit Kevlar-Zugentlastung, integriertem Druckausgleich und Kondensatonschutz ist druckdicht mit dem Sondenkörper verbunden. Diese Verbindung hat entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer der gesamten Messeinrichtung.

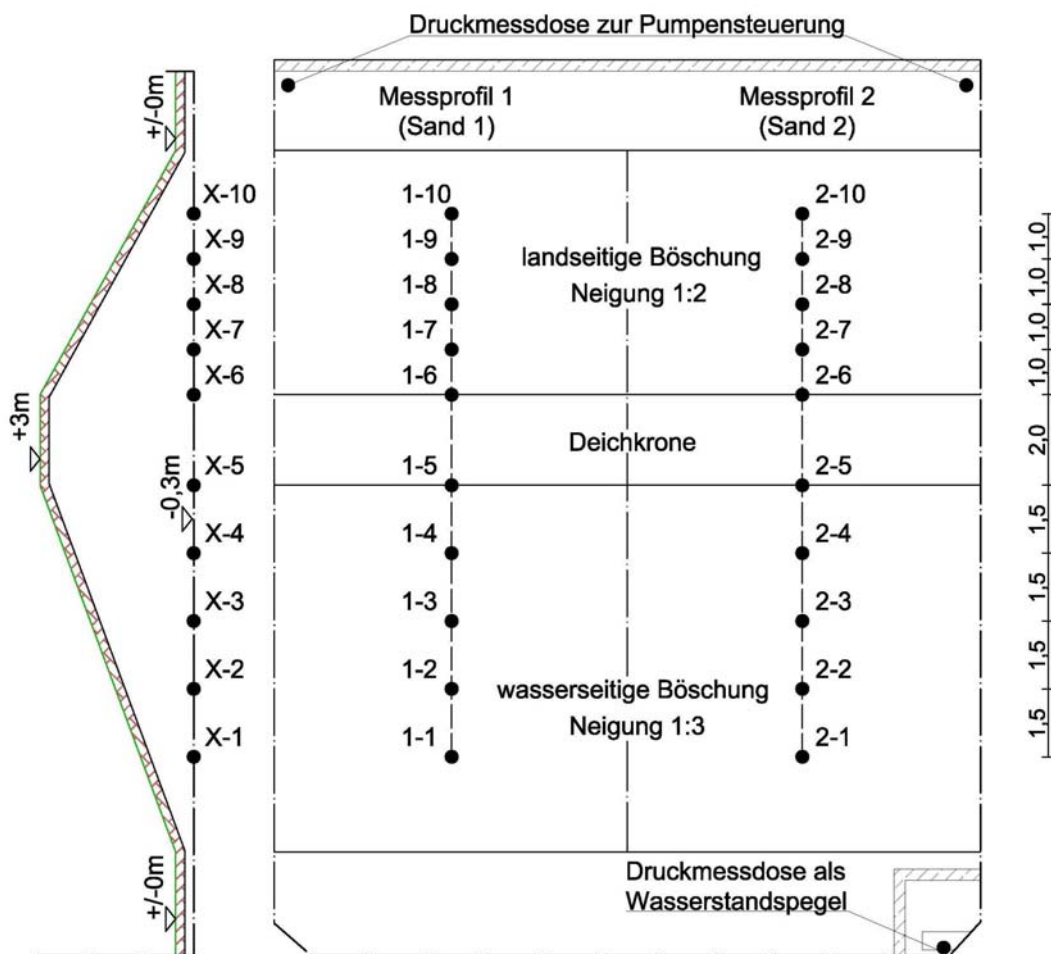


Abbildung 4-1: Lage der Messprofile der Druckmessdosen



**Abbildung 4-2: Lagefester Einbau der Druckmessdosen auf Kunststoffgitter**

### 4.3 Messung der Sickerwassermenge

Zum Auffangen und zur Bestimmung der Mengen des Sickerwassers wurde im luftseitigen Bereich des Deichs eine Dränage eingebaut. Das Dränrohr ist in Längsrichtung in der Mitte getrennt, so dass jede Seite nur das Sickerwasser des jeweiligen Deichquerschnittes aufnimmt. Die Außenseiten des Dränrohres münden jeweils in einen Inspektionsschacht, in den eine Druckmessdose mit einem Messbereich von 75 mBar eingebaut ist.

Anhand des gemessenen Wasserstands im Dränrohr wird je Inspektionsschacht eine unabhängig betriebene Tauchpumpe gesteuert, die das anfallende Sickerwasser zurückpumpt. Die Sickerwassermenge wird während des Pumpens durch eine Wasseruhr registriert.



**Abbildung 4-3: Foto der Sickerwasser-Druckmessdose (links) und verwendete Wasseruhr (rechts)**

### 4.4 Bodenfeuchtemessung

Neben der Messung des Porenwasserdrucks und der damit verbundenen Beschreibung des Verlaufs der Durchsickerung ist es möglich, die Bodenfeuchtigkeit an 13 Positionen im Deich über die Tiefe zu ermitteln. Die Messung kann gleichzeitig an 5 Positionen mit Bodenfeuchtigkeitssensoren erfolgen. Die Bodenfeuchtigkeitssensoren sind für die Messung des Wassergehaltes in sandigen Böden ausgelegt. Mit den Sonden ist eine schnelle, regelmäßige, zerstörungsfreie und indirekte Messung des Wassergehaltes ohne Verwendung radioaktiven Materials durchführbar. Das Sondenrohr besteht aus

einem zylindrischen Gehäuse, das in ein Messrohr eingeführt wird. Die Messrohre verbleiben nach der Installation für weitere Messungen im Boden.

Die Sensoren haben ein Messfeld von 25 cm vertikal und bis zu 50 cm im Durchmesser horizontal. Die Messung erfolgt mittels einer TDR (TDR = Time Domain Reflectometry) Messtechnik. Der Sensor generiert einen hochfrequenten Impuls (höher als 1GHz), der sich entlang des Metallgehäuses verbreitet. Dadurch wird ein elektromagnetisches Feld im Umkreis der zu untersuchenden Probe erzeugt. Am Ende des Gehäuses wird der ausgesendete Impuls zum Ausgangspunkt zurückreflektiert. Die resultierende Übertragungszeit (3ps bis 2ns) wird gemessen und ermöglicht die Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, die primär vom Wassergehalt abhängt. Der Volumenanteil des Wassers wird durch die Geschwindigkeit ermittelt und kann sofort auf einem angeschlossenen Display angezeigt werden.

Die Messung dient zur Verifizierung der Höhenlage des Durchsickerungswasserstandes. Hier kann der Bodenfeuchtigkeitssensor in der Höhenlage so verändert werden, bis er 100 % Bodenfeuchte ermittelt. Diese Höhenlage sollte aufgrund der geringeren vertikalen Auflösung etwa in dem Bereich des durch die Druckmessdosen ermittelten Wasserstands liegen.

Wichtig ist auch die Ermittlung eines vertikalen Bodenfeuchtigkeitsprofils anhand dessen auch eingesickertes Oberflächenwasser im Bereich der luftseitigen Böschung erfasst werden kann. Da das Umsetzen der Sonden manuell erfolgt, dauert die Ermittlung des vertikalen Bodenfeuchteprofils pro Messquerschnitt ungefähr 15 bis 20 Minuten, es kann also keine kontinuierliche Messung über die Zeit erfolgen.

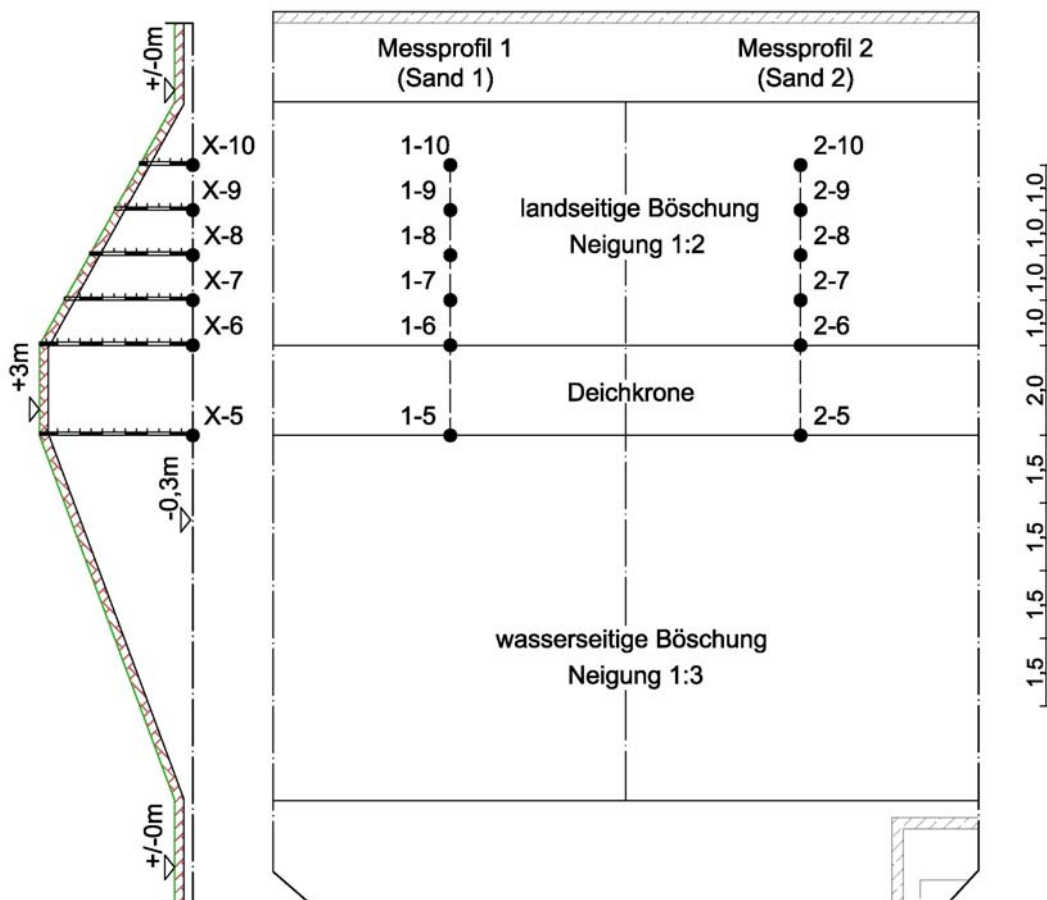
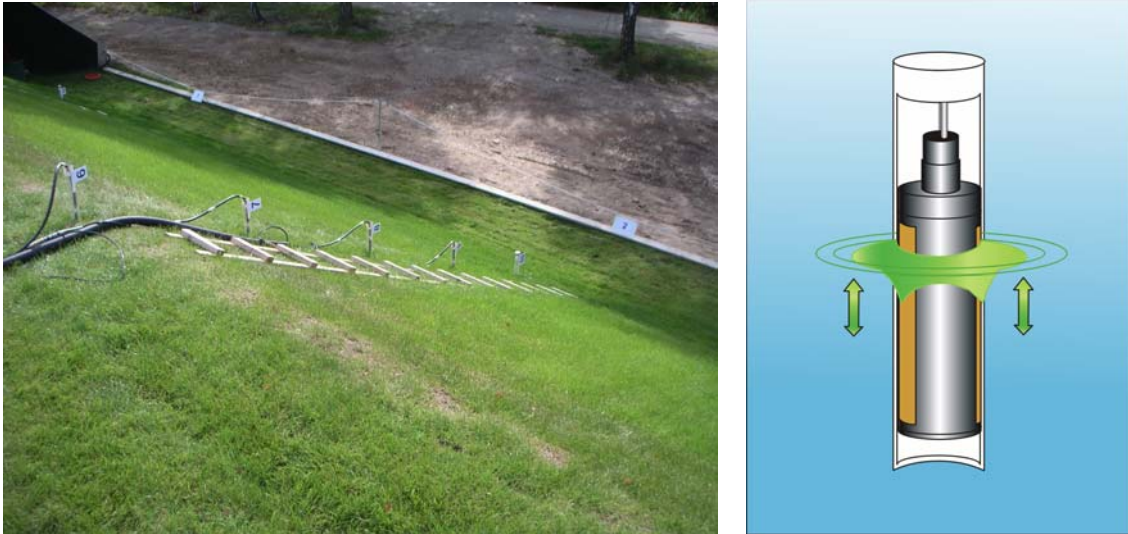


Abbildung 4-4: Lage der Messprofile der Feuchtigkeitssensoren





**Abbildung 4-5:** Lage der Kunststoffrohre zur Messung der Bodenfeuchte (links) und schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Bodenfeuchtesensoren

## 4.5 Messung der Bodentemperatur

Zur Messung der Bodentemperatur und der Wassertemperatur bei verschiedenen Wasserhöhen wurden Temperaturmesser eingebaut. Verwendung fanden Platin-Widerstandsthermometer, so genannte PT100 Temperaturfühler. Widerstandsthermometer zeichnen sich allgemein durch eine hohe Messgenauigkeit aus. Die hier verwendeten Thermometer weisen eine Genauigkeit von  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  auf.

Das Messprinzip der Temperaturmessung beruht auf der Eigenschaft aller Leiter und Halbleiter, Ihren elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur zu verändern. Die Temperatur wird über Platin-Glaswiderstände gemessen. Mit zunehmender Temperatur nimmt auch der Widerstand zu und umgekehrt. Für die Messung wird der Spannungsabfall über den Widerstand gemessen und daraus die Temperatur bestimmt. Die Temperaturgrenzen für Platin-Glaswiderstände liegen bei  $-200$  bis  $+400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Bedingt durch die Verwendung des Werkstoffes Glas ist auch der Gebrauch in aggressiven Medien ohne weitere Schutzhüllen möglich. Einsatzmöglichkeiten von Platin-Glaswiderständen liegen z. B. in Laborversuchen.



**Abb. 4-1:** Messfühler PT100 (links) und Einbau in der luftseitigen Böschung des Labordeichs (rechts)

## 4.6 Meteorologische Daten

Im Einflussbereich der Versuchsanlage wurde eine Wetterstation aufgebaut. Im Einzelnen setzt sich die Wetterstation aus den folgenden Komponenten zusammen.



- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Erdbodentemperatur
- Wassertemperatur
- Erdoberflächentemperatur
- Globalstrahlung
- Niederschlagssumme
- Barometrischer Luftdruck

Die Windgeschwindigkeit wird mit dem Windgeber gemessen. Der Anwendungsbereich des Windgebers liegt im Erfassen horizontaler Windgeschwindigkeiten. Die Windgeschwindigkeit wird mit einem trägheitsarmen Kunststoff-Schalenstern erfasst, dessen kugelgelagerte Achse mit einer Schlitzscheibe verbunden ist. Die Schlitzscheibe wird berührungslos, optisch abgetastet und liefert 10 bis 11 Impulse pro Umdrehung. In der eingebauten Elektronik werden die Impulse geformt, die zur digitalen Messwertverarbeitung genutzt werden.



- Messbereich: 0,5 bis 50 m/s  
Messgenauigkeit:  $\pm 0,5$  m/s oder  $\pm 3$  % vom Messwert  
Umgebungstemp.:  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $70^{\circ}\text{C}$

**Abbildung 4-6: Windgeber zur Messung der Windgeschwindigkeit**

Die Windrichtung wird mittels Windrichtungsgeber erfasst. Der Windrichtungsgeber dient zur Erfassung der horizontalen Windrichtung und zur Umsetzung in elektrische Signale. Die Windrichtung wird mit einer trägheitsarmen Windfahne aus Kunststoff erfasst, deren kugelgelagerte Achse mit einer Co-

descheibe verbunden ist. Diese Codescheibe beinhaltet einen Gray-Code, der opto-elektronisch abgetastet wird.



Messbereich: 0 bis 360  
Fehlertoleranz:  $\pm 0,5^\circ$   
Umgebungstemp.: -30 bis 70 °C

**Abbildung 4-7: Windrichtungsgeber zur Messung der Windrichtung**

Die Messwerte des Windgebers und des Windrichtungsgebers werden als Eingangssignale für Data-logger verwendet. Für den Winterbetrieb sind die Geräte mit einer elektronisch geregelten Heizung versehen, um ein Einfrieren der Kugellager und äußeren Rotationsteile zu verhindern.

Der Hygro-Thermogeber bestimmt die relative Feuchte und die Temperatur in der Luft. Zur Reduzierung verfälschter Messergebnisse wird ein Wetter- und Strahlungsschutz verwendet.



Feuchte:  
Messelement: FE 09/1  
Messbereich: 0 bis 100 % rel. Feuchte  
Abweichung:  $\pm 2$  % rel. Feuchte  
(MB 5...95% rel. F. bei 10...40°C)  
Temperatur:  
Messelement: Pt 100 1/3 DIN, Klasse B  
Messbereich: -30 bis 70 °C

**Abbildung 4-8: Hygro-Thermogeber zur Messung der relativen Luftfeuchte und -temperatur**

Die Bodentemperatur wird mit einem Temperaturgeber erfasst, der die Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen misst. Als Sensor dient ein Pt 100-Widerstandsthermometer, das in einem Edelstahlrohr eingekapselt ist.

Messbereich: -30 bis 130 C  
Genauigkeit:  $\pm 0,1$  K bei 0 °C

Die Messung der Wassertemperatur erfolgt mit einem Wassertemperaturgeber, der im Unterschiede zum Temperaturgeber wasserdicht gekapselt ist.

Messbereich: -50 bis 200 °C

Genauigkeit:  $\pm 0,1$  K; 1/3 Klasse B

Der Erdoberflächen-Temperaturgeber dient als Messwertaufnehmer zur Ermittlung von Temperaturen in Bodennähe. Ein wesentliches Einsatzgebiet ist die Ermittlung von Bodenfrost. Die Erdbodentemperatur wird ca. 5 cm über dem Erdboden gemessen, während die Messung der Lufttemperatur im 2 m Höhe erfolgt. Die Temperatur kann in unmittelbarer Bodennähe bis etwa 5 °C tiefer sinken als in der Wetterhütte. Um den Strahlungsfehler weitgehend auszuschalten, wird der Messfühler von einem Dach abgedeckt. Dieses Dach hat nach außen eine silber glänzende Oberfläche zur Strahlenreflexion, während die nach innen gerichtete Fläche schwarz lackiert ist. Die um den Fühler gebauten Schutzrohre reflektieren die vom Dach abgegebene Strahlung und dienen zusätzlich als mechanischer Schutz des Sensors. Alle Teile sind so angeordnet, dass eine gute Durchlüftung zur Vermeidung eines Wärmestaus gegeben ist.

Messbereich: -30 bis 50 °C

Genauigkeit:  $\pm 0,1$  K bei 0 °C

Das Pyrometer dient zur Erfassung der Sonneneinstrahlung. Die Strahlung ist die aus dem oberen Halbraum auf eine horizontale Fläche auffallende Strahlung im Wellenbereich des Sonnenspektrums. Die Präzisionskuppel aus optischem Glas dient als Filter mit einem spektralen Bandfilter, der es dem gesamten Sonnenspektrum ermöglicht, zum Sensor zu gelangen. Des Weiteren schützt die Glaskuppel den Sensor vor anderen Witterungseinflüssen. Der Sensor ist eine geschwärzte Thermosäule, deren Aufheizung durch die auftretende Sonnenstrahlung ein Signal im Mikrowellenbereich bewirkt, das durch das Kabel weitergeleitet wird. Mittels Kalibrierung wird die Ausgabespannung einer Sonnenstrahlung zugeordnet.

Messbereich: 0 bis 1.300 W/m<sup>2</sup>



**Abbildung 4-9: Hygro-Thermogeber zur Messung der relativen Luftfeuchte und -temperatur**

Mit dem Niederschlagsgeber kann die Niederschlagshöhe, die Menge und die Intensität des auf die Erdoberfläche fallenden Niederschlags gemessen werden. Der durch die 200 cm<sup>2</sup> große Auffangfläche fallende Niederschlag wird durch ein Einlaufsieb in eine Kippwaage geleitet. Nach der Aufnahme einer Niederschlagsmenge von 2 cm<sup>3</sup> (entsprechend 0,1 mm Niederschlag) kippt die Waage um. Dieser Kippvorgang wird mit einem Reed-Schalter erfasst und erzeugt in Verbindung mit einer nachgeschalteten Elektronik einen Ausgangsimpuls für 0,1 mm Niederschlag.





Auffangfläche:	200 cm <sup>2</sup>
Fassung Kippwaage:	2 cm <sup>3</sup>
Messbereich:	0 bis 7 mm/min
Auflösung:	0,1 mm Niederschlag
Genauigkeit:	± 3 %
Umgebungstemp.:	-25 bis 60 °C (mit Heizung)

**Abbildung 4-10: Niederschlagsgeber zur Messung der Niederschlagshöhe, -intensität, -menge**

Der Barogeber misst den barometrischen Umgebungsdruck und gibt den Messwert als elektrischen Spannungswert aus. In den Barogebern PTB 100 wird ein kapazitiver Silizium-Absolutdrucksensor eingesetzt, der sich durch hohe Genauigkeit und Langzeitstabilität auszeichnet.



Messbereich:	800 bis 1060 hPa
Temperaturbereich:	-40 bis 60 °C
Feuchtebereich:	nicht kondensierend

**Abbildung 4-11: Barogeber zur Messung barometrischen Umgebungsdrucks**



## 5 Betrieb des Labordeiches

Ziel der bisher durchgeführten Versuche war es, den Deich an definierten Stellen durchfeuchten zu lassen, sowie den Einfluss verschiedener Pflanzen zu unterschiedlichen Wachstumsphasen zu untersuchen. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Simulation und Darstellung von Durchsickerungen des Deichs bei unterschiedlicher Materialzusammensetzung, Bepflanzung, Belastungsdauer und Witterung. Des Weiteren wurde die Analyse bestimmter deichtypischer Schadensmerkmale, wie z.B. Sickerwasseraustritte an der Binnenböschung, ermöglicht.

Der Einstau sollte also so lange erfolgen, bis eine vollständige Durchsickerung des Deichs erreicht war. Nach der Durchführung von Referenzversuchen mit geschlossener Dichtung wurden hierfür die in Kap. 3.6 beschriebenen Öffnungen in die wasserseitige Böschung eingebracht.

Die Untersuchungen erfolgten zu unterschiedlichen Tageszeiten und meteorologischen Randbedingungen, um ein möglichst breites Spektrum natürlicher Randbedingungen abzudecken.

Abbildung 4-12 zeigt beispielhaft Messergebnisse aus dem Projekt "Deichmonitoring". Dabei sind alle erfassten Messgrößen anschaulich in einer Gesamtgrafik dargestellt.

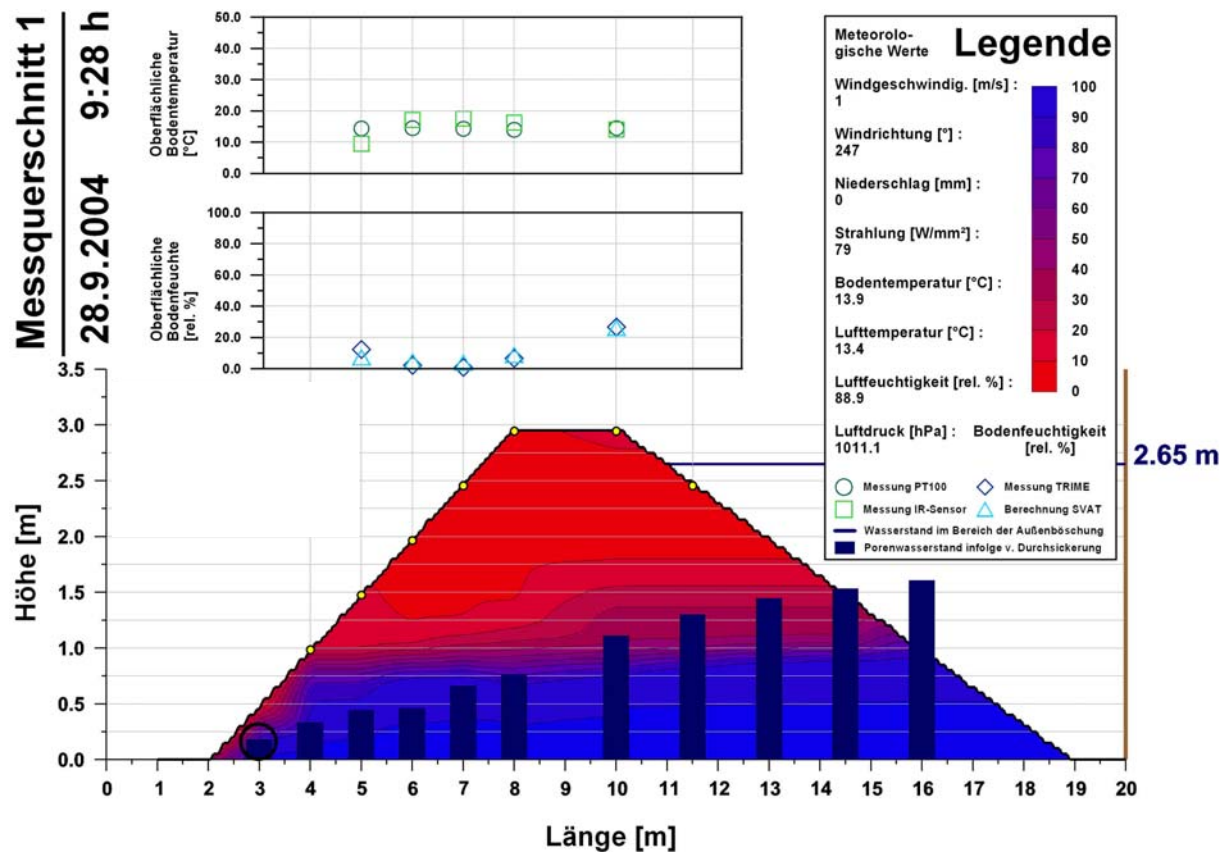


Abbildung 4-12: Beispielhafte Darstellung der Messergebnisse - Komplette Durchsickerung - 15 h nach Beginn des Einstaus



## 6 Schrifttum

**BRAUNS, JOSEF (1985)**

Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung, Wasserwirtschaft 75 (1985)

**DAVIDENKOFF, R. (1957)**

Durchsickerung durch Deiche und Erddämme - Wirkung der Sickerströmung auf die Standsicherheit eines Erddammes, Mitteilungsblatt BAW 10/1957 Heft 9

**DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1997)**

DIN 19712, Flussdeiche, Beuth Verlag, November 1997

**DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1996)**

DIN EN 60751, Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Messwiderstände, Beuth Verlag, Juli 1996

**DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (1986)**

Flussdeiche, Merkblätter zur Wasserwirtschaft 210, Verlag Paul Parey, 1986

**DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (1992)**

Historischer Küstenschutz an Nord- und Ostsee, Verlag Konrad Wittwer, 1992

**HERRMANN, RICHARD; JENSEN, JÜRGEN HRSG. (2003)**

Sicherung von Dämmen und Deichen - Handbuch für Theorie und Praxis Universitätsverlag Siegen, 2003

**KRAMER, JOHANN (1989)**

Kein Deich kein Land - Kein Leben: Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee, Verlag Gerhard Rautenberg, 1989

**POHL, R**

Probabilistische Überlegungen bei der Durchströmung von Deichen, TU Dresden

**RIECHWIEN (1996)**

Kritische Beanspruchung von Deichböden - Versagensformen und Nachweiskonzepte, HANSA Nr. 5, Uni Essen 1996

**RIECHWIEN; SCHOEN; WITTKOP (1997)**

Der Nachweis der Standsicherheit von Deckwerken bei schnellem Wasserspiegelabsenk, Binnenschiffahrt - ZfB Nr. 23, S. 30-36, 1997

**RUPPERT, JÜRGEN (1985)**

Zur plötzlichen Wasserstansabsenkung beim Standsicherheitsnachweis von Deichen, Wasserwirtschaft 75 (1985)

**SOMMER, HEINRICH (1980)**

Erosionsuntersuchungen bei Brüchen an unterströmten Rheindeichen, Wasserwirtschaft 70 (1980)

**STROBL, T; HASELSTEINER R. (2004)**

Zum Einfluss von Bewuchs und Hohlräumen auf die Durchsickerung von Deichbauten, TU München

## **Herstellerinformationen zur Mess- und Bautechnik**

### **BODENFEUCHTESENSOREN**

Imko Micromodultechnik GmbH  
[www.imko.de](http://www.imko.de)

### **DRUCKMESSDOSEN**

Druck Messtechnik GmbH  
[www.druck.com](http://www.druck.com)

### **DICHTUNGEN AUS NATURTON**

Dia Dieckmann GmbH & Co.KG  
[www.dia-dieckmann.de](http://www.dia-dieckmann.de)

### **FOLIEN UND GEOTEXTILIEN**

Naue Sealing GmbH & Co.KG  
[www.nauesealing.com](http://www.nauesealing.com)

### **KLIMA-MESSTECHNIK**

Adolf Thies GmbH & Co.KG  
[www.thiesclima.com](http://www.thiesclima.com)



