

# Pro Altbeton zum Hochwasserschutz

## Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

### **„Verbundprojekt: Deichbau – Nutzung ausgebauter großformatiger Betonelemente aus dem Wohnungsbau für den Hochwasserschutz; Teilvorhaben BTU Cottbus“**

gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung  
(FKZ 19W4004A)

Projektträger: TÜV Rheinland Consulting GmbH, Projektträger Mobilität und  
Verkehr, Bauen und Wohnen, Köln

Projektleitung: Dr.-Ing. Angelika Mettke

Autor/Innen: Dipl.-Ing. Sören Heyn  
Dr.-Ing. Angelika Mettke

Cottbus, 16.04.2009

Weitere Bearbeiter/Innen im Projekt

(unterschiedlich vertraglich gebundene und zeitliche Mitarbeit):

Lehrstuhl Altlasten, Fachgruppe Bauliches Recycling

Dipl.-Ing. Jan Czyganowsky

Dipl.-Ing. Stefan Asmus (M.A.)

Dipl.-Ing. Cynthia Thomas

Dipl.-Ing. Ricarda Hänsel

Technische Mitarbeiter/Innen:

Cand.-Ing. Gregor Kania

Cand.-Ing. Andreas Gude

Cand.-Ing. Nina Warzecha

Gero Woydich

Daniela Zalon

Dipl.-Ing. Annett Herrmann

Lehrstuhl Bodenmechanik und Grundbau / Geotechnik

Prof. Dr.-Ing. Lutz Wichter

Dipl.-Ing. Corinna Reinfeld

Dipl.-Ing. Kathleen Tobias

Dipl.-Ing. Nils Wienberg

Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau

Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Koch

Dr.-Ing. Lutz-Uwe Finze

Dipl.-Ing. (FH) Ralf Regel

ECOSOIL Ost GmbH

Dipl.-Ing. Dietmar Gottschling

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Mathen

BTU Cottbus

Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik

Lehrstuhl Altlasten

Fachgruppe Bauliches Recycling

Dr.-Ing. Angelika Mettke

Siemens-Halske-Ring 8

03046 Cottbus

Telefon: 0355 / 69 22 70

Telefax: 0355 / 69 31 71

Email: [mettke@tu-cottbus.de](mailto:mettke@tu-cottbus.de)

URL: [www.tu-cottbus.de/altlasten](http://www.tu-cottbus.de/altlasten)

# Inhaltsverzeichnis

<b><i>Inhaltsverzeichnis</i></b> .....	<b>1</b>
<b>1 <i>Das Projekt</i></b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 Problemstellung</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2 Zielstellung des Forschungsvorhabens</b> .....	<b>7</b>
<b>1.3 Methodische Herangehensweise</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4 Projektpartner</b> .....	<b>9</b>
<b>1.5 Verwertung der Ergebnisse – Der Bericht</b> .....	<b>9</b>
<b>2 <i>Stadtumbau und Hochwasserschutz</i></b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Leerstand und Stadtumbau</b> .....	<b>10</b>
2.1.1 Wohnungsleerstand in Ostdeutschland.....	10
2.1.2 Teilrückbau, Bestandsaufwertung, Stadterneuerung .....	14
2.1.3 Wiederverwendungspotenzial des krangeführten Rückbaus .....	15
<b>2.2 Klimawandel und Hochwasserschutz</b> .....	<b>15</b>
2.2.1 Einflüsse des Klimawandels .....	16
2.2.2 Ursachen und Entstehung von Hochwassern .....	17
2.2.3 Hochwasserereignisse in Deutschland.....	18
<b>2.3 Symbiose von Stadtumbau und Hochwasserschutz</b> .....	<b>21</b>
<b>3 <i>Der konventionelle Deichbau und die Deichertüchtigung</i></b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 Grundlagen des Deichbaus</b> .....	<b>23</b>
3.1.1 Bestehende Regelwerke zum Deichbau .....	23
3.1.2 Begriffe.....	23
3.1.3 Bemessungsgrundlagen .....	25
3.1.4 Deichausbildung .....	27
3.1.4.1 Querschnittselemente .....	27
3.1.4.2 Deichprofile .....	28
3.1.4.3 Deichentwässerung und Wasserableitung.....	31
3.1.4.4 Dichtungen .....	32
3.1.4.5 Überlaufstrecken .....	34
3.1.5 Deichbaustoffe .....	35
3.1.5.1 Konventionelle Deichbaustoffe .....	35
3.1.5.2 Anforderungen an Deichbaustoffe .....	36
3.1.5.3 Dichtungsbaustoffe .....	37
3.1.5.4 Deichschutz.....	42

---

<b>3.2</b>	<b>Deichertüchtigung und Sanierung .....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Teilneubau .....	44
3.2.2	Nachträglicher Einbau von Dichtungselementen.....	45
3.2.3	Deicherhöhung.....	46
3.2.4	Überlaufstrecken.....	48
<b>4</b>	<b>Qualität der RC-Betonbauteilen .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Verfügbares Sortiment an RC-Betonbauteilen .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Geometrie der Betonelemente .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3</b>	<b>Betontechnische Merkmale der RC-Betonbauteile .....</b>	<b>52</b>
4.3.1	Betondruckfestigkeit .....	52
4.3.2	Expositionsklassen .....	56
4.3.3	Betondeckung, Karbonatisierung.....	61
4.3.4	Permeabilität, totale Porosität, Wassereindringtiefe.....	65
4.3.5	Widerstand gegen Frosteinwirkung mit und ohne Einwirkung von Taumitteln.....	66
4.3.6	Säurewiderstand .....	67
<b>4.4</b>	<b>Umweltverträglichkeitsprüfung .....</b>	<b>76</b>
<b>4.5</b>	<b>Fazit – Qualitätsuntersuchungen der RC-Bauteile.....</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>Konstruktion von Deichen mit RC-Betonbauteilen.....</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Variante 1 – Oberflächendichtung .....</b>	<b>81</b>
5.1.1	Konstruktive Ausbildung – Grundlegendes, Anforderungen .....	81
5.1.2	Beschreibung des Bauablaufes .....	82
<b>5.2</b>	<b>Variante 2 - Innendichtung .....</b>	<b>85</b>
5.2.1	Konstruktive Ausbildung .....	85
5.2.2	Beschreibung des Bauablaufes .....	86
<b>5.3</b>	<b>Varianten 3 – Überlaufstrecken.....</b>	<b>88</b>
5.3.1	Konstruktive Ausbildung .....	88
5.3.2	Bemerkungen zur bautechnischen Realisierung .....	89
<b>5.4</b>	<b>Übersicht zur Fugenausbildung .....</b>	<b>89</b>
5.4.1	Hinweise zur Ausbildung der Stirnseiten und Kanten gebrauchten Bauteile .....	90
5.4.2	Einfluss des Einbaus der Bauteile auf die Fugengestaltung .....	90
5.4.3	Innendichtung .....	91
5.4.4	Oberflächendichtung.....	92
5.4.5	Ausbildung der Fugen.....	93
5.4.6	Erläuterungen zu möglichen Dichtungsvarianten .....	94
5.4.6.1	Beton .....	94
5.4.6.2	Brunnenschaum (PU-Schaum) .....	95

---

5.4.6.3	Ton - Packungen.....	95
5.4.6.4	Überlappung der Fugen mit Betonelementen.....	96
5.4.6.5	Bentonit-Fugendichtbleche.....	96
5.4.6.6	Orbit-Flex.B.....	96
<b>5.5</b>	<b>Allgemeine Standsicherheit der entwickelten Varianten.....</b>	<b>97</b>
5.5.1	Lastfälle.....	97
5.5.2	Grundlagen der Standsicherheitsüberprüfung.....	98
5.5.2.1	Randbedingungen.....	98
5.5.2.2	Ansprüche an die Deichbaumaterialien.....	98
5.5.3	Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchung am Versuchsdeich.....	99
5.5.3.1	Homogener Deich.....	99
5.5.3.2	Oberflächendichtung.....	103
5.5.3.3	Innendichtung.....	105
5.5.3.4	Überlaufstrecke.....	107
5.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	108
<b>6</b>	<b>Wirtschaftliche Betrachtung des RC-Einsatzes.....</b>	<b>109</b>
6.1	Vergleich konventioneller und neu entwickelter Deichbauweisen.....	109
6.2	Betrachtung der Betonfertigteile und ihrer Transportkosten.....	112
6.3	Baukalkulation.....	115
6.3.1	sirAdos - Leistungspositionen und Baupreise.....	118
6.3.2	Fugenabdichtung.....	122
6.3.3	Baubeschreibung.....	124
6.3.3.1	Deich mit Oberflächendichtung.....	126
6.3.3.2	Deich mit Innendichtung.....	126
6.3.3.3	Deich mit Überlaufstrecke.....	127
6.3.4	Baukostenermittlung und -vergleich.....	128
6.4	Kostenvergleich und Kosten-Nutzen-Betrachtungen.....	132
6.4.1	Kostenvergleichsrechnung.....	132
6.4.2	Schaden-Nutzen-Betrachtung.....	136
6.5	Fazit - Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	138
<b>7</b>	<b>Ökologische Relevanz des RC-Einsatzes.....</b>	<b>143</b>
7.1	Flächen- und Bodenverbrauch.....	143
7.2	Energetische Betrachtung.....	144
7.2.1	Untersuchte Szenarien.....	144
7.2.2	Gewähltes Fallbeispiel.....	145
7.2.3	Stoffliche Aufbereitung - Fallbeispiel.....	146
7.2.4	Transportaufwendungen für rückgebaute Betonbauteile - Fallbeispiel.....	147

---

7.2.5	Resultierende Deichlängen des RC-Bauteileinsatzes - Fallbeispiel.....	148
7.2.6	Energetische Aufwendungen für die Herstellung der Dichtungsvarianten aus RC-Bauteilen - Fallbeispiel .....	149
7.2.7	Transportaufwendungen für die Erdmassen - Fallbeispiel .....	151
7.2.8	Aufwendungen für den Einbau der Erdmassen - Fallbeispiel .....	152
7.2.9	Vergleich der energetischen Aufwendungen - Fallbeispiel .....	153
<b>7.3</b>	<b>Fazit – Ökologische Betrachtungen .....</b>	<b>160</b>
<b>8</b>	<b>Experimentalbau – Versuchsdeichkörper .....</b>	<b>161</b>
<b>8.1</b>	<b>Ausführung des Versuchsdeichkörpers .....</b>	<b>161</b>
8.1.1	Verwendete Erdstoffe und Materialien .....	164
8.1.2	Variante 0: Homogener Deich .....	166
8.1.3	Variante 1: Oberflächendichtung .....	167
8.1.4	Variante 2: Innendichtung .....	168
8.1.5	Variante 3: Überlauf- /Überströmstrecken .....	170
<b>8.2</b>	<b>Bauausführung.....</b>	<b>172</b>
8.2.1	Erstellen der Tonbasisabdichtung .....	172
8.2.2	Erstellen des Streifenfundamentes der Innendichtung (Var. 2).....	173
8.2.3	Stellen der RC-Betonbauteile der Innendichtung (Var. 2).....	173
8.2.4	Fugenabdichtung Innendichtung (Var. 2) .....	175
8.2.5	Aufbau des Erdkörpers .....	178
8.2.6	Einbau der Tonschotts .....	181
8.2.7	Verlegen der RC-Betonbauteile der Oberflächendichtung .....	182
8.2.8	Fugenabdichtung Oberflächendichtung .....	183
8.2.9	Aufbau der Überlaufstrecken .....	185
8.2.10	Einbau des Filterfußes (Drainageschicht) .....	187
8.2.11	Aussaat der Rasenmischung zur Deichbegrünung .....	188
8.2.12	Auswertung der Bauausführung .....	190
8.2.13	Nachträgliche Standsicherheitsbewertung .....	193
<b>8.3</b>	<b>Messtechnik.....</b>	<b>196</b>
8.3.1	Untersuchungen zum Setzungsverhalten.....	196
8.3.2	Untersuchungen zur Durchsickerung .....	201
8.3.2.1	Aufbau des Pegelnetzes .....	201
8.3.2.2	Ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmesstechnik .....	204
8.3.2.3	Messgerinne zur Durchflussmessung .....	207
8.3.3	Untersuchung der Wettereinflüsse .....	209
8.3.3.1	Wetterstation .....	209
8.3.3.2	Infiltrationsmessgerät für die Bestimmung der Versickerungsrate von Böden .....	210
<b>8.4</b>	<b>Versuchsdurchführung.....</b>	<b>210</b>

---

<b>8.5</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b> .....	<b>212</b>
8.5.1	Ergebnisse zum Setzungsverhalten .....	212
8.5.2	Ergebnisse zur Durchsickerung .....	222
8.5.2.1	Sickerwasserentwicklung im homogenen Untersuchungsabschnitt .....	227
8.5.2.2	Sickerwasserentwicklung im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung .....	230
8.5.2.3	Sickerwasserentwicklung im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung .....	233
8.5.3	Untersuchung der aufgetretenen Vernässungszonen .....	237
8.5.4	Ergebnisse der ortsaufgelösten faseroptischen Temperaturmessung .....	242
8.5.4.1	Leckageermittlung im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung .....	244
8.5.4.2	Leckageermittlung im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung .....	253
8.5.5	Ergebnisse der Überströmungsversuche .....	264
<b>8.6</b>	<b>Fazit – Untersuchungen am Versuchsdeichkörper</b> .....	<b>271</b>
<b>9</b>	<b>Resümee und Ausblick</b> .....	<b>275</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>279</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>281</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>293</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>297</b>
	<b>Normen- und Richtlinienverzeichnis</b> .....	<b>301</b>





# 1 Das Projekt

## 1.1 Problemstellung

Stadtumbau und Hochwasserschutz stellen große Herausforderungen an die Gesellschaft. Sie bedeuten massive Eingriffe in das Umfeld der Menschen. Beide verursachen hohe finanzielle Belastungen für die Kommunen, die Länder und den Staatshaushalt und somit für die Bürger. Beide sind mit Bewegungen großer Mengeneinheiten an Baustoffen verbunden. Zum einen werden enorme Mengen an RC-Baustoffen und –produkten aus dem erforderlichen Umbau der Kommunen gewonnen, zum anderen werden große Erdmassen und eine Vielfalt anderer Baustoffe für den Hochwasserschutz verbaut. Eine Verbindung dieser Rohstoffquellen und –senken erscheint durchaus sinnvoll. Hinsichtlich der geplanten Abfallhierarchie in Europa: Vermeidung – Wiederverwendung – Recycling – Verwertung – Beseitigung – zeigt sich eine möglichst hochwertige Wieder- resp. Weiterverwendung kompletter Bauteile aus dem Stadtumbau im Hochwasserschutz als Ideallösung. Gleichzeitig kann so ein weiteres Beispiel zur optimalen Ausnutzung des Potenzials der sekundären Baustoffressourcen auch für andere Einsatzbereiche gegeben werden und der Entwicklung - weg vom Downcycling, hin zum Re- und Upcycling – weiter Vorschub geleistet werden, um die Zielsetzung der Entwicklung einer europäischen Recyclinggesellschaft umzusetzen.

Inwieweit sich die Verwendung ausgewählter sekundärer Bauprodukte (RC-/Altbetonelemente) aus dem Stadtumbau im Hochwasserschutz (Deichbau) wirtschaftlich, ökologisch wie auch sozial sinnvoll – also nachhaltig – umsetzen lässt, soll dieser Bericht aufzeigen. Mit diesem Bericht wird das BMBF-geförderte Forschungsvorhaben „Verbundprojekt: Deichbau – Nutzung ausgebaute großformatiger Betonelemente aus dem Wohnungsbau für den Hochwasserschutz; Teilvorhaben BTU Cottbus“ (FKZ 19W4004A) abgeschlossen. Die Laufzeit des Forschungsvorhabens unter Berücksichtigung aller bewilligten Projektaufstockungen und der kostenneutralen Verlängerung betrug 55 Monate vom 01.04.2004 bis 31.10.2008.

## 1.2 Zielstellung des Forschungsvorhabens

Ausgehend von der Verknüpfung der kommunalen Situation in Ostdeutschland (Wohnungsüberhang im industriellen Bestand) und dem anstehenden notwendigen Ausbau / der Sanierung der Hochwasserschutzanlagen hat das Forschungsvorhaben das Ziel, den Einsatz gebrauchter Betonbauteile aus dem Rückbau im Deichbau zu untersuchen. Im Ergebnis steht der Vorschlag eines nachhaltigen Verwendungskonzeptes, welches beginnend beim Eigentümer der nachnutzbaren Bauelemente (Wohnungsgesellschaft) eine Wertschöpfungskette schafft, die in wirksamen Maßnahmen zum Hochwasserschutz mündet.

Die Ziele und der Nutzen des Forschungsprojektes liegen:

- im verbesserten Durchfeuchtungsschutz der Deiche während des Hochwassers,
- in der Verwendung gebrauchter Betonfertigteile in ihrer originären Form und Gestalt und der Energie- und Ressourcenschonung für ihre Verwertung anstatt Beseitigung,

- in einer verbesserten Ausnutzung der Langlebigkeit der Betonbauteile,
- in der Substitution von Primärrohstoffen, die mit dem Einsatz konventioneller Baustoffe und –produkte für Deichbaumaßnahmen verbunden sind,
- in einem neuartigen Tätigkeitsfeld für Unternehmen der Bau- und RC-Wirtschaft,
- im wirtschaftlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Deichbauvarianten.

Das primäre Anliegen, zurückgewonnene Bauteile in ihrer originären Form und Gestalt als Produkt nachzunutzen und so einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens zu leisten, ist ausschlaggebend für die Schaffung von wissenschaftlich fundierten Voraussetzungen zur Weiterverwendung von gebrauchten großformatigen Betonelementen im Deichbau.

### **1.3 Methodische Herangehensweise**

Zur Erreichung des gestellten Zieles wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet<sup>1</sup>:

- 1) Klärung der rechtlichen Bedingungen für den Einsatz gebrauchter Betonfertigteile im Deichbau,
- 2) Ermittlung des Potenzials an geeigneten und in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehenden Betonfertigteilen und des Bedarfs an Maßnahmen zur Ertüchtigung und Neubau von Deichen
- 3) Entwicklung, Aufbau einer Software zur automatisierten Bestandsauswertung und bedarfsgerechten Material-/Produkteinsatzplanung,
- 4) Untersuchung zum Einsatz der Betonfertigteile gemäß der Anforderungen nach geltenden Normen, Richtlinien und sonstigen Regelwerken,
- 5) Überprüfung des Einsatzes der Betonfertigteile für Rad- und Gehwege,
- 6) Konstruktive Durchbildung mehrerer Varianten zum Deichbau unter Verwendung gebrauchter Betonfertigteile und Ermittlung von Vorzugsvarianten unter technischen und wirtschaftlichen Prämissen,
- 7) Technologische Vorbereitung und Ausführung des Experimentalbaus zur Umsetzung und Untersuchung der entwickelten Vorzugsvarianten (Versuchsdeichkörper),
- 8) Versuchsdurchführung am errichteten Versuchsdeichkörper (Großversuch),
- 9) Klärung logistischer Fragen bei der Zusammenführung der Bereitstellung geeigneter sekundärer Bauteile und der Nachnutzung im Hochwasserschutz, bspw. Ermittlung der maximalen Transportwege aus wirtschaftlicher Sicht vom Anfall- zum Einsatzort,
- 10) Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit der Weiterverwendungsmaßnahmen (Kosten-Nutzen-Analyse), Herausarbeiten der ökonomischen Vorteile,
- 11) Darstellung der ökologischen Relevanz.

---

<sup>1</sup> vgl. Antragstellung zum o.a. Forschungsprojekt, Vorhabensbeschreibung vom 30.09.2003.

## 1.4 Projektpartner

Die Struktur des Verbundprojektes war interdisziplinär angelegt, denn verschiedene Akteure und Handlungsebenen mussten zusammengeführt bzw. vernetzt werden. So steht auf der einen Seite die Behörde als der Auftraggeber und auf der anderen Seite die planenden und ausführenden Unternehmen. Als Schnittstelle zwischen diesen beiden Gruppen fungiert die Wissenschaft in Form der eingebundenen Lehrstühle der BTU.

Die Bearbeitung der Forschungsaufgaben erfolgte im Verbund mit:

- dem Landesumweltamt Brandenburg, Abt. Gewässerschutz und Wasserwirtschaft Cottbus,
- der ECOSOIL Ost GmbH, Senftenberg,
- dem Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau der BTU Cottbus,
- dem Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik der BTU Cottbus
- Vattenfall Mining AG.

Des Weiteren wurden verschiedene Ingenieurbüros in Beraterfunktion über die Vergabe von Aufträgen in das Projekt eingebunden. Dies waren u.a.:

- IHC – IPP Hydro Consult GmbH, Cottbus - Planung und Standsicherheitsnachweise für den Versuchsdeichkörper,
- GUG Gesellschaft für Umwelt- und Geotechnik mbH, Simmern, Dipl.-Geol. Max Wiederspahn, geotechnische, wasserbauliche und betriebliche Aspekte des Deichbaus und seiner Unterhaltung,
- Ing.-Büro für Wasserwirtschaft, Münster, Dipl.-Ing. Gerd-W. Braach – wasserbautechnische Beratung zu Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Großversuches,
- Lohmann & Robinski GbR, Cottbus - Datenbankentwicklung.

Eine Zusammenstellung aller beteiligten Partner und deren Kontaktdaten sind in Anlage 1 aufgeführt.

## 1.5 Verwertung der Ergebnisse – Der Bericht

Die Ergebnisse der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete (vgl. Abschn. 1.3) werden im vorliegenden Bericht vorgestellt. Dazu werden im Folgenden die Ausgangssituationen im Stadtumbau und Hochwasserschutz erläutert (s. Abschn. 1) und die Grundlagen als auch der derzeitige Stand der Technik im Deichbau dargestellt (s. Abschn. 2). Die Optionen des Einsatzes von RC-/Altbetonbauteilen im Deichbau wie im Wegebau und die Anforderungen an die Bauteile werden erläutert und Vorzugsvarianten herausgestellt (s. Abschn. 3). Die entwickelten Vorzugsvarianten wurden einer praxisbezogenen Untersuchung im Rahmen der Errichtung eines Experimentalbaus und der Durchführung verschiedener Versuchsreihen an diesem hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Dauerhaftigkeit geprüft (s. Abschn. 4). Neben der technischen und technologischen Machbarkeit des Einsatzes gebrauchter Betonbauteile bilden der Nachweis der Wirtschaftlichkeit und die Herausstel-

lung der ökonomischen Vorteile (s. Abschn. 5) eine wichtige Säule der Projektarbeit. Gleiches gilt für die ökologische Relevanz solcher Maßnahmen (s. Abschn. 6). Abschließend und zusammenfassend werden die Vorteile wie auch die Nachhaltigkeit des Einsatzes gebrauchter großformatiger Betonelemente im Deichbau herausgestellt.

## 2 Stadtumbau und Hochwasserschutz

### 2.1 Leerstand und Stadtumbau

Die ostdeutschen Bundesländer als auch Teile Westdeutschlands stellt der massive Wohnungsleerstand die Kommunen und Wohnungsunternehmen vor große soziale wie wirtschaftliche Probleme. Ohne Gegensteuerung droht der bauliche Verfall ganzer Stadtbereiche als auch soziale Erosion. Hervorgerufen wird diese Situation durch eine weiterhin starke Abwanderung der Bürger aus wirtschaftlich schwachen Regionen im Osten und Norden Deutschlands in starke Wirtschaftsgebiete vor allem im Südwesten der Bundesrepublik. Verstärkend wirkt zudem der demografische Wandel der Gesellschaft, welcher durch anhaltend niedrige Geburtenraten zu einer Verringerung der Bevölkerungszahl und einer Alterung der Gesellschaft führt.

#### 2.1.1 Wohnungsleerstand in Ostdeutschland

Aus den demografischen Wandlungsprozessen vor allem in Ostdeutschland resultieren massenhaft leerstehende Wohnungen als auch eine veränderte Nachfragesituation am Wohnungsmarkt. Gleichzeitig leidet die Stadtstruktur unter dem anhaltenden Leerständen, woraus eine weitere Verschlechterung der Attraktivität der Stadtteile resultiert. In dieser Abwärtsspirale spitzt sich die Leerstands-Misere weiter zu. Der Umbau der Städte als Reaktion auf die gesellschaftlichen Wandlungsprozesse ist eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung.

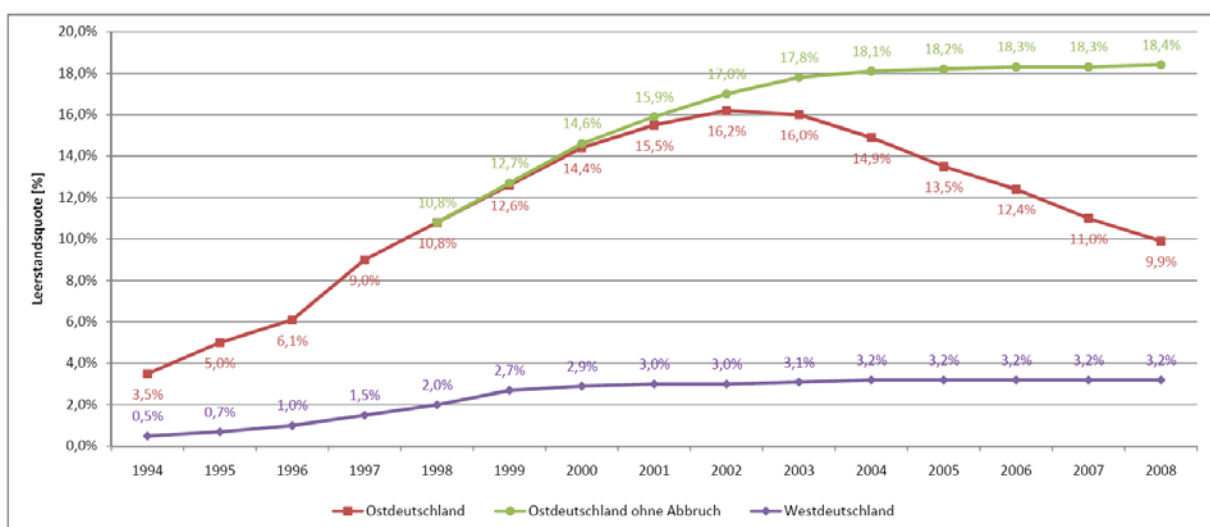
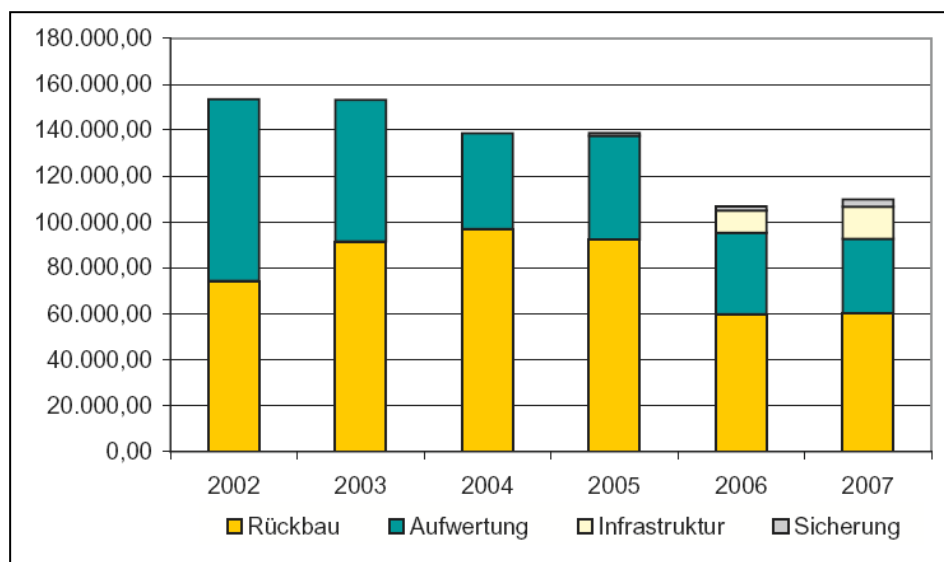


Abb. 1 : Entwicklung des Leerstandes in Ost- im Vergleich zu Westdeutschland<sup>2</sup>

<sup>2</sup> nach: [http://www.gdw.de/index.php?mod=article\\_details&id\\_art=1607&id\\_mnu=7](http://www.gdw.de/index.php?mod=article_details&id_art=1607&id_mnu=7), aufgerufen am 28.11.2008.

Das Bund-Länder-Programm „Stadtumbau-Ost“ zielt auf die Förderung der qualitativen Aufwertung betroffener Kommunen bei gleichzeitiger Reduzierung der Wohnraumüberhänge ab. Diese Zuwendungen sind an das Vorhandensein schlüssiger Stadtentwicklungskonzepte gebunden. Somit soll eine „Perforierung“ von Stadtgebieten durch unkontrollierte Abbrüche von Wohnbauten und eine damit einhergehende weitere Verschärfung der Situation unterbunden werden. Für die Umsetzung des Förderprogramms „Stadtumbau-Ost“ wurden für den Zeitraum 2002 bis 2009 rd. 2,7 Mrd. € zur Verfügung gestellt. Bis Ende 2007 wurden bereits 221.000 WE abgerissen oder rückgebaut; somit mehr als die Hälfte der im Stadtumbau-Ost-Programm vorgesehenen 350.000 Wohnungen (bis 2009). Entsprechend einer DDP-Meldung vom 17.06.2008 sollen bis Ende 2016 weitere 200.000 bis 250.000 Wohneinheiten vom Markt genommen werden. Wie Bundesbauminister Tiefensee betont, würde ohne diese Rückbauförderung die Zahl leerstehender Wohnungen auf über 1,4 Mio. ansteigen.

Von 2002 bis 2007 stellte der Bund bereits Finanzhilfen in Höhe von 800 Mio. € zur Verfügung. Davon wurden ca. 475,2 Mio. € für Abrissmaßnahmen und 295,6 Mio. € für Aufwertungsmaßnahmen verwendet. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass Aufwertungsmaßnahmen zu einem Drittel aus dem Bundeshaushalt und zu je einem Drittel aus Länder- und Kommunalhaushalten finanziert werden. Bei der Abrissförderung entfällt der kommunale Eigenanteil, so dass insgesamt ca. 950,4 Mio. € für Abriss und 886,8 Mio. € für die Aufwertung verwendet wurden. Dies zeigt, dass der notwendigen Beseitigung von Wohnraumüberschüssen und der Aufwertung der Städte die gleiche Bedeutung zu kommt. Ab 2006 flossen zudem ca. 23,6 Mio. € des Bundes in Maßnahmen zur Anpassung und Rückführung städtischer Infrastruktur sowie seit 2005 weitere 6,2 Mio. € in die Durchführung von Sicherungsmaßnahmen. Im Jahr 2008 werden sich die Bundesfinanzhilfen auf ca. 105 Mio. € belaufen.<sup>3</sup>

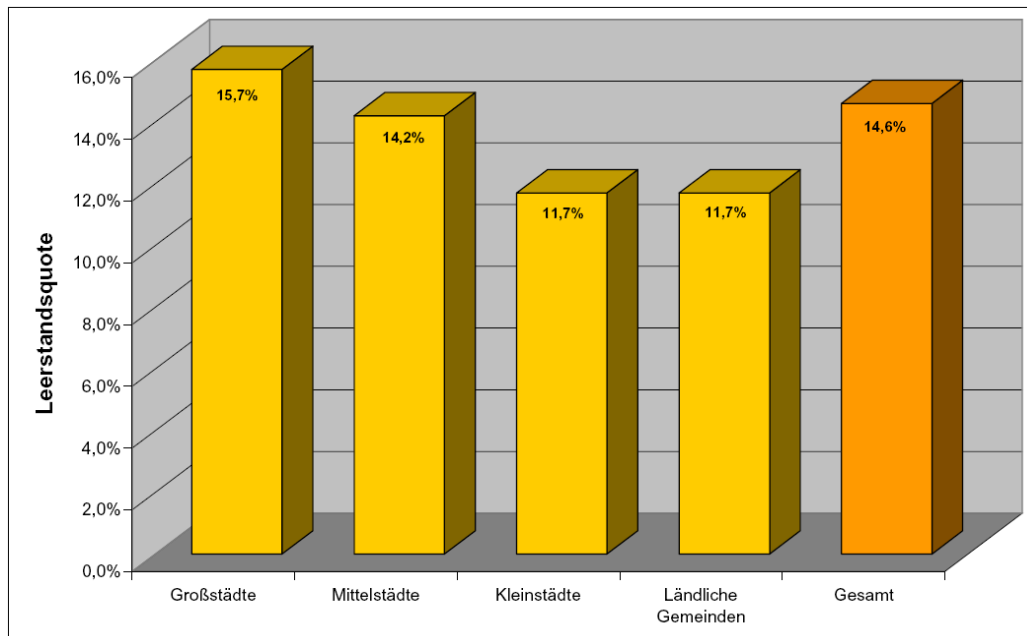


**Abb. 2** : Einsatz der Stadtumbauittel (Bundesfinanzhilfen) von 2002-2007 in den unterschiedlichen Programmbereichen<sup>4</sup>

<sup>3</sup> 3. Statusbericht der Bundestransferstelle Stadtumbau Ost, 2008, S. 14 f.

<sup>4</sup> ebenda, S. 15.

Eine Betrachtung der Leerstandsverteilung im Jahr 2005 nach Stadt- und Gemeindetypen (s. Abb. 3) zeigt eine deutlich höhere Leerstandsbelastung bei Groß- und Mittelstädten mit durchschnittlich 15,7 % und 14,2 %. Kleinstädte und ländliche Gemeinden sind mit 11,7 % unterdurchschnittlich (Gesamtmittelwert 14,6 %) von Wohnungsüberhängen betroffen. Nichtsdestotrotz muss auch in diesen Kommunen dem anhaltenden Schrumpfungstrend entgegengewirkt werden. 85 % der Kommunen gaben bei einer Befragung im Jahr 2006 einen weiteren Bevölkerungsrückgang für die nächsten 10 Jahre an. 71 % der befragten Mittelstädte und 68 % der Kleinstädte und Landgemeinden gehen demnach von einem Rückgang der Wohnungsnachfrage aus. Von den 11 befragten Großstädten rechnen 7 Kommunen mit einer rückläufigen Wohnungsnachfrage. Allein Leipzig steht für einen positiven Wohnungsmarktstrend.<sup>5</sup> Das heißt, bis auf wenige Ausnahmen ist weiterhin mit einem hohen Wohnraumüberschuss in den ostdeutschen Kommunen und so mit steigenden Leerstandsquoten zu rechnen, sollte dem nicht durch sinnvolle Abbruch- und Rückbaumaßnahmen entgegengewirkt werden.

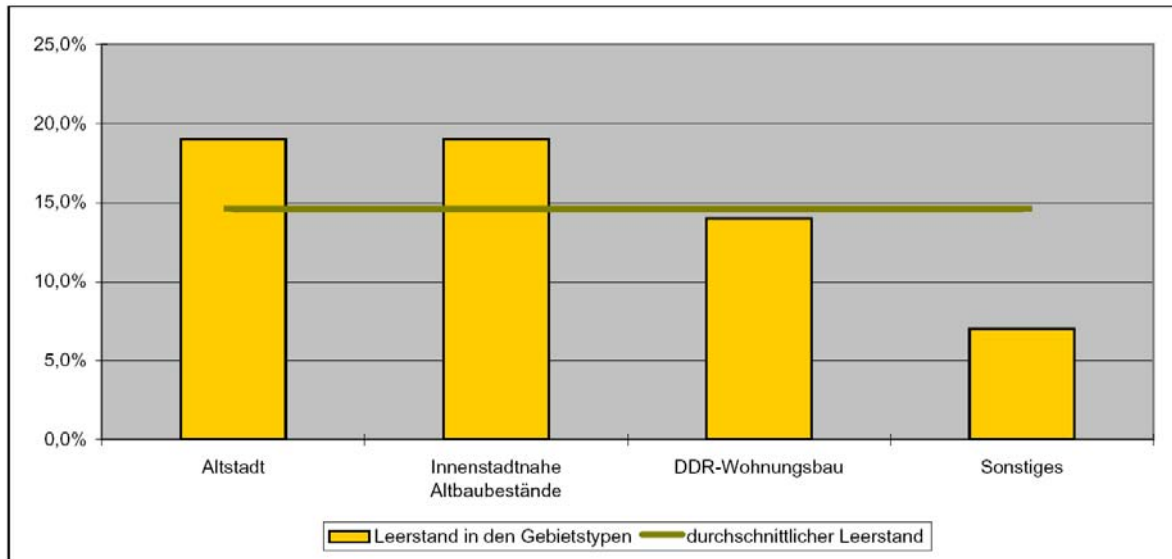


**Abb. 3** : Wohnungsleerstand in den Stadtumbaukommunen nach Stadt- und Gemeindetyp<sup>6</sup>

In Abhängigkeit der regionalen und lokalen Gegebenheiten betrifft der Leerstand Gebäude aller Baualtersklassen und Bautypen. Die in Montagebauweise errichteten Wohnungen, im allgemeinen Sprachgebrauch auch Plattenbauwohnungen, machen allerdings einen großen Anteil am Gesamtleerstand aus.

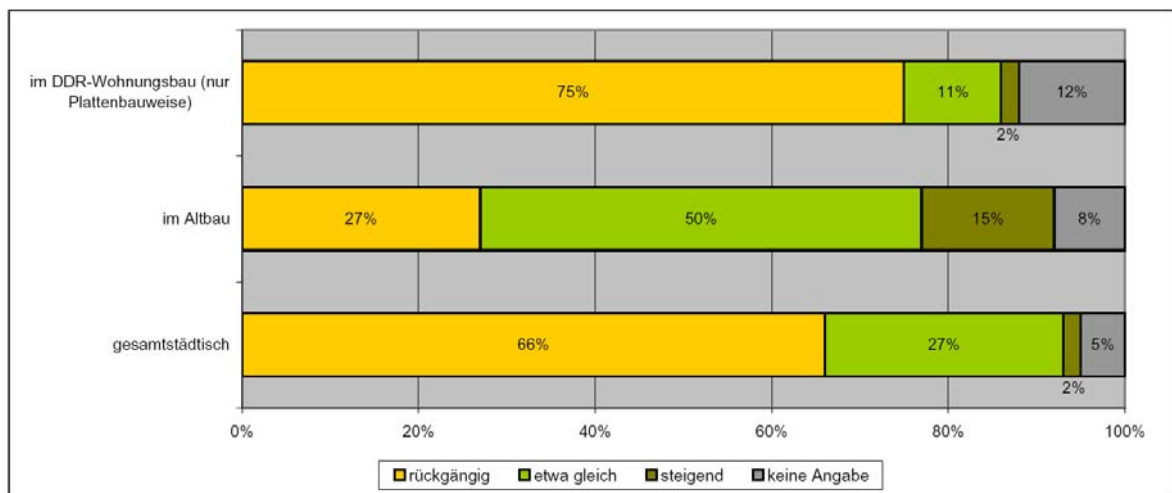
<sup>5</sup> 2. Statusbericht der Bundestransferstelle, Stadtumbau Ost, 2007, S. 16.

<sup>6</sup> ebenda, S. 17.



**Abb. 4** : Wohnungsleerstand in den Stadtumbaukommunen 2005 nach Gebietstypen<sup>7</sup>

Verschärfend auf die Leerstandproblematik im industriell errichteten Wohnbaubestand wirkt sich auch die prognostizierte weiterhin sinkende Nachfrage von Wohnungen in Plattenbauweise aus (s. Abb. 5). Nach Befragungen von Stadtumbaukommunen werden Plattenbauwohnungen in 75 % dieser Kommunen deutlich weniger nachgefragt werden. Hingegen bleibt die Nachfrage von Altbauwohnungen in 50 % der befragten Kommunen stabil oder erhöht sich sogar (15 %).



**Abb. 5** : Bewertung der Wohnungsnachfrage in den Stadtumbaukommunen (bis 2017)<sup>8</sup>

In einer Umfrage am Programm beteiligter Kommunen stellten diese den Rückbau resp. Abbruch von Wohnbausubstanz zur Leerstandsreduzierung und zur Stabilisierung der Stadtgebiete durch punktuellen Rückbau/ Abriss und Entdichtung in den Vordergrund. Ca. 90 % der Kommunen benannten dabei den Rückbau von DDR-Plattenbausubstanz als räumlichen Schwerpunkt von Rückbau/Abbruch. Rund 14 % der befragten Kommunen greifen dabei auf den flächenhaften Abbruch ganzer Stadtteile zurück. Für die Umsetzung von kleineren und größeren Aufwertungsmaßnahmen in Plattenbaugebieten wer-

<sup>7</sup> nach: 2. Statusbericht der Bundestransferstelle, Stadtumbau Ost, 2007, S. 28.

<sup>8</sup> ebenda, S. 30.

den von ca. 67 % der befragten Kommunen Mittel aus dem Förderprogramm Stadtumbau-Ost eingesetzt. Der Aufwertungsgedanke wird somit auch zunehmend für die Gestaltung von industriell errichteten Wohngebäuden und -quartieren interessant, was wiederum zu einer verstärkten Ausführung krankgestützter Rückbauvorhaben gegenüber Totalabbrüchen von Plattenbauten führen wird.<sup>9</sup>

### **2.1.2 Teilrückbau, Bestandsaufwertung, Stadterneuerung<sup>10</sup>**

Zur Leerstandsreduzierung muss man sich alternativ zum (Komplett-)Abriss unbedingt verstärkt mit den Ideen einer behutsamen Stadterneuerung auseinandersetzen, welche die Reformierung des Baubestandes zum Inhalt hat. Das bedeutet, auch örtlich an die Siedlungssystematik angepasste Umbaumaßnahmen und Aufwertungen im Bestand in Angriff zu nehmen. Dem Teilrückbau kommt dabei eine spezielle Bedeutung zu. Unabhängig der allgemein verbreiteten Forderung nach unabdingbarer wirtschaftlicher Rentabilität von Stadtumbau, hat diese Herangehensweise für die Veränderung der Strukturen im Wohnungsbestand etliche Vorteile.

Da die Kapazitäten der technischen Infrastruktur, ober- wie unterirdisch vorhanden sind, die Quartiere teils über Jahrzehnte gewachsene Vegetationsstrukturen verfügen, gilt es insbesondere aus Ressourcenschutzgründen vorhandenes Potenzial zu nutzen. In erhaltungswürdigen Stadtbereichen ist unter städtebaulichen Gesichtspunkten und nach entsprechender Analyse der Aufwertung durch Teilrückbau, gekoppelt mit einer Modernisierung des verbleibenden Bestandes, mehr Bedeutung beizumessen. Die bestehenden Fördermodalitäten sollten daher modifiziert werden, um entsprechende Anreize zu schaffen. Nicht die Wertvernichtung, sondern der Werteehalt sollte im Blickpunkt stehen, wenn es um die Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele geht. Somit kann man auch einen Teil der Bewohner, welche sich dort immer noch sozial gebunden fühlen, im Quartier halten.

Durch punktuellen Rückbau bzw. (Teil-)Abriss von Plattenbauten kann eine Auflockerung der stringenten Struktur und eine Verringerung der Bebauungsdichte erreicht sowie die Belichtungsverhältnisse verbessert werden. Im Zusammenspiel von gleichzeitiger Sanierung und bedarfsgerechten Grundrissveränderungen von Wohnungen sowie der Neugestaltung der öffentlichen wie auch privaten Freiflächen kann eine weitere Aufwertung einzelner Quartiere erreicht und somit auch das Vertrauen der Bevölkerung und auf den Standort gestärkt werden. Da die Wohnungsunternehmen eine soziale Verpflichtung übernommen haben, auch zukünftig preiswerten Wohnraum mit entsprechenden Wohnungsgrößen (gerade auch für untere Einkommensschichten) zur Verfügung zu stellen, bieten einfache Bestandsveränderungen wie beispielsweise der geschossweise Rückbau im bewohnten Zustand ohne Modernisierung des verbleibenden Bestandes eine Möglichkeit.

Die Gebäude- und Tragkonstruktion der industriell errichteten Wohnbauten lässt bauliche Veränderungen zu. Durch geschossweisen Rückbau und die Herausnahme ganzer Wohnsegmente, in Verbindung mit Veränderungen der Raumzuschnitte, sind unterschiedliche Gebäudevariationen möglich. Die ehemaligen Wohnscheiben mit monotonem Erscheinungsbild lassen sich derart verändern, dass man diese als solche nicht mehr erkennt und durch gezielte Eingriffe nachgefragte Wohnformen realisier-

---

<sup>9</sup> nach: 2. Statusbericht der Bundestransferstelle, Stadtumbau Ost, 2007, S. 15ff.

<sup>10</sup> nach Mettke, A. et al.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil =:Zielstellung und Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Forschungsvorhabens, BTU Cottbus, 2008, S. 23.



bar sind. Der Umbau in kleinteiligere, auf dem Markt mehr nachgefragte Baustrukturen sollte keine Ausnahme bleiben. Wohnungsangebote in niedriggeschossigen Zeilen, Reihenhaustypen oder auch in Gebäuden mit Stadtvillencharakter können fließende Übergänge zwischen dichteren Baustrukturen und individuellen Bauformen, Quartieren mit Einfamilien- und Doppelhäuser etc., schaffen und so zur Auflockerung und Imagesteigerung beitragen. Außerdem können diese baulichen Veränderungen und das Angebot an attraktive Wohnformen die Forderungen unterstützen, Eigentumsbildungen der Bewohner voranzutreiben.

### **2.1.3 Wiederverwendungspotenzial des krangeführten Rückbaus<sup>11</sup>.**

In den kommenden Jahren werden allein über Mittel des Stadtumbau-Ost Förderprogramms ca. 150.000 WE industriell errichteter Bauweisen in den ostdeutschen Bundesländern abgebrochen oder rückgebaut. Bei ausschließlicher Rückbauausführung und einer durchschnittlichen Bauteilanzahl von 30 Elementen pro WE würden ca. 4,5 Mio. Betonelemente als Bauprodukt in Gänze anfallen. Bei einer durchschnittlich angesetzten Wiederverwendungsquote von ca. 60 % (alle Deckenplatten, Außen- und Innenwände eines 6-geschossigen WBS 70) stünden ca. 2,7 Mio. gebrauchsfähige Altbauteile zur sekundären Verwendung bereit.

Unter der theoretischen Annahme, dass 2/3 dieser Bausubstanz abgebrochen und 1/3 rückgebaut werden, fallen etwa bei 50.000 krangeführten WE-Rückbauten 1,5 Mio. Betonfertigteile an. Selbst unter dem Ansatz, dass die Wiederverwendungsquote lediglich 40 % beträgt, stünden immer noch ca. 600.000 Betonfertigteile für den sekundären Einsatz zur Verfügung.

In Anbetracht des weiterhin hohen Wohnungsüberschusses ist davon auszugehen, dass auch über das Jahr 2010 hinaus der Stadtumbau Ost fortgesetzt wird.<sup>12</sup> Mit weiteren krangeführten Rückbaumaßnahmen (derzeitiger Trend: Rückbau unter bewohnten Bedingungen) ist zu rechnen, so dass mehrere hunderttausend RC-/Altbetonplatten zur Verfügung stehen werden.

## **2.2 Klimawandel und Hochwasserschutz**

Der fortschreitende Treibhauseffekt mit den zu erwartenden Änderungen in den klimatischen Bedingungen verschiedener Regionen stellt vor allem den Hochwasserschutz vor neue Herausforderungen. Neben länger anhaltenden sommerlichen Dürreperioden werden vor allem häufigere und heftigere Starkregenereignisse und Schneeschmelzen die mitteleuropäischen Flusssysteme mit Hochwasserereignissen heimsuchen. Gleichzeitig erfordert der erwartete Meeresspiegelanstieg einen verbesserten Küstenschutz. Dies wie auch die Zerstörungen aus Hochwasserereignissen der vergangenen Jahre bedingen eine Sanierung vorhandener Deich- und Hochwasserschutzanlagen als auch zum Teil eine Erhöhung vorhandener Bauwerke und den Neubau.

<sup>11</sup> vgl. Mettke, A.: Wiederverwendung von Plattenbauteilen in Osteuropa, BTU Cottbus, Mai 2008, S. 15f.

<sup>12</sup> Interview der Lausitzer Rundschau mit Bundesbauminister Tiefensee im Sept. 2007.

## 2.2.1 Einflüsse des Klimawandels

Die überwiegende Mehrheit aller Klimatologen geht heute von eindeutigen Anzeichen für einen menschenverursachten Klimawandel aus. Nach dem 4. Sachstandbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) der Vereinten Nationen besteht kein Zweifel an der Klimaerwärmung. Belege sind die steigenden Temperaturen, das weit verbreitete Schmelzen von Eis und Schnee und ein ansteigender Meeresspiegel. Unter vielen anderen sind folgende Prognosen für den Hochwasserschutz von besonderem Interesse<sup>13</sup>:

*„Für Siedlungen in Gebirgsregionen besteht – infolge des Abschmelzens der Gletscher – ein erhöhtes Risiko durch **Fluten nach Gletscherseeausbrüchen**. In einigen Gebieten haben Regierungsinstitutionen damit begonnen, mit dem **Bau von Dämmen und Abflussanlagen** darauf zu reagieren.“*

*„In zahlreichen Gebieten tragen der **Anstieg des Meeresspiegels** und die menschliche Entwicklung gemeinsam zu Verlusten von Küstenfeuchtgebieten sowie in zahlreichen Gebieten zu zunehmenden **Schäden infolge von Küstenüberflutungen** bei.“*

*„Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird für den **mittleren Jahresabfluss in Flüssen** und die Wasserverfügbarkeit in hohen Breiten und einigen feuchten Tropengebieten ein **Anstieg von 10-40 % projiziert**, für einige trockene Gebiete in den mittleren Breiten sowie für trockene Tropengebiete, die derzeit unter Wassermangel leiden, hingegen eine Abnahme um 10-30 %.“*

*„Es ist wahrscheinlich, dass sich von Dürre betroffene Gebiete flächenmäßig ausdehnen. **Schwere Niederschlagsereignisse**, bei denen eine Häufigkeitszunahme sehr wahrscheinlich ist, werden das **Überschwemmungsrisiko** erhöhen.“*

*„Am verwundbarsten sind **Industrien, Siedlungen und Gesellschaften im Allgemeinen in Küsten- oder Flussschwemmgebieten** sowie dort, wo die Wirtschaft eng an klimatisch sensible Ressourcen gebunden ist, aber auch in Gebieten, die für extreme Wetterereignisse anfällig sind - insbesondere dort, wo die Urbanisierung rasch voranschreitet.“*

*„Für **nahezu alle Regionen Europas** werden durch einige künftige Auswirkungen der Klimaänderung **nachteilige Beeinträchtigungen** erwartet, die für viele Wirtschaftssektoren Herausforderungen darstellen. In Bezug auf natürliche Ressourcen und Güter wird die Klimaänderung voraussichtlich regionale Differenzen in Europa verstärken. Zu den negativen Auswirkungen zählen ein **erhöhtes Risiko durch flutartige Überschwemmungen im Landesinneren, an Häufigkeit zunehmende Küstenüberschwemmungen** und eine verstärkte Erosion (durch Gewitter und Meeresspiegelanstieg).“*

*„Die für **Nordeuropa** projizierten Effekte der Klimaänderung werden anfänglich uneinheitlich ausfallen und auch einige Vorteile – z.B. verminderter Heizbedarf, steigende Ernteerträge und verstärktes Waldwachstum – mit sich bringen. **Bei fortgesetzter Klimaänderung** werden jedoch wahrscheinlich die **negativen Auswirkungen** (darunter **häufigere winterliche Hochwässer**, gefährdete Ökosysteme und anwachsende Bodeninstabilität) die Vorteile überwiegen.“*

---

<sup>13</sup> IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, in: Klimaänderung 2007, Auswirkungen, Anpassungen, Verwundbarkeiten, deutsche IPCC Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.

Der Klimawandel wird dramatische ökologische und volkswirtschaftliche Schäden zur Folge haben. Er wird sich auf den Wasserhaushalt und damit auch auf die Hochwasserhäufigkeit auswirken. An diese Entwicklung sind frühzeitige Anpassungen erforderlich. Die Planungsgrundlagen für Hochwasserschutzmaßnahmen müssen zukünftig die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigen. Damit sind der Klimaschutz und die Hochwasservorsorge eine der zentralen Herausforderungen dieses Jahrhunderts.<sup>14</sup>

## 2.2.2 Ursachen und Entstehung von Hochwassern<sup>15</sup>

Hochwasser sind natürliche Zustände in einem Gewässer, bei denen der Wasserstand aufgrund erhöhter Abflüsse einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Je nach Ausprägung unterscheidet man zwischen Hochwassern, die jährlich auftreten und großen Hochwassern mit kleineren Auftretenswahrscheinlichkeiten. So wird beispielsweise ein fünfzigjähriges Hochwasser  $HQ_{50}$  jedes Jahr nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 2 % erreicht oder überschritten, ein einhundertjähriges Hochwasser  $HQ_{100}$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 %.

Durch Hochwasser verursachte Überflutungen sind ein altes, natürliches Phänomen und grundsätzlich nicht negativ zu beurteilen. Sie haben das Aussehen der Flusslandschaften zu allen Zeiten geprägt und sind notwendige Voraussetzungen für eine intakte Entwicklung von Flora und Fauna. Als Bestandteil des natürlichen Wasserkreislaufs sind Hochwasser nicht zu vermeiden.

Mit Beginn des starken Bevölkerungswachstums zu Anfang des 19. Jahrhunderts und der zunehmenden Nutzung des Wassers und der Wasserwege im Verlaufe der industriellen Revolution gewannen die Überschwemmungsflächen der meist geräumigen Flusstäler an Wert. Sie wurden eingedeicht und urbar gemacht. Die Planer und Ingenieure konnten selbstverständlich zu keiner Zeit eine Garantie gegen das Hochwasser geben. Der zu erwartende Nutzen schien jedoch stets höher als die möglichen Schäden und die damit verbundenen Kosten.

Das Oderbruch beispielsweise, eine ehemalige Sumpfniederung der Oder in Brandenburg, wurde auf Anweisung Friedrichs des Großen zwischen 1772 und 1786 trockengelegt und besiedelt. Der Gesamtschaden beim Oder-Hochwasser im Juli 1997 belief sich auf mehrere hundert Millionen Mark, weil u.a. die mittlerweile besiedelte Ziltendorfer Niederung nach einem Deichbruch überflutet wurde (s. Abschn. 2.2.3).

Das Zusammenspiel von Topographie, Vorfuchte der Böden, Vegetation, landwirtschaftlicher Nutzung, mobilisierbarer Geschiebemenge, Schneeverteilung sowie technischer Eingriffe an den Gewässern, bestimmt die Bereitschaft für Hochwasser in einem Einzugsgebiet. Ereignisse wie extreme Niederschläge, die entweder sehr heftig sind oder lange andauern, können schließlich ein Hochwasser auslösen. Ebenso kann starke Schneeschmelze zu einem Hochwasser beitragen.

<sup>14</sup> Kania, G.: Wiederverwendung gebrauchter großformatiger Betonfertigelemente im Deichbau und bei der Deichsanierung, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2008, S. 8.

<sup>15</sup> ebenda, S. 3, bearbeitet.

### 2.2.3 Hochwasserereignisse in Deutschland<sup>16</sup>

In der Vergangenheit kam es in unregelmäßigen Abständen immer wieder zu teils verheerenden Hochwassern. Hochwassermarken an alten Gebäuden zeigen, dass die meisten Hochwasser der jüngeren Vergangenheit in früheren Jahrhunderten weit übertroffen wurden. Das in Europa vermutlich größte Hochwasser des letzten Jahrtausends - das so genannte Magdalenenhochwasser - trat am 21. Juli 1342 auf. Der Main am Pegel Würzburg führte damals über 3 000 m<sup>3</sup>/s Wasser, möglicherweise sogar knapp 4 000 m<sup>3</sup>/s (Abb. 6). Der Wasserspiegel des Mains reichte annähernd bis zum Portal des Doms, „in der Stadt Würzburg trat der Strom bis an die erste steinerne Säule an den Domgreden“<sup>17</sup>. Dieses Hochwasser hat alle großen Flussgebiete Mitteleuropas angeht, darunter auch die Rheinregion, Mosel, Weser, Moldau, Elbe und Werra. Besonders betroffen war auch die Donau bis nach Wien. Dieses katastrophale Hochwasser wird in den Chroniken vieler Donaustädte beschrieben<sup>18,19</sup>. Aus heutiger Sicht ist das Magdalenenhochwasser eine Ausnahme, die man mit statistischen Methoden nicht mehr erfassen kann. Es wäre mit „seltener als ein 1000-jähriges Hochwasser“ (HQ<sub>1000</sub>) einzustufen.

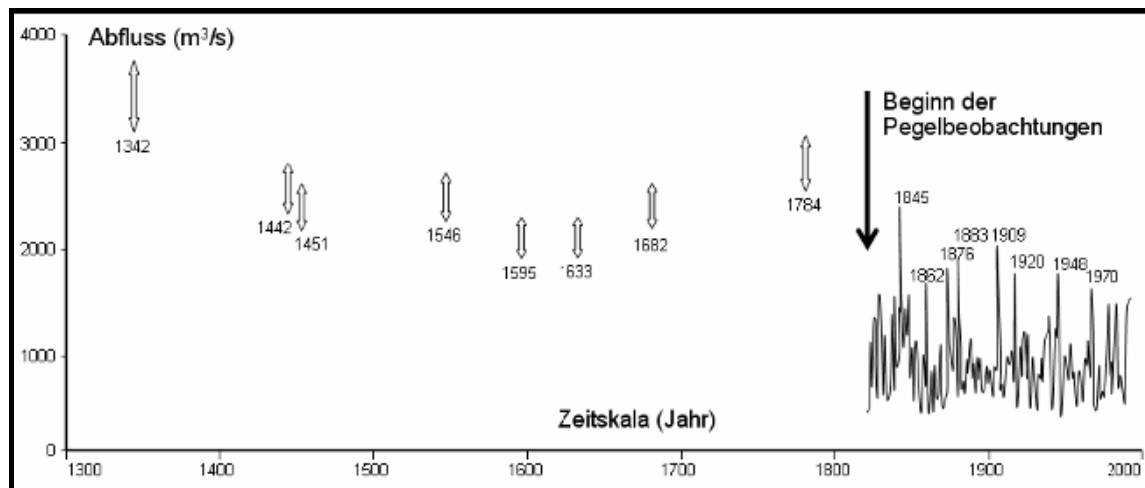


Abb. 6 : Hochwasserabflüsse am Pegel Würzburg, Main<sup>20</sup>

Auch in den vergangenen Jahren wurden weite Teile Deutschlands von Hochwasserkatastrophen betroffen. Sie zählen zu den größten der letzten 100 Jahre. Nach den Hochwasserereignissen an Rhein und Mosel (Jahreswende 1993/94 und im Januar/Februar 1995), an der Saale (April 1994), der Oder (Juli 1997), an Oberrhein und Donau (Pfingsten 1999), nochmals an der Donau (August 2000) ereignete sich im August 2002 an Elbe, Mulde und wiederum an der Donau das siebte außergewöhnliche Hochwasser in Deutschland innerhalb weniger Jahre.

<sup>16</sup> Kania, G.: Wiederverwendung gebrauchter großformatiger Betonfertigelemente im Deichbau und bei der Deichsanierung, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2008, S. 4.

<sup>17</sup> [http://www.wuerzburg.de/storage/med/umweltamt/263\\_1342\\_A3G.pdf](http://www.wuerzburg.de/storage/med/umweltamt/263_1342_A3G.pdf), aufgerufen am 21.06.08, Domgreden = Domstufen.

<sup>18</sup> vgl. Glaser, R.: Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus Verlag, 2001

<sup>19</sup> vgl. Weikinn, C.: Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitwende bis zum Jahr 1850, Hydrographie Teil 1, Zeitwende bis 1500, Berlin, 1958.

<sup>20</sup> Strobl, T., Zunic, F.: Wasserbau - Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen, Berlin Heidelberg, 2006, S. 484.



**Abb. 7** : Deichbruch während des Hochwassers an Elbe und Mulde 2002<sup>21</sup> (li.); Schäden durch ausgelaufenes Heizöl<sup>22</sup> (re.)

Diese Überschwemmungen verursachten schwerwiegende materielle Schäden (Abb. 7, re.) in Milliardenhöhe. Dies geschah im öffentlichen, privaten sowie gewerblichen, landwirtschaftlichen und Umweltsektor. Selbstverständlich bedrohten die Hochwasserereignisse Leib und Leben der betroffenen Personen. Folgende Fakten verdeutlichen, welche enormen Schadenshöhen die genannten Hochwasserereignisse bewirkten<sup>23</sup>:

- Der eingetretene Schaden für das „Weihnachtshochwasser“ 1993/94 wird auf mehr als eine Mrd. DM für die gesamte deutsche Rheinstrecke mit Nebengewässern geschätzt.
- Der Gesamtschaden des Hochwassers 1995 betrug im gesamten Einzugsgebiet von Maas und Rhein nach vorsichtigen Schätzungen mehr als fünf Mrd. DM, davon in Deutschland 500 Mio. DM.
- Die Überschwemmungsschäden im April 1994 beliefen sich in Thüringen auf etwa 150 Mio. DM, in Sachsen-Anhalt erreichten sie einen Umfang von 461,7 Mio. DM.
- Das große Oderhochwasser 1997 verursachte in Deutschland Schäden in Höhe von rund 647 Mio. DM und löste den größten Katastrophen-Einsatz Deutschlands aus (zusätzliche Kosten von etwa 200 Mio. DM). Der Gesamtschaden dieses Hochwasserereignisses erreichte zehn Mrd. DM, jedoch fast ausschließlich in Polen und Tschechien (in Polen mehr als fünf Mrd. DM, in Tschechien rund dreieinhalb Mrd. DM). Aufgrund des Oderhochwassers waren in Polen 54 Tote und in Tschechien 60 Menschenleben zu beklagen; in Deutschland gab es keine Toten. Etwa 195.500 Menschen mussten evakuiert werden, davon in Deutschland ca. 6.500.
- Während die vorgenannten Hochwasser in Deutschland keine Menschenleben forderten, waren Pfingsten 1999 an der Donau sechs Tote zu beklagen; der finanzielle Schaden belief sich auf mehr als zwei Mrd. DM.
- Im August 2000 ertrank in Deutschland in den Fluten ein Mensch, während die Sachschäden in Vergleich zu den vorausgegangenen Hochwassern mit einer zweistelligen Millionenhöhe eher gering ausfielen. In Österreich kamen drei Personen ums Leben, die entstandenen Schäden bewegten sich in dreistelliger Millionenhöhe.

<sup>21</sup> <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3019.pdf>, S. 37 aufgerufen am 24.06.08.

<sup>22</sup> ebenda, S. 27, aufgerufen am 24.06.08.

<sup>23</sup> vgl. Schneider, S.: Rechtliche Instrumente des Hochwasserschutzes in Deutschland, Berlin, 2005, S. 1ff.

- Die Flutkatastrophe im Sommer 2002 an Elbe, Mulde und Donau hat allein in Deutschland 21 Menschen das Leben gekostet. Darüber hinaus hat sie über 9 Mrd. Euro unmittelbare Sachschäden verursacht.

Eine weltweite Statistik der Naturkatastrophen<sup>24</sup> besagt, dass rund 50 % der volkswirtschaftlichen Schäden aus Überschwemmungen resultieren. Die Schäden steigen exponentiell und könnten hier nach bis 2050 jährlich mehr als 100 Mrd. Euro betragen. Es werden daher große Summen aufgewendet, um Städte, Siedlungen, Infrastruktur und Wirtschaftsgüter vor den Auswirkungen eines Hochwassers bestmöglich zu schützen. Die finanziellen Aufwendungen hierzu sind enorm. In Bayern beispielsweise sollen bis zum Jahr 2020 über zwei Milliarden Euro in Maßnahmen fließen, die dem Hochwasserschutz dienen<sup>25</sup>.

Zehn Jahre nach dem Oderhochwasser dauern in Brandenburg die Maßnahmen zur Sanierung der Deiche, der Wiederherstellung der Hochwasserschutzbauwerke sowie zum Ausbau des Gewässer- und Landesmessnetzes an. Die brandenburgische Landesregierung veranschlagte dafür im November 1997 im Rahmen des Programms „Sicherheit und Zukunft für die Oderregion“ mittelfristig 291 Mio. DM (148,8 Mio. Euro). Von den im Oderprogramm zu sanierenden 163,2 Deichkilometern und 53 Hochwasserschutzanlagen sind von September 1997 bis Ende Mai 2007 insgesamt 131,2 km (80,4 %) – davon 75 km im Oderbruch – sowie 27 Hochwasserschutzbauwerke mit insgesamt 193,2 Mio. Euro repariert beziehungsweise saniert worden. Zukünftig sind an der Oder noch 32 km Oderhauptdeiche und 15 Hochwasserschutzbauwerke zu sanieren oder instand zu setzen<sup>26</sup>.

Das Land Niedersachsen lässt künftig - als Reaktion auf den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg - die Küstenschutzdeiche um zusätzliche 25 Zentimeter erhöhen. Fernerhin sollen die Veränderungen der Tidewasserstände sowie die Häufigkeit und Stärke der Sturmfluten stärker beobachtet werden. Die durch Deiche und Sperrwerke geschützte Küstenregion Niedersachsens umfasst eine Fläche von über 6.000 km<sup>2</sup>, in der rund 1,2 Mio. Menschen leben. Pro Jahr investiert das Land mehr als 40 Mio. Euro in den Küstenschutz, insgesamt wurden seit 1955 umgerechnet 2,2 Mrd. Euro für diesen Bereich aufgewendet<sup>27</sup>.

Neben den baulichen Voraussetzungen sind es auch legislative Strategien, durch die versucht wird, Schäden aus Hochwassern zu minimieren. Wenn diese auch nicht gänzlich vermeidbar sind, können präventive Maßnahmen dazu beitragen, Hochwasserschäden zu reduzieren.

Trotz aller Anstrengungen verbleibt dennoch immer ein Restrisiko, dessen sich Planer, politisch Verantwortliche und auch die Betroffenen bewusst sein müssen. Keine Maßnahme und kein Schutzsystem kann eine absolute Garantie bieten, dass keine Hochwasserschäden mehr auftreten werden.

---

<sup>24</sup> vgl. Münchener Rück: Naturkatastrophen 2002. In: topics, Jahresrückblick Naturkatastrophen, München, 2003.

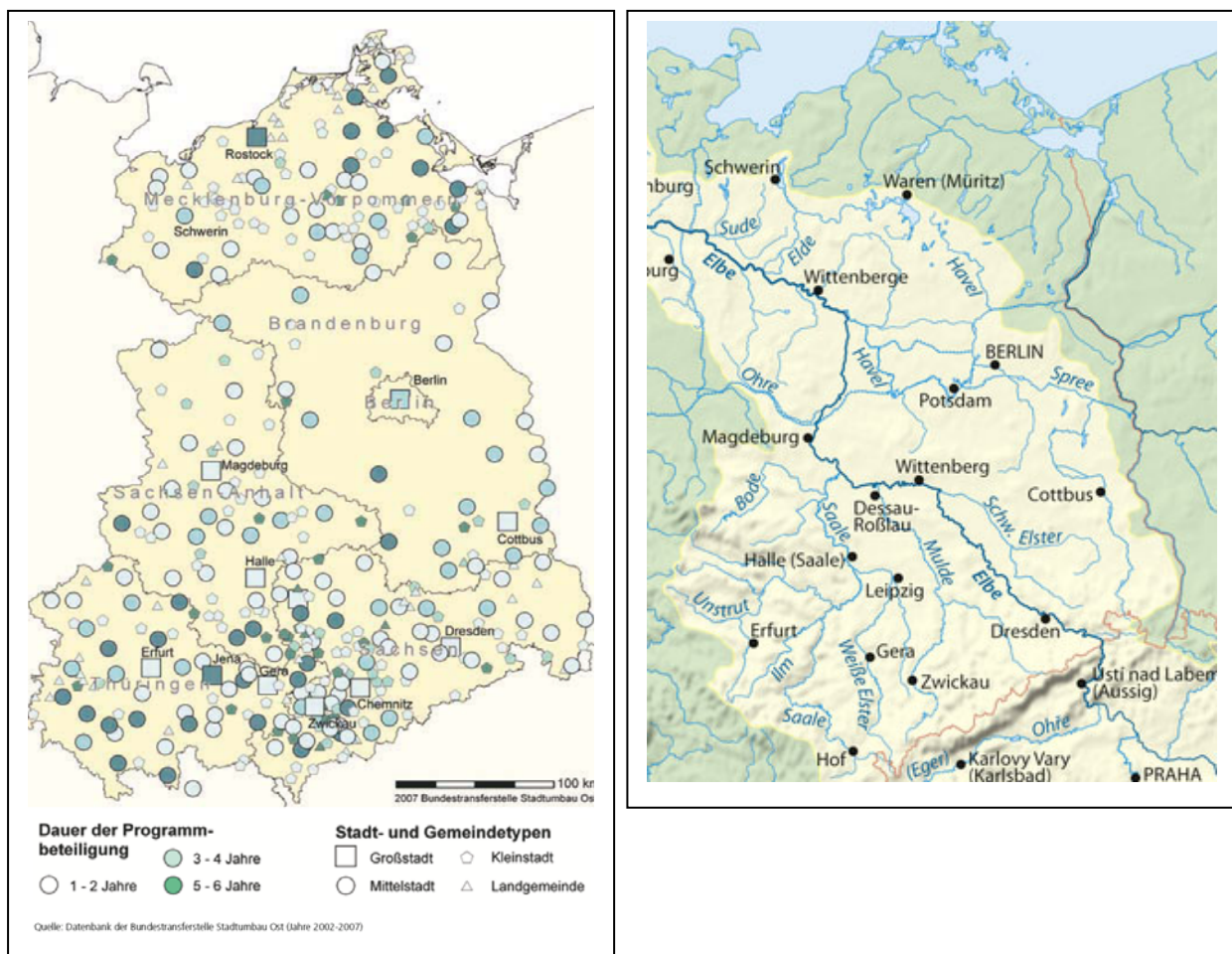
<sup>25</sup> vgl. Strobl, T., Zunic, F.: Wasserbau - Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen, Berlin Heidelberg, 2006, S. 383.

<sup>26</sup> vgl. <http://www.mluv.brandenburg.de/cms/detail.php/5lbn1.c.114089.de>, aufgerufen am 21.06.08.

<sup>27</sup> vgl. [http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C38685806\\_N11281\\_L20\\_D0\\_I598.html](http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C38685806_N11281_L20_D0_I598.html), aufgerufen am 21.06.08.

## 2.3 Symbiose von Stadtumbau und Hochwasserschutz

In Anbetracht der großen gesellschaftlichen Herausforderungen durch den weiter voranschreitenden Stadtumbau und durch die erforderlichen Maßnahmen zum Hochwasserschutz müssen in beiden Fällen Formen und Verfahren entwickelt werden, die resultierenden Belastungen für die Bürger, die Umwelt als auch den Fiskus so gering wie nur möglich zu halten. Aufgrund der großen Dimensionen beider Handlungsebenen können selbst kleine, aber breit anwendbare Rationalisierungen große Effizienz bewirken. Insbesondere die hohen Ressourcenaufkommen in Form von anfallenden Bauabfällen, sekundären Baustoffen und –Produkten beim Stadtumbau gegenüber dem hohen Bedarf an Erdbaumassen und weiteren Baustoffen zur Sicherstellung des Hochwasserschutzes verlangen geradezu eine Verknüpfung beider Maßnahmen.



**Abb. 8** : Kommunen im Stadtumbau-Ost-Programm<sup>28</sup> (li.); Einzugsgebiet der Elbe<sup>29</sup> (Ausschnitt; re.)

Die Elbe stellt das überragende Flusssystem im ostdeutschen Raum dar. So deckt deren deutsches Einzugsgebiet mit den Hauptzuflüssen Unstrut, Weiße und Schwarze Elster, Mulde, Spree und Havel fast zwei Drittel der fünf neuen Bundesländer ab. Vor allem durch starke Regenereignisse bei definierten Wetterlagen als auch bei der Schneeschmelze in den Mittelgebirgen Harz, Thüringer Wald, Erzgebirge, Elbsandsteingebirge und Zittauer Gebirge aber auch des Riesengebirges als Quellgebiet der Elbe können hier flächenhaft enorme Hochwasser auftreten. Die Hochwasseranfälligkeit dieses Fluss-

<sup>28</sup> 3. Statusbericht der Bundestransferstelle Stadtumbau Ost, 2008, S. 13.

<sup>29</sup> [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Elbe\\_Einzugsgebiet.png&filetimestamp=20080424182045](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Elbe_Einzugsgebiet.png&filetimestamp=20080424182045), aufgerufen am 01.12.2008.

systems zeigte sich bei den verheerenden Überschwemmungskatastrophen im Sommer 2002 (s. Abschn. 2.2.3). An diesen Zuläufen der Elbe liegt ein Großteil der am Stadtumbau beteiligten Kommunen Sachsens, Thüringens und Sachsen-Anhalts (vgl. Abb. 8). Auch an der Neiße und Oder sind die größten Kommunen wie Zittau, Görlitz, Guben, Eisenhüttenstadt, Frankfurt a.O. und Schwedt in das Stadtumbauprogramm involviert. Auch hier ist das Hochwasserpotenzial durch Starkregen und Tauwetter im Riesengebirge enorm und zeigte sich im Jahr 1997.

Es zeigt sich also, dass im Bereich notwendiger Sanierungs- und Baumaßnahmen an Hochwasserschutzbauwerken und Deichen auch Stadtumbaumaßnahmen ausgeführt werden. Diese territoriale Nähe gestattet Überlegungen zum effizienten Einsatz von sekundären Baustoffen und Bauteilen in Hochwasserschutzanlagen. So kann zum einen der Einsatz von Primärbaustoffen beim Bau von Deichanlagen reduziert werden. Zum anderen können Bauabfälle aus dem Stadtumbau zur Entsorgung (Verwertung / Beseitigung) substituiert werden. So wird der energetische Aufwand und die damit verbundene Emission klima- und umweltschädlicher Stoffe für die Erzeugung und den Transport von Primärbaustoffen reduziert. Ressourcen werden geschont. Insbesondere auch im Blick auf die Verknappung von Deponiekapazitäten bzw. die Schließung aller Deponieräume bis zum Jahr 2020<sup>30</sup> stellen Senken für zu entsorgende Bauabfälle wie die Weiterverwendung im Deichbau deutliche Kostenreduzierungen für Abbruch- und Rückbaumaßnahmen dar. Durch den Wiedereinsatz von Bauprodukten, wie Betonfertigteilen, wird eine höchstmögliche Werterhaltung erzielt. Gleichzeitig werden energetische Aufwendungen und Schadstoffemissionen durch Verwertungsmaßnahmen und der dafür notwendigen Transporte reduziert.

Die Weiterverwendung von RC-/Altbetonbauteilen im Deichbau stellt somit eine nachhaltige Option zur Werterhaltung als auch zur Kostenreduzierung und zur Verminderung des Umweltverbrauchs dar. Stadtumbau und Hochwasserschutz gehen eine Symbiose ein, aus welcher weit reichende Synergieeffekte erzeugt werden können. Denn der Einsatz von sekundären Betonbauteilen aus dem Rückbau von Plattenbauten im Deichbau ist nur eine Möglichkeit diese gesamtgesellschaftlichen Aufgaben effizient miteinander zu verknüpfen.

---

<sup>30</sup> TA Siedlungsabfall (TASi) vom 14.05.1993.



### 3 Der konventionelle Deichbau und die Deichertüchtigung

Im folgenden Abschnitt sollen Begriffe und Grundlagen des konventionellen Deichbaus und der Stand der Technik dazu näher erläutert werden. Es werden Deichbauvarianten, -verfahren und -baustoffe vorgestellt, welche derzeit umgesetzt, angewandt und verwendet werden. Ebenso wird auf Maßnahmen der Deichertüchtigung eingegangen, da gerade diese einen Hauptteil der derzeit ausgeführten Deichbaumaßnahmen ausmachen. Auf dieser Basis soll das Substitutionspotenzial primärer Baustoffe durch den sekundären Einsatz von Betonbauteilen aus dem Rückbau von Plattenbauten herausgestellt werden.

#### 3.1 Grundlagen des Deichbaus<sup>31</sup>

##### 3.1.1 Bestehende Regelwerke zum Deichbau

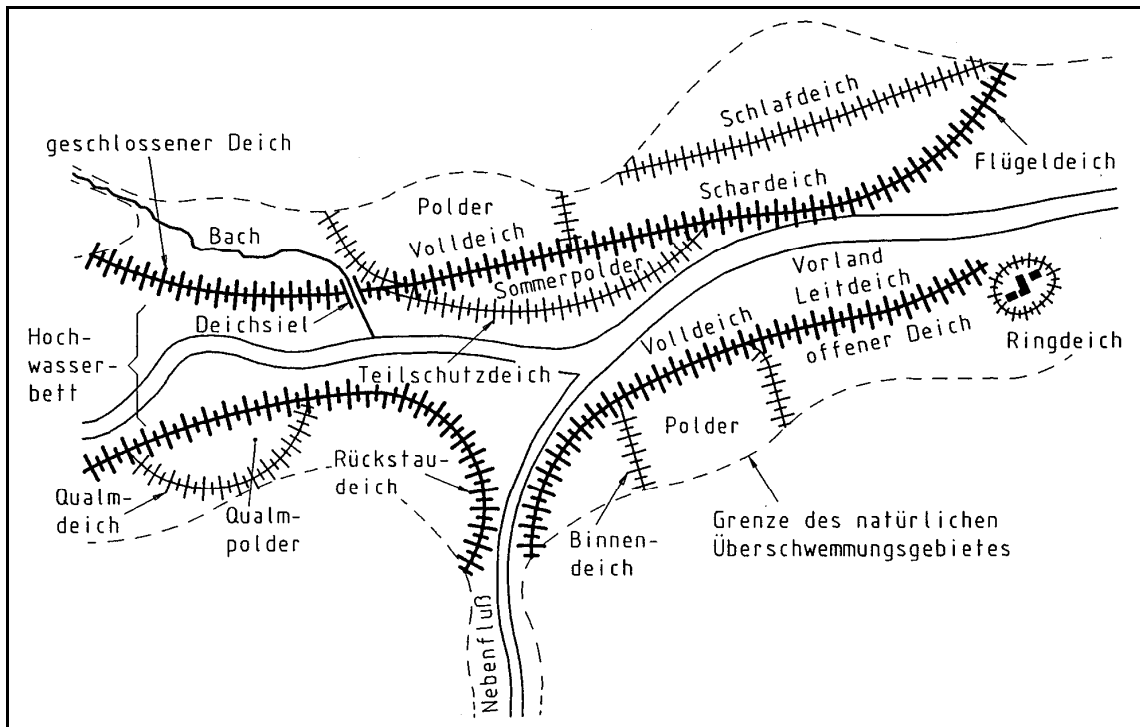
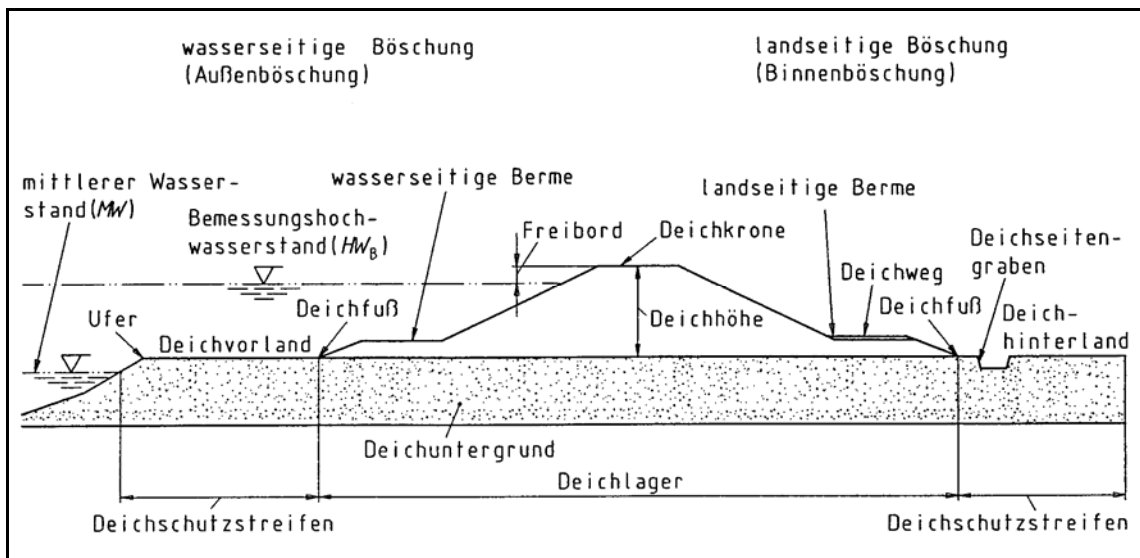
Das zurzeit gültige Regelwerk im Bereich der Planung, des Baus und der Unterhaltung von Flusdeichen besteht aus der DIN 19712: 1997-11, „Flusdeiche“ sowie dem Merkblatt 210 „Flusdeiche“ des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK). Aufgrund der vorgenannten Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre beschloss die aus dem Zusammenschluss der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (ATV) mit der DVWK entstandene Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) den zwischenzeitlich erreichten Stand der Technik zu aktualisieren und zusammenzufassen. Die Ausführungen dieses Kapitels beruhen daher (falls nicht anders angegeben) sinngemäß auf dem Entwurf des neuen Merkblattes DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ vom Februar 2007 (Gelbdruck)<sup>32</sup>. Das Merkblatt gilt für Deiche an Fließgewässern ohne Tideeinfluss und Flutungspolder. Es behandelt nicht Hochwasserrückhaltebecken nach DIN 19700-12, Stauhaltungsdämme nach DIN 19700-13 und Seedeiche.

##### 3.1.2 Begriffe

Deiche sind zeitweilig eingestaute Dämme an Fließgewässern zum Schutz des Hinterlandes vor Hochwasser. Sie bestehen vorwiegend aus Erdbaustoffen (Bodenmaterial). Insbesondere an größeren Flüssen im Flachland können längere Einstauperioden auftreten (länger als eine Woche). Ihre hydraulischen Wirkungen sind wie ein Dauerstau zu berücksichtigen. Die Wellenbelastung bei den Flusdeichen ist im Gegensatz zu den Seedeichen in der Regel geringer. Einen Überblick über die verschiedenen Flusdeicharten verschafft die Abb. 9. Die nachfolgende Abbildung eines Deichquerschnitts (s. Abb. 10) veranschaulicht einige wichtige Begriffe, die in Zusammenhang mit Deichen an Fließgewässern verwendet werden.

<sup>31</sup> Unter Verwendung von: Kania, G.: Wiederverwendung gebrauchter großformatiger Betonfertigelemente im Deichbau und bei der Deichsanierung, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2008, S. 9ff.

<sup>32</sup> Eine Veröffentlichung des Weißdrucks ist bis zum 15.04.2009 noch nicht erfolgt.

Abb. 9 : Flussdeicharten<sup>33</sup>Abb. 10 : Begriffe bei Deichen an Fließgewässern<sup>34</sup>

Die nachfolgende Einordnung von Deichen (Tab. 1) gibt eine Orientierungshilfe für die an die Deiche zu stellenden Anforderungen. Im Allgemeinen richtet sich die Einordnung nach dem Kriterium, welches die höchsten Anforderungen verlangt. Die Angaben verstehen sich nicht als starre Regeln, da sie aus komplexen Entscheidungsvorgängen unter Einbeziehung technischer, wirtschaftlicher und gestalterischer Aspekte hervorgehen. In begründeten Fällen kann bei der Zuordnung von den Vorgaben abgewichen werden.

<sup>33</sup> DIN 19712 : 1997-11 – Flussdeiche, S. 6.

<sup>34</sup> ebenda.

**Tab. 1:** Einordnung von Deichen an Fließgewässern nach Größe und Bedeutung<sup>35</sup>

Größe / Bedeutung	groß	mittel	klein <sup>1)</sup>
Deichhöhe	≥ 3 m	≥ 1,5 m	< 1,5 m
Schadenspotenzial nach Tab. 2	hoch	mittel	niedrig
Im Falle langer Einstaudauer und/oder bei Böschungsneigungen 1:m = 1:2 und steiler kann der Deich in die nächst höhere Gruppe eingeordnet werden. Bei kurzer Einstaudauer und/oder flacher Böschungsneigung (m > 3) kann auch die Einordnung in eine untergeordnete Gruppe erfolgen <sup>1)</sup> geringste Deichhöhe = 0 m, weil der Deich u.U. an höher liegendes Gelände anschließt.			

### 3.1.3 Bemessungsgrundlagen

Die Bestimmung der Deichhöhe richtet sich primär nach:

- dem Bemessungshochwasserstand (BHW),
- dem Freibord,
- evtl. erforderlichen Deichvorsorgehöhen (bei zu erwartender Auflandung oder Bergsenkung),
- ggf. bautechnisch erforderlichen Überhöhungen zur Kompensation planmäßiger Setzungen der Schüttung.

Alle Hochwasserschutzeinrichtungen für ein zusammenhängendes Retentions-(resp. Überschwemmungs-)gebiet müssen gemäß ihrem Schutzgrad nach einem einheitlichen Konzept dimensioniert werden. Zu diesem Zweck ist die Festlegung eines Bemessungshochwasserstandes (BHW) notwendig.

#### Bemessungshochwasserstand

Der höchste Wasserstand, der sich an der betreffenden Stelle aus dem Bemessungshochwasserabfluss ergibt, wird als Bemessungshochwasserstand bezeichnet. Seine Wahl ist entscheidend für die Dimensionierung des Deiches. In der Regel wird das Bemessungshochwasser als Hochwasser einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit mit Hilfe von Abfluss- oder Niederschlagsbeobachtungen und deren Statistik ermittelt. Dabei wird ein Restrisiko in Kauf genommen, über dessen Annehmbarkeit unter Berücksichtigung des möglichen Schadenspotenzials zu entscheiden ist. Bei der Wahl des Wiederkehrintervalls  $T_n$  des Bemessungshochwassers soll der im weitesten Sinne verstandene Nutzen der Eindeichungsmaßnahme größer sein als ihre Kosten.

Die in der Tab. 2 aufgeführten Anhaltswerte für die Bestimmung des Wiederkehrintervalls in Abhängigkeit von der Objektkategorie und des Schadenspotenzials können als Orientierungshilfe dienen. In der Praxis kann von diesen Werten je nach den jeweiligen Randbedingungen abgewichen werden.

<sup>35</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 12.

**Tab. 2:** Objektkategorien und mögliche Zuordnung von Schadenspotentialen sowie Anhaltswerte für das Wiederkehrintervall<sup>36</sup>

Objektkategorie	Schadenspotenzial	Anhaltswerte für das maßgebende mittlere statistische Wiederkehrintervall $T_n$ in Jahren <sup>1)</sup>
Sonderobjekte mit außergewöhnlichen Konsequenzen im Hochwasserfall	hoch	im Einzelfall zu bestimmen
Geschlossene Siedlungen	hoch	etwa 100
Industrieanlagen	hoch	etwa 100
Überregionale Infrastrukturanlagen	hoch	etwa 50 bis 100
Einzelgebäude, nicht dauerhaft bewohnte Siedlungen	mittel	etwa 25
Regionale Infrastrukturanlagen	mittel	etwa 25
Landwirtschaftlich genutzte Flächen <sup>2)</sup>	gering	bis 5
Naturlandschaften	gering	-

<sup>1)</sup> Die jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit entspricht dem reziproken Wert des Wiederkehrinteralls  
<sup>2)</sup> In der Regel ist eine der Situation angepasste Landwirtschaft zu betreiben

Als Hilfestellung für das Erkennen einer Schutzbedürftigkeit durch Deiche können auch Gefahrenkarten herangezogen werden. Sie werden für raumplanerische Zwecke erstellt und stellen verschiedenfarbig Hochwassergefährdungen in Abhängigkeit von deren zu erwartenden Häufigkeit dar.

### Freibord und Festlegung der Kronenhöhe

Der Freibord ist der vertikale Abstand zwischen der Deichkrone und dem Bemessungshochwasserstand. Er ist ein Maß für die Gewährleistung der Bauwerkssicherheit gegenüber Versagen infolge einer Deichüberströmung. Der Freibord setzt sich aus Windstau, Wellenauflauf und Zuschlägen zusammen (s. Abb. 11). Der durch die Zuschläge für Ausführungstoleranzen und konstruktive Dichtungsüberdeckungen vergrößerte Freibord bietet keine endgültige Sicherheit gegen Überflutung. Weitere Zuschläge können ebenfalls erhoben werden.

Eine eventuell zu erwartende Setzung des Deichkörpers wird nicht durch einen Freibordzuschlag berücksichtigt, sondern durch eine Überhöhung beim Bau. Zusätzlich zum Freibord können Vorsorgehöhen eingeplant werden. Das ist der Fall bei Prognostizierung einer Höhenlagenänderung in Bergsenkungsgebieten und Auflandungsstrecken von Flüssen.

<sup>36</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 16.

In Abhängigkeit von der Deichgröße und der Deichbedeutung werden folgende Mindestfreiborde empfohlen:

- kleine und mittlere Deiche: 0,5 m
- große Deiche:
  - bis 3 m Deichhöhe: 0,5 m
  - ab 5 m Deichhöhe: 1 m

Zwischen 3 m und 5 m Deichhöhe wird eine gleitende Mindestfreibordhöhe (z. B. mit linearer Interpolation von 0,5 m bis 1,0 m) angeregt.

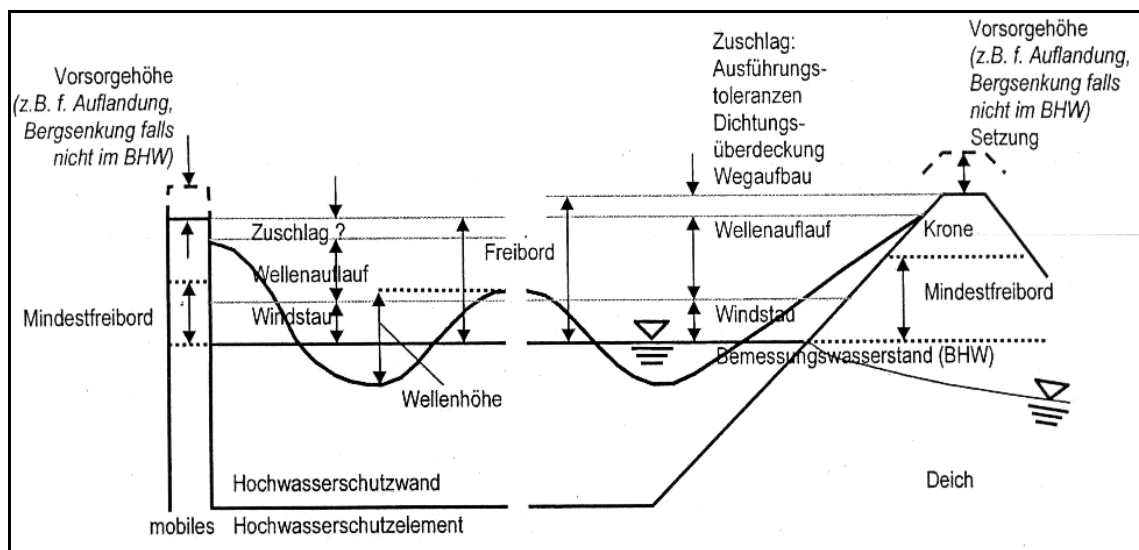


Abb. 11 : Begriffe bei Deichen an Fließgewässern<sup>37</sup>

Die Höhe der Deichkrone ergibt sich aus der Summe vom Bemessungshochwasserstand, Freibord, ggf. Deichvorsorgehöhe und ggf. bautechnisch erforderlicher Überhöhung. Abhängig vom gewählten Schutzbauwerk, den maßgebenden Streichlängen, der Lage sowie der Flussmorphologie können sich verschiedene erforderliche Kronenhöhen ergeben. Bei der Betrachtung aller Einwirkungen müssen sie aber den gleichen Schutzgrad aufweisen<sup>38</sup>.

### 3.1.4 Deichausbildung

#### 3.1.4.1 Querschnittselemente

##### Deichkrone

Die Breite der Krone soll mindestens 3 m betragen. Bei kleinen Deichen kann ihre Breite auf 2 m beschränkt werden. Eine gute Entwässerung kann mittels einer schwachen Wölbung oder einer wasserseitigen Neigung gewährleistet werden. Zusätzlich soll die Krone bei größeren Deichen zwecks Überwachung und Unterhaltung befahrbar sein.

<sup>37</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 16.

<sup>38</sup> vgl. Pohl, R.: Hydrologische und hydraulische Bemessung von Deichen, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche“, Mai 2007, S 10.

## **Berme**

Die Berme ist ein horizontaler Absatz in der Böschung des Deiches. Sie unterteilt die Böschung in zwei oder mehrere Abschnitte. Die Berme vermindert mitunter den Erddruck auf den Fuß der Böschung. Eine Böschung mit steilem Hang und Bermen ist standsicherer als eine durchgehende Böschung ohne Bermen. Des Weiteren erleichtern die Bermen die Deichunterhaltung.

Bei einem Mittelwasser (MW) soll der Deichfuß wasserseitig trocken zugänglich sein. Wenn der Deichfuß tiefer liegend ist, kann eine mindestens 0,5 m über dem MW liegende Berme angeordnet werden. Landseitig können je nach Erfordernissen weitere Bermen angelegt werden. Ihre Breiten sind abhängig davon, ob sie nur begangen (Mindestbreite 1 m) oder auch befahren werden sollen (Mindestbreite 3 m).

## **Deichwege**

Um die Deichüberwachung und –Verteidigung zu gewährleisten, ist es notwendig Schutzstreifen (Mindestbreite 5 m) an den beidseitigen Böschungsfüßen anzulegen. Die Streifen müssen von Gehölzbewuchs, etwaiger Bebauung und landwirtschaftlicher Nutzung freigehalten werden.

Zur Deichverteidigung müssen bei größeren Deichen Wege angelegt werden, die von schweren Fahrzeugen befahren werden können. Je nach örtlichen Gegebenheiten und Erfordernissen kann auch bei kleinen und mittleren Deichen ein Deichverteidigungsweg erforderlich sein. Die Deichkrone sollte möglichst nicht als Deichverteidigungsweg ausgebaut sein und nur in Ausnahmefällen für diesen Zweck genutzt werden. Bei widrigen Wetterumständen kann hierbei die Fahrsicherheit erheblich beeinträchtigt sein.

Für die Wegbefestigung können je nach Belastungsfall hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT), Verbundpflaster, Spurplatten, Beton oder Asphalt verwendet werden.

## **Deichböschungen**

Maßgeblich für die Wahl der Böschungsneigung ist die Standsicherheit. Als weitere Aspekte können die Deichunterhaltung sowie die Landschaftsgestaltung herangeführt werden. In der Praxis hat sich eine wasser- und landseitige Neigung von 1:3 und flacher als optimal erwiesen. Böschungen mit solchen Neigungen bieten den durch die Strömung und den Wind verursachten Wellen geringe Angriffsmöglichkeiten.

### **3.1.4.2 Deichprofile**

Die Deichform wird von folgenden Aspekten bestimmt:

- Neigung der Böschungen,
- Anordnung der Bermen,
- Breite der Krone.

Die Gestaltung des Querschnitts ist abhängig von den Beanspruchungen, denen der Deich je nach seiner Lage, seinem Zweck und seiner Höhe ausgesetzt wird. Zusätzlich müssen die Art des Deich-

baumaterials und die Untergrundverhältnisse betrachtet werden. Wenn der Deich fremd genutzt werden soll (z. B. durch befestigte Radwege auf der Krone), muss diese Nutzung ebenso wie die nötigen Zu- und Abgänge zum Deichkörper hin mit berücksichtigt werden.

Die Deichausbildung muss so erfolgen, dass die Standsicherheit für alle in Betracht kommenden Belastungsfälle auf dem Untergrund und im Querschnitt gewährleistet ist. Hierbei muss bedacht werden, dass Sickerströmungen, die in begrenzter Form immer auftreten, die Standsicherheit beeinflussen. Daher ist eine schadlose Abführung des anfallenden Sicker- und Dränagewassers zu gewährleisten.

Des Weiteren sind etwaige Erosionserscheinungen, die durch Austreten von Wasser aus dem Deich und dem deichnahen Hinterland hervorgerufen werden, zu verhindern. Dieses kann durch den Bau eines homogenen Deichs erreicht werden. Alternativ kann auf der Wasserseite Material geringerer Durchlässigkeit und auf der Landseite größerer Durchlässigkeit verbaut werden.

Aufgrund verschiedener örtlicher Gegebenheiten können keine allgemeingültigen Regelprofile für Deiche angegeben werden. Es gibt jedoch drei typische Bauweisen, die den jeweiligen Bedingungen vor Ort anzupassen sind.

### Homogener Deich

Der Querschnitt des homogenen Deichs (Abb. 12) besteht aus einem Stützkörper (St). Der Stützkörper übernimmt die Dichtungsfunktion und grenzt direkt an den Untergrund (U). Neben dem landseitigen Böschungsfuß wird ein Deichverteidigungsweg (DVW) angelegt.

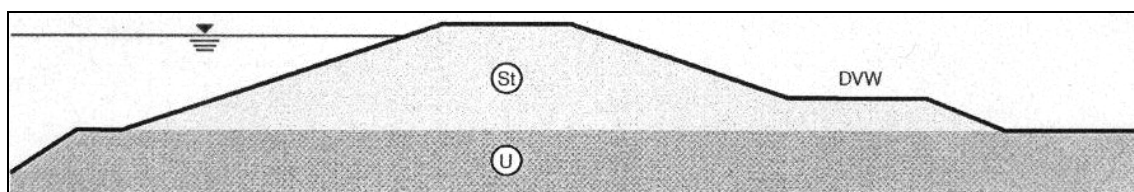


Abb. 12 : Homogener Deich<sup>39</sup>

### 2-Zonen-Deich

Der Querschnitt des 2-Zonen-Deiches (Abb. 13) besteht aus einem dichtendem Stützkörper (St). Ein stark durchlässiger Dränkörper (Dr) wird landseitig angeordnet. Beide Deichzonen grenzen direkt an den Untergrund (U).

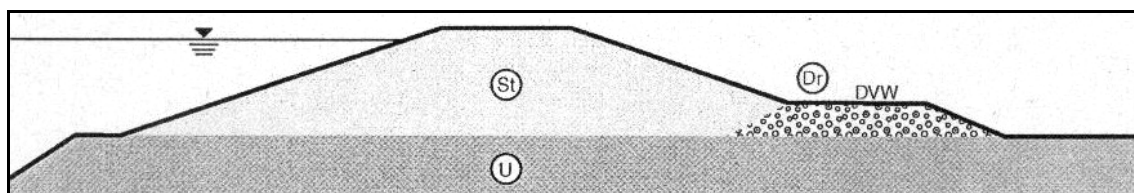


Abb. 13 : 2-Zonen-Deich<sup>40</sup>

<sup>39</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 19.

<sup>40</sup> ebenda.

### 3-Zonen-Deich

Der Querschnitt des 3-Zonen-Deiches (Abb. 14) besteht aus einem Stützkörper (St), einem der Landseite angeordneten stark durchlässigen Dränkörper (Dr) sowie einer der Wasserseite angeordneten Dichtung (Di). Die Dichtung sollte möglichst an den gering durchlässigen Untergrund (U) anschließen. Wenn der gering durchlässige Untergrund (U') tiefer ansteht, kann diese Bedingung auch durch eine Untergrundabdichtung (W) erfüllt werden.

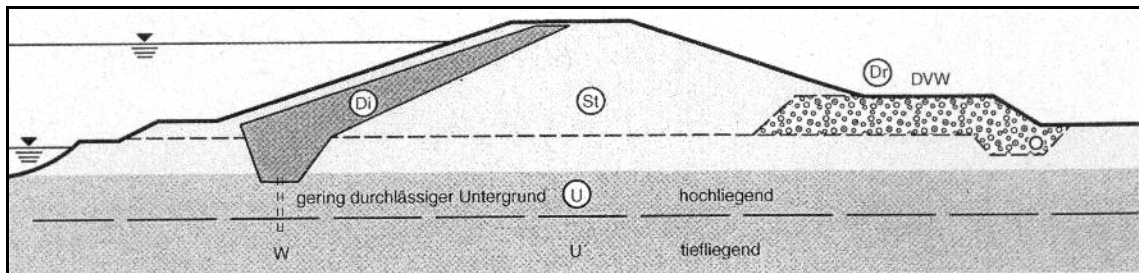


Abb. 14 : 3-Zonen-Deich<sup>41</sup>

Als Beispiele für regionale Ausführungen der Deichprofile kann an die Regelprofile der Elbdeiche in Sachsen-Anhalt und den Rheindeich in Nordrhein-Westfalen verwiesen werden (Abb. 15 und Abb. 16). Sie haben sich im Zusammenhang mit Deichsanierungen erfolgreich bewährt.

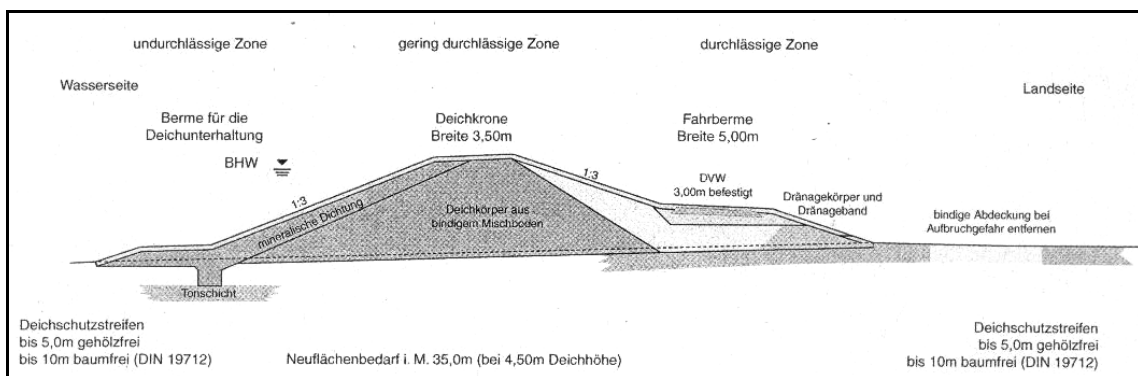


Abb. 15 : Regelprofil für Sanierungen der Elbdeiche in Sachsen-Anhalt<sup>42</sup>

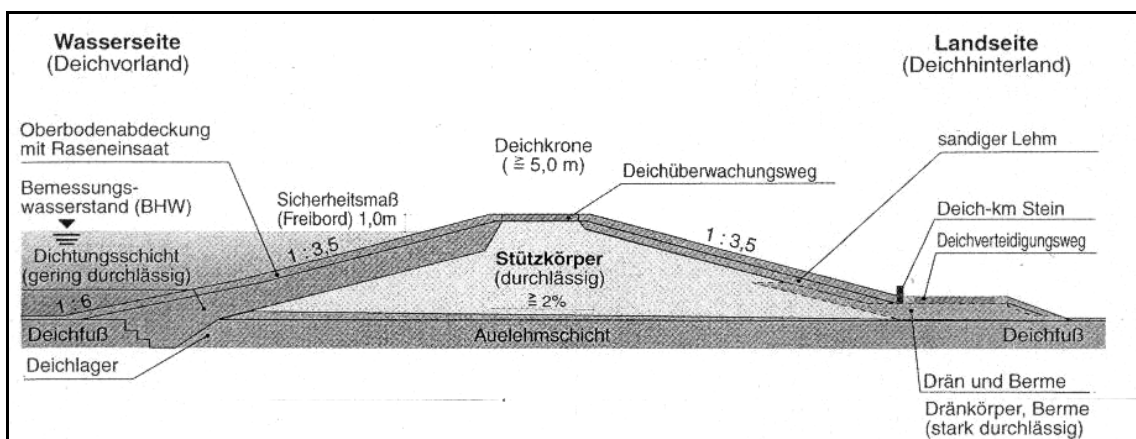


Abb. 16 : Regelprofil Rheindeich in Nordrhein-Westfalen<sup>43</sup>

<sup>41</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 20.

<sup>42</sup> ebenda, S. 18.



### 3.1.4.3 Deichentwässerung und Wasserableitung

#### Dränage und Filter

Dränagen - auch als Dräns bezeichnet - werden eingebaut, um Sickerwasser aus dem Deich zu sammeln, abzuleiten und um das aus dem Untergrund anfallende Sickerwasser aufzunehmen. Sie werden auf der landseitigen Böschung angelegt und bestehen aus Dränschichten oder Sickerpackungen, z.T. auch Dränrohren.

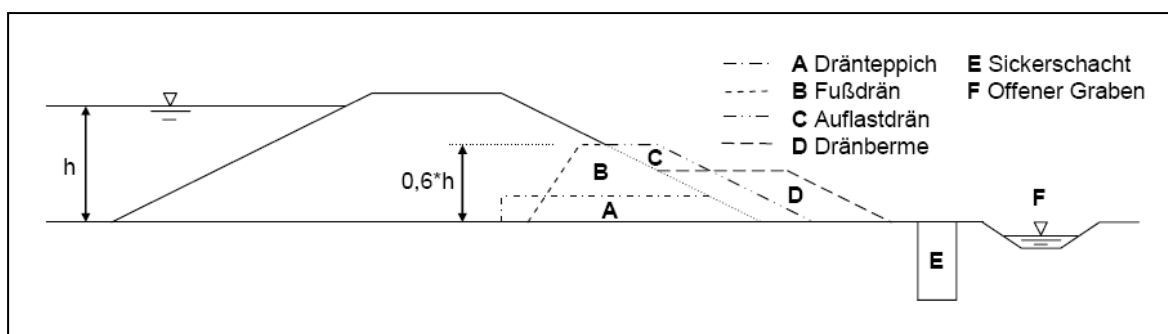


Abb. 17 : Möglichkeiten von Entwässerungseinrichtungen bei Flussdeichen<sup>44</sup>

Die Dränmaterialien müssen gegenüber dem zu entwässernden Boden filterwirksam sein und dürfen den Wasseraustritt aus dem Boden nicht behindern. Filter bestehen aus Sand, Kies, Splitt, Schotter, Schlacke oder Geotextilien. Es wird zwischen Stufen- und Mischfiltern unterschieden. In der Praxis werden überwiegend Mischfilter angewendet, welche aus einem Kiessand-Korngemisch 0/16 oder 0/32 bestehen. Als Stufenfilter werden aufeinander abgestimmte Sande und Kiese verwendet.<sup>45</sup> Es muss darauf geachtet werden, dass diese sich beim Einbau nicht entmischen. Bei Mischfiltern soll die Dicke mindestens 0,5 m betragen, bei Stufenfiltern mindestens 0,25 m.

#### Wasserableitung

Das anfallende Dränwasser muss vollständig bzw. teilweise abgeleitet werden, um etwaige Schäden am Deichkörper zu unterbinden. Dies geschieht auch in Abhängigkeit von der Nutzung des Deichhinterlandes.

Das Dränwasser ist unter Umständen einer Vorflut oder temporären Fassung zuzuleiten. Die Standsicherheit des Deiches und des Untergrundes darf hierbei nicht beeinträchtigt werden. Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn Seitengräben oder Leitungen angelegt werden müssten, die die vorhandene Decklehmschicht schwächen oder durchstoßen.

<sup>43</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 19.

<sup>44</sup> Haselsteiner, R.: Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung, TU München, 2007, S. 83.

<sup>45</sup> <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/Bofaweb/berichte/lba24/heft240088.html>, aufgerufen am 04.12.2008.

### 3.1.4.4 Dichtungen

Dichtungen in Deichen vermindern den Sickerwasseranfall und die damit verbundene Strömungsbelastung für den hinter der Dichtung liegenden Deichkörper. Gleichzeitig erhöhen sie die Deichstandicherheit. Abb. 18 zeigt eine Übersicht über Deichdichtungssysteme ihrer Anordnung im Deichquerschnitt nach. Je nach Querschnittlage der Dichtung unterscheidet man Oberflächendichtungen (Außendichtungen oder Böschungsdichtungen) und Innendichtungen (Kerndichtungen).

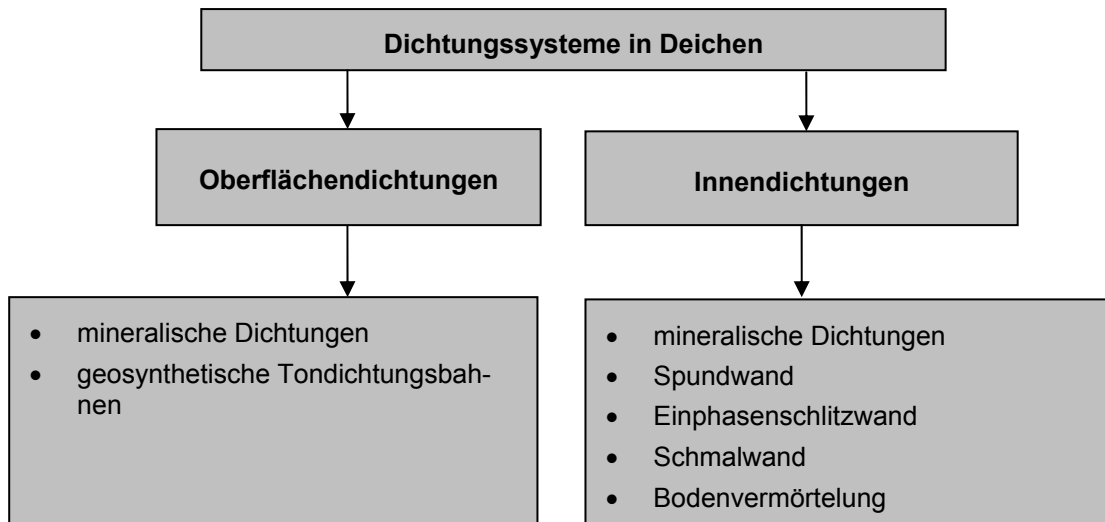


Abb. 18 : Einteilung von Dichtungssystemen nach Querschnittslage<sup>46</sup>

Abb. 19 zeigt eine wasserseitige Oberflächendichtung vor einem Stützkörper aus durchlässigem Material und Dränkörper auf gering durchlässigem Untergrund.

Abb. 20 veranschaulicht eine Innendichtung bis zum tief liegenden gering durchlässigen Untergrund.

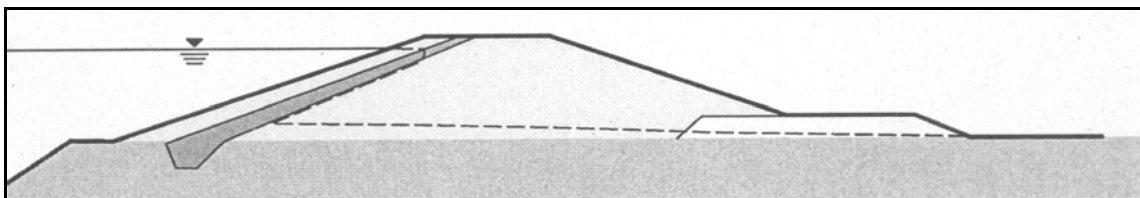


Abb. 19 : Wasserseitige Oberflächendichtung<sup>47</sup>

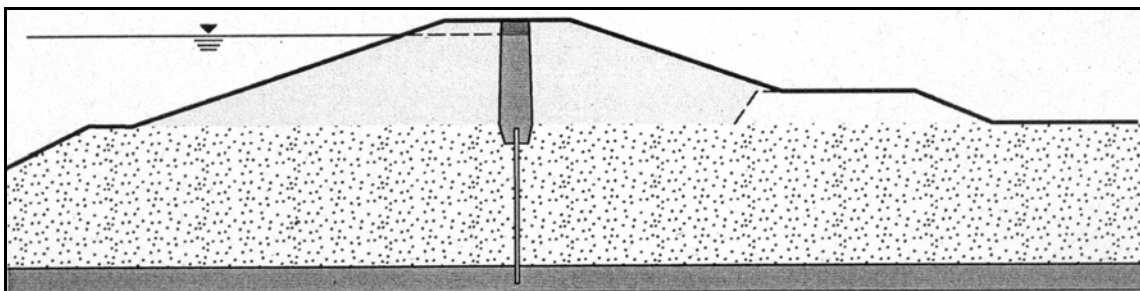


Abb. 20 : Vollkommene Innendichtung<sup>48</sup>

<sup>46</sup> Bielitz, E.: „Anforderungen an die Querschnittsgestaltung“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche“, Mai 2007, S. 5.

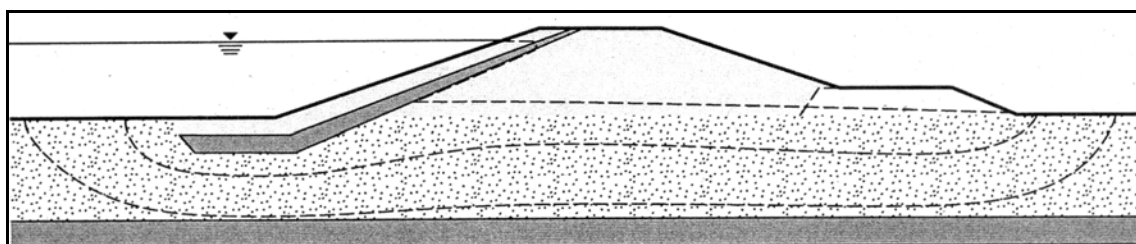
<sup>47</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 23.

<sup>48</sup> ebenda.

Zu den Vorteilen einer Innendichtung zählen:

- geringste Dichtungsfläche,
- sehr guter Schutz gegen äußere Einwirkungen durch zweiseitige Überdeckung,
- beidseitige Wasserüberdruckaufnahme,
- bei Spundwänden: einfacher Anschluss von weiteren Dichtungselementen.

Weiterhin unterscheidet man vollkommene und unvollkommene Dichtungen. Eine vollkommene Dichtung reicht bis zu einer gering durchlässigen Untergrundsicht (Abb. 20). In dem Fall, dass ein Anschluss an eine tief liegende, gering durchlässige Untergrundsicht technisch und/oder wirtschaftlich nicht nötig oder nicht möglich ist, kann die Oberflächendichtung zu einem Dichtungsteppich verlängert werden (unvollkommene Dichtung, Abb. 21).



**Abb. 21** : Unvollkommene Oberflächendichtung<sup>49</sup>

Unvollkommene Dichtungen dienen der Verlängerung des Sickerweges zur Verhinderung von Erosionsprozessen im Untergrund (Suffusion, Erosion). Eine Abdichtung des Untergrundes und Reduktion der Durchsickerung wird bei unvollkommenen Dichtungen nicht angestrebt. Die Dimensionierung der Dichtungen ist je nach technischen Möglichkeiten und Erfordernissen über den Bemessungshochwasserstand zu führen. Die Sickerwasserströmung bei Hochwasser ist bei keiner denkbaren Dichtung vollständig zu unterbinden. Daher muss bei der Auswahl der Dichtungssysteme stets ein Konzept einer schadlosen Sickerwasserabführung realisiert werden.

Fernerhin gibt es eine Vielzahl technischer und wirtschaftlicher Aspekte, die bei der Auswahl berücksichtigt werden können:

- Verfügbarkeit geeigneter Böden,
- Anforderungen an statische Wirksamkeit,
- Funktion der Dichtung als Erosionssperre,
- Aufbau und Beschaffenheit der Dichtung sowie des Deichkörpers und Deichuntergrundes,
- Vorkommen von Hindernissen im Boden,
- Einbindungsmöglichkeit in dichtende Schichten,
- Herstellbarkeit der Dichtung und Zugänglichkeit während der Herstellung,
- Möglichkeit bzw. der Aufwand für Anschlüsse an andere, vorhandene oder temporäre Dichtungselemente,

<sup>49</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 23.

- Möglichkeit, trotz unerwarteter Hindernisse, das ausgewählte Dichtungssystem einzubauen,
- verfahrensspezifische Bauzeit,
- verfahrensbedingte Emissionen, Lärm und Vibrationen,
- Kostengesichtspunkte (Aufwand – Nutzen),
- Aufwand zur Verwertung bzw. Entsorgung des Erdaushubes.

#### **3.1.4.5 Überlaufstrecken**

Bei extremen Hochwassersituationen ist eine Überströmung von Deichanlagen nicht ausgeschlossen. Da das überlaufende Wasser zu einer Erosion der landseitigen Deichböschung und somit zum Deichbruch führt, besteht durch die plötzlich und unkontrolliert einströmenden Wassermassen ein großes Risiko für den Polder im Deichhinterland. Daher werden insbesondere bei langen Deichstrecken Überlaufstrecken vorgesehen, welche einen kontrollierten Abfluss des Hochwassers in die Überschwemmungsflächen ermöglichen. Diese Überlaufstrecken sind entsprechend erosionssicher anzulegen, d.h. eine Überströmung bleibt ohne Schädigung für die Deichanlage. Dafür wird die Deichkrone in einem tolerierbaren Maß zu Lasten des Freibords abgesenkt. Dies geschieht zudem unter Berücksichtigung des vermuteten zeitlichen Hochwasseranstiegs in einer Überlaufbreite, welche eine hinreichende hydraulische Leistungsfähigkeit gewährleistet.

Zu Ausführung von Überlaufstrecken (auch Überströmstrecken genannt) kommen verschiedene Bauweisen in Frage. Grundsätzlich unterscheidet man selbsttragende und nicht selbsttragende Varianten. Im Ganzen können folgende Bauarten angewendet werden<sup>50</sup>:

- Deckwerke in Lockerbauweise:
  - Steinschüttung
  - Steinsatz
- Kohärente Deckwerke:
  - Mastix-Schotter-Deckwerk
  - Verbundene Rasengittersteine
  - Geogittermatratzen
- Bodenbefestigung mittels Bindemittelzugabe
- Verbundbauweisen

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Entscheidung für eine Bauweise ist die Möglichkeit und der Aufwand bei der Unterhaltung und Pflege der Bauwerke.

Für Überlaufstrecken als Sicherungselemente ist ein Standsicherheitsnachweis zu erbringen. Infolge der statischen Erfordernisse ergeben sich für die landseitigen Böschungen flache Neigungen. Sie liegen jeweils in Abhängigkeit vom abzuführenden Abfluss zwischen 1:5 und 1:10. Das Deckwerk wird i.A. im Kronenbereich angeordnet. Im Bereich der landseitigen Böschung ist eine schadlose Energieumwandlung zu gewährleisten. Bei der Bauausführung kommt der Qualitätssicherung eine hohe Be-

---

<sup>50</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 29.

deutung zu. Die Anschlüsse und Übergangsbereiche an die nicht gesicherten Böschungs- und Kronenbereiche müssen sehr sorgsam projektiert und ausgeführt werden. Die Abb. 22 zeigt die prinzipielle Ausführung einer Überlaufstrecke im Vergleich zu einem homogenen Deich.

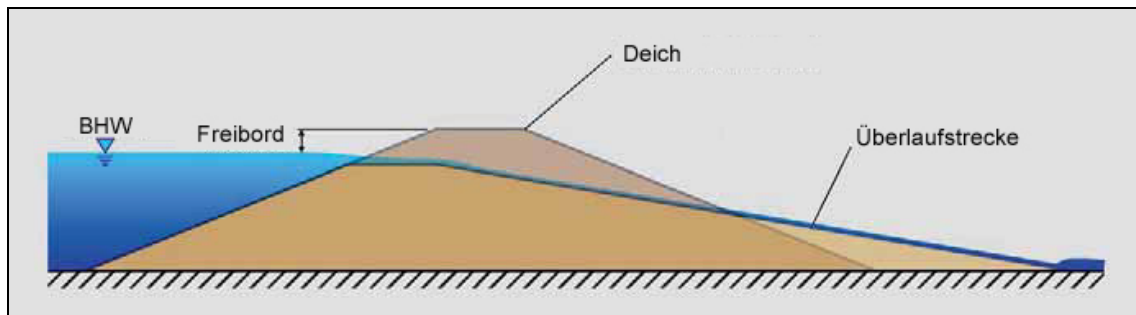


Abb. 22 : Ausführungsvergleich - Deich und Überlaufstrecke<sup>51</sup>

### 3.1.5 Deichbaustoffe

#### 3.1.5.1 Konventionelle Deichbaustoffe

Je nach Deichaufbau können bei Deichbauten verschiedene Baustoffe zur Anwendung kommen<sup>52</sup>:

- bindige Böden (Dichtungen, Stützkörper),
- nichtbindige Böden (Stützkörper, Dräns, Filter),
- Beton (Stützwände, Böschungssicherungen, Wege),
- Asphalt (Straßen, Wege, Böschungssicherungen),
- Ton-Bindemittel-Gemische (Dichtungen, Bodenverbesserung),
- Erdbeton (Dichtungen, Erosionsschutzwände),
- Geokunststoffe (Dichtungen, Bodenbewehrungen, Dräns, Filter),
- Stahl (Dichtungen, Bewehrungen),
- Baustoffrecyclingmaterial (Stützkörper, Wege, Dräns).

Als Deichbaustoffe können natürliche mineralische Böden Eignung finden. Zu diesen zählen Ton, Schluff, Sand, Kies, Steine, des Weiteren gebrochenes Gestein wie Grus, Splitt und Schotter. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist es vorteilhaft die benötigten Bodenmassen aus der Nähe der Einbaustelle zu gewinnen. Es muss jedoch immer eine Untersuchung und Bewertung der Eignung vorgenommen werden.

Für den Einsatz im Deichbau sind ebenso künstlich hergestellte nichtbindige Schüttmaterialien wie Hochofenschlacke, granuliert Schlacke, Asche und Flugasche geeignet. Als Bedingung gilt hierbei eine gute Einbau- und Verdichtungsfähigkeit sowie Umweltverträglichkeit. Ein weiteres bewährtes Material ist Bergematerial, bspw. aus dem Steinkohlenbergbau.

<sup>51</sup> Überströmbare Dämme und Dammscharten. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 90. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004, S. 6, überarbeitet.

<sup>52</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 25ff.

Nicht geeignet sind in der Regel Bodenarten mit mehr als 4 Gew.-% an organischen Bestandteilen wie Torf, Moorerde, Mudde und organischen Klärrückständen. Unter Umständen können torfige Böden zusätzlich zur Oberflächenschicht landseitig als äußere Bedeckung verwendet werden.

### 3.1.5.2 Anforderungen an Deichbaustoffe

Alle Deichbaustoffe müssen dauerbeständig sein. Sie dürfen sich im Laufe der Zeit nicht zersetzen, nicht auflösen, nicht übermäßig quellen und nicht entzündbar sein. Die Eignung der Bodenarten ist ebenso von der Querschnittsgestaltung abhängig, insbesondere, ob bindige oder nichtbindige Bodenarten benötigt werden.

Die Zweckmäßigkeit eines Deichbaustoffes kann durch weitere Forderungen bestimmt sein wie:

- Durchlässigkeit,
- Verdichtungsfähigkeit,
- Scherfestigkeit,
- Kornzusammensetzung,
- Filtereigenschaften.

Maßgeblich für die Dimensionierung der Dichtung und die Gestaltung des Deichquerschnitts ist die Begrenzung der Durchsickerung. Die Wirksamkeit einer Dichtung wird durch die durchsickernde Wassermenge pro Zeiteinheit gekennzeichnet. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (nach Darcy-Gesetz) wird als ein Materialkennwert für den Boden oder den Baustoff angewandt.

Die Wirksamkeit verschiedener Dichtungselemente lässt sich mit Hilfe der Permittivität  $\psi$  (Wasserdurchlässigkeit bezogen auf die Dicke der Abdichtung) bewerten<sup>53</sup>:

$$\psi = \frac{k}{d} = \frac{q}{\Delta h}$$

$\psi$	Permittivität [ $s^{-1}$ ]
$k$	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
$d$	Dicke der Dichtung [m]
$q$	flächenbezogener Durchfluss [ $m^3/(sm^2)$ ]
$\Delta h$	Höhenunterschied/Potenzialdifferenz [m]

Die Dichtungen müssen sicherstellen, dass kleine Fehlstellen oder Leckagen bei Durchströmung nicht aufgeweitet werden. Die Erosionsstabilität muss daher durch die Materialeigenschaften bzw. den Aufbau des Dichtungssystems sichergestellt sein.

An die Dichtungssysteme werden weitere Anforderungen gestellt:

- Suffosionssicherheit,
- Alterungs- und Langzeitbeständigkeit,
- Witterungsbeständigkeit (Hitze, Frost, UV-Strahlung, Niederschlag),
- Beständigkeit gegen mechanische Einwirkungen (z.B. Wellen),

<sup>53</sup> vgl. Heyer, D., Schmutterer, C.: Einführung in das DWA-Thema „Dichtungssysteme in Deichen“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche“, Mai 2007, S. 2.

- Beständigkeit gegen chemische und biologische Einwirkungen (z.B. Mikroorganismen, Wühltiere, Durchwurzelung),
- Verformbarkeit (ohne Beeinträchtigung der Materialeigenschaften) und Festigkeit.

### 3.1.5.3 Dichtungsbaustoffe

Alle Bodenarten und Materialien, die entsprechende Dichtungsfunktion übernehmen können (s. Abschn. 3.1.5.1), sich nicht zersetzen oder auflösen, die Standsicherheit des Deiches nicht gefährden und das Grundwasser nicht kontaminieren, sind prinzipiell als Dichtungen geeignet.

#### Oberflächendichtung

Die Oberflächendichtung wird auf der wasserseitigen Böschung des Stützkörpers angeordnet. In der Regel werden mineralische Dichtungen (Lehm, Ton) oder geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten) verwendet. Ist der Dichtungsbaustoff mineralischer Art, so hängt die Neigung der Dichtung von seinen bodenmechanischen Eigenschaften ab. Im eingebauten Zustand sollte der Boden eine Permittivität von  $\psi = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  oder kleiner aufweisen<sup>54</sup>. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  des Dichtungsmaterials soll mindestens zwei Zehnerpotenzen kleiner sein, als der des Stützkörpers. Zwischen der Dichtung und dem dahinter liegenden Stützkörper muss Filterstabilität gegeben sein.

Um die Dichtung gegen mechanische und klimatische Einwirkungen (z.B. Frost) zu schützen, ist eine genügend mächtige Deckschicht anzubringen. Die Schicht sollte auch als Wachstums- oder Erosionsschutzschicht geeignet sein.

Wenn die Dichtungsschicht selbst mächtig genug ist, so dass ihre Funktionstüchtigkeit nicht durch äußere Einwirkungen beeinflusst werden kann, genügt es auf ihr eine Rasendecke anzubringen. Die Dicke der Dichtung soll wegen der Wasserdruckzunahme zum Deichfuß hin zunehmen.

#### Natürliche bindige Böden

Mineralischen Dichtungen aus natürlichen, gering durchlässigen Böden werden mit geeignetem Wassergehalt eingebaut und anschließend verdichtet. Durch die Bestimmung von bodenmechanischen Kennziffern lässt sich die Eignung von bindigen Böden als Dichtung überprüfen (die Plastizität des Materials muss gegeben sein). Die langjährige wasserbauliche Nutzung von natürlichen Baustoffen für mineralische Dichtungen zeigt ihre Alterungs- und Langzeitbeständigkeit.

Aufgrund mechanischer, chemischer und biologischer Einflüsse sowie wegen der Empfindlichkeit der Dichtung gegenüber Trocknungsrisen, Frost- und Tauwechseln muss eine mineralische Dichtung mit einer Schutzdecke von wenigstens 0,8 m versehen werden (einschließlich der Vegetationsschicht). Die Schutzdecke kann mit zunehmender Mächtigkeit der Dichtungsschicht abnehmen. Bei einer Stärke der Dichtung von 1 m und einer Dicke der Schutzschicht von 0,8 m, ist die Effizienz der Dichtung durch austrocknungs- oder frostbedingte Beanspruchungen gegeben. Abb. 23 zeigt die Anordnung einer mineralischen Dichtung.

<sup>54</sup> vgl. Heyer, D., Schmutterer, C.: Einführung in das DWA-Thema „Dichtungssysteme in Deichen“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche“, Mai 2007, S. 3.

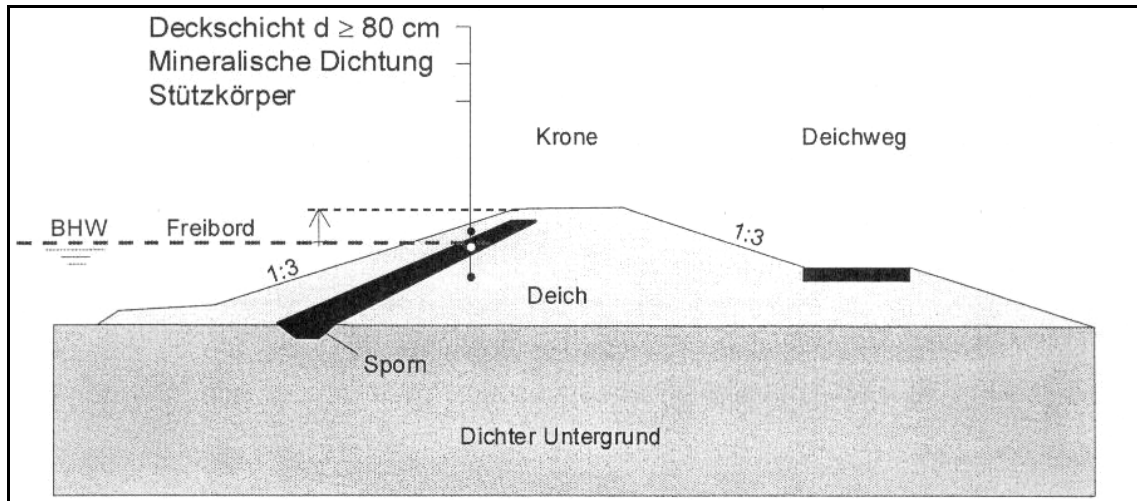


Abb. 23 : Deichquerschnitt mit mineralischer Oberflächendichtung<sup>55</sup>

#### Künstlich zusammengesetzte bindige Böden

Zu den künstlich zusammengesetzten bindigen Böden zählen Mischungen aus Tonen, Schluffen und Additiven. Sie haben dieselben Anforderungen wie die natürlichen bindigen Böden zu erfüllen. Man unterscheidet mixed-in-place und mixed-in-plant Dichtungsstoffe (Herstellung vor Ort bzw. in Mischanlagen).

#### Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD)

Dieses Dichtungsmaterial besteht aus zwei Geotextillagen und einer dazwischen angeordneten Bentonitschicht. Geosynthetische Tondichtungsbahnen können wasserseitig als Oberflächendichtungen angeordnet werden (s. Abb. 24 und Abb. 25). Zum Schutz vor klimatischen Einwirkungen sollten die Bahnen mit einer Überdeckung von wenigstens 0,8 m versehen werden (einschließlich der Vegetationsschicht). Einen Nachteil von geosynthetischen Tondichtungsbahnen stellen mögliche Schäden dar, die an der dünnen Dichtung durch Wühltiere und Durchwurzelung entstehen können. Dadurch kann die Dichtungswirkung und damit letztlich die Standsicherheit des Deichs gefährdet sein.

<sup>55</sup> Heyer, D., Schmutterer, C.: Einführung in das DWA-Thema „Dichtungssysteme in Deichen“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche“, Mai 2007, S. 3.



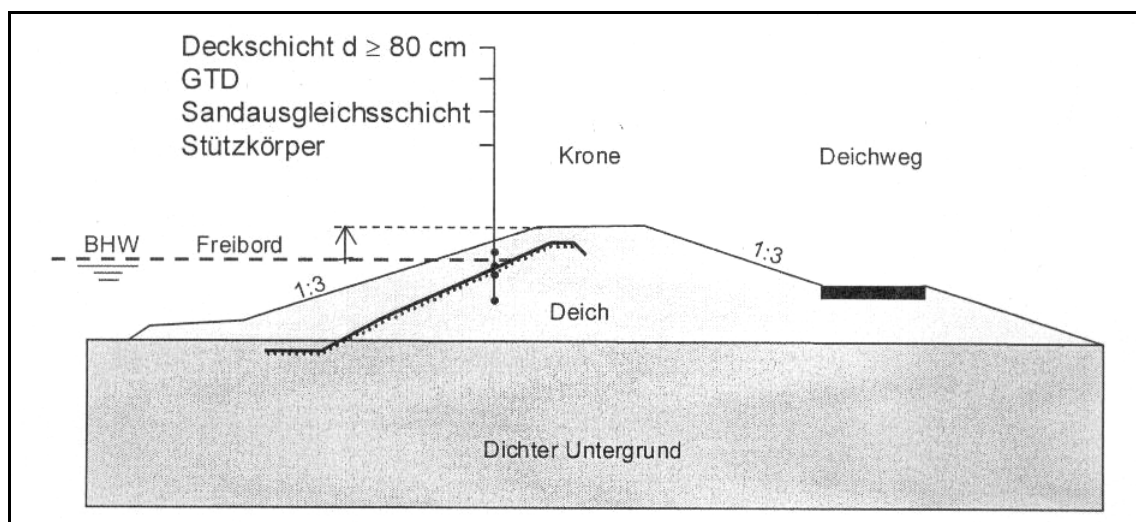


Abb. 24 : Oberflächendichtung aus geosynthetischer Tondichtungsbahn<sup>56</sup>



Abb. 25 : Einbinden einer geosynthetischen Tondichtungsbahn (GTD) in den Untergrund<sup>57</sup>

### Innendichtungen

Innendichtungen werden in der Mitte des Deichquerschnitts eingebaut. Sie werden bspw. als Beton- oder Spundwände vor dem Bau des Stützkörpers separat gefertigt, zeitgleich mit dem Stützkörper aus gering durchlässigen Böden hergestellt oder im fertigen Deich eingebracht. Eine nachträgliche Herstellung der Dichtung erweist sich gegenüber der gleichzeitigen als nützlicher. So kann sie in Kombination mit einer Untergrundabdichtung eingebracht werden. Die Setzungen des Stützkörpers sind dann im Wesentlichen abgeebnet und seine Erbauung durch den Dichtungseinbau nicht behindert. Die Auswahl der Dichtung muss eng mit den gegebenen Untergrundverhältnissen und der vorgesehen Einbautiefe erfolgen. Folgende Elemente und Verfahren kommen als Innendichtungen in Frage<sup>58</sup>:

<sup>56</sup> Heyer, D., Schmutterer, C.: Einführung in das DWA-Thema „Dichtungssysteme in Deichen“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche“, Mai 2007, S. 4.

<sup>57</sup> Strobl T., Zunic F.: Wasserbau - Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, S. 433.

<sup>58</sup> vgl. ebenda, S 4.

## Spundwände

Ihre Einbringung ist fast in allen Böden bis 30 m Tiefe möglich. Das Einbringverfahren ist abhängig von der Bodenart. Zur Herstellung der Spundwand aus Stahl wird für das schwere Trägergerät ein tragfähiger Untergrund als Arbeitsebene benötigt. Spundwände werden in speziellen Situationen eingebaut. Das ist beispielsweise der Fall, wenn nur beengter Raum oder nachträgliche Einbringung den Aufwand legitimiert.

Spundwände können beinahe in allen Böden eingebaut werden. Wenn die Böden sehr dicht gelagert sind, kann ein Vorbohren notwendig sein. Bei der Auswahl des Einbringverfahrens müssen die anstehenden Böden berücksichtigt werden. So können beispielsweise Hindernisse im Boden, das Einpressen einer Spundwand verhindern.



**Abb. 26** : Einbau einer Spundwand (kleines Bild: „Schloss“)<sup>59</sup>

## Schlitzwände

Bei einer Einphasenschlitzwand wird der Boden längs der Deichachse in Schlitzen ausgehoben und anschließend mit einer selbsterhärtende Stützflüssigkeit (bspw. Bentonit-Zement-Suspension) aufgefüllt. Mit Ausnahme von sehr eng gestuften Kiesen ist die Herstellung von Einphasenschlitzwänden in fast allen Lockergesteinen durchführbar. Beim Deichbau haben sich hierbei zwei Verfahren bewährt. Bei geringeren Tiefen bis ca. 7 m werden die Schlitze von der Deichkrone aus errichtet. Für größere Tiefen werden Seilbagger eingesetzt, die vom Deichfuß arbeiten. Die Herstellung erfolgt im Pilgerschrittverfahren. Für die Abtragung von Lasten können Spundbohlen oder Stahlträger in die noch nicht abgebundene Suspension eingestellt werden.

Für die Errichtung einer Zweiphasenschlitzwand wird in der ersten Phase eine rein stützende Flüssigkeit eingebracht. In der zweiten Phase erfolgt das Einbringen des eigentlichen Wandbaustoffes, z.T. Beton nach DIN 1045 bei konstruktiven Wänden mit statischen Anforderungen, meist jedoch Tonbeton (Ton-Zement-Mischung)<sup>60</sup>.

<sup>59</sup> Strobl T., Zunic F.: Wasserbau - Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen, Berlin Heidelberg, 2006, S. 439.

<sup>60</sup> Weini, Thomas: Dichtungselemente als Mittel der Deichsanierung – Planung, Bemessung und Anwendungsgrenzen, TU München, 2004, S. 30.

Tonbeton kann zum Bau von Ein- und Zweiphasenschlitzwänden sowie Schmalwänden verwendet werden. Des Weiteren kann Tonbeton bei Bodenvermörtelung zum Einsatz kommen (s. unten). Seine Herstellung erfolgt aus einer Zementsuspension und aufbereitetem Ton. Zu den Bestandteilen des Tonbetons zählen Wasser, Tonmehl, hydraulische Bindemittel und Zuschläge. Um die Homogenität der Mischung zu gewährleisten, muss eine geeignete Mischeinrichtung und ausreichende Mischzeit gegeben sein.

#### Schmalwände

Für die Herstellung von Schmalwänden wird der Boden durch Einbringung von Doppel-T-Stahlprofilen vollständig verdrängt. Im Zuge des anschließenden Ziehens der Profile wird über Injektionsleitungen eine Suspension (bestehend aus Zement, Bentonit und Steinmehl) in den entstandenen Hohlraum eingepresst. Durch Flanschüberschneidung entsteht auf diese Weise eine Wand mit Dicken von 8 bis 30 cm. Schmalwände können ebenso wie Spundwände bis in Tiefen von etwa 30 m eingebracht werden. Ihre Herstellung ist hauptsächlich in Kiesen und Grobsanden möglich. In Feinsanden und bindigen Böden kommt als Weiterentwicklung dieser Technologie die düsenstrahlunterstützte Schmalwand zur Anwendung.

#### Verfahren der Bodenvermörtelung

Der Ausdruck Bodenvermörtelung bezeichnet diejenigen Verfahren, die das Bodenkorngefüge an Ort und Stelle komplett zerstören und mit einer Zement-Suspension versetzen (als weiterer Zuschlag kann Bentonit verwendet werden). Auf diese Weise erhält man ein Boden-Bindemittel-Gemisch, das im Anschluss abbindet. Zu den gängigsten Verfahren zählen mixed-in-place (MIP), soil-mixing-wall (SMW), Fräs-Misch-Injektion (FMI) und cutter-soil-mixing (CSM). Sie unterscheiden sich im maschinentechnischen Verfahren der Bodenvermörtelung. Bei allen Verfahren verbleibt der Großteil des Bodens im Untergrund. Die Bodenvermörtelung kann in beinahe allen Böden angewendet werden. Eine gezielte Einstellung der Rezeptur kann das Spannungs-Verformungs-Verhalten an das Verformungsverhalten des Bodens anpassen. Das Abtragen statischer Lasten und der Anschluss von Dichtungselementen an der Deichkrone kann durch Einstellen von Stahlträgern in die frisch hergestellte Wand ermöglicht werden.



**Abb. 27** : MIP-Gerät (li.); Grabenfräse (FMI-Verfahren)<sup>61</sup> (re.)

<sup>61</sup> Strobl T., Zunic F.: Wasserbau - Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen, Berlin Heidelberg, 2006, S. 434.

### 3.1.5.4 Deichschutz

Die wasser- und landseitigen Deichböschungen und Böschungsfüße müssen soweit gegen mögliche Schädigungen abgesichert werden, wie das Deichmaterial selbst nicht genügend Widerstand bietet.

Die Schädigungen können entstehen durch:

- Starkregen,
- Wellen und Strömung,
- Überströmung,
- Eisgang und Eisstau,
- Gehölze, Haus- und Wühltiere.

#### Grasnarbe

Eine dichte, geschlossene, auf den Böschungen dauerhaft angelegte und gut gepflegte Grasnarbe, ist sowohl aus ökologischer wie ökonomischer Sicht der beste natürliche Schutz für den Deichkörper. Eine Rasendecke wächst am besten auf bindigen Böden, bei mindestens 0,2 m starken Oberbodenauftrag. Wenn der Deichkörper aus schluffigem bzw. bindigem Material besteht, wird sich die gewünschte Grasnarbe auch auf einem schwächeren Bodenauftrag bilden.

Folgende Verfahren werden bei Begrünung von Deichen angewandt:

- Normalrasen, evtl. mit Bindemittel,
- Decksaaten bei erosionsgefährdeten Standorten,
- Nasssaaten (Anspritzenverfahren) bei keinem oder nur geringem Oberbodenauftrag,
- Fertigrasen von anderen möglichst entsprechenden Standorten oder von benachbartem Gelände aus standortgerechten Saatmischungen,
- Saatmatten (organische Matten).

Die Auswahl des Saatguts, der Mischungen und Samenmengen, die örtlichen Standortgegebenheiten, spätere Unterhaltung sowie die Verbreitung und Wuchseigenschaften der in Frage kommenden Gräser sind vorrangig zu beachten. Fertigrasen und Saatmatten können die Deichoberfläche sehr rasch gegen Auswaschungen schützen. Der Nachteil des Fertigrasens liegt in seiner begrenzten Lagerfähigkeit. Die Saatmatten hingegen können lange trocken gelagert werden und sind zudem leichter als Fertigrasen.

#### Gehölze

Gehölze (Bäume, Sträucher und Hecken) stören die Unterhaltung des Deiches und gefährden dessen Standsicherheit. Man unterscheidet zwischen primären und sekundären Schäden durch Gehölze. Als primäre Schäden bezeichnet man alle möglichen Effekte, die durch direkte Einwirkung des Bewuchses oder seiner Wurzeln entstehen und damit die Struktur des Deiches beeinträchtigen oder zerstören. Sekundäre Schäden wirken sich indirekt negativ auf den Deich aus (z.B. durch Behinderung der Deichschau, der Deichunterhaltung und Deichverteidigung).

Eine Fremdnutzung des Deiches durch teilweise Bepflanzung der landseitigen Böschung kann nur in Ausnahmefällen zugelassen werden. Hierbei müssen bestimmte Voraussetzungen vorliegen oder geeignete Maßnahmen getroffen werden.

### **Wühl- und Nutztiere**

Wühltiere verursachen lang gezogene Hohlräume im Deichkörper. Diese Höhlungen begünstigen im Hochwasserfall unkontrollierte Strömungen.

Zu den Wühltieren zählen u. a.:

- Nagetiere wie Kaninchen, Wanderratte, Bisam, Biber, Große Wühlmaus, Feldmaus,
- Insektenfresser wie Maulwurf und Spitzmaus,
- Raubtiere wie Fuchs, Iltis, Wiesel und andere Marderarten.

Nutztiere wie Pferde, Kühe, Schweine, Geflügel sollen aus dem Deichbereich ferngehalten werden. Sie zerstören die Grasnarbe. Schafbeweidung hat sich dagegen in der Praxis als vorteilhaft und erwünscht bewährt.

### **Wasserseitige Befestigungen**

In speziellen Fällen kann eine besondere Sicherung der wasserseitigen Befestigung notwendig sein.

Zu diesen speziellen Fällen zählen beispielsweise:

- Schardeiche,
- Deiche mit schmalem Vorland,
- Deiche mit Böschungsneigungen steiler als 1:1,5,
- Deiche mit ungewöhnlichen äußeren Angriffen (z.B. mit erhöhten Strömungsbelastungen),
- Deiche bei denen die pflegende Unterhaltung der Rasendecke nicht gewährleistet ist,
- Deiche an Gewässern mit großer Wellenbelastung.

Eine solche besondere Sicherung kann ausgeführt werden als:

- Schotterrasen,
- Steinschüttung,
- Steinsatz,
- Setzpack,
- Rauhpfaster u. a.

Da Bauweisen aus Gussasphalt, Einguss- und Asphaltbetondecken nicht begrünt werden können, sollten sie bei Deichen zur Böschungssicherung nicht angewendet werden. Bei Schardeichen hat sich das Konzept eines durchlässigen bituminösen Deckwerks aus Mastix-Kies und Mastixschotter effektiv erwiesen. Das Wachsen von Gräsern und Kräutern oberhalb des im Wasser gelegenen Teils der Sicherung ist dabei nicht unterbunden. Bei gepflasterten Böschungen müssen der Unterbau und die Fugen gegen Ausspülungen gesichert sein. Bei gering durchlässigen Böschungsbefestigungen ist sicherzustellen, dass sich bei schnell fallendem Wasser kein Druck aus dem Deichkörper bilden kann. Diese Bedingung wird erreicht, wenn die Befestigung durchlässiger ist als das angrenzende Deichma-

terial. Nur an Stellen, an denen sich Trampelpfade nicht verhindern lassen, sollten Böschungstreppen angelegt werden. Zu beachten ist eine hinreichende Breite sowie erosionssichere Einbindung der seitlichen Treppenwangen in die Grasnarbe.

## 3.2 Deichertüchtigung und Sanierung

Eine Deichertüchtigung umfasst die Deichinstandsetzung, die Deichsanierung, den Deichausbau (entsprechend den allgemein bekannten Technikregeln) sowie die Beseitigung geringer Schäden im Rahmen der Unterhaltung. Ein instandgesetzter oder ausgebauter Deich muss den gleichen Anforderungen genügen wie ein Deichneubau. Nachstehend sind einige mögliche Ertüchtigungsmaßnahmen angeführt.

### 3.2.1 Teilneubau

Unter Teilneubau versteht man einerseits die Wiedererrichtung eines abgetragenen Deichbestandteils und andererseits eine Erweiterung des bestehenden Deiches mit Integration des Altdeiches.

Der Altdeich muss so integriert werden, dass die Durchlässigkeit des Querschnitts landseitig zunimmt. Die Querschnittslage des Altdeiches hängt von dessen Eigenschaften und dem geplanten Aufbau des neuen Querschnitts ab. Die Altdeicheingliederung kann je nachdem, ob eine wasserseitige Dichtung aufgebracht wird, eine nachträgliche Innendichtung eingebaut oder eine landseitige Drainage mit einem Deichverteidigungsweg (DVW) angeordnet wird, unterschiedlich erfolgen (siehe Abb. 27 und Abb. 28).

Altdeiche besitzen meist keinen zonierten Aufbau. Daher bietet es sich an, vergleichsweise durchlässige Altdeiche durch Anordnung von Dichtungselementen zu ertüchtigen. Durch die Anordnung einer Oberflächendichtung und eines landseitigen Drainagekörpers erhält man einen Aufbau, der dem eines 3-Zonen-Deiches entspricht (Abb. 28). Durch die Anordnung einer Innendichtung im Altdeich verbessert sich die Standsicherheit der landseitigen Böschung (Abb. 29).

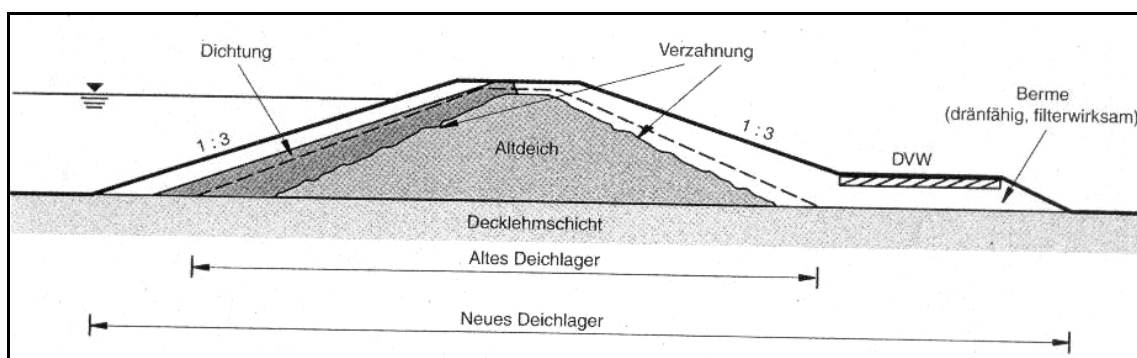


Abb. 28 : Altdeichertüchtigung mittels Oberflächendichtung<sup>62</sup>

<sup>62</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 80.

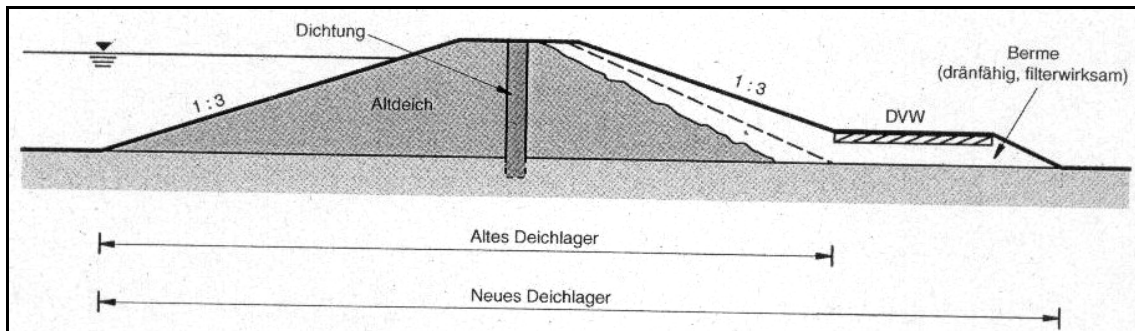


Abb. 29 : Altdeichertüchtigung mittels Innendichtung<sup>63</sup>

### 3.2.2 Nachträglicher Einbau von Dichtungselementen

Der nachträgliche Einbau einer Dichtung empfiehlt sich wenn längere Deichstrecken durchlässig werden und Erosionsprozesse auftreten. Einen wesentlichen Einfluss auf die Planung und Ausführung einer Dichtungsmaßnahme haben die Erreichbarkeit einer geringdurchlässigen Schicht im Untergrund, der Deichaufbau und die Grundwasserverhältnisse. Wenn im Altdeich eine Dichtung bereits vorhanden ist, kann sie in den neuen Querschnitt integriert werden. Die alte Dichtung muss jedoch entfernt oder unwirksam gemacht werden (z. B. durch Sickerschlitze), wenn durch diese eine Beeinträchtigung der Tragsicherheit nicht auszuschließen ist. Eine solche Lösung setzt voraus, dass die Standsicherheit der vorhandenen Böschungen in allen relevanten Lastfällen gegeben ist. Die Abb. 30 und Abb. 31 verdeutlichen den nachträglichen Einbau von Dichtungen:

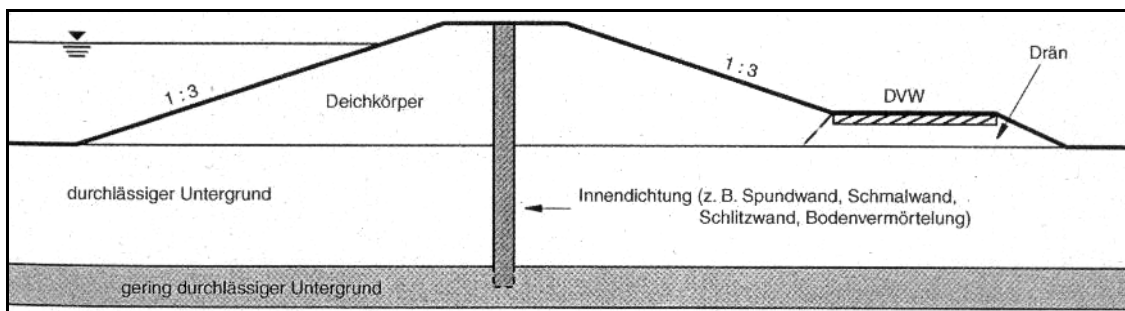
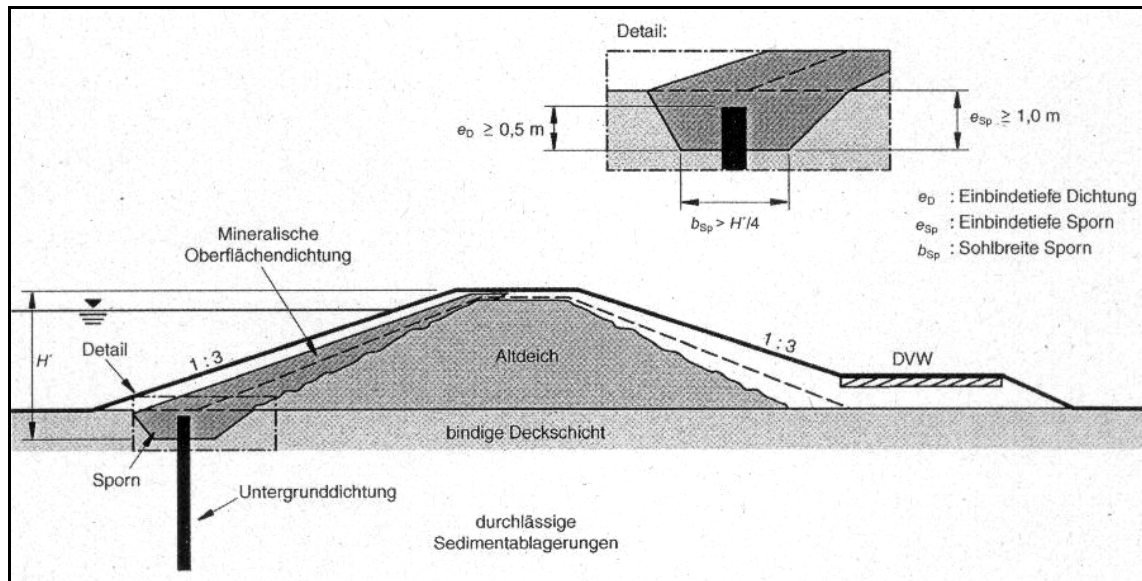


Abb. 30 : Nachträglich eingebaute vollkommene Innendichtung<sup>64</sup>

<sup>63</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 80.

<sup>64</sup> ebenda, S. 81.



**Abb. 31** : Mineralische Oberflächendichtung mit Dichtungssporn und daran angeschlossener unvollkommener Untergrundabdichtung (Tauchwand)<sup>65</sup>

### 3.2.3 Deicherhöhung

Deicherhöhungen sind erforderlich, wenn der Bemessungshochwasserstand und/oder der Freibord neuen Gegebenheiten angepasst werden müssen oder Setzungen/Senkungen eingetreten bzw. zu erwarten sind.

Eine Erhöhung kann unter Beachtung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit ohne Verbreiterung (Abb. 32) oder mit Verbreiterung des Deichlagers (Abb. 33 und Abb. 34) erfolgen.

Die Aufhöhung ohne Verbreiterung des Deichlagers kann bei Böden mit hohen Scherwiderständen u.U. unter Berücksichtigung der Strömungsverhältnisse durch Versteilung der Böschungen erfolgen. Dieses Verfahren darf allerdings nur zur Anwendung kommen, wenn eine ausreichende Kronenbreite gewährleistet ist.

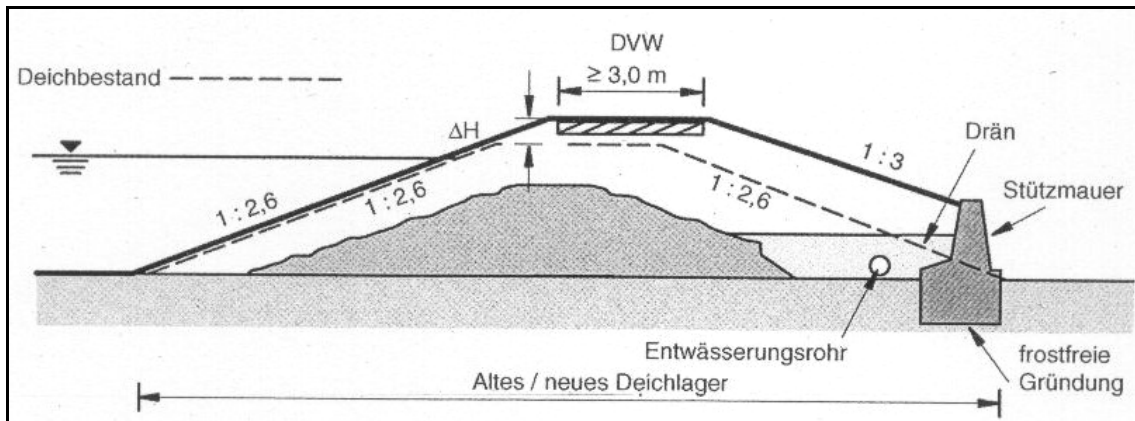
Im Falle, dass die Deichmaterialien oder die Konstruktion keine ausreichend steilen Böschungsneigungen zulassen, können an den Böschungsfüßen Stützbauwerke angebracht werden. Eine zuverlässige und beständige Entwässerung dieser Mauern oder Wände ist sicherzustellen (Abb. 32).

Der Deich kann unter Beibehaltung oder Abflachung der Böschungsneigung erhöht werden, wenn genügend Platz zur Verbreiterung des Deichlagers zur Verfügung steht (Abb. 33).

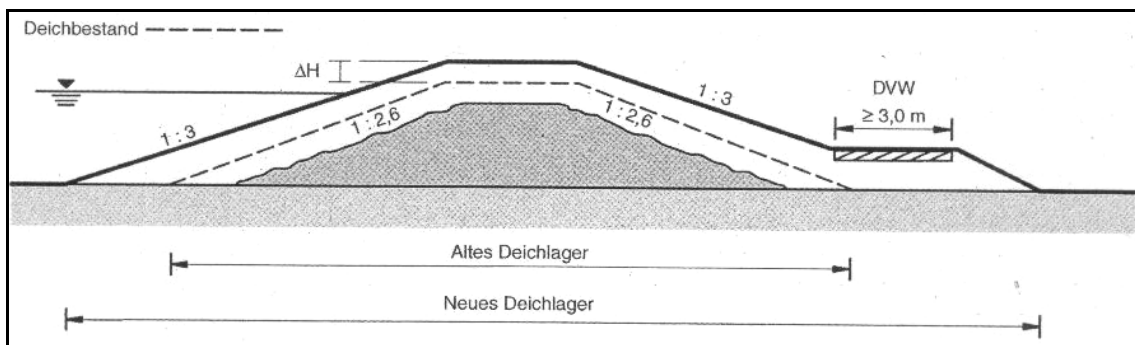
In Bereichen mit beengten Platzverhältnissen können auch Mauern oder Wände und mit Mauern kombinierte Bauwerke zur Deicherhöhung verwendet werden. Die Mauergründung kann auf einem statisch wirksamen Dichtungselement (z. B. einer Spundwand) erfolgen. Die Anordnung der Mauer und des Dichtungselements sollte wasserseitig erfolgen (Abb. 34).

<sup>65</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 82.

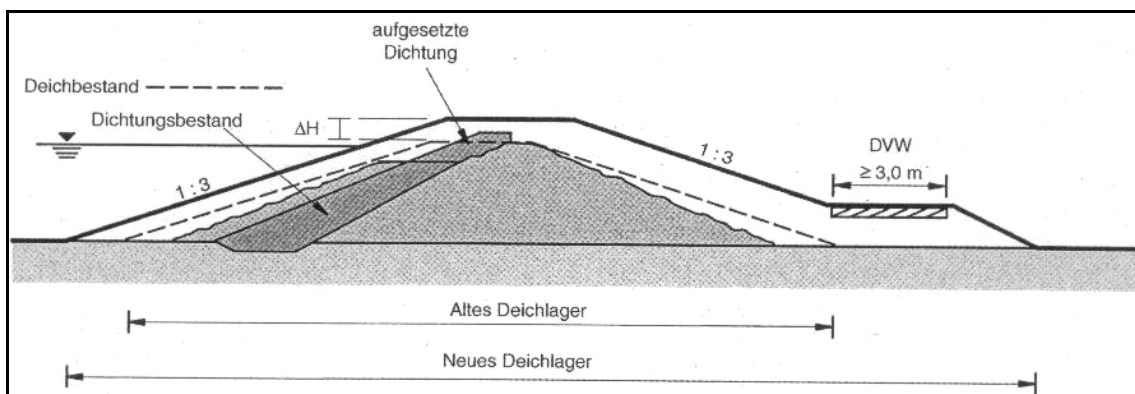




**Abb. 32** : Aufhöhung eines Deiches (um  $\Delta H$ ) durch Einbau einer landseitigen Stützmauer ohne Verbreiterung des Deichlagers<sup>66</sup>



**Abb. 33** : Aufhöhung eines Deiches (um  $\Delta H$ ) mit Verbreiterung des Deichlagers, Abflachen der Böschungen und Einbau einer landseitigen Berme<sup>67</sup>



**Abb. 34** : Aufhöhung eines Deiches (um  $\Delta H$ ) mit Integration einer Oberflächendichtung<sup>68</sup>

<sup>66</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 86.

<sup>67</sup> ebenda.

<sup>68</sup> ebenda.

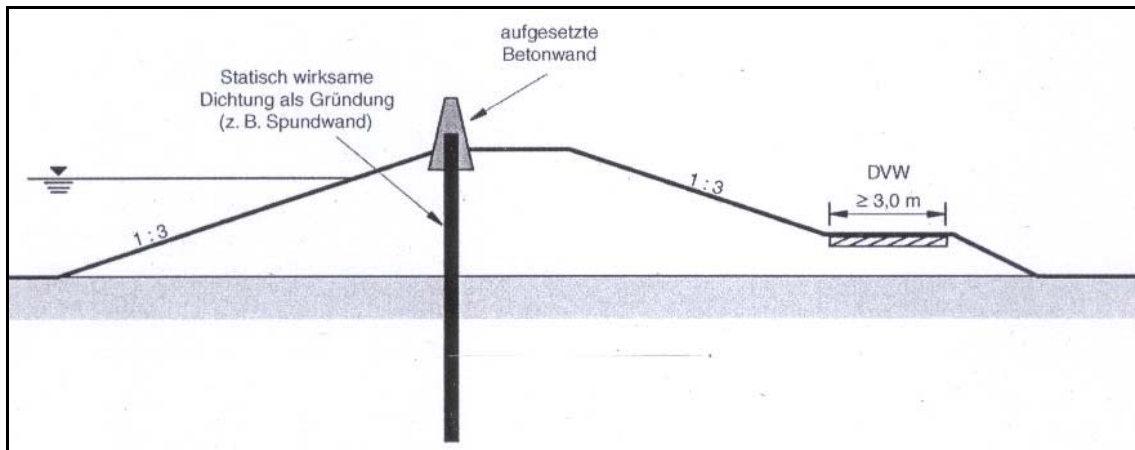


Abb. 35 : Aufhöhung eines Deiches durch wasserseitige Spundwand und darauf aufgesetzter Mauer<sup>69</sup>

### 3.2.4 Überlaufstrecken

Da Überlaufstrecken im hohen Maße zur Erhöhung der Hochwassersicherheit beitragen, hat sich die Möglichkeit ihrer nachträglichen Anordnung als besonders überlegenswert erwiesen. Ggf. muss auch eine Einbindungsmöglichkeit des Altdeiches in die Konstruktion überprüft werden. Je nach Höhenlage der Krone kann ein Abtrag des vorhandenen Deiches im Kronenbereich notwendig sein.

Überlaufstrecken benötigen starke Schutzvorkehrungen an der Krone, an der Böschung und am Deichfuß. Näheres zu Überlaufstrecken wurde im Abschn. 3.1.4.5 beschrieben.

<sup>69</sup> Merkblatt - DWA-M 507 „Deiche an Fließgewässern“ (Gelbdruck), Februar 2007, S. 87.

## 4 Qualität der RC-Betonbauteilen

Um mögliche Optionen für den Einsatz von RC-/Altbetonbauteilen im Deichbau zu erarbeiten, mussten zunächst

- das zur Verfügung stehende Sortiment,
- die Geometrie,
- die Erfüllung der Anforderungen an diese Bauteile

untersucht werden. Die Untersuchungen zur Verfügbarkeit des Sortimentes erfolgten zunächst an Parametern wie Anzahl und Einbauort im Spendergebäude, schadensfreie Demontierbarkeit, konstruktive Ausbildung (Aufbau, Gestalt, Stahl-/Spannbeton, Bauteildicke, mögliche Schadstoffbelastung,...). Eine Auswertung der vorhandenen Bauteilgeometrien erfolgte auf Basis der Untersuchungen an Wohngebäuden der Typenserien P2 und WBS 70, die Abschätzung der Eignung der Elemente hinsichtlich ihrer Bauteileigenschaften auf Basis der Ergebnisse weiterer Forschungsarbeiten der Fachgruppe Bauliches Recycling zur Wiederverwendungseignung gebrauchter Betonbauteile aus dem Wohnungsbau.

### 4.1 Verfügbares Sortiment an RC-Betonbauteilen

Aufgrund des hohen Anteils der Bauserien WBS 70 (644.900 WE) und P2 (363.600 WE)<sup>70</sup> am Bestand industriell hergestellter Wohnbauten der DDR wird nachfolgend exemplarisch auf diese eingegangen. Das Sortiment der Betonelemente und die generelle Eignung der Betonelementgruppen des Plattenbaus für den Einsatz im Deichbau sind in der folgenden Tab. 3 zusammengestellt.

**Tab. 3:** Eignung der Betonelementgruppen für den Einsatz im Deichbau

BE – Sortiment	Eignung für Einsatz im HWS	Begründung/ Bemerkungen
Deckenplatten	geeignet	- hergestellt in Stahl- oder Spannbeton - Einsatzmöglichkeit auch für Deckenplatten mit Öffnungen
Innenwände	geeignet	- ohne Tragbewehrung - Einsatzmöglichkeit auch für Innenwände mit Öffnungen
Dachkassetten	nicht geeignet	- ungünstige konstruktive Ausbildung für Einsatz im HWS - mögliche Belastung durch Schadstoffe (PAK)
Drempel - Wände	bedingt geeignet	- zu geringe Anzahl
Außenwände	nicht geeignet	- ungünstige konstruktive Ausbildung (große Öffnungen) - mögliche Belastung durch Schadstoffe (Kamilit)
Trennwände	nicht geeignet	- meist durch Rückbau beschädigt (geringe Bauteildicke) - unbewehrt, niedrige Betongüteklasse
Loggia	bedingt geeignet	- Bodenplatte geeignet - in Brüstung u. Seitenwänden mögliche Belastung durch Asbest
Kellerwände	nicht geeignet	- geringe Anzahl

<sup>70</sup> In der DDR am häufigsten gebaute Plattenbautypen (Stand 1990): WBS 70: 644.900 Wohnungen; P2: 363.600 Wohnungen [IEMB 1992]

Deckenplatten und Innenwände werden demnach als besonders geeignet für den Deichbau angesehen, wobei gegebenenfalls vorhandene Öffnungen und Aussparung verschlossen werden können. Dies bedeutet jedoch zusätzliche Aufwendungen und Kosten und soll hierbei zunächst außen vorgehalten werden.

Der Anteil weiterverwendbarer Elemente an der Gesamtzahl der im Gebäude vorhandenen Betonelemente beträgt für ein Beispielgebäude des Typs P 2/5 ca. 45 %. In einem beispielsweise betrachteten Gebäude des Typs WBS 70/11 sind immerhin noch ca. 30 % der Betonelemente Deckenplatten und Innenwände.

## 4.2 Geometrie der Betonelemente

Die grundlegenden geometrischen Kennwerte der analysierten Deckenplatten (DP) und Innenwände (IW) der Wohnungsbauserien P2 und WBS 70 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

**Tab. 4:** Geometrische Kennwerte der Innenwandelemente der Wohnungsbauserien WBS 70 und P2

Innenwände	Länge [m]	Höhe [m]	Dicke [mm]
WBS 70	3,580	2,630	150
	4,610		
	5,810		
	3,580	2,620	
	4,780		
	5,980		
P2	3,580	2,785	150
	3,410		
	4,095		
	5,460	2,635	
	3,580		

Die Dicke der Innenwände beider Gebäudeserien ist konform und beträgt 150 mm. Die Parameter Höhe und Länge der Innenwände in den Normalgeschossen variieren je nach Einbaulage. Die Höhe der Innenwände, die in den Wohnungen verbaut sind, beläuft sich überwiegend auf 2,630 m.

**Tab. 5:** Geometrische Kennwerte der Deckenelemente der Wohnungsbauserien WBS 70 und P2

Decken (DP)	Länge [m]	Breite [m]	Dicke [mm]
WBS 70	5,980	2,980	140
	5,970	1,785	
P2	5,970	1,785	
	4,170		
	3,570		
	2,370		

Die Deckenplatten sind – unabhängig vom Gebäudetyp der Großtafelbauweise – mit 14 cm identisch in ihren Dicken. In der WBS 70 wurden zwei verschiedene Deckenbreiten 3,00 m und 1,80 m, 6,00 m (Systemmaße) lang verbaut. Im P2-Typ weisen die Deckenplatten mit 1,80 m (Systemmaß) einheitli-

che Breiten auf. In der Länge variieren sie: 6,00 m lange Decken sind generell in Spannbeton ausgeführt.

In nachfolgender Tab. 6 sind für den Deichbau geeignete Bauteile aufgeführt und entsprechend ihrer Abmessungen geordnet. Die Zuordnung erfolgt hier mit einer Maßtoleranz von  $\pm 10$  cm. Detaillierte Angaben dazu können der Datenbank (s. Abschn. 6), den vorliegenden Elementekatalogen<sup>71</sup> bzw. den Planungsunterlagen des jeweiligen Spendergebäudes entnommen werden. In der untenstehenden Auflistung erfolgt beispielhaft die Angabe der Elementanzahl in einem Gebäude der jeweiligen Bauart über 3 Segmente (Eingangsbereiche). In den aufgeführten Gebäuden können weitere für den Deichbau geeignete Bauteile verschiedener Abmessungen vorhanden sein, welche aber aufgrund der Wahrung der Übersichtlichkeit der Darstellung hier außen vor gelassen werden.

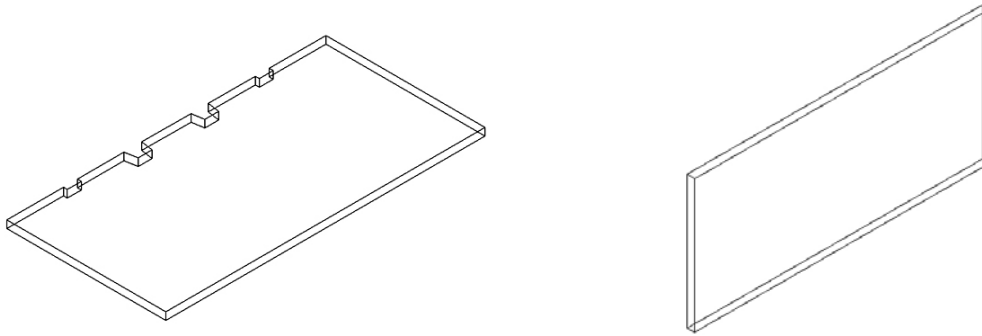
**Tab. 6:** Abmaße und Bauteilnummern für den Einsatz im Deichbau geeigneter Deckenplatten und Innenwandplatten des Serientyps P2 und der WBS 70

Elementesortiment Abmessungen [m x m]	Deckenplatten		Innenwände		
	6,0 x 1,8	6,0 x 3,0	2,6 x 3,7	2,6 x 4,7	2,6 x 5,9
Elementdicke [mm]	140	140	150	150	150
Elementfläche [m <sup>2</sup> ]	10,8	18	9,6	12,2	15,3
<b>P2, 5-geschossig</b>					
Elementnummer	21000		51501		
			51515		
			51707		
<b>Anzahl im Gebäude</b>	<b>132</b>		<b>61</b>		
<b>WBS 70, 11-geschossig</b>					
Elementnummer	20040	20000		50602	50400
	20044	20020		20620	50500
		20100			50540
		20115			
		20120			
		20200			
		20220			
<b>Anzahl im Gebäude</b>	<b>66</b>	<b>241</b>		<b>55</b>	<b>102</b>
<b>WBS 70, 6-geschossig</b>					
Elementnummer	D 410		I 210	I 310	I 410
	D 412		I 211		I 411
	D 413				I 420
	D 416				I 715
<b>Anzahl im Gebäude</b>	<b>147</b>		<b>12</b>	<b>10</b>	<b>45</b>

<sup>71</sup> Mettke, A. (Hrsg.): Elementekatalog – Elementesortiment des Typs P2, BTU Cottbus, 2003 und Mettke, A.: Elementekatalog – Elementesortiment der WBS 70/11, BTU Cottbus, 2007.

Die Auswahl der Bauteile muss für jedes Deich- resp. Rückbauvorhaben entsprechend konkretisiert werden. Folglich wird es für Wieder- und Weiterverwendungen erforderlich, die geometrischen Parameter der Betonelemente objektspezifisch zu erfassen. Von Vorteil ist, die zur Wieder- oder Weiterverwendung geeigneten Betonelemente bereits im eingebauten Zustand zu kennzeichnen und zu listen.

In den folgenden Abb. 36 sind beispielhaft die Deckenplatte 20015 und die Innenwand 50500 der WBS 70/11 abgebildet.



**Abb. 36** : Deckenplatte 20015 aus WBS 70/11 (li.); Innenwand 50500 aus WBS 70/11 (re.)

## **4.3 Betontechnische Merkmale der RC-Betonbauteile<sup>72</sup>**

### **4.3.1 Betondruckfestigkeit**

Der Beton als tragender Baustoff ist aufgrund seines günstigen Festigkeitsverhaltens, insbesondere unter Druckspannungen, bedeutend. Entsprechend der Druckfestigkeit wird der Beton in Festigkeitsklassen eingeteilt (vgl. Tab. 7).<sup>73</sup>

---

<sup>72</sup> Auszug aus Produkt- und Materialrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Angelika Mettke, BTU Cottbus, Jan. 2009.

<sup>73</sup> Mit der DIN EN 206-1 und der DIN 1045 aus 2001 wurden u.a. neue Betonklassen eingeführt. Im Gegensatz zur DIN 1045 aus 1988 (Druckfestigkeitsbestimmung an Würfeln mit 20 cm Kantenlänge) werden die Betone mit einer charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit (erster Wert) und einer charakteristischen Würfeldruckfestigkeit (zweiter Wert) bezeichnet. Die Zylinder haben einen Durchmesser von 150 mm und sind 300 mm hoch; die Würfel haben eine Kantenlänge von 150 mm

Tab. 7: Übersicht über die Betonfestigkeitsklassen nach TGL, DIN und DIN EN<sup>74</sup>

	Regelwerke	Betongüte / Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton										
in BRD	DIN EN 206-1: 2001-07 / DIN 1045-2: 2001-07	C 8/10			C 8/10		C 12/15		C 16/20		C 20/25	C 25/30
	DIN 1045: 1977 / DIN 1045:1988-07	B 5			B 10		B 15				B 25	
in DDR	TGL 33412/01 nach 1980	Bk 5	Bk 7,5		Bk 10		Bk 15		Bk 20		Bk 25	Bk 30
	TGL 0-1045 vor 1980			B 80		B 120		B 160		B 225		B 300

	Regelwerke	Betongüte / Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton										
in BRD	DIN EN 206-1: 2001-07 / DIN 1045-2: 2001-07	C 30/37			C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	C 55/67*		... C 100/115	
	DIN 1045: 1977 / DIN 1045:1988-07	B 35			B 45		B 55		B 65*			
in DDR	TGL 33412/01 nach 1980	Bk 35		Bk 40	Bk 45	Bk 50	Bk 55	Bk 60				
	TGL 0-1045 vor 1980				B 450			B 600				

Regelung für die Übergangszeit zwischen alter und neuer Norm DIN 1045, \*hochfester Beton;

Insgesamt wurden von der FG Bauliches Recycling rund 1.200 Betonelemente, vornehmlich zerstörungsfrei mittels Rückprallhammer nach Schmidt (Modell N) gemäß DIN EN 12504-2<sup>75</sup> überprüft. Anhand von Bohrkernen<sup>76</sup> wurden punktuell vergleichend die erzielten Messergebnisse übereinstimmend nachgewiesen. Folgende Ergebnisse sind festzustellen (s. Tab. 8, Abb. 37).

<sup>74</sup> Auszug aus Elementekatalog; Übersicht: Elementesortiment des Typs WBS 70 am Beispiel Gebäudetyp WBS 70/11, Hrsg. Mettke, Angelika, 2007

<sup>75</sup> DIN EN 12504-2: 2001-12 Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung; Bestimmung der Rückprallzahl

<sup>76</sup> DIN EN 12504-1: 2000-09 Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 1: Bohrkernproben; Herstellung, Untersuchung und Prüfung unter Druck; DIN 1048-2: 1991-06, Teil 2: Prüfverfahren für Beton, Festbeton in Bauwerken und Bauteilen

**Tab. 8:** Vergleich der projizierten mit den ermittelten Betondruckfestigkeitsklassen an Deckenplatten und Innenwänden vom Gebäudetyp P2 und WBS 70

Sortiment / Anforderungen Messergebnisse	Betondruckfestigkeitsklasse (Unterstrich bedeutet überwiegend hergestellte Festigkeitsklasse)			
	Deckenplatten (DP)		Innenwände (IW)	
	P2	WBS 70	P2	WBS 70
<b>Anforderungen:</b> - lt. Projektierung Betongüte gemäß TGL 0-1045: 1973-04 (frühere Bezeichnung)  Betonklasse BK (TGL 33403: 1980-10)  entspr. Festigkeitsklasse nach DIN EN 206-1: 2001-07  - lt. DIN 4227-1, Abschnitt 3.1.2 entspr. Festigkeitsklasse nach DIN EN 206-1  bzw. lt. DIN 1045-1: Abschnitt 6.2 (3)	a) B 225 schlaff bewehrt b) B 300 vorgespannt  a) C 16/20 schlaff bewehrt b) C 25/30 vorgespannt  B 35  C 30/37	BK 25 vorgespannt  C 20/25  B 35  C 30/37	<u>B 160</u> / B 225  C 12/15 / C 16/20	BK 25  C 20/25
<b>Untersuchungsergebnisse:</b> (statistische Auswertung nach DIN 1048-2) in Klammern ( ) Anzahl der untersuchten Elemente	a) C 20/25 (77) schlaff bewehrt b) C 30/37 (83) vorgespannt	C 50/60 (160) vorgespannt	C 20/25 (172)	C 20/25 (126)
<b>Bewertung:</b> Ist gegenüber Projektierung  Ist gegenüber DIN 1045-1 (alt DIN 4227-1)	erfüllt a) Erhöhung um 1 Klasse b) erfüllt	erfüllt Erhöhung um 6 Klassen  Erhöhung um 4 Klassen	erfüllt Erhöhung um 1 Klasse	erfüllt gleich bleibend

TGL 0-1045: 1973-04 Bauwerke aus Stahlbeton, Projektierung und Ausführung  
 TGL 33403: 1980-10 Betonbau; Festigkeits- und Formänderungskennwerte  
 DIN 4227-1: 1988-07 Spannbeton, Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter und voller Vorspannung  
 DIN EN 206-1: 2001-07 Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität / DIN 1045-02: 2001-07 Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1  
 DIN 1048-2: 1991-06 Prüfverfahren für Beton; Festbeton in Bauwerken und Bauteilen  
 DIN 1045-1: 2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Bemessung und Konstruktion

### Ergebnisdiskussion zum Parameter Druckfestigkeit (vgl. Tab. 8)

Generell ist festzuhalten, dass sich die Druckfestigkeit der Betonelemente mit zunehmendem Alter i.d.R. erhöht hat. Dies gilt uneingeschränkt für die erzielten Ergebnisse an 172 gemessenen Innenwänden vom P2-Typ, an 243 überprüften Spannbetondecken vom Typ WBS 70 und P2 sowie an 77 kontrollierten, schlaff bewehrten Deckenplatten vom P2-Typ.



- **WBS 70**

Die statistische Auswertung nach DIN 1048-2 von 160 Messreihen des geprüften Deckenplatten-Sortiments nach DIN EN 12504-1 und 2 belegt, dass die Druckfestigkeiten deutlich über den Anforderungen der Projektierungsunterlagen liegen. Gemäß Projektierung sind die Spannbetondeckenplatten in BK 25 bzw. B 25 resp. C 20/25 hergestellt worden. Nach DIN 1045-1, Abschnitt 6.2, Ersatz für 4227-1, Abschnitt 3.1.2 besteht die Forderung, dass Spannbeton mit sofortigem Verbund mindestens in C 30/37 herzustellen ist. Die Auswertung der Messdaten des geprüften 15-30 Jahre alten Deckensortiments der WBS 70 weist einen C 50/60 auf. Dies entspricht einer 4-fachen Erhöhung gegenüber der Mindestanforderung gemäß gültiger DIN. Die stichprobenmäßig durchgeführten Analysen zur Betondruckfestigkeit anhand von Bohrkernen bestätigen diese erzielten Ergebnisse mittels Rückprallhammerprüfung.

Die statistische Auswertung von 126 Messreihen an tragenden Innenwänden der WBS 70 bestätigen, dass die Festigkeitsklasse C 20/25 sicher erreicht wird. Nachstehende grafische Darstellung der Verteilung der Messdaten im Häufigkeitsdiagramm (s. Abb. 37)<sup>77</sup> weisen auf eine Normalverteilung (Gaußsche Glockenkurve) hin. Das Ergebnis lässt sich demzufolge für das hier (auszugsweise aufgezeigte) geprüfte Elementesortiment wie folgt zusammenfassen:

Die Festigkeitsklasse beträgt für

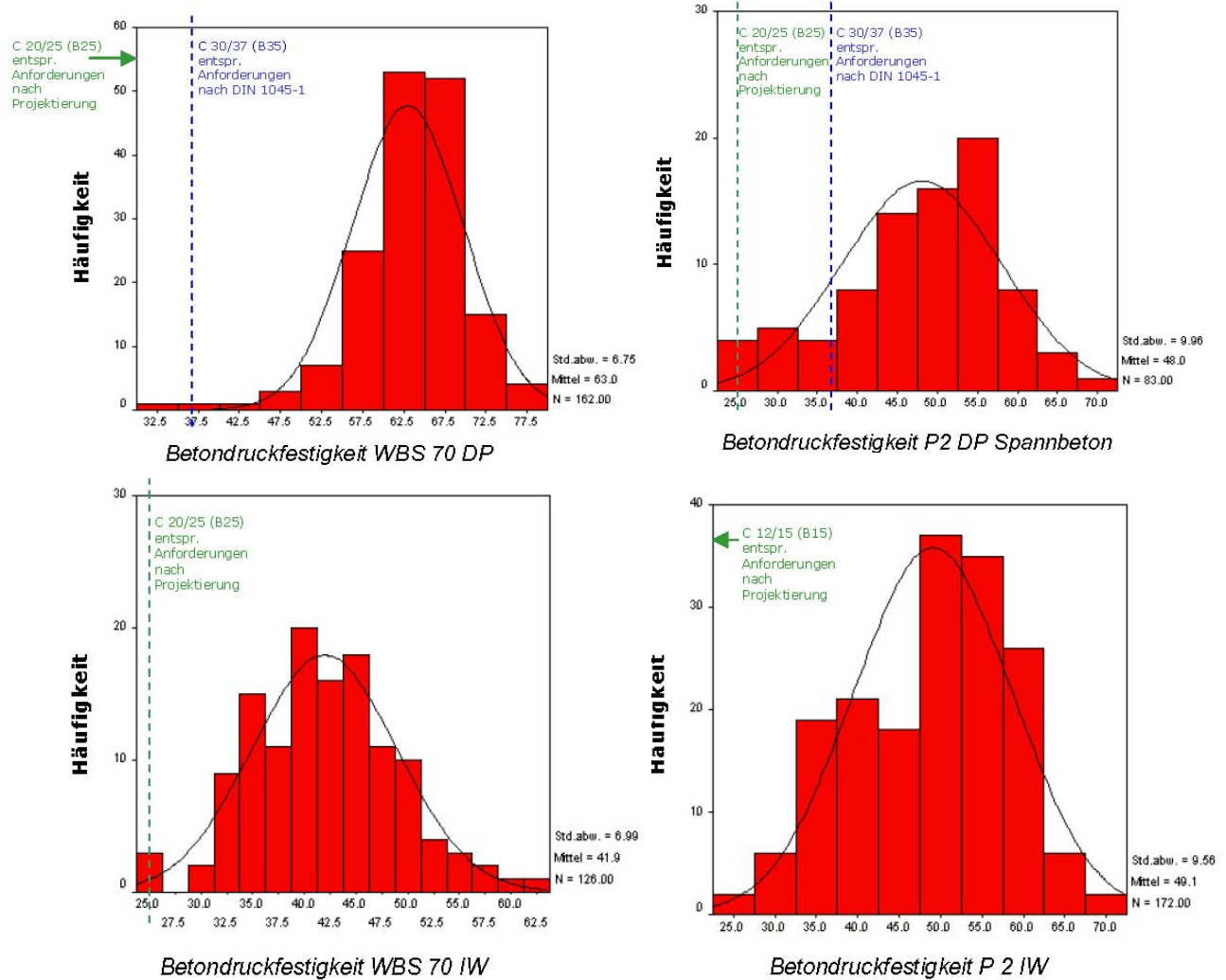
- Spannbetondecken C 50/60,
- tragende Innenwände C 20/25.

- **P2**

Im Vergleich zum geprüften WBS 70-Sortiment streuen die Messwerte der geprüften P2-Betonelemente etwas. Maßgeblich dafür verantwortlich sind die Untersuchungen an einem Wohnblock in Weißwasser. An anderen Untersuchungsstandorten wurden solche Schwankungen nicht registriert. Dennoch ist eine Normalverteilung der Messwerte errechnet. Untersucht wurden 77 schlaff bewehrte, 83 vorgespannte Deckenplatten und 172 Innenwände. Das geprüfte Elementesortiment – ausgenommen die Decken in dem geprüften Gebäude in Weißwasser – erfüllt folgende Festigkeitsklassen:

- schlaff bewehrte Decken C 20/25,
- Spannbetondecken C 30/37,
- tragende Innenwände C 20/25 (vgl. Abb. 36).

<sup>77</sup> Nach Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest wird in allen Fällen die Hypothese „Normalverteilung liegt vor“ nicht abgelehnt.



**Abb. 37** : Vergleich der projektierten mit den ermittelten Betondruckfestigkeiten von Deckenplatten und Innenwänden<sup>78</sup> (WBS 70: Betonalter zwischen 14 und 23 Jahren, P2: Betonalter zwischen 21 und 27 Jahren)

### 4.3.2 Expositionsklassen

Der Sinn und Zweck der Expositionsklassen besteht darin, die Dauerhaftigkeit von einzelnen Betonbauteilen als auch des gesamten Bauwerks über die geplante Nutzungsdauer (i.d.R. > 50 Jahre) sicherzustellen. Bei Wohn- und Gesellschaftsbauten wird von einer 80- bis 130-jährigen Nutzungsdauer ausgegangen.<sup>79</sup>

Während der Nutzung sind die verbauten Betonteile je nach Einbaulage unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Daher ist die Umgebung, in der das Bauteil verbaut wird oder ist, das wichtigste Kriterium für die Einstufung in die entsprechende Expositionsklasse. Die Expositionsklassen bestimmen die Art des Angriffes auf den Beton und die Bewehrung.

<sup>78</sup> Kania, G.: Statistische Auswertung der ermittelten Ergebnisse von Untersuchungen zur Betondruckfestigkeit, Karbonatisierungstiefe und Betondeckung an gebrauchten Betonfertigteilen, Studienarbeit, 2006

<sup>79</sup> vgl. Mettke, A.: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus, 1995, S. 20

Die möglichen Einwirkungen auf die Bewehrung im Beton werden durch folgende Expositionsklassen gekennzeichnet:

- XC (Carbonation) – Korrosionsgefahr, ausgelöst durch Karbonatisierung,
- XD (Deicing) – Korrosionsgefahr, ausgelöst durch Chloride aus Taumitteln,
- XS (Seawater) – Korrosionsgefahr, ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft.

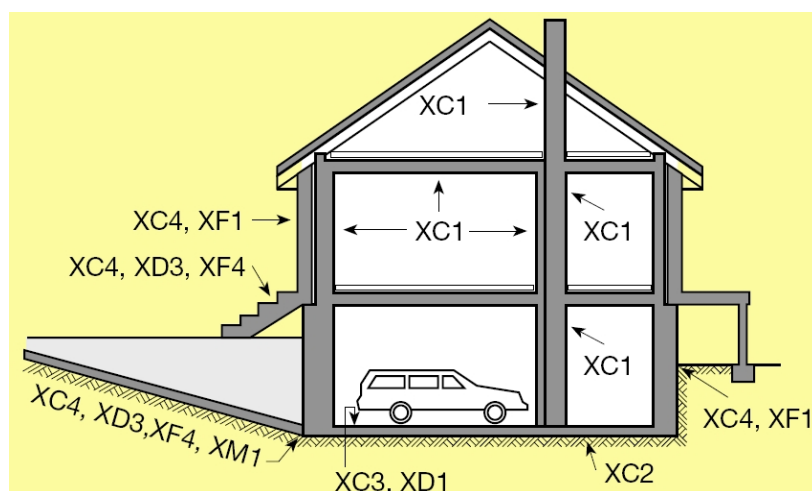
Die möglichen Einwirkungen auf den Baustoff Beton werden durch die Expositionsklassen:

- XF (Freezing) Beanspruchung durch Frost mit und ohne Taumittel,
- XA (Chemical Attack) Beanspruchung durch chemische Angriffe,
- XM (Mechanical Abrasion) Beanspruchung durch Verschleiß erfasst.

Der Angriffsgrad 1-4 bedeutet 1 schwach bis 4 stark. Die Festlegung der Expositionsklasse wirkt sich auf die Mindestbetongüte, die Mindestbetondeckung (vgl. Tab. 9) und die Begrenzung der Rissbreiten aus.

Die Expositionsklasse X0 (kein Angriffsrisiko) gilt nur für Betone ohne Bewehrung (z.B. unbewehrtes Fundament).

Beim Bau eines Wohnhauses sind bspw. gleichzeitig folgende Expositionsklassen zutreffend:



**Abb. 38** : Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen an einem Wohnhaus<sup>80</sup>

Die im Abschn. 4.3.1 dargelegten Ergebnisse der analysierten Betonfestigkeitsklassen sind den Expositionsklassen zugeordnet worden (Tab. 9), um zu ermitteln, welche spezifischen Umgebungsbedingungen ohne Aufarbeitungsmaßnahmen erfüllt werden.

Im Ergebnis wird festgestellt, dass die untersuchten Deckenplatten und Innenwände der WBS 70 und P2 die Anforderungen der Expositionsklassen XC1 bis XC3 erfüllen. Die vorgespannten Deckenplatten beider Gebäudeserien machen demnach sogar einen Einsatz ab XC4 möglich.

<sup>80</sup> Zement-Merkblatt Betontechnik, B9

**Tab. 9:** Anforderungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-1 an die Betonfestigkeitsklasse und an die Mindestbetondeckung – Bewertung der Altbetonelemente in Vorbereitung ihrer sekundären Einsetzbarkeit [Auszug aus DIN 1045-1: 2001-07; Tab. 3, 4]

Maßgebende Expositions-klasse	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für Zuordnung	Mindestbetondeckung $c_{min}$ [mm]		Mindestdruckfestigkeitsklasse $\min f_{ck}$	Bewertung Einsatz gebräuchter DP und IW ohne Aufarbeitung	
			Betonstahl	Spannglieder			
Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion	XC1	trocken oder ständig nass	Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte einschließlich Küche, Bad, Gründungsbauteile	10	20	C 16/20	DP vorgespannt und schlaff bewehrt, IW aus WBS 70 und P2
	XC2	nass, selten trocken	Fundamentplatte	20	30	C 16/20	
	XC3	mäßige Feuchte	Bauteile, zu denen die Außenluft häufig Zugang hat; vor Regen geschützter Beton im Freien	20	30	C 20/25	
	XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Beregnung	25	35	C 25/30	
Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion	XD1	mäßige Feuchte	Betonoberflächen, die Sprühnebel ausgesetzt sind; Garagen	40	50	C 30/37	
	XD3	wechselnd nass und trocken	Bauteile im Spritzwasserbereich, Fahrbahndecken	40	50	C 35/45	
Betonbeanspruchung durch Frost mit und ohne Taumittel	XF1	wässrige Wassersättigung ohne Taumittel	senkrechte Betonoberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind; Außenwände			C 25/30	vorgespannte DP aus WBS 70 und P2
	XF 4	hohe Wassersättigung, mit Taumitteln	im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen			C 30/37	
Verschleiß	XM 1	mäßige Verschleißbeanspruchung	Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge			C 30/37	

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit ist die Festlegung der Mindestdruckfestigkeitsklasse einzuhalten, sofern aus statischer Sicht keine höheren Anforderungen an die Druckfestigkeitsklasse gestellt werden. Aus der Forderung der Dauerhaftigkeit ist beispielsweise für Deckenplatten im Haus aus Stahl- und Spannbeton  $f_{ck} \geq C 16/20$  (XC1) gefordert. Aus statischer Sicht hingegen müssen Spannbetondecken gemäß DIN 1045-1 mindestens C 30/37 aufweisen (vgl. Tab. 8).

Maßgebend ist demzufolge für vorgespannte Decken die Festigkeitsklasse C 30/37. Für Betonoberflächen, die mehreren Umweltbeeinflussungen ausgesetzt sind, ist die Expositionsklasse mit den höchsten Anforderungen maßgebend. Für Außenwände aus Stahlbeton im Wohnhaus (XC4, XF1) ergibt sich aus der Forderung der Dauerhaftigkeit  $f_{ck} \geq C 20/25$ .

Bezogen auf die Wiederverwendung zurückgebauter Deckenplatten aus Spannbeton im Hausbau bedeutet dies – auf die Umgebungsbedingungen bezogen –, dass sie sowohl als Geschossdecke als auch in der Garage als Bodenplatte oder Fundamentplatte eingesetzt werden können. Stahlbetondeckenplatten aus dem P2-Typ erfüllen unaufgearbeitet die Forderung XC1 bis XC3. Der Einsatz rückgebauter Innenwände in Innenräumen (XC1) und im Freien vor Regen geschützt (XC3) ist unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeitsanforderungen uneingeschränkt möglich. Als Außenbauteile (XC4) können sie nur eingesetzt werden, wenn ein entsprechender Schutz (Wärmedämmung und z.B. hydrophobierende Putzschicht) hergestellt wird.

Andere Einsatzbereiche wie beispielsweise der Einsatz von gebrauchten Spannbetondecken in Umweltschutzbauten, z.B. im Deichbau, lassen folgende Möglichkeiten zu (Tab. 10):

**Tab. 10:** Anforderungen aus DIN EN 206-1/DIN 1045-1 an die Betonfestigkeitsklasse eingesetzter Altbetonelemente im Deichbau

Maßgebende Expositions-klasse	Einsatzort	Mindestdruckfestigkeitsklasse min $f_{ck}$	Einsetzbare Altbetonelemente ohne Aufarbeitung
1	2	3	4
XC2	<b>Einsatz im Deichkörper</b> (Oberflächendichtung, Innendichtung), nass, selten trocken	C 16/20	DP und IW aus WBS 70 und P2
XA1	<b>Einsatz im Deichkörper</b> (Oberflächendichtung, Innendichte), chemisch schwach angreifende Umgebung	C 25/30	vorgespannte DP aus WBS 70 und P2
XF1 XF3 XC4	<b>Einsatz auf Deichoberfläche</b> (Überlauf-, Überströmstrecken) Frostangriff ohne Taumittel bei: - mäßiger Wassersättigung - hoher Wassersättigung	C 25/30	
XF4	<b>Einsatz im Wegebau</b> Frostangriff mit Taumittel bei hoher Wassersättigung	C 30/37	vorgespannte DP aus WBS 70
XD3	Korrosion ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser; wechselnd nass und trocken	C 35/45	

Daraus ergibt sich zunächst folgende Einschätzung für den Einsatz im Deichbau:

Liegt keine chemisch schwach angreifende Umgebung vor, was durch Untersuchungen am Einsatzort nachgewiesen werden muss, können Deckenplatten und Innenwände aus beiden Gebäudetypen im Innern des Deichkörpers (maßgebend XC2) eingesetzt werden. Der Einsatz von Spannbetondeckenplatten aus dem Gebäudetyp WBS 70 und P2 ist im Innern des Deichkörpers auch bei schwach chemischem Angriff der Umgebung (XA1) und auf der Deichoberfläche (XC4: Bewehrungskorrosion, XF1-3: Frostangriff bei mäßiger und hoher Wassersättigung) möglich.

Für den Einsatz als Oberschicht im Wegebau eignen sich die Deckenplatten des WBS 70 und die vorgespannten Decken des P2-Typs (maßgebend XF4: Frosteinwirkung mit Taumittel und hoher Wassersättigung).

Da die DIN 1045-1 über die Mindestbetonfestigkeit hinausgehend Anforderungen an die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit formuliert, sind weitere Kriterien zu erfüllen:

### 4.3.3 Betondeckung, Karbonatisierung

- **Mindestbetondeckung**

Die Mindestbetondeckung  $c_{\min}$  ist einzuhalten, um den Schutz der Bewehrung gegen Korrosion, eine sichere Übertragung von Verbundkräften und den Brandschutz zu gewährleisten. Dementsprechend werden folgende Grundforderungen an die Betondeckung erhoben:

- Mindestbetondeckung abhängig von der Expositionsklasse (Korrosionsschutz; s. Tab. 9, 10, 11),
- Mindestbetondeckung abhängig vom Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung zur sicheren Übertragung der Verbundkräfte.

**Tab. 11:** Anforderungen an die Mindestbetondeckung zum Schutz gegen Korrosion in Abhängigkeit von der Expositionsklasse [Auszug aus DIN 1045-1, Tab. 4]

Expositionsklasse	Mindestbetondeckung $c_{\min}$ [mm]*	
	Betonstahl	Spannglieder
XC1	10	20
XC2	20	30
XC3	20	30
XC4	25	35
XD1	40	50
XD2		
XD3		

\*  $c_{\min}$  darf bei Bauteilen, deren Betonfestigkeit um mind. 2 Festigkeitsklassen höher ist als nach Tab. 5.1 erforderlich, um 5 mm verringert werden. Ausnahme: für XC1 ist diese Abminderung nicht zulässig.

Die Mindestbetondeckung  $c_{\min}$  darf zudem nicht kleiner sein als der Stabdurchmesser  $d_s$  der Betonstahlbewehrung. Es gilt:  $c_{\min} \geq d_s$ .

Die Anforderungen an die Betondeckung aus brandschutztechnischen Gründen ergeben sich aus:

- den jeweils gültigen Landesbauordnungen (Zuordnung der Bauteile zu den Bauweisen feuerhemmend und feuerbeständig),
- der DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen (Zuordnung zu Feuerwiderstandsklassen)
  - feuerhemmend → F 30 – B
  - feuerbeständig → F 90 – A

und zu konstruktiven Vorgaben:

- Einhaltung von Mindestabständen zwischen der Außenkante des Bauteils und der Achslinie der tragenden Längsbewehrung,
- Mindestbauteildicken,
- Mindestanzahl von Längsbewehrungsstäben in Stahlbeton.

Die Untersuchungsergebnisse zum Feuerwiderstand sind für den Einsatz im Deichbau nicht relevant und werden daher im vorliegenden Bericht nicht näher betrachtet.

An über 500 Elementen wurde die vorhandene Betondeckung  $c_{\text{vorh}}$  zerstörungsfrei mittels Ferroskan-System FS 10 (magnetische Bewehrungssuche) gemessen, um die Mindestbetondeckung  $c_{\text{min}}$  zu überprüfen. Die statistische Auswertung der gemessenen Daten erfolgte nach dem DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“ des Deutschen Betonvereins e.V.<sup>81</sup> Durch das Messen der Betondeckung auf mehreren Messlinien konnte die Verteilung der Betondeckung ermittelt werden. Aus 10 Messwerten je Element wurde  $c_{\text{vorh}}$  abgeleitet und der Mindest- sowie durchschnittlichen Betondeckung ( $c_{\text{min}}$  bzw.  $c_{i,M}$ ) gegenübergestellt.

Für die Entscheidung gilt:

**Tab. 12:** Entscheidungstabelle zur Quantilbestimmung für den quantitativen Nachweis<sup>82</sup>

Entscheidung	10% -Quantil für XC1	5% -Quantil für XC2-4
Ablehnung	$c_{\text{min}} > c$ (10%)	$c_{\text{min}} > c$ (5%)
Annahme	$c_{\text{min}} \leq c$ (10%)	$c_{\text{min}} \leq c$ (5%)

Unter Hinzuziehung der Expositionsklassen stellen sich die Messergebnisse exemplarisch wie folgt dar<sup>83</sup>:

**Tab. 13:** Zusammenstellung der Auswertung der Messergebnisse zur festgestellten/vorhandenen Betondeckung in Abhängigkeit der Expositionsklasse

Elementesortiment	Gebäudetyp	Datensätze	Erfüllung			
			XC1		XC2-4	
			$c_{\text{min, vorh}}$	$c_{i,M, vorh}$	$c_{\text{min, vorh}}$	$c_{i,M, vorh}$
Spannbetondeckenplatten	WBS 70	32	n.e.	V	n.e.	n.e.
	P2	52	V	V	n.e.	n.e.
Schlaff bewehrte Deckenplatten	P2	38	V	V	n.e.	n.e.
Innenwände	P2	50	V	V	n.e.	n.e.

V: erfüllt, n.e.: nicht erfüllt

Die Untersuchungen zur Betondeckung in XC1 ergeben nach der Neville-Verteilung, dass sämtliche Elemente der P2-Gebäudeserie die Mindestbetondeckung  $c_{\text{min}}$  erfüllen. Die Spannbetondeckenplatten der WBS 70 erfüllen diese Anforderung nicht. Wird  $c_{i,M, vorh}$  zugrunde gelegt, dann wird die Bedingung erfüllt.

Die Mindestbetondeckung der Umweltklasse XC2 bis XC4 wird unaufgearbeitet erwartungsgemäß von keinem der geprüften Elemente erfüllt. Dieses Zwischenfazit gilt jedoch wiederum nur bedingt, da außerdem der Karbonatisierungshorizont zu beurteilen ist, um die tatsächliche Korrosionsgefahr der Bewehrung bewerten zu können.

<sup>81</sup> DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“, Fassung 07/2002, Hrsg. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Berlin

<sup>82</sup> Kania, G.: Statistische Auswertung der ermittelten Ergebnisse von Untersuchungen zur Betondruckfestigkeit, Karbonatisierungstiefe und Betondeckung an gebrauchten Betonfertigteilen, Studienarbeit, 2006

<sup>83</sup> ausführlich siehe: Mettke, A.; Heyn, S.; Thomas, C.: Schlussbericht Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil 2: Wieder- und Weiterverwendung großformatiger Betonelemente, gefördert vom BMBF, 2008, S. 38 ff.



- **Karbonatisierung**

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit hängt hauptsächlich ab von:

- der Art, der Konzentration und Einwirkungsintensität der angreifenden Medien (CO<sub>2</sub>, Feuchtigkeits-, Sauerstoff- und weitere stahlaggressive Ionen wie z.B. Säuren, Laugen, Salze),
- der Porosität des Betons (v.a. Kapillarporosität),
- der Feuchtigkeit des Betons,
- der Betondruckfestigkeitsklasse,
- dem Betonalter,
- der Dicke der Betondeckung.<sup>84</sup>

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird weitgehend durch den CO<sub>2</sub>-Diffusionsvorgang bestimmt und in der Baupraxis vereinfachend nach dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz ermittelt (vgl. Abb. 39, Abb. 40). Die Karbonatisierungstiefe wurde an frischen Bruchflächen anhand von Bohrkernen mittels Phenolphthalein bestimmt. Bereits karbonatisierter Beton bleibt unverfärbt während sich der nicht karbonatisierte Beton violett verfärbt.

In nachstehender Tab. 14 sind wesentliche Untersuchungsergebnisse zusammengefasst, die im Rahmen der Analysen zur Wiederverwendungsfähigkeit in unserer Fachgruppe ermittelt wurden.

**Tab. 14:** Gemessene Karbonatisierungstiefen<sup>85</sup>

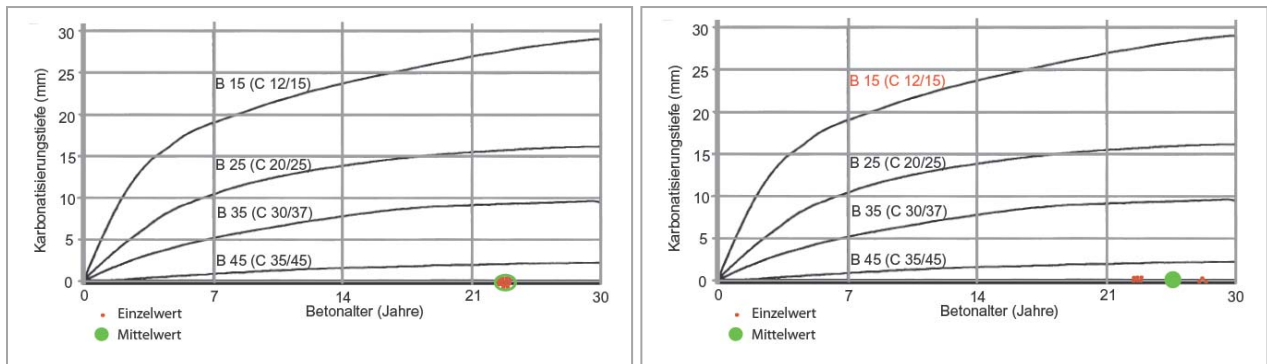
Elementesortiment		Betalter [Jahre]	Anzahl der Messwerte	Karbonatisierungstiefe [mm] gemessen		
				Minimalwert	Durchschnittswert	Maximalwert
Spannbetondecken	WBS 70	20-22	26	0	2	18
	P2	23	14	0	0	0
Innenwände	WBS 70	21	13	0	2	8
	P2	23	9	0	0	0
Außenwände	WBS 70	18-21	5	0	5	10
	P2	23	21	0	12	30

Damit wurde nachgewiesen, dass bei den untersuchten Spannbetondecken und den Innenwänden vom Typ P2 selbst bei einem Baualter von 23 Jahren noch keine Betonumwandlung stattgefunden hat. Bei den untersuchten Spannbetondecken der WBS 70 ist eine Karbonatisierungstiefe im Mittel von 2 mm festgestellt worden.

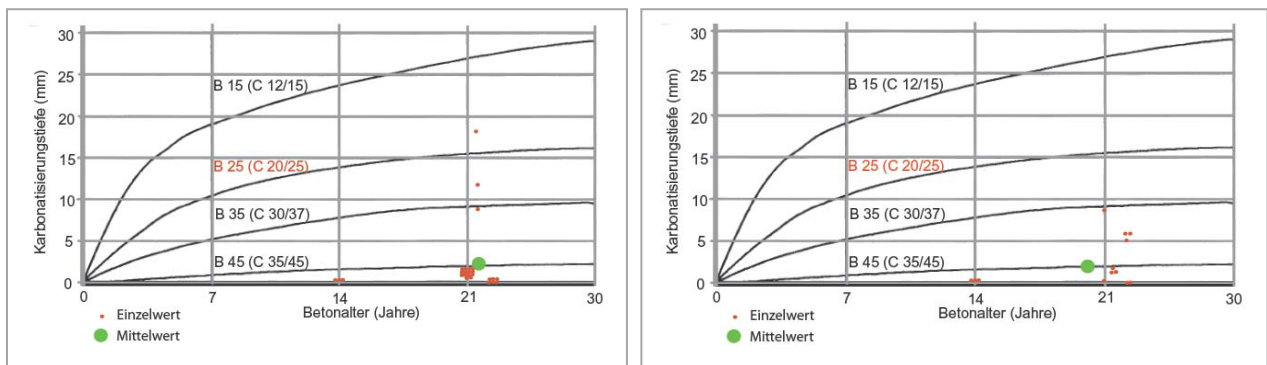
<sup>84</sup> Mettke, A.: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus, 1995, S. 100

<sup>85</sup> ausführlich siehe: Mettke, A.; Heyn, S.; Thomas, C.: Schlussbericht Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil 2: Wieder- und Weiterverwendung großformatiger Betonelemente, gefördert vom BMBF, 2008, S. 32 ff.

Der gemessene Maximalwert von 18 mm ist als statistischer Ausreißer zu werten, da nur eine Deckenplatte diesen Wert aufwies. Die grafische Darstellung der Karbonatisierungstiefe ist exemplarisch für die Deckenplatten und Innenwände der WBS 70 nachfolgender Abb. 40 entnehmbar.



**Abb. 39** : Ermittelte Karbonatisierungstiefe an 14 Spannbetondecken und 9 Innenwänden der Typenserie P2



**Abb. 40** : Ermittelte Karbonatisierungstiefe an 26 Spannbetondecken und 13 Innenwänden der WBS 70

Die 23 Jahre alten Außenwände der P2-Serie weisen im Mittel eine Karbonatisierungstiefe von 12 mm auf und liegen damit deutlich unter den prognostizierten Karbonatisierungshorizonten nach dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz und in Abhängigkeit der projizierten Betondruckfestigkeitsklasse (rd. 27 mm).

Zusammenfassend wird zur Karbonatisierung festgestellt, dass bei allen 78 untersuchten 18 bis 23 Jahre alten Bauteilen – bis auf eine Geschossdecke – der Schutz der Bewehrung vor Korrosion gegeben ist. Da mit zunehmendem Baualter die Karbonatisierung nur noch unmerklich fortschreitet und praktisch einen Endwert erreicht (vgl. Abb. 39), ist davon auszugehen, dass bei gleich bleibenden Umweltbedingungen in der Sekundärnutzung im Vergleich zur Primärnutzung ein ausreichender Korrosionsschutz besteht.

Auch die hohe Dichte der alten Spannbetondeckenplatten (s. Tab. 8 - nachgewiesene Betondruckfestigkeitsklassen sowie Feststellung der geringen Porosität, Abschn. 4.3.4) – und infolge der zunehmenden Verdichtung des Betons selbst durch den Karbonatisierungsprozess – lässt keinen weiteren Karbonatisierungsfortschritt erwarten. Der Fortschritt der Karbonatisierung ins Bauteilinnere ist praktisch zum Erliegen gekommen. Unter Hinzuziehen des Zwischenfazits bezüglich der Betondeckungsmesswerte kann für die Spannbetondeckenplatten der WBS 70-Serie relativierend vermerkt werden, dass unter Zugrundelegung des Maximalwertes der gemessenen Karbonatisierungstiefe von 18 mm der Bewehrungsstahl bei einer durchschnittlichen minimalen Betondeckung von 2,3 cm immer noch

korrosionssicher eingebettet ist. Beträgt  $c_{\min}$  nur 13 bis 17 mm (an 6 von 32 gemessenen Spannbetondecken der WBS 70 festgestellt) und liegt der Extremfall 18 mm Karbonatisierungstiefe vor, dann ist eine Behandlung der Betonoberfläche erforderlich.

In jedem Fall des Wiedereinsatzes von gebrauchten Betonbauteilen im Deichbau ist in Voruntersuchungen die vorhandene Betondeckung als auch Karbonatisierungstiefe zu prüfen. Bei einer Unterschreitung der je nach Einsatzbereich erforderlichen Betondeckung (s. Tab.11) sind Maßnahmen zur Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung zu ergreifen.

#### 4.3.4 Permeabilität, totale Porosität, Wassereindringtiefe

Die untersuchten 22 Jahre alten Spannbetondecken und 19 Jahre alten Innenwände vom Typ WBS 70 weisen überraschender Weise Durchlässigkeitswerte von  $k_f=10^{-10}$  bis  $10^{-11}$  m/s<sup>86</sup> (vergleichbar mit Ton  $k_f=10^{-8}$  bis  $10^{-12}$  m/s) auf. Somit können diese ehemals in Wohnungsbauten verbauten Platten als dicht eingestuft werden.

Die totale Porosität (Anteil des gesamten Porenvolumens) streut zwischen 6,5% und 15,6%; im Mittel beträgt sie 12,5%. Auch diese Werte weisen auf einen dauerhaften Beton hin, der durch eine Festbetonporosität < 16% gekennzeichnet ist.<sup>87</sup> Im Übrigen korrelieren diese Ergebnisse mit den ermittelten Betondruckfestigkeiten und den Ergebnissen zum Säurewiderstand.

Die Wassereindringtiefe liegt zwischen 1,3 cm und 2,4 cm. Damit wird nach ZTV-W gemäß DIN EN 12390-8: 2001-02<sup>88</sup> die angegebene Wassereindringtiefe von max. 3 cm unterschritten.

**Tab. 15:** Ermittelte Ergebnisse zu Durchlässigkeit, Totalen Porosität, Wassereindring- und Karbonatisierungstiefe

	Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	Totale Porosität	Wassereindringtiefe	Karbonatisierungstiefe
	[m/s]	[%]	[mm]	[mm]
<b>3 DP (WBS 70):</b> Elemente-Nr. 20 015; Planungsjahr 1983; Betonalter ca. 22 Jahre; Betondruckfestigkeit lt. Projektierung BK 25 (C20/25)				
D-I	$4,8 \times 10^{-11}$	6,5	13	18
D-II	$1,3 \times 10^{-10}$	13,1	24	12
D-III	$1,0 \times 10^{-10}$	12,5	20	8
<b>3 IW (WBS 70):</b> Elemente-Nr. 50 015; Planungsjahr 1986; Betonalter ca. 19 Jahre; Betondruckfestigkeit lt. Projektierung BK 25 (C20/25)				
IW-I	$2,9 \times 10^{-10}$	13,6	23	1
IW-II	$1,8 \times 10^{-10}$	13,5	20	1
IW-III	$1,9 \times 10^{-10}$	15,6	20	2

<sup>86</sup> IBeWa Wilsnack & Partner, Freiberg: Bestimmung der Flüssigkeitspermeabilität von Betonelementen, Prüfbericht i. A. Fachgruppe Bauliches Recycling vom Dezember 2004

<sup>87</sup> Mettke, Angelika: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus, 1995, S. 92

<sup>88</sup> DIN EN 12390-8: 2001-02: Prüfung von Festbeton, Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck und ZTV-W LB 215 - Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton, Anlage 1 Eignungsprüfungen Pkt. 3.2 Wassereindringwiderstand, Ausgabe 2004

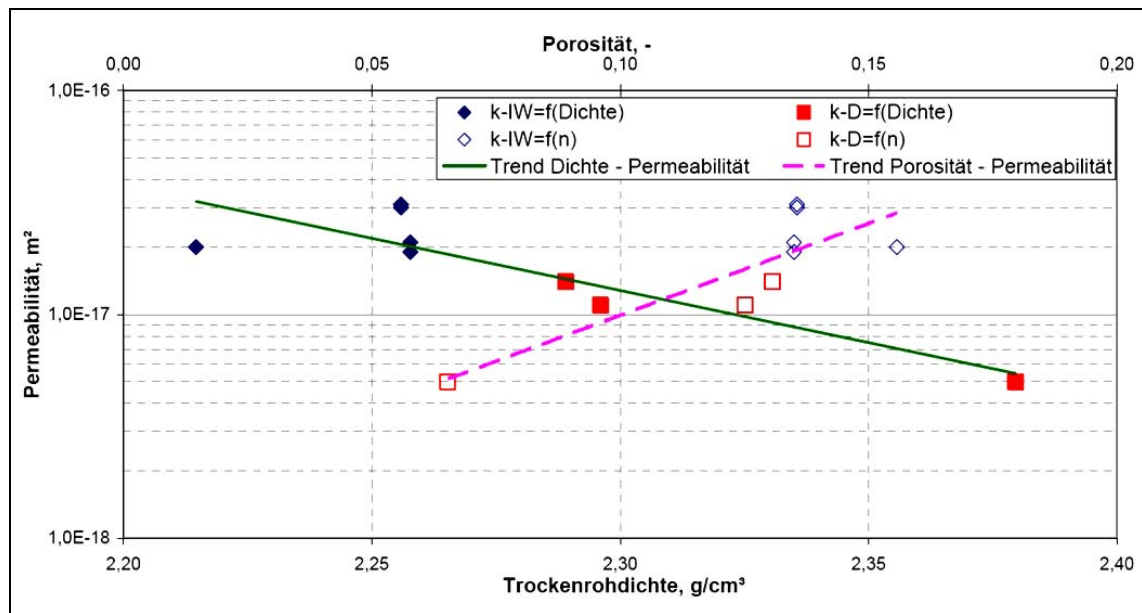


Abb. 41 : Korrelation von Permeabilität zu Dichte und Porosität

#### 4.3.5 Widerstand gegen Frosteinwirkung mit und ohne Einwirkung von Taumitteln

Ein sekundärer Einsatz der Altbetonelemente im Außenbereich wie beispielsweise in Überlaufstrecken im Deichbau ist dem Frosteinfluss ausgesetzt. Bei einem Einbau als Oberschicht im Wegebau ist außerdem die Belastung durch Tausalze zu berücksichtigen. Gemäß DIN 1045-1 sind für solche Einsätze (Expositionsklasse XF4 für Frosteinwirkung mit Tausalzen an horizontalen Flächen) Betondruckfestigkeiten von C 30/37 erforderlich. Diese Forderung wird erfüllt (vgl. Abschn. 4.3.2).

Zur Ermittlung des Widerstandes gegen Frost wurden 12 Bohrkern von WBS 70-Deckenplatten (Baualter: 20 Jahre) gezogen und nach dem CIF-Verfahren bzw. CF-Verfahren geprüft.<sup>89</sup> Die mittlere Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln beträgt 147,5 g/m<sup>2</sup> (zul. 1.500g/m<sup>2</sup>, Mindestprüffläche 800 cm<sup>2</sup>).

Die Änderung des dynamischen E-Moduls beträgt nach 56 Frost-Tau-Wechseln 72,9%. An diesen Proben wurden umfangreiche Rissbildungen festgestellt, die auf innere Schädigungen zurückzuführen sind. Hinsichtlich des Schädigungsgrades ist der geprüfte Beton als „sehr stark geschädigt“ einzustufen.

Bei gleichzeitigem Tausalzangriff erhöhen sich die Schäden. 8 von 12 Prüfkörper zerfielen nach 14 Frost-Tauwechseln. Der CDF-Test<sup>90</sup> wurde nicht bestanden und damit werden die Anforderungen an einen Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand nicht erfüllt.

<sup>89</sup> Forschungs- und Materialprüfanstalt, FG Betontechnologie an der BTU Cottbus: Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes nach dem CF und dem CIF-Verfahren, Prüfbericht i. A. Fachgruppe Bauliches Recycling, November 2005; CF-Test: Bestimmung der Abwitterung an der Betonoberfläche; CIF-Test: Bestimmung der inneren Schädigung mittels Ultraschalllaufzeit

<sup>90</sup> ebenda, Prüfbericht i. A. Fachgruppe Bauliches Recycling, Juli 2005

### 4.3.6 Säurewiderstand

Bei der Verwendung von gebrauchten Betonbauteilen im Deichbau wird Wasser verschiedener Zusammensetzungen, je nach Einsatzort auch mit möglichen betonschädigenden Inhaltsstoffen, auf die Bauteile wirken. Daher wurden durch die FMPA Cottbus im Auftrag der FG Bauliches Recycling Versuchsreihen zum Säurewiderstand an Probekörpern aus Spannbetondeckenplatten der WBS 70 durchgeführt<sup>91</sup>.

#### Prüfkörper

Für das Untersuchungsprogramm wurden Kernbohrungen an einer ausgebauten Deckenplatte vorgenommen und damit Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm gewonnen. Die Anzahl der Probekörper (insgesamt 44) wurde durch Halbieren/ Schneiden der gezogenen Bohrkerne hergestellt. Die so hergestellten Probekörper wurden sortiert, gründlich gereinigt und mit einer dauerhaften Kennzeichnung versehen. Aufgenommen wurde ebenfalls, an welchen Bohrkernen angeschnittene Stahleinlagen erkennbar sind.

#### Verwendete Prüfflüssigkeiten

Untersucht wurde der Einfluss verschiedener Säurelösungen, von Brunnenwasser aus dem Großversuch (s. Abschn. 5) und vergleichend von Trinkwasser auf das Betongefüge. Die Einlagerung der Probekörper in eine „Prüfflüssigkeit“ sollte in Anlehnung an reale Bedingungen erfolgen und damit Aussagen zum späteren Einsatz der Betonelemente in Wasser verschiedener Aggressivität zulassen. Zu diesem Zweck war eine Auswahl zu treffen, die einerseits zielgerichtet die Bandbreite möglicher Aggressivität abdeckt, zum anderen den Aufwand im Hinblick auf die Prüfkörperanzahl, die Prüfkörperlagerung und den gesamten Arbeitsaufwand in überschaubarem Rahmen hält. Eine Übersicht der verwendeten Lösungen und der jeweiligen Untersuchungsdauer wie auch der unterschiedliche Lagerung der Prüfkörper zeigt Tab. 16.

---

<sup>91</sup> Panzer, J., Wollgam, H.: Untersuchungsbericht – Untersuchungen zum Säurewiderstand der eingesetzten Bauteile im Deichbau“, FMPA, BTU Cottbus, April 2008.

**Tab. 16:** Zuordnung der Probekörper und Prüfflüssigkeiten

Prüfflüssigkeit	Anzahl Probekörper	Lagerungsdauer	Lagerort
Ohne (Vergleichskörper)	1	1 Jahr	Im Raum
Trinkwasser (Nullmessung)	3	1 Monat	Im Raum
	3	1 Jahr	Im Freien
	3	1 Jahr	Im Raum
Brunnenwasser	3	1 Monat	Im Raum
	3	½ Jahr	Im Freien (Winter)
	3	1 Jahr	Im Freien
	3	1 Jahr	Im Raum
Schwefelsäure pH 6,0	3	1 Monat	Im Raum
	3	1 Jahr	Im Raum
Schwefelsäure pH 5,0	3	1 Monat	Im Raum
	3	1 Jahr	Im Raum
Schwefelsäure pH 4,0	3	1 Monat	Im Raum
	3	1 Jahr	Im Raum
Salpetersäure pH 4,0	3	1 Monat	Im Raum

Als erstes wurde Trinkwasser/Leitungswasser mit einem durchschnittlichen pH-Wert von 7,6 gewählt. Das verwendete Trinkwasser ist im Sinne von DIN 4030 als *nicht betonangreifend* zu werten, da die Grenzwerte für den Bereich *schwach angreifend* deutlich unterschritten werden. Damit kann dieses Medium als Vergleichsmessung/ Nullmessung für die Einlagerung der Probekörper verwendet werden.

Zum zweiten bot sich die Einlagerung in das Brunnenwasser des Tagebaus Welzow-Süd an, da hier der Großversuch zur Verwendbarkeit der Altplatten für den Deichbau gestartet wurde. Das Brunnenwasser (Probe vom Juli 2006) zeigt in der vorbereitenden Laboruntersuchung nach DIN 4030-1 insgesamt den Angriffsgrad *stark angreifend* an. Festzustellen ist dabei eine gewisse Komplexität im Angriffsvermögen. Der pH-Wert mit der „sauren Reaktion“ liegt im Grenzbereich zwischen *schwach* und *stark angreifend*. Daneben ist ein „lösender Angriff“ durch den Gehalt an kalklösender Kohlensäure möglich, der schon deutlich im *stark angreifenden* Bereich liegt. Ebenfalls im *stark angreifenden* Bereich liegt der Sulfatgehalt, wenn auch im unteren Drittel der einzuordnenden Spannbreite. Im Sinne der DIN 4030-1 muss einem Wasser mit 1080 mg/l  $\text{SO}_4^{2-}$  eine treibende Wirkung zugeordnet werden.

Die drei möglichen Angriffsgrade (*schwach*, *stark*, *sehr stark*) durch „saurer Wasser“ wurden durch die Herstellung von Säurelösungen mit den pH-Werten 6,0; 5,0 und 4,0 simuliert. Für die Einstellung der pH-Werte kam Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) zur Anwendung. Um den Einfluss einer weiteren anorganischen Säure zu werten, wurde eine wässrige Lösung (pH=4,0) mit Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) hergestellt.

## Versuchsdurchführung

Die weiter festgelegten Bedingungen können mit dem Begriff „Umgebungsbedingungen“ beschrieben werden. Hierfür kamen als „Lagerort“ für die Versuchsbehälter die Umgebungsbedingungen „im Raum“ oder „im Freien“ zur Anwendung. Bei der Auslagerung „im Freien“ – an der Nordseite der FMPA – sind die deutlichen Temperaturänderungen Sommer/Winter bewusst mit erfasst worden.

Die Lagerung „im Raum“ erfolgte in Laborräumen der FMPA mit durchschnittlicher Raumtemperatur von 19-23 °C.

Für die Bewertung wurden sowohl kurzfristige (1 Monat) als auch langfristige (1 Jahr) Einlagerungen in den Prüflüssigkeiten vorgenommen. So konnte der Einfluss der verschiedenen Prüflüssigkeiten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen über gestaffelte Zeiträume getestet werden.

Die Einlagerung der Probekörper erfolgte in Behältern aus säurebeständigem Kunststoff mit verschließbaren Deckeln. Je Behälter konnten 3 Probekörper eingelagert werden, sie wurden auf Gitterträgern mit der Bauteiloberfläche nach unten (also mit der geschnittenen Fläche nach oben) angeordnet. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass die Prüfkörper während der gesamten Einlagerungszeit komplett mit Prüflüssigkeit überdeckt waren, die Prüflüssigkeit wurde nicht bewegt.



**Abb. 42** : Prüfkörper und Versuchsanordnung der Untersuchungen zum Säurewiderstand

Um möglichst gleichmäßige Lagerungsbedingungen einzuhalten, wurden zweimal täglich die pH-Werte der Säurelösungen überprüft, neu auf den vorgegebenen Wert eingestellt und dabei der Flüssigkeitsstand kontrolliert. Die vollständige Erneuerung der Prüflüssigkeiten erfolgte 2mal wöchentlich. Bei der kurzzeitigen Einlagerung wurden die Probekörper jeweils 10 Tage in der Prüflüssigkeit gelagert, nach dem Herausnehmen, dem Abspülen und der Volumenbestimmung – durch „Unterwasserwägung“ – 72 h im Trockenschrank getrocknet. Die danach bestimmten Trockenmassen und Volumina sind dokumentiert worden. Sowohl beim Herausnehmen aus der Prüflüssigkeit als auch nach dem Trocknen erfolgte eine augenscheinliche Überprüfung der Betonoberflächen auf Veränderungen.

Die Langzeituntersuchungen erfolgten über den Zeitraum eines Jahres, hier wurden Entnahme, Trocknung, Masse- und Volumenbestimmungen im monatlichen Rhythmus durchgeführt, ebenso die augenscheinliche Überprüfung der Betonoberflächen auf Gefügeveränderungen. Nach Ende der Versuchsdauer wurden die Prüfkörper mittig zersägt und die Schnittflächen hinsichtlich eines sichtbaren Schädigungshorizontes geprüft.

## Untersuchungsprogramm

Insgesamt wurden für das Untersuchungsprogramm für die Kurz- und Langzeiteinlagerungen in den beschriebenen Abständen durchgeführt:

- Volumenbestimmung,
- Trockenmassebestimmung,
- visuelle Prüfung der Oberflächenstruktur und des Schädigungshorizontes.

Als weitere Laboruntersuchungen kamen dazu

- Ermittlung der Gesamtporosität des Betons vor der Einlagerung,
- chemische Vollanalyse des Betons vor der Einlagerung,
- chemische Vollanalyse an einer für 1 Jahr im Brunnenwasser eingelagerten Betonprobe,
- chemische Analyse des Brunnenwassers und des Bodens nach DIN 4030.

## Untersuchungsergebnisse

Bei der Probenahme der Betonbohrkerne für das Versuchsprogramm wurde der mit „0“ bezeichnete Bohrkern als Vergleichsprobe durchgängig in einem Raumklima von 19-23°C und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 40-50 % gelagert. Erwartungsgemäß sind an dieser Vergleichsprobe keine Veränderungen an der Betonoberfläche erkennbar.

- Kurzzeitprüfungen

Die Ergebnisse der Kurzzeitprüfungen, d.h. die Änderungen von Trockenmasse und Volumen nach 10, 20 und 30 Tagen Einlagerung, zeigen im Hinblick auf die Zunahme der Trockenmasse für das *Brunnenwasser* eine kontinuierliche Steigerung um durchschnittlich 1,37 %. Auch bei der Einlagerung in Trinkwasser ergibt sich diese Massezunahme. Hier wäre jedoch die Angabe eines Durchschnittswertes nicht sinnvoll, da die Schwankungsbreite für die Einzelproben bei 0,18 % bis 1,43 % liegt. Alle in Schwefelsäurelösung eingelagerten Betonproben zeigen einen Masseverlust, er steigt relativ kontinuierlich vom 10. bis zum 30. Einlagerungstag an. Bei den in Salpetersäurelösung eingelagerten Betonproben ist ebenfalls ein kontinuierlich steigender Masseverlust festzustellen.

Die Volumenänderungen zeigen weniger differenzierte Ergebnisse. Beim Brunnenwasser ergibt sich eine sehr geringe Erhöhung des Volumens nach 30 Tagen Einlagerung, die am 20. Einlagerungstag minimal höheren Werte erscheinen nicht relevant für eine Aussage.

Für die Einlagerung in Trinkwasser ist bis zum 20. Tag doch eine recht deutliche Volumenzunahme zu registrieren, die bei der Messung am 30. Tag wieder etwas abflacht.

Bei der Einlagerung in Säurelösungen ist keine tendenzielle Veränderung über den Zeitrahmen bis zu 30 Tagen erkennbar. Inwieweit die Laborverfahren an sich, bei aller Präzision in den Arbeitsabläufen, dies mit verursachen können, wurde nicht geklärt.



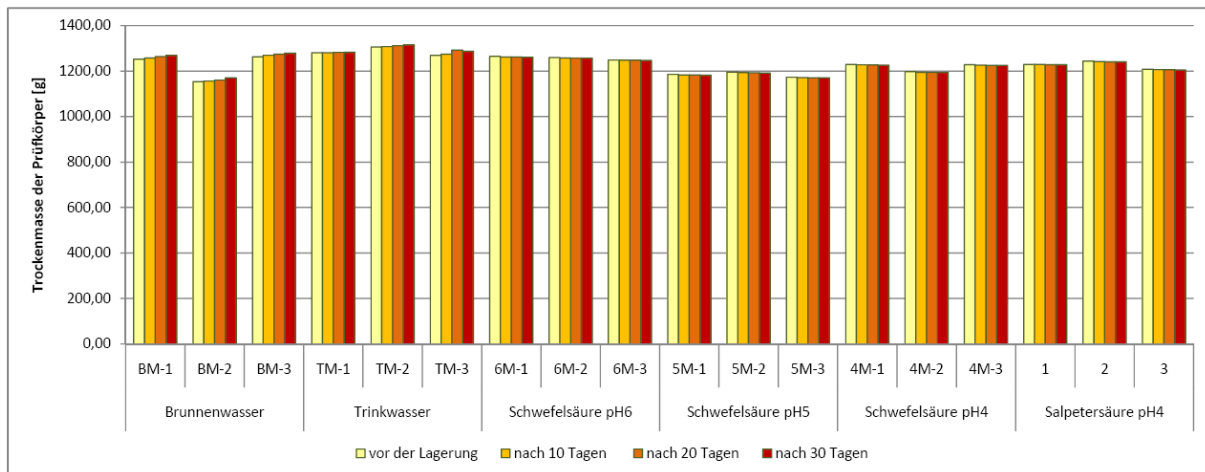


Abb. 43 : Ermittelte Trockenmasse der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Kurzzeitprüfung)

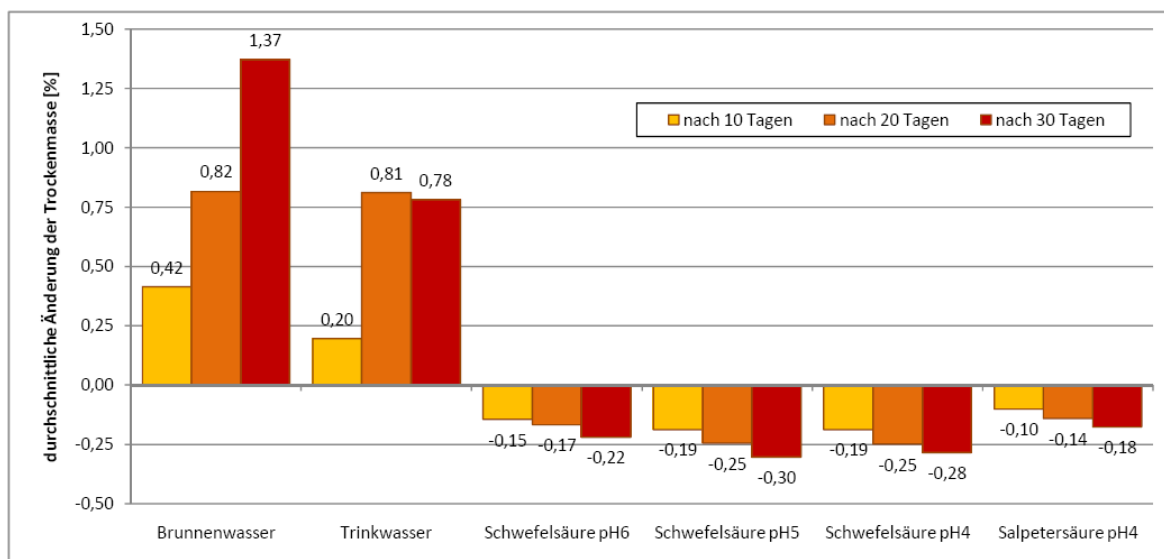


Abb. 44 : Ermittelte durchschnittliche Trockenmasseänderung der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Kurzzeitprüfung)

- Langzeitprüfungen

Änderungen der Trockenmasse:

Bei der Lagerung im Raumklima stellt sich eine Zunahme der Trockenmasse bis zur Einlagerung von 6 Monaten dar, dann kommt es zum Verlust an Trockenmasse (minimal streuend) nach ca. 8 Monaten Einlagerung, der sich tendenziell bis zur Messung nach 12 Monaten fortsetzt. Am dritten Bohrkern kann im zweiten Halbjahr der Einlagerung keine Aussage getroffen werden und er ist bei dieser Betrachtung zu vernachlässigen.

Für Brunnenwasser/im Freien (BJF) ergibt sich bis zu 6 Monaten ebenfalls eine Zunahme der Trockenmasse, durchschnittlich etwas deutlicher als beim Raumklima. Danach zeigt der Verlauf nach 7-8 Monaten in der Tendenz und bei einer Betonprobe nach 12 Monaten recht deutlich, den Verlust an Trockenmasse.

Die Lagerung Brunnenwasser/im Freien/Winterhalbjahr weist für den Messzeitraum von 6 Monaten eine deutliche und kontinuierliche Zunahme an Trockenmasse aus, die im Mittel bei 1,49 % liegt.

Bei der Lagerung Trinkwasser/Raumklima und Trinkwasser/im Freien ergeben sich nach 12 Monaten durchgängig Zunahmen an Trockenmasse. Der Verlauf ist nicht immer kontinuierlich, im Anfangszeitraum (nach 1 Monat) tritt teilweise eine Abnahme an Trockenmasse auf.

Alle in Schwefelsäurelösung eingelagerten Betonproben zeigen nach 12 Monaten einen Verlust an Trockenmasse, der über den Zeitraum von 1-12 Monaten fast kontinuierlich verläuft. Eine Abhängigkeit vom pH-Wert (6, 5 oder 4) ist dabei nicht zu erkennen.

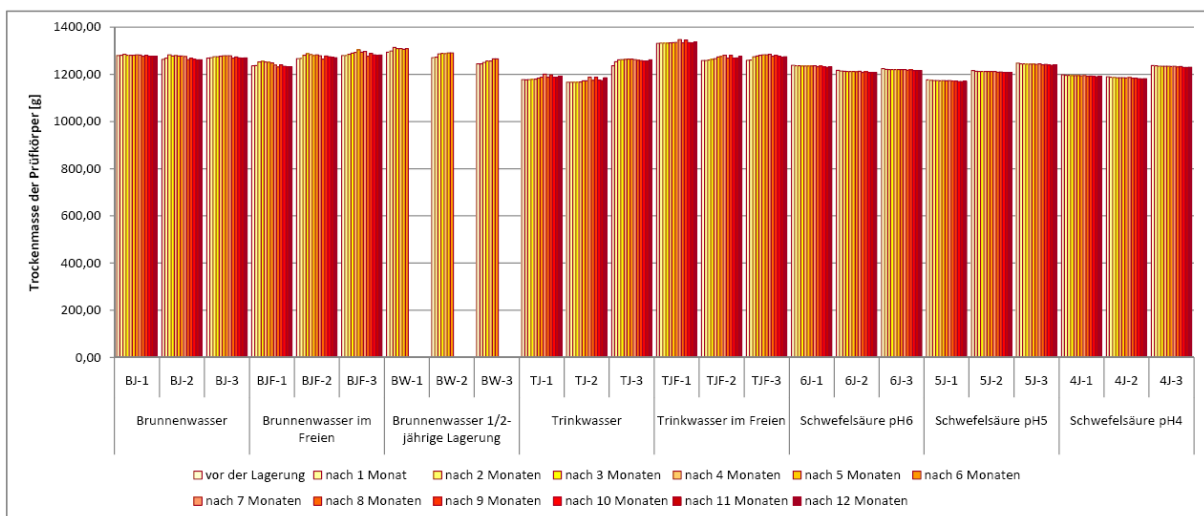


Abb. 45 : Ermittelte Trockenmasse der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Langzeitprüfung)

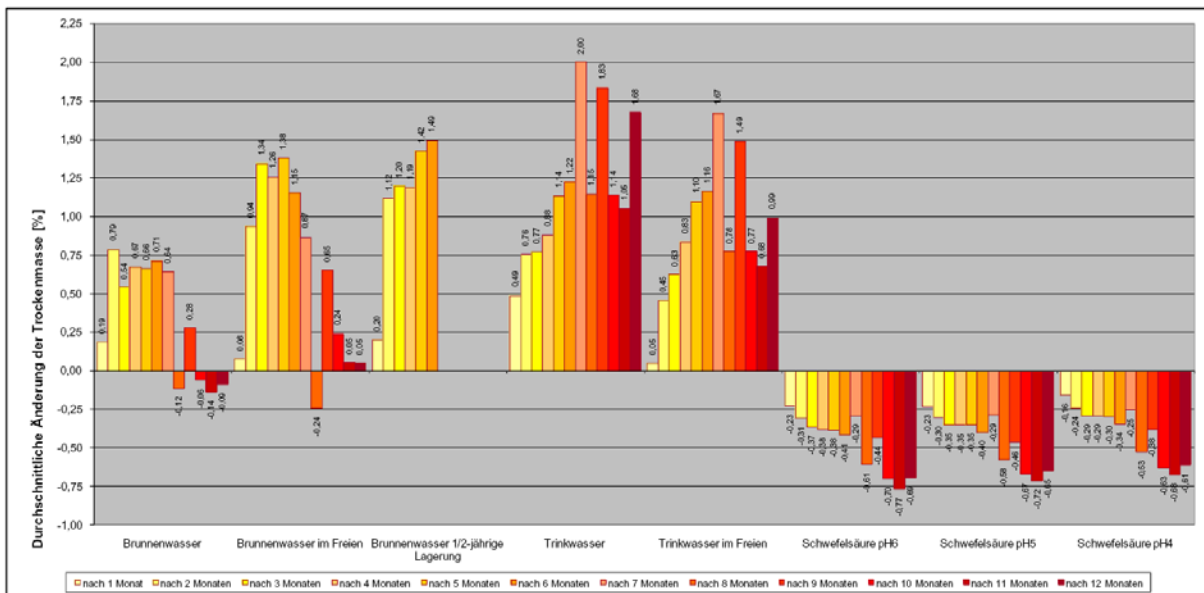


Abb. 46 : Ermittelte durchschnittliche Trockenmasseänderung der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Langzeitprüfung)

#### Volumenänderungen:

Für das Brunnenwasser ergibt sich nach 12 Monaten eine sehr geringe Volumenzunahme bei der Lagerung im Raum. Eine Kontinuität der Volumenzunahme im zeitlichen Verlauf ist nicht erkennbar. Bei der 12 monatigen Lagerung im Freien ist das Ergebnis widersprüchlich, 2 Betonproben zeigen eine geringe Zunahme, eine Betonprobe eine Abnahme des Volumens.

Bei der Auslagerung Brunnenwasser/Winterhalbjahr tritt eine sehr geringe Volumenzunahme von i.M. 0,04 % auf.

Die Einlagerung in Trinkwasser/Raumklima weist kontinuierlich steigende Volumina aus und erreicht nach 12 Monate i.M. 0,23 %. Die Tendenz ist bei der Lagerung Trinkwasser/im Freien ebenfalls erkennbar und erreicht hier i.M. einen etwas geringeren Wert von 0,13 %.

Die Ergebnisse der Volumenänderungen bei den Säureeinlagerungen zeigen eine relativ große Spannweite (von Volumenabnahme bis Volumenzunahme), überwiegend nimmt das Volumen nach 12 Monaten etwas zu.

#### Visuelle Betrachtung:

An keiner der im Leitungswasser und in den aggressiven Medien eingelagerten Betonproben waren Oberflächenveränderungen im Sinne von Zerstörungen der Zementsteinmatrix sichtbar. Auch die Gesteinskörnung zeigte sich ungeschädigt und die Kontaktzonen zwischen der Zementsteinmatrix und der Gesteinskörnung scheint ungestört. Absandungen, zermürbte Stellen und Gefügeauflockerungen sind definitiv nicht festzustellen. Daher waren Prüfungen der Abtragtiefe u.ä. nicht erforderlich, da diese Veränderungen nicht beobachtet wurden.



**Abb. 47** : Geschnittene Prüfkörper (li.), Auskristallisationen am Prüfkörper (re.)

#### Gesamtporosität des Betons:

Die Bestimmung der Gesamtporosität des Betons wurde nach entsprechenden Prüfmethode für silikatische Baustoffe und Beton durchgeführt.

Sie erfolgt über die Ermittlung von Roh- und Reindichte und wird berechnet nach

$$p = (1 - \rho_b / \rho_r) \times 100$$

Die Gesamtporosität des Betons beträgt 12,05 Vol.-%.

Bei der Berechnung der Gesamtporosität nach der genannten Formel wurde für die Rohdichte ( $\rho_b$ ) der Mittelwert der Rohdichtebestimmungen an den Bohrkernen (ohne Stahl) verwendet. Die Reindichtebestimmung erfolgte an Beton des Bohrkerns „Vergleichsprobe“ durch Aufmahlen einer größeren Probenmenge und Messung im Pyknometer. Die Reindichte beträgt 2,672 g/cm<sup>3</sup>.

Brunnenwasser- und Bodenuntersuchungen:

Es liegen die Ergebnisse von zwei durchgeführten chemischen Analysen des Brunnenwassers nach DIN 4030 vor. Die in Vorbereitung der Einlagerungen, im Juli 2006, durchgeführte Analyse ist insgesamt als *stark angreifend* einzustufen. Der saure Charakter des Wassers bei erheblichem Sulfatgehalt und Anwesenheit von kalklösender Kohlensäure lässt deutlich auf betonkorrosives Verhalten schließen. Die chemische Analyse nach DIN 4030 der Probenahme vom Juli 2007 zeigt ein Absinken der Aggressivität des Brunnenwassers. Der pH-Wert liegt nur noch knapp im *schwach angreifenden* Bereich, die kalklösende Kohlensäure ist ebenfalls nur noch als *schwach angreifend* zu bewerten und die Sulfate liegen mit 764 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> nur noch im ganz unteren Bereich des Angriffsgrades *stark angreifend*.

Die im November 2006 entnommene Bodenprobe (Entnahmeort: Großversuch Tagebau Welzow/Süd) liegt mit 1.862 mg/kg Sulfat SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> unterhalb des Grenzwertes (2.000 mg/kg) für den Angriffsgrad *schwach angreifend*. Der Boden wird im Sinne von DIN 4030-1 Tabelle 5 als *nicht angreifend* eingestuft, da auch der „Säuregrad nach Baumann-Gully“ weit unter einem kritischen Grenzwert liegt. Sulfide sind in der untersuchten Bodenprobe nicht vorhanden.

Chemische Analysen des Betons

Es wurden zwei chemische Analysen des Betons durchgeführt, einmal gleich nach der Bohrkernentnahme am unbehandelten Beton (Probe 1) und am Bohrkern BJ-1 (Probe 2) nach 12 monatiger Lagerung im Brunnenwasser bei Raumklima.

Für die chemische Analyse wurde durch Zerkleinerung und Probenteilung eine ausreichende Probenmenge gewonnen und fein aufgemahlen. Die Aufschlussverfahren und die chemischen Einzelbestimmungen wurden nach Vorschriften der Zementanalytik (DIN EN 196-2 u.a.) und nach internen Analyseverfahren durchgeführt. Dabei wurden aus der „Gesamtanalyse“ die „löslichen Bestandteile“ insgesamt dem Bindemittel (Zement) zugerechnet und auch in diesem Sinne die prozentualen Anteile der Zementbestandteile berechnet. Damit entspricht die jeweils rechte Spalte der aufgeführten Analyseergebnisse dieser Umrechnung und damit etwa der Bindemittelzusammensetzung.

Zu dem Ergebnis der Analyse des unbehandelten Betons ist anzumerken, dass die ca. 52% Kalk (CaO) nicht unbedingt für einen Portlandzement (ohne Zuschlagstoffe) sprechen.

Zum Vergleich liegt die Analyse der 1 Jahr im Brunnenwasser gelagerten Betonprobe vor. Sie zeigt in den Werten der chemischen Analyse die gleiche Tendenz. Die Verschiebungen sind geringfügig und lassen keinen Schluss auf eine beginnende Betonkorrosion zu. Die Verringerung des Kalkgehaltes ist so geringfügig, dass dies auch möglichen Abweichungen dieser Analysenmethodik zuzuordnen ist.

Eine Erhöhung des Sulfatgehaltes (bestimmt als  $\text{SO}_3$ ) kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abgelesen werden.

### **Zusammenfassende Bemerkungen**

Die im ersten Schritt bei jeder Entnahme aus den Versuchsbehältern durchgeführte visuelle Bewertung zeigt an keinem Prüfkörper negative Ergebnisse im Sinne von Gefügeveränderungen/Zerstörungen des Betons. Die Betonoberflächen, geschnitten und ungeschnitten, sind im Vergleich zum im Raumklima gelagerten Bohrkern unverändert.

Als deutliches Merkmal ist eine Farbveränderung bei der Brunnenwasserlagerung zum kräftigen rostbraun zu registrieren. Sie wird durch einen hohen Gehalt an eisenhaltigen Verbindungen in diesem Wasser verursacht.

Die im Trinkwasser eingelagerten Betonproben zeigen bereits im Wasser weiße, punktuelle Ablagerungen auf ihren Oberflächen. Im qualitativen chemischen Nachweis bestehen diese aus Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ).

Weiter wurden an den eingelagerten Betonproben die Änderungen von Trockenmasse und Volumen bestimmt. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass es nach dem Ablauf (theoretisch bekannter) Korrosionsvorgänge zu Verminderungen oder Anreicherungen an der Betonsubstanz durch Ionenaustausch, z.B. durch Umsetzung schwerlöslicher Verbindungen in leichtlösliche, bzw. zur Substanzverminderung durch Auslaugungsprozesse kommen kann.

Die Einlagerungen für den „lösenden Angriff“ erfolgten in sauren Lösungen mit verschiedenen pH-Werten. Nach festgelegter Einlagerungsdauer wurden dabei Verluste an Trockenmasse des Betons festgestellt. Die chemischen Reaktionen zwischen Beton und saurer Lösung beginnen fast unmittelbar nach der Einlagerung. Natürlich zeigt sich das auch am täglich erforderlichen Einstellen des pH-Wertes durch Nachdosieren mit Säure.

Wenn auch nach 12-monatiger Lagerung im unterschiedlich sauren Milieu visuell keine Veränderungen an den Betonoberflächen festzustellen sind, gibt es doch diesen Verlust an Trockenmasse des Betons. Ob diese Beeinträchtigung nun im oberflächennahen Bereich eingetreten ist, ob sie in einer Front minimal ins Innere des Bohrkerns fortgeschritten ist oder ob in den Poren und/oder strukturell bedingt ein Herauslösen erfolgte, kann mit bloßer augenscheinlicher Bewertung nicht festgestellt werden.

Verluste an Trockenmasse des Betons (bei 0,5 bis max. 0,9 %, überwiegend jedoch um 0,6 %) haben jedenfalls keine Veränderungen im Sinne der Haftung der Gesteinskörnung in der Zementsteinmatrix verursacht.

Die Einwirkung der Sulfate wurde mit der Einlagerung in Brunnenwasser getestet, das außerdem noch kalklösende Kohlensäure bei einem niedrigen pH-Wert aufwies. Visuell wurden auch hier keine Schädigungen an den Betonoberflächen festgestellt, insbesondere auch keine Risse oder Abplatzungen. Die Änderungen der Trockenmasse zeigen kein einheitliches Bild.

Die chemische Betonanalyse gibt keinen Anhaltspunkt für eine Sulfaterhöhung im Beton nach der Einlagerung. Weiterführende strukturanalytische Bestimmungen zu möglicher Gips- und/oder Ettringitbildung waren nicht Bestandteil dieses Untersuchungsprogramms.

Die gute Widerstandsfähigkeit des Betons gegen Sulfatangriff ist sicher auch mit seiner Festigkeit und Dichtigkeit begründet. Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass zum damaligen Zeitpunkt der Betonproduktion ein Zement mit vergleichsweise geringem Tricalciumaluminat ( $C_3A$ )-Gehalt verwendet wurde, der dem Sulfatangriff vorliegender Größenordnung Widerstand entgegensetzt. Es kommt weiter hinzu, dass sich das Brunnenwasser im Verlauf des einen Jahres in der Zusammensetzung verändert hat, z.B. die Sulfate von 1.080 mg/l  $SO_4$  auf 764 mg/  $SO_4$ . Daher kann davon ausgegangen werden, dass das zu Beginn *stark angreifende* Wasser nicht durchgängig zur Verfügung stand. Sinngemäß trifft das auch auf den sauren Charakter des Brunnenwassers (pH-Wert von 5,5 bis 6,5) zu.

Abschließend wird ausgeführt, dass unter den Bedingungen des beschriebenen Versuchsprogramms keine sichtbaren Schäden an den eingelagerten Betonbohrkernen aufgetreten sind.

#### **4.4 Umweltverträglichkeitsprüfung**

Für den Einbau von gebrauchten Betonbauteilen im Deichbau muss die Umweltverträglichkeit der verbauten Materialien nachgewiesen werden. Mit Inkrafttreten der neuen Bestimmungen der Ersatzbaustoffverordnung werden sich neben den veränderten Analyseverfahren auch die Grenzwerte deutlich verschärfen.

Das bisherige Auslaugverfahren – Schüttel-eluatverfahren DEV S4 mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 10:1 – wurde als zu ungenau herausgestellt und wird im Weiteren durch das Säulen-eluatverfahren mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2:1 ersetzt. In diesem Zusammenhang erfolgte die Untersuchung von Betonproben aus Spannbetondeckenplatten der WBS 70 unter der Verwendung des bisherigen und des neuen Analyseverfahrens.

Dabei ist anzumerken, dass für die Untersuchungen aufbereitetes also gebrochenes Material verwendet wurde. Hierbei ist die umströmte Oberfläche enorm vergrößert und die zu durchströmenden Materialquerschnitte deutlich kleiner. Somit werden bei der Untersuchung des aufbereiteten Materials viel höhere Stoffkonzentrationen freigesetzt als dies beim Einsatz kompletter Bauteile erfolgt. Für den Deichbau sollen jedoch ausschließlich ganze Betonbauteile eingesetzt werden. Daher sind die nachfolgend dargestellten Werte für die eigentliche Wiederverwendung der kompletten Bauteile nicht relevant, sollen aber zur Vervollständigung der qualitativen Untersuchungen an dieser Stelle trotzdem aufgeführt werden.

Es ist davon auszugehen, dass bei den geplanten Einsatzvarianten keine Schadstoffe freigesetzt werden bzw. diese nur in unerheblichen Maßen. Die RC-Betonbauteile sind daher hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit als unbedenklich einzustufen.

**Tab. 17:** Umrechnung des Säulenschnelleluates (2:1) in Schütteluat (10:1) mittels Kappa-Werten zum „groben Vergleich“ für RC-Baustoff<sup>92</sup>

Ersatzbaustoff	Dim.	RC-1	RC-1	Z 1.1	RC-2	RC-2	Z 1.2	RC-3	RC-3	Z 2
Parameter	Eluat	2:1	10:1		2:1	10:1		2:1	10:1	
pH-Wert		7-12,5			7-12,5		7-12,5	7-12,5		
elektr. Leitf.	µS/cm	2000		1500	2500		2500	10000		3000
Chlorid	mg/l			20			40			150
Sulfat <sup>1) 3)</sup>	mg/l	350	92,2	150	700	184,5	300	1400	368,9	600
Sulfat <sup>2) 3)</sup>	mg/l	200	52,7		350	92,2				
Fluorid	mg/l									
DOC	mg/l									
PAK <sub>16</sub> <sup>3)</sup>	µg/l	3	3		4,5	4,5		15	15	
Antimon	µg/l									
Arsen	µg/l			10			40			50
Blei	µg/l			40			100			100
Cadmium	µg/l			2			5			5
Chrom, ges.	µg/l	50	18,7	30	60	22,4	75	100	37,3	100
Kupfer	µg/l	40	12,6	50	70	22,0	150	100	31,4	200
Molybdän	µg/l									
Nickel	µg/l			50			100			100
Vanadium	µg/l	30	30		50	50		100	100	
Zink	µg/l			100			300			400

Im Rahmen der Analysen wurden folgende Parameter ermittelt:

**Tab. 18:** Ermittelte Materialwerte einer Betonprobe aus einer Spannbetondeckenplatten WBS 70

Parameter	Dimension	Säuleneluat			Eluat Schüttelverfahren
		W:F = 0,3	W:F = 1,0	W:F = 2,4	W:F 10:1
pH-Wert		12,64	12,62	12,62	12,29
Elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	7.250	7.040	6.310	4.110
Chlorid	mg/l	0,9	0,26	0,28	0,16
Sulfat	mg/l	226	170	94	31
Fluorid	mg/l				
DOC	mg/l				
PAK	µg/l				
Antimon	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10
Arsen	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10
Blei	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10
Cadmium	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1
Chrom IV	µg/l				
Chrom ges.	µg/l	51	47	37	19
Kupfer	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 5
Molybdän	µg/l	8	7	6	3
Nickel	µg/l	< 5	< 5	< 5	16
Vanadium	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 5
Zink	µg/l	< 0,5	0,8	0,9	3,5

Ein Vergleich der in dieser Probe erzielten Analysewerte mit den Anforderungen der neuen Ersatzbaustoffverordnung sowie den noch geltenden Regelungen der LAGA als länderspezifischer Regelungen erfolgt in den nachstehenden Abbildungen.

<sup>92</sup> Nonte, Willi, Seminar „Aktuelles aus dem Abfallrecht“ von SAM, MUFV und LUWG am 12.06.2008 im Schloss Waldhausen, in [http://kd119693.ws0.rz.it-works2.de/sam-rlp.de/fileadmin/pdf/tagung\\_-abfallrecht\\_2008/08\\_nonte.pdf](http://kd119693.ws0.rz.it-works2.de/sam-rlp.de/fileadmin/pdf/tagung_-abfallrecht_2008/08_nonte.pdf) aufgerufen am 26.01.2009.

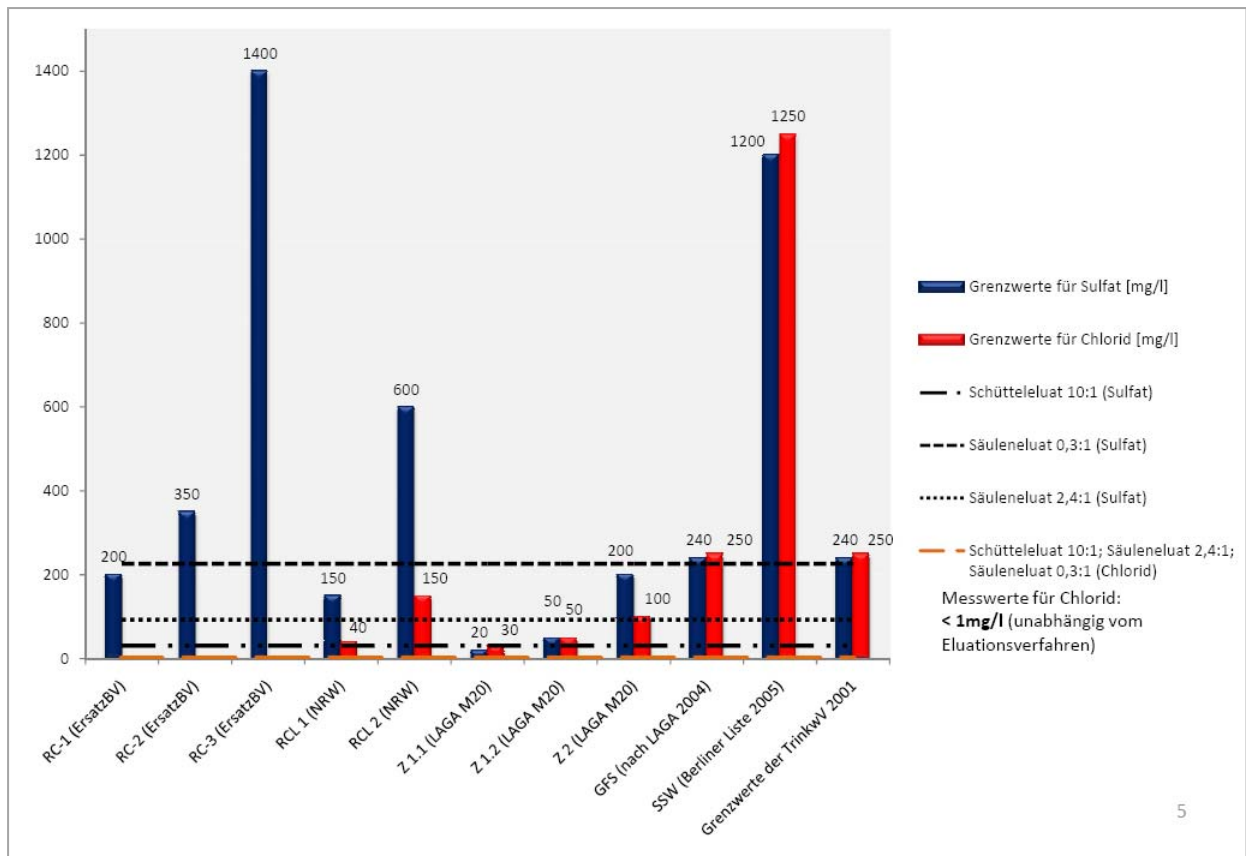


Abb. 48 : Grenzwerte für Sulfat und Chlorid nach unterschiedlichen Regelungen, sowie Messwerte eigener Proben

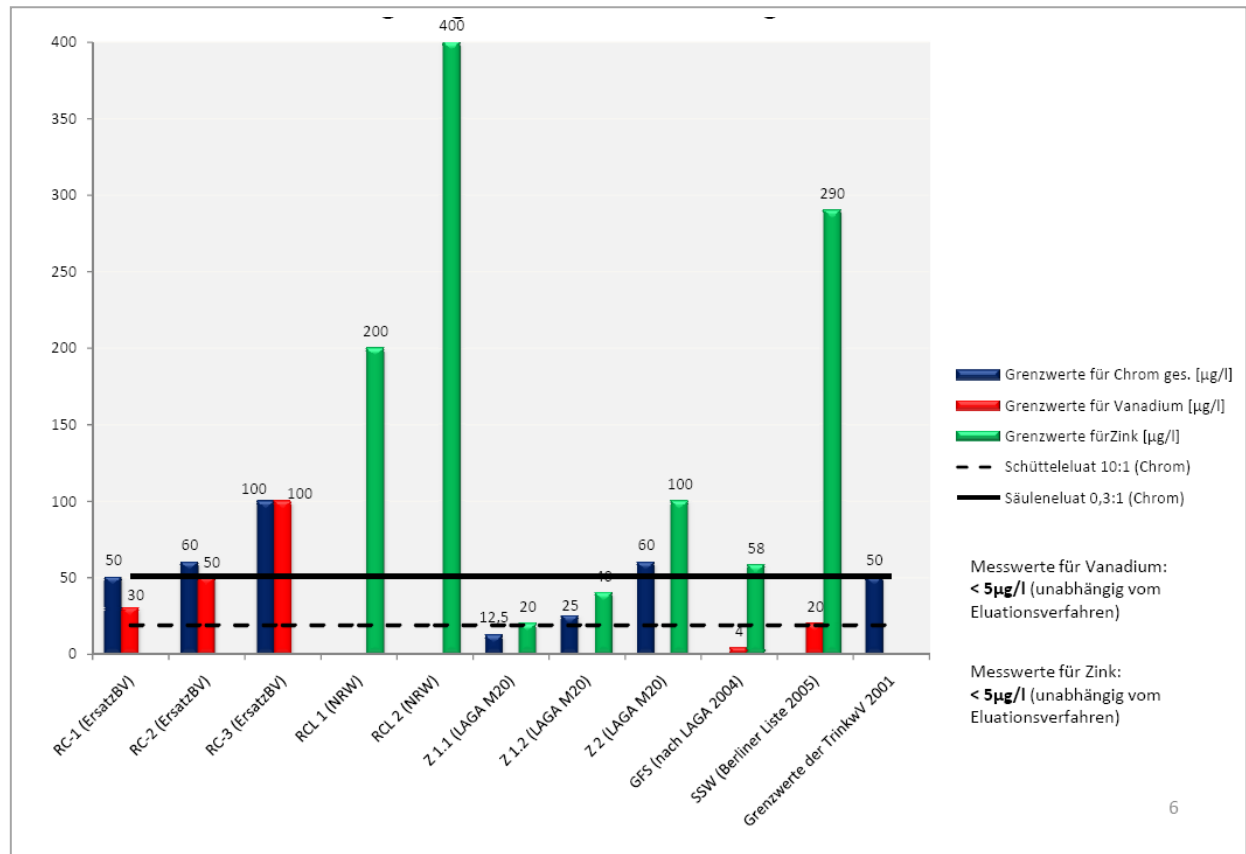


Abb. 49 : Grenzwerte für Chrom gesamt, Vanadium und Zink nach unterschiedlichen Regelungen, sowie Messwerte eigener Proben



## 4.5 Fazit – Qualitätsuntersuchungen der RC-Bauteile

Für den Einsatz im Deichbau sind insbesondere schlaff bewehrte und Spannbetondeckenplatten sowie Innenwandelemente geeignet. Letztere sollten möglichst keine Türöffnungen aufweisen, da diese durch zusätzliche Maßnahmen wasserdicht geschlossen werden müssen. Kleinere Aussparungen sowie demontagebedingte Abplatzungen können durch das eingesetzte Fugendichtungsmaterial verfüllt und abdichtet werden.

Spannbetondeckenplatten der Wohnungsbauserie 70 liegen als 6,0 m lange und 1,8 bzw. 3,0 m breite Elemente vor. Die Spannbetondeckenplatten der Typenserie P2 weisen eine Fläche von 6,0 m mal 1,8 m auf. Die schlaff bewehrten Deckenplatten haben ebenfalls eine Breite von 1,8 m und eine Länge von 4,2 m, 3,6 m und 2,4 m. In den Gebäuden der WBS 70 und P2 sind die Spannbetondeckenplatten am häufigsten vertreten. Alle Deckenelemente haben eine Dicke von 140 mm.

Die Innenwandplatten der WBS 70 und P2 sind 150 mm dick. Bei einer Höhe von 2,6 m kommen diese mit den Bauteillängen 3,6 m, 4,6 m, 5,5 m und 5,8 m. Die Typenserie P2 beinhaltet zudem Innenwandbauteile mit einer Höhe von 2,8 m in den Längen 3,4 m, 3,6 m und 4,1 m.

Die Betondruckfestigkeiten der im Deichbau verwendbaren Bauteile stellen sich wie folgt dar:

- Spannbetondeckenplatten
  - WBS 70            C 50/60
  - P2                C 30/37
- Schlaff bewehrte Deckenplatten, Innenwände
  - WBS 70 / P2    C 20/25

Die Betondeckung der untersuchten RC-Betonbauteile entspricht den Anforderungen der Expositionsklasse XC1 für Innenbauteile, welche dem bisherigen Einsatz der Bauteile entspricht. Die Karbonatisierungshorizonte – so überhaupt vorhanden – erreichen nicht die Bewehrungsstäbe und sind als aufgrund der Bauteildichte (resultierend aus der Betondruckfestigkeit) und des Bauteilalters als stabil einzustufen.

Betondruckfestigkeit, Betondeckung und Karbonatisierung können jedoch im Einzelfall aufgrund von Produktionsschwankungen variieren und sind daher an jedem Spendergebäude stichpunktartig zu prüfen, um so Schadensfälle zu vermeiden.

Die an RC-Betonbauteilen ermittelten Durchlässigkeitswerte  $k_f$  von  $10^{-10}$  m/s bis  $10^{-11}$  m/s entsprechen denen einer Tondichtung mit einem  $k_f$  von  $10^{-9}$  bis  $10^{-12}$ . Die ermittelte Wassereindringtiefe lag unter 3 cm. Die RC-Betonbauteile können als dicht eingestuft werden, so sie keine Risse oder Löcher aufweisen.

Die Untersuchungen zum Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand ergaben erwartungsgemäß negative Ergebnisse. Ein Einsatz nicht aufgearbeiteter RC-Betonbauteile ist somit nur im frostsicheren Bereich im Deichinneren möglich. Ein Einsatz an der Deichoberfläche oder im Wegebau ist nur mit einer Er-tüchtigung der Betonplatten zur Herstellung des erforderlichen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes durchführbar.

Im Zuge der Untersuchungen zum Säurewiderstand von RC-Betonbauteilen zeigten diese eine gute Widerstandsfähigkeit gegen einen Sulfatangriff. An den eingesetzten Probekörpern konnte keine sichtbaren Schäden festgestellt werden. Die ermittelten Volumen- und Masseverluste durch die Versuchsdurchführung erwiesen sich als sehr gering.

Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit der verwendbaren RC-Betonbauteile konnten nur an gebrochenem Material durchgeführt werden. Die erzielten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass beim vorgesehenen Einsatz kompletter RC-Bauteile keine Schadstoffe freigesetzt werden. Dieser kann hinsichtlich seiner Umweltverträglichkeit als unbedenklich eingestuft werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den überprüften Qualitätsparametern lassen einen Einsatz unaufgearbeiteter RC-Bauteile im Deichinneren zu. Für den Einsatz an der Deichoberfläche und im Wegebau müssen entsprechende Aufarbeitungsmaßnahmen durchgeführt werden, um die Anforderungen dieser Expositionsklassen hinsichtlich der Betondeckung als auch der Frost- und Frost-Tausalz-Sicherheit zu erfüllen.

## 5 Konstruktion von Deichen mit RC-Betonbauteilen

Für den Einsatz von gebrauchten Betonbauteilen im Deichbau wurden verschiedene Varianten entwickelt. Diese können zum einen bei der Neuerrichtung von Deichen als auch beim Teilneubau/Sanierung eingesetzt werden. Einsatzoptionen für RC-/Altbetonbauteile bestehen als

- |                       |                           |            |
|-----------------------|---------------------------|------------|
| ▪ Oberflächendichtung | (Deichneubau / Sanierung) | Variante 1 |
| ▪ Innendichtung       | (Deichneubau)             | Variante 2 |
| ▪ Überlaufstrecke     | (Deichneubau / Sanierung) | Variante 3 |

Diese entwickelten Varianten werden im Folgenden näher beschrieben und dienen als Grundlage für den Bau des Versuchsdeiches. Im Weiteren werden mögliche Materialien zur Fugengestaltung sowie die Berechnungen zur Standfestigkeit als auch zur Ausführung der notwendigen Streifenfundamente für die Herstellung der Innendichtung erörtert. Die Berechnungen erfolgten auf Grundlage der Planungen zum errichteten Versuchsdeichkörper (s. Abschn. 5 und 8).

### 5.1 Variante 1 – Oberflächendichtung

Diese Variante ist für einen Einsatz bei Deichneubauten sowie auch für die Sanierung von bestehenden Deichkörpern geplant.

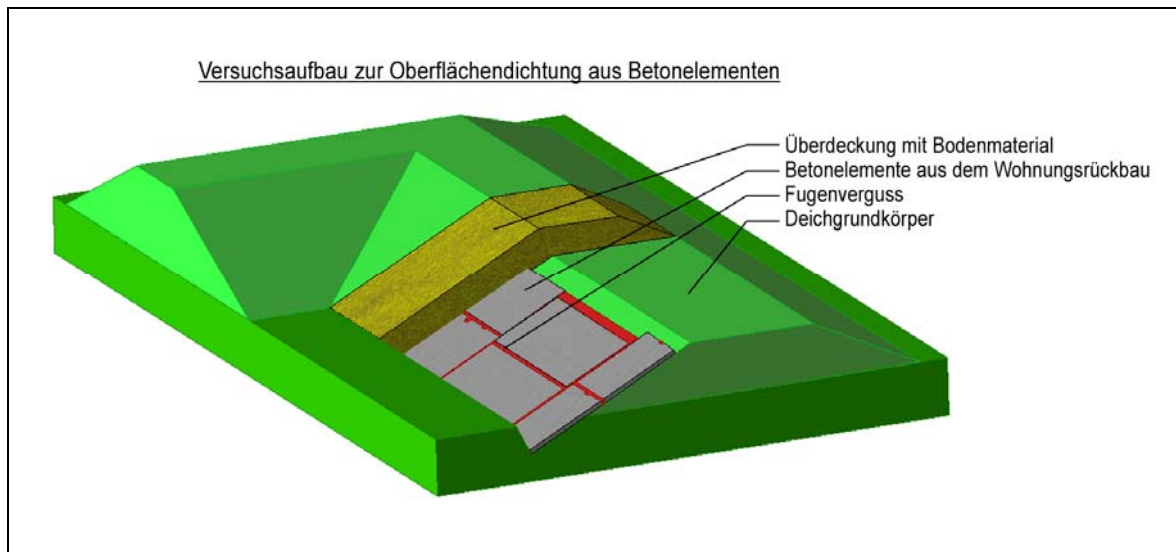
#### 5.1.1 Konstruktive Ausbildung – Grundlegendes, Anforderungen

Die Betonelemente werden als Flächendichtung auf der wasserseitigen Oberfläche des Deiches eingebaut und mit 1 m Deichmaterial (inkl. Vegetationsschicht) überdeckt. Hierfür sollen die Betonelemente direkt auf den Deichgrundkörper aufgelegt werden. Der Einsatz der Betonelemente als Oberflächendichtung ist in Abb. 50 skizziert.

Der Untergrund muss vor Erstellung des Deichgrundkörpers gut verdichtet sein, um Setzungen durch die Eigenlast des Deichkörpers zu verhindern. Der Deichgrundkörper wird aus homogenem, ggf. vor Ort anstehendem Bodenmaterial hergestellt, sofern dieses den Anforderungen der gültigen Normen entspricht. Der Deichgrundkörper soll eine land- und wasserseitige Neigung von 1:2 aufweisen. Der Deichgrundkörper ist in seiner Höhe so auszuführen, dass durch die spätere Überdeckung der Oberflächendichtung und der Krone mit Bodenmaterial die geplante Deichhöhe erreicht wird.

Die Oberflächendichtung wird direkt auf dem hergestellten Planum des Deichgrundkörpers verlegt. Die Fugen der Oberflächendichtung sind besonders sorgfältig auszubilden, da diese die Schwachstellen der Dichtung darstellen. Die Plattenfugen können mit verschiedenen Fugendichtstoffen, wie z.B. Betonverguss, PE-Schaum oder Bitumen u.a., verfüllt werden.

Die Oberflächendichtung wird mit 1 m Bodenmaterial als Deckschicht (Vegetationsträger) überdeckt.



**Abb. 50** : Konstruktive Ausbildung – Betonelemente als Oberflächendichtung im Deichbau (Variante 1)

Die Einbaulage der Elemente kann längs (horizontal) oder quer (vertikal) der Deichachse erfolgen. So kann die Höhe der Oberflächendichtung der erforderlichen Deichhöhe angepasst werden. Durch das Anordnen mehrerer Reihen kann die Höhe der Oberflächendichtung sukzessive erhöht werden. Über die Gestaltung der Breite der Fugen und ein Absenken der untersten Lage der Betonelemente in den Untergrund kann die Höhe der Oberflächendichtung auf die geforderte Deichhöhe angeglichen werden. Ebenso können die Betonteile passend geschnitten werden, was aber einen zusätzlichen Arbeitsaufwand darstellt.

Über das Absenken der untersten Elementereihe kann zudem der Anschluss der Dichtung an gering durchlässige Bodenschichten im Deichuntergrund erfolgen bzw. durch Erzeugung eines sog. Dichtungsteppichs der Sickerweg unter dem Deichkörper verlängert werden (unvollkommene Dichtung, vgl. Abb. 21, Abschn. 3.1.4.4).

### 5.1.2 Beschreibung des Bauablaufes

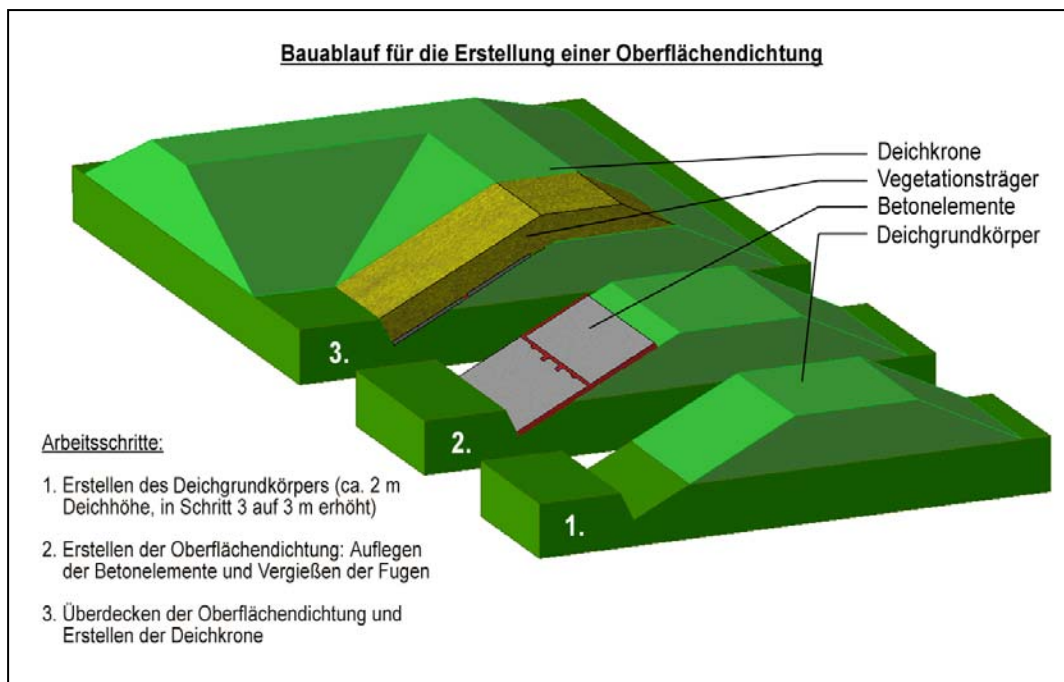
In Abb. 51 sind die Arbeitsschritte zum Erstellen der Oberflächendichtung aus Betonelementen grafisch abgebildet. Der 1. Arbeitsschritt stellt das Vorbereiten des Untergrundes und das Erstellen des Deichgrundkörpers dar.

- Anforderungen an die Vorbereitung des Untergrundes und Erstellen des Deichgrundkörpers (1. Schritt)

Der Untergrund muss frei von Bewuchs und gut verdichtet sein, d.h. das Aufbringen des Deichkörpers darf keine Setzungserscheinungen hervorrufen. Bei bestehendem Bewuchs muss dieser abgetragen werden. Der Deichgrundkörper ist gemäß DIN 19712<sup>93</sup> lagenweise zu erstellen und zu verdichten. Die Stärke der einzelnen Lagen ist abhängig vom Erdstoff und dem eingesetzten Verdichtungsgerät. Der

<sup>93</sup> DIN 19712:1997-11 Flussdeiche, 10.2 Erdarbeiten

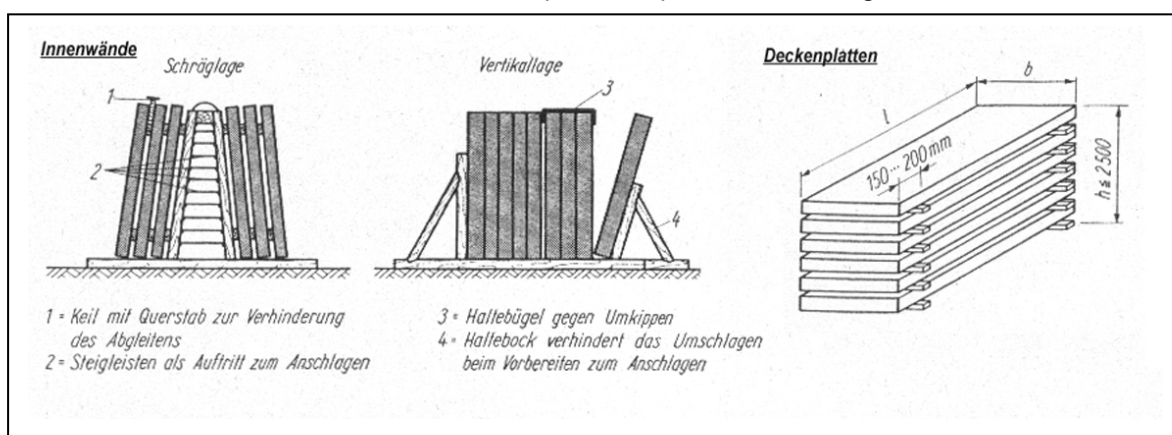
verwendete Boden sollte mit optimalem Wassergehalt eingebaut werden. Die Böschungen des Deiches sind mit einem Böschungsfertiger zu verdichten und glatt abzuziehen.



**Abb. 51** : Darstellung des Bauablaufes für die Herstellung einer Oberflächendichtung in Arbeitsschritten

- **Zwischenlagerung der BE auf der Baustelle**

Die Beschreibung der Zwischenlagerung der Betonelemente auf der Baustelle gilt analog für die weiteren Einsatzvarianten (s. Abschn. 5.2 Innendichtung und Abschn. 5.3 Überlaufstrecke). Die Betonelemente sind zur Baustelle zu transportieren und dort zwischenzulagern. Hierfür sind Flächen bereitzustellen, die in der Nähe der Einbaustelle, im Schwenkbereich des Kranes, liegen. Zusätzlich anzumerken ist, dass die Betonelemente erst nach Beendigung des 1. Arbeitsschrittes zu liefern sind, da eine Lagerung nahe der Einbaustelle erst nach diesem Arbeitsschritt möglich ist. Die Lagerung der Betonelemente ist in Abb. 52 dargestellt. Demnach sind Deckenelemente liegend mit Zwischenhölzern und Innenwände z.B. am A-Bock oder Deckenplattenstapel stehend zu lagern.



**Abb. 52** : Lagerung von Betonelementen<sup>94</sup>

<sup>94</sup> vgl. S. Ludewig: Montagebau, S.469

Der auf der Baustelle bereitzustellende Kran muss die bis zu 5,8 t schweren Betonelemente mit einer Auslegerlänge entsprechend der Deichgrundkörperbreite transportieren können.

- **Einbau der Betonelemente (2. Schritt)**

Die Deckenelemente sind an den vorhandenen Tragösen anzuschlagen. Hierfür sind viersträngige Seilgehänge zu verwenden, bei denen zwei Stränge kürzer sind. Auf diese Weise werden die Deckenelemente geneigt, entsprechend der Böschungsneigung 1:2, vom Kran angehoben und flächig auf der Deichböschung abgesetzt. Der Fugenabstand zwischen den aufgelegten Betonelementen sollte aus verfahrenstechnischen Gründen mindestens 10 cm betragen.

Die Innenwände sind in geeigneter Weise auf der Deichoberfläche im Fugenabstand von mindestens 10 cm abzulegen. Die Lage der Betonelemente auf dem Deichkörper ist schematisch in Abb. 50 im 2. Arbeitsschritt dargestellt. Der Einsatz einer Traverse (s. Abb. 53) stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Betonelemente geneigt anzuheben.

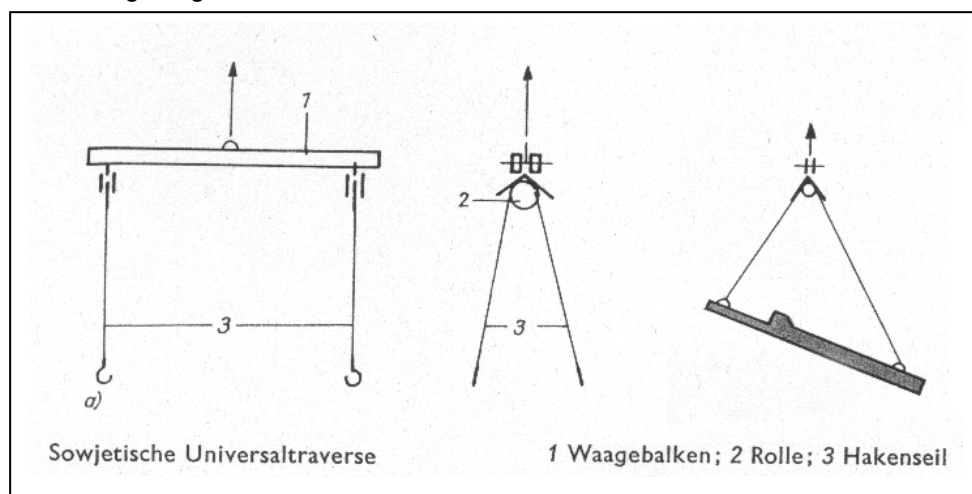


Abb. 53 : Einsatz einer Traverse zum Anschlag der Betonbauteile<sup>95</sup>

- **Fugenabdichtung (2. Schritt)**

Die Fugen zwischen den einzelnen Bauelementen werden im Anschluss abdichtet bzw. vergossen. Empfohlen wird den Vergussbeton mit Betonkübel (Betonbombe) und Auslassschlauch, der an den Kran angehängt und über die Betonoberfläche geschwenkt wird, herzustellen. Ebenfalls möglich ist der Einsatz einer Autobetonpumpe, welche den Beton über Förderleitungsrohre zur Einbaustelle pumpt. Empfohlen wird der Einsatz von C 20/25 mit einem Größtkorn von 8 mm in der Konsistenz F5 (sehr fließfähig).

- **Überdecken der Oberflächendichtung mit Deckschicht (3. Schritt)**

Nach Herstellung der Dichtungsschicht auf der Deichoberfläche wird eine ca. 1 m dicke Deckschicht aus Oberbodenmaterial aufgebracht und verdichtet (s. Abb. 51, 3. Arbeitsschritt). Die Deichkrone wird ebenfalls mit dem vorhandenen Oberbodenmaterial erhöht. Das einzubauende Bodenmaterial soll mit

<sup>95</sup> vgl. S. Ludewig: Montagebau, S.421

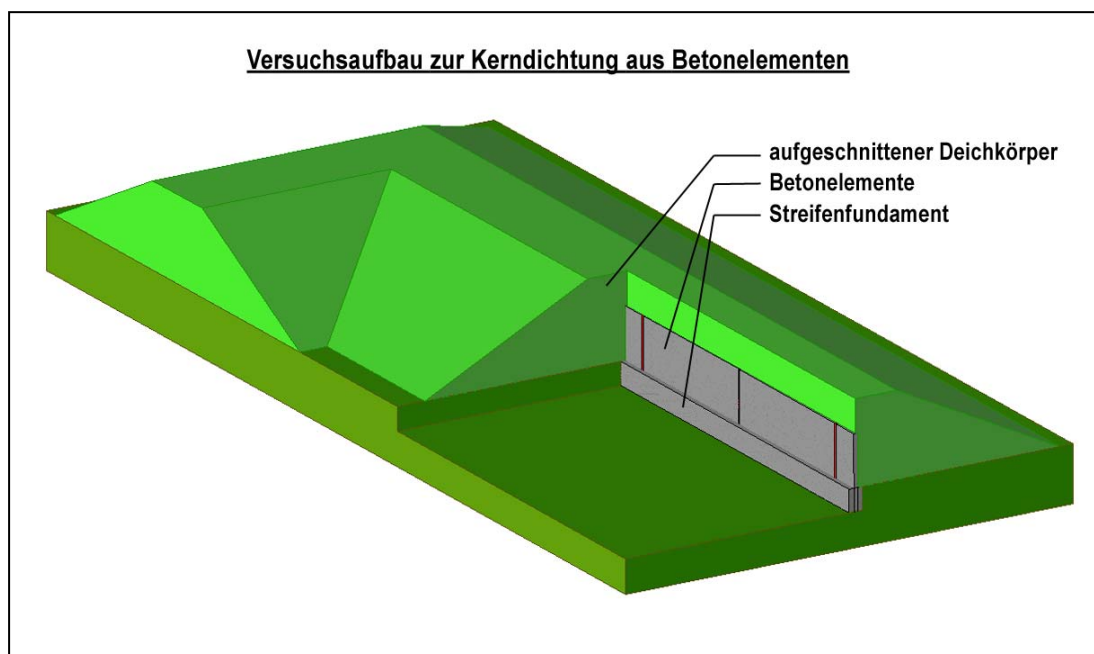
geeignetem Gerät auf der Oberflächendichtung und der Deichkrone verteilt, geebnet und verdichtet werden.

## 5.2 Variante 2 - Innendichtung

Diese Variante ist für eine Anwendung beim Deichneubau entwickelt worden.

### 5.2.1 Konstruktive Ausbildung

Die Innendichtung (hier auch als Kerndichtung bezeichnet) ist aus einzelnen Betonplatten aufgebaut, welche aneinander gereiht entlang der Deichachse eingebracht werden. Die Betonelemente sollen in ein Fundament eingebunden werden und reichen 50 bis 80 cm unter OK Deichkrone. Der Einsatz der Betonelemente als Innendichtung ist in Abb. 54 verdeutlicht.



**Abb. 54** : Konstruktive Ausbildung - Betonelemente als Innendichtung im Deichbau (Variante 2)

Beim Deichneubau wird zur Einbindung der Betonelemente ein Fundamentgraben (Streifenfundament) ausgehoben. Für den Einsatz im Versuchsdeichkörper (s. Abschn. 8) wurde unter Berücksichtigung des verwendeten Deckenplattensortiments (WBS 70) durch SCHMIEDEHAUSEN<sup>96</sup> ein Fundament mit einer Breite von 1,15 m und einer Tiefe von 0,80 m berechnet. Die Einspanntiefe der RC-Bauteile beträgt 50 cm. Die maximale Grabtiefe ohne Verwendung von Stützflüssigkeit ist vom anstehenden Erdstoff abhängig. Gegebenenfalls ist der Schlitz unter Verwendung einer Stützflüssigkeit (Bentonit) herzustellen. Anschließend werden mit einem Kran die Betonplatten aneinander gereiht in den Schlitz gesetzt und seitlich mit höhenverstellbaren Streben (Montagestreben) abgestützt. Dabei muss bei der Verwendung von Spannbetondeckenplatten die ehemalige Bauteilunterseite zur Wasserseite ausgerichtet sein. Betoniert wird mit einem wasserundurchlässigen Beton C 20/25 entsprechend der Expositionsklasse XC2 und einer Mindestbetondeckung von 3,5 cm. Nach dem Aushärten des Fundamentes

<sup>96</sup> Schmiedehausen, R.: Statische Berechnung Streifenfundament für Innendichtung, im Auftrag der FG Bauliches Recycling, Cottbus, 05.09.2006.

wird beginnend auf der Wasserseite der Innendichtung lagenweise ( $h_L = 50 \text{ cm}$ ) der Deichkörper aufgeschüttet und verdichtet. Dabei ist es notwendig, dass beide Seiten ungefähr denselben Erddruck auf die eingebauten Platten ausüben. Die Schütthöhe auf der Wasserseite darf die Einbauhöhe auf der Landseite max. 1,0 m überschreiten. Die Fugen zwischen den Elementen (ca. 2 cm) können mit verschiedenen Fugendichtstoffen verfüllt bzw. wasserseitig oberflächlich abgedichtet werden. Die Deichoberfläche wird abschließend begrünt.

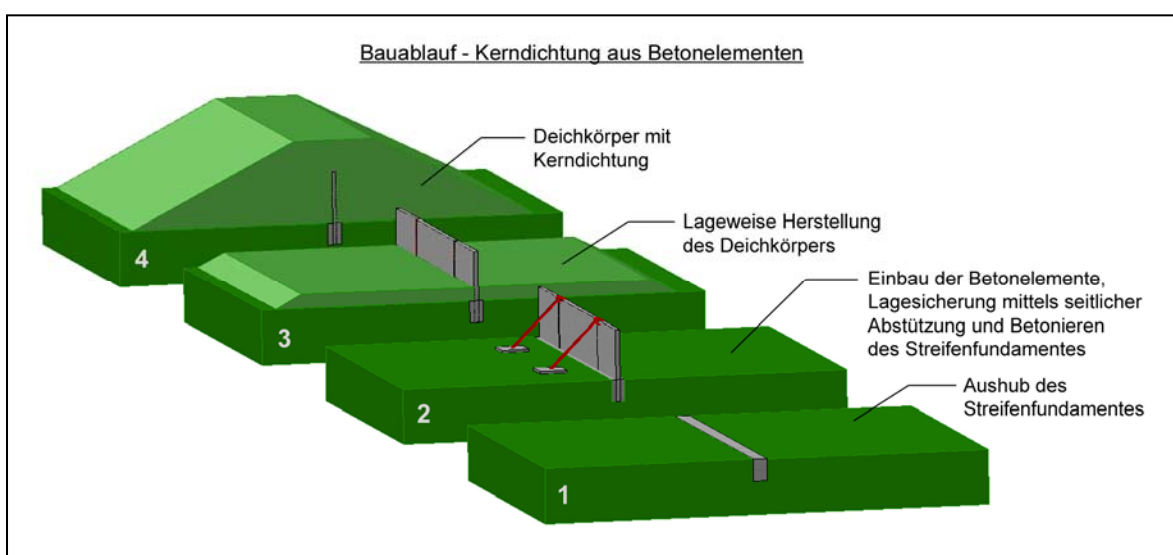
Das Schließen von Tür- oder Fensteröffnung ist durch die senkrechte Einbaulage nur unter großen Aufwand möglich. Aussparungen können eventuell beim Schließen der Fugen mit Verguss mit ausbetoniert werden.

Bei einer maximalen Länge von ca. 6 m der Deckenplatten beträgt somit die maximale Höhe der Innendichtung 5,5 m. Diese Höhe kann über ein Tieferlegen des Fundamentes in den Untergrund oder durch Schneiden der Bauteile in ihrer Länge variiert werden. Ein Tieferlegen des Fundaments ermöglicht wie auch bei der Oberflächendichtung eine Anbindung der Dichtung an gering durchlässige Bodenschichten (vollkommene Dichtung) bzw. eine Sickerwegsverlängerung (unvollkommene Dichtung).

Um den Einbauvorgang, d.h. die Ausführung des Streifenfundamentes, zu vereinfachen, empfiehlt es sich, Bauteile gleicher Höhe einzusetzen. Also entweder Deckenplatten vertikal mit 6 m Höhe (5 m Deichhöhe), Deckenplatten horizontal 3 m Höhe (Deichhöhe 2,5 m) oder Innenwände stehend mit 2,6 m Höhe 2,1 m (Deichhöhe). Für die Herstellung eines Deiches mit einer Höhe der Dichtung von bis zu 5,5 m werden bei höherem Aufwand für die Herstellung der Innendichtung weniger Elemente benötigt als bei einer Ausführung mit Oberflächendichtung.

## 5.2.2 Beschreibung des Bauablaufes

In der folgender Abb. 55 sind die Arbeitsschritte zum Erstellen eines Deichneubaues mit Innendichtung (Kerndichtung) unter Verwendung von Betonelementen skizziert.



**Abb. 55** : Darstellung des Bauablaufes für die Herstellung einer Innendichtung in Arbeitsschritten



- **Herstellen des Streifenfundamentes und Einbau der RC-Betonbauteile**

Mit einem Bagger ist ein Graben für die Herstellung des Streifenfundamentes auszuheben. Die maximale Grabtiefe ohne Verwendung von Stützflüssigkeit ist vom anstehenden Erdstoff abhängig. Gegebenenfalls ist der Schlitz unter Verwendung einer Stützflüssigkeit (Bentonit) herzustellen. So erforderlich ist die verlorene Schalung für das Streifenfundament einzurichten und die Bewehrung entsprechend des Bewehrungsplans einzubringen. Anschließend wird das Streifenfundament bis in Höhe der Auflagerfläche der Betonbauteile gegossen. Es wird ein schnell erhärtender Beton empfohlen, welcher mit einer Rüttelflasche zu verdichten ist.

Nach Ablauf eines ausreichenden Erhärtungsprozesses werden die zwischengelagerten Betonelemente mit einer Fugenbreite von ca. 2 cm in den Schlitz gestellt und jeweils durch eine Steife senkrecht gehalten. Zur Befestigung der Steifen sind Widerlager zu schaffen. Empfohlen wird, bewehrte Betonplatten als Widerlager vor die senkrecht eingebauten Betonelementen zu verlegen. An der Oberseite jedes Innendichtungselementes ist mittig eine Klaue (U-Profil) zu befestigen. Anschließend wird eine höhen- und längenverstellbare Steife (Montagestrebe) zwischen die Klaue und das Widerlagerelement gesetzt. Jeweils zwei nebeneinander stehende Betonelemente werden zusätzlich mit U-Profilen an der Oberkante miteinander verbunden.

- **Verfüllung der Fugen und Betonieren des Fundamentes**

Nach dem Einrichten und Sichern der Betonbauteile der Innendichtung sind die Fugen zwischen den Bauteilen zu schließen. Bei einem Einsatz von Vergussbeton müssen beidseitig der Fugen Schalungsplatten bzw. -bretter befestigt werden. Das Fugenmaterial ist von oben einzubringen. Empfohlen wird der Einsatz von C 20/25 (B 25) mit 8-er Größtkorn in der Konsistenz F5 (sehr fließfähig). Der Beton muss gut verdichtet werden, um eine lückenlose undurchlässige Fugenfüllung zu erzielen. Teurer aber weniger arbeitsaufwendig sowie sicherer ist der Einsatz von selbstverdichtendem Beton.

Nach Ausführung der Fugenabdichtung bzw. beim Einsatz von Vergussbeton nach dem Ausschalen der Fugen ist das Streifenfundament bis zu seiner Oberkante auszubetonieren.

- **Entfernen der Montagestreben und lagenweise Herstellung des Deichkörpers**

Nach Erhärtung des Fundamentes sind die Steifen an der Innendichtung abschnittsweise zu entfernen. In diesem freien Bereich wird die erste Lage ( $h = 50$  cm) des Deichkörpers aufgeschüttet und verdichtet. Der verwendete Boden sollte gut abgestuft sein und mit optimalem Wassergehalt eingebaut werden.

Der Deichkörper ist lagenweise bis zu einer Höhe von 3 m zu errichten. Das einzubauende Oberbodenmaterial ist auf Böschungen und Deichkrone zu verteilen, zu ebnen und zu verdichten. Die 50 - 80 cm Überdeckung mit Deichmaterial dienen als Vegetationsträger und wirken zusätzlich als Frostschutz für die Betonelemente.

## 5.3 Varianten 3 – Überlaufstrecken

Die Herstellung von Überlauf-/Überströmstrecken mit Einsatz gebrauchter Betonfertigteile kann bei Deichneubauten sowie –sanierungen angewandt werden.

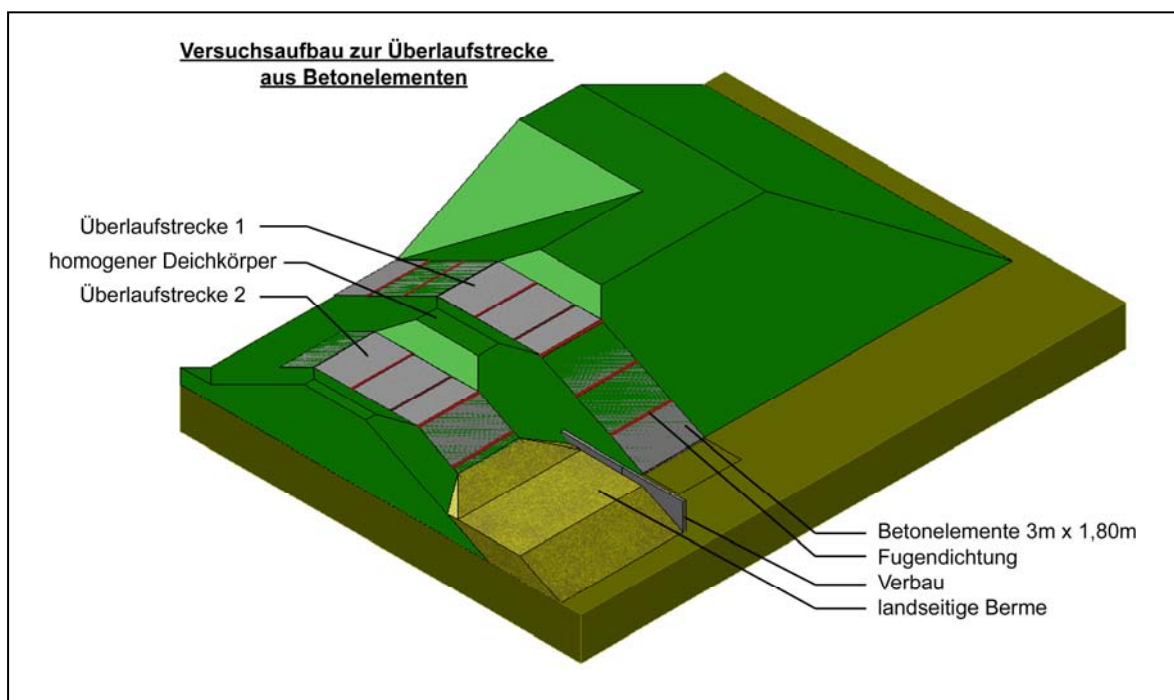
### 5.3.1 Konstruktive Ausbildung

Der Deich soll durch den Einsatz der Betonbauteile beim Überströmen vor Erosion geschützt werden. Hierbei wird durch die oberflächigen Auflage von Betonfertigteilen im Bereich der Deichkrone eine Auflast erzeugt, welche zur Erhöhung der Standfestigkeit des Deichkörpers beiträgt. Zudem wird eine zusätzliche Auflast auf der landseitigen Deichoberfläche mittels

- gebrauchter Betonelemente (Variante 3.1; s. Abb. 56, Überlaufstrecke 1) oder
- einem Auflastfilter (Berme) aus Recyclingschotter (Variante 3.2; s. Abb. 56, Überlaufstrecke 2)

erzeugt. In Variante 3.1 dienen die wasserseitigen Betonelemente gleichzeitig als Oberflächendichtung und können bis in gering durchlässige Bodenschichten oder zur Sickerwegsverlängerung abgesenkt werden. Zum Schutz des landseitigen Deichfußes vor Auskolkung bei Überströmung wurde hier zudem ein zusätzliches Betonelement angeordnet. In Variante 3.2 erfolgt nur die wasserseitige Verlegung im oberen Bereich des Deichkörpers.

Die Fugen zwischen den Bauteilen werden mit Fugendichtstoff (bspw. Beton) geschlossen. Die Betonelemente können mit einer Oberbodenschicht als Vegetationsträger überdeckt werden.



**Abb. 56** : Konstruktive Ausbildung - Betonelemente Überlaufstrecken im Deichbau (Variante 3.1 und 3.2)  
(Entwurf zur Planung des Versuchsdeichkörpers)

### 5.3.2 Bemerkungen zur bautechnischen Realisierung

Das Auflegen der Betonelemente erfolgt analog zu Variante 1 - Oberflächendichtung nach Erstellen des Deichkörpers.

## 5.4 Übersicht zur Fugenausbildung

Die Fugen der vorgeschlagenen Dichtungssysteme für die Oberflächen- und Innendichtung (s. Abb. 57) sowie der überströmten Bereiche sind besonders sorgfältig auszubilden, da diese die Schwachstellen der Dichtung darstellen. Untersucht wurde der Einsatz verschiedener Fugendichtstoffe: Betonverguss, Ton- und Bentonitpackungen sowie handelsübliche Dichtungssysteme. Die Untersuchungen umfassten den Einbau der Dichtungen, die Kosten der Materialien, das Dichtungsverhalten, die Beständigkeit bzw. die Dauerhaftigkeit der eingesetzten Produkte und Materialien.

Entscheidend für die Auswahl des Dichtungssystems ist neben der Lage der Fuge (horizontal und vertikal – Oberflächendichtung; vertikal – Innendichtung) die auszubildende Fugenbreite inkl. der Ausführung sowie der Zustand der Bauteilkanten.

Die Fugenbreite kann beim Einbau der Betonelemente variiert werden, um hier die gewählten Fugendichtungssysteme optimal einzusetzen. Dabei sind technologisch bedingte Mindestabstände zwischen den Bauteilen zu berücksichtigen. Dieser Mindestabstand wird vor allem durch den Einsatz üblicher Anschlagmittel beim Verlegen/Stellen der Platten beeinflusst. So ergeben sich Zwischenräume zwischen den Elemente der Oberflächendichtung von ca. 10 cm, bei der Innendichtung von ca. 2 cm. Die Fugenbreiten zwischen den Platten als Oberflächendichtung sind jedoch reduzierbar. Im Fall der Innendichtung können die Bauteile auch versetzt hintereinander gestellt werden, so dass diese an ihren Rändern überlappen. Hier stehen die Bauteile dicht an dicht. Im Betonfundament muss ein Abdichten der Auflagerfuge berücksichtigt werden, um einen Sickerwasserfluss zwischen dem alten Betonelement und dem neuen Beton des Fundamentes zu unterbinden.

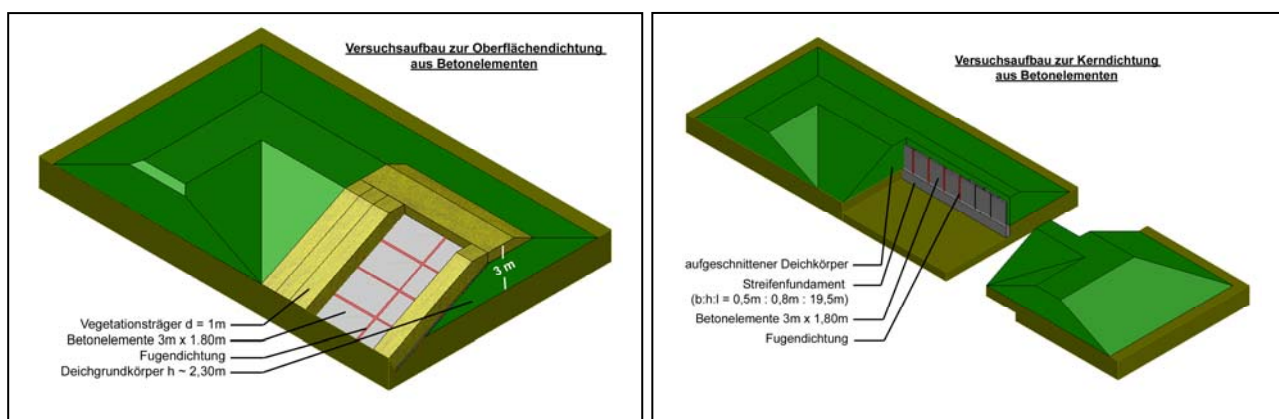


Abb. 57 : Prinzipskizzen der Oberflächen- und Innendichtung

### 5.4.1 Hinweise zur Ausbildung der Stirnseiten und Kanten gebrauchten Bauteile

In den nachfolgenden Abbildungen sind die senkrechten Stirnseiten von Innenwandelementen sowie Deckenplatten (Abb. 58 und 59) der WBS 70 abgebildet. Die senkrechten Stirnseiten der Innenwände sind entweder verzahnt oder glatt ausgebildet. Durch unsachgemäße Stemmarbeiten zum Herauslösen der Bauteile bei der Demontage wurden die Ränder zum Teil (vor allem bei den Deckenplatten) beschädigt.



Abb. 58 : Ausgebaute Innenwandbauteile und Deckenplatten eines WBS 70 – Wohnblocks

### 5.4.2 Einfluss des Einbaus der Bauteile auf die Fugengestaltung

Der Einbau der Bauteile, deren Anschlagmöglichkeiten und deren Handling ist abhängig von der herzustellenden Variante der Dichtung (Oberflächen- oder Innendichtung) und von der Art des Bauteils sowie dem Zustand der vorhandenen Tragösen am Bauteil. So können beispielsweise Innenwandbauteile für die Herstellung einer Innendichtung an den noch nutzbaren vorhandenen Tragösen angeschlagen werden. Die Elemente befinden sich damit in Einbaulage und müssen nicht mehr in ihrer Lage verändert (z.B. gekippt) werden. Dies gilt auch für den Einsatz von ungeschnittenen Deckenplatten bei der Oberflächendichtung, soweit – und das ist in der Regel der Fall - alle 4 Tragösen noch vorhanden sind.

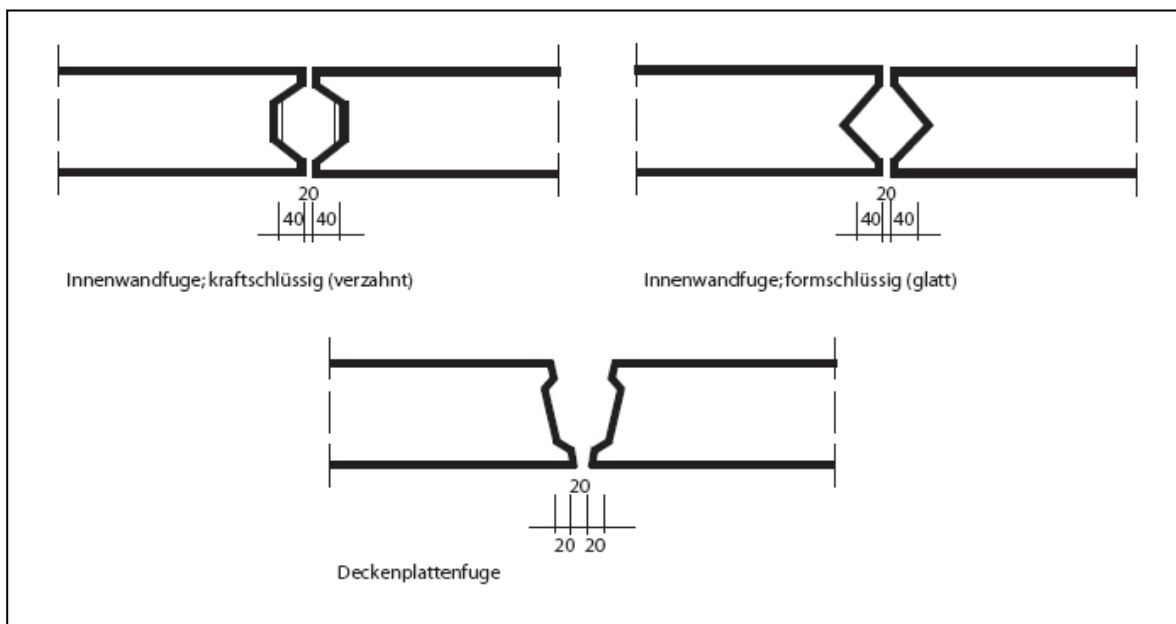
Sind die ursprünglichen Tragösen nicht mehr vorhanden, können für das Versetzen der RC-Betonbauteile bei der Variante Innenwand alternative Anschlagoptionen wie z.B. Durchstecksysteme oder der Einsatz von Zangen gewählt werden. Beim Herstellen der Oberflächendichtung ist dies nicht möglich, da beiderseitige Zugänglichkeit nicht gegeben ist. Daher könnten Hebebänder eine Alternative sein oder besser noch der Einsatz von Vakuumtechnik bzw. verdübelte Tragösen oder seitlich anzuschlagende Klemmen. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf.

### 5.4.3 Innendichtung

Bei der Herstellung der Innendichtung werden die Elemente in ein Streifenfundament hochkant eingespannt. Die vertikalen Fugen der Innendichtung werden einen technologisch bedingten Abstand der Bauteile von mindestens 2 cm aufweisen. Dieser kann zum besseren Einbringen und gegebenenfalls Verdichten bei der Verwendung von Füllstoffen entsprechend vergrößert werden.

Ebenso können demontagebedingte Abplatzungen an den Rändern der Bauteile (s. Abb. 58 re.) die Fugenbreite punktuell vergrößern. Auch müssen die Räume für die ehemaligen Mörtelschlösser zwischen den Bauteilen komplett verfüllt werden. Dies kann durch das Dichtungsmaterial selbst erfolgen, z.B. Beton, Bentonit- oder Tonpackungen.

Durch das Aneinanderreihen der Bauteile entstehen nachfolgend abgebildete Fugenbilder. Werden Bauteile mit unterschiedlichen Ausführungen der Stirnseiten nebeneinander platziert, können auch Kombinationen aus diesen auftreten.



**Abb. 59** : Schematische Darstellung möglicher Fugenausführungen

Ausgehend von einer Elementedicke der Innenwände von 150 mm und der Deckenplatten von 140 mm und dem Mindestabstand der Bauteile von 2 cm ergeben sich nachfolgend aufgelistete Fugenquerschnitte und Volumina je laufenden Meter Fuge (lfdm).

**Tab. 19:** Fugenquerschnitte und –volumina bei der Innendichtung

<b>Variante</b>	<b>Innendichtung</b>		
Bauteilabstand	2 cm		
	Querschnitts- fläche		Volumen auf lfdm.
	[cm <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
<b>Innenwand, kraftschlüssig</b>	102	0,010	<b>0,010</b>
<b>Innenwand, formschlüssig</b>	66	0,007	<b>0,007</b>
<b>Deckenplatten</b>	56	0,006	<b>0,006</b>

Für die Versuchsdurchführung werden Deckenplattenelemente in einem Abstand von 2 cm aneinandergereiht. Die Bauteilhöhe und somit die Fugenlänge beträgt 3 m. Somit ergibt sich bei einem Fugenquerschnitt von 0,006 m<sup>2</sup> ein abzudichtendes Fugenvolumen von ca. 0,018 m<sup>3</sup> je Fuge. Es sollen drei verschiedene Dichtungsvarianten in drei Deichabschnitten untersucht werden. Jeder Deichabschnitt umfasst drei Fugen. Die Gesamtfugenlänge je Untersuchungsabschnitt umfasst somit 9 m Fuge mit einem Volumen von 0,054 m<sup>3</sup>.

#### 5.4.4 Oberflächendichtung

Bei der Herstellung werden die Betonbauteile wasserseitig auf den bereits errichteten Deichgrundkörper aufgelegt. Beim Verlegen der Elemente darf die Oberfläche des Deichgrundkörpers nicht beschädigt werden, um ein Hohlliegen der Bauteile zu vermeiden.

Die Breite der Fugen zwischen den Bauteilen ist abhängig von der verwendeten Anschlagtechnik. Für ein einfaches Handling der Bauteile empfiehlt sich die Nutzung vorhandener oberseitiger Tragösen bzw. das Verdübeln entsprechender Alternativen. Diese ermöglichen ein einfaches Lösen der Ketten des Krans. Durch die Wahl einer handhabbaren Fugenbreite von ca. 10 cm muss das Bauteil nicht unnötig lange eingependelt werden, um die optimale Einbaulage zu erreichen. Der Bauprozess wird beschleunigt. Bei der Verwendung von Hebebändern, Klemmen oder Spreizgehängen können diese unkompliziert vom Bauteil entfernt werden.

**Tab. 20:** Fugenquerschnitte und –volumina bei der Oberflächendichtung

<b>Variante</b>	<b>Oberflächendichtung</b>		
Bauteilabstand	10 cm		
	Querschnitts- fläche		Volumen auf lfdm.
	[cm <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
<b>Innenwand, kraftschlüssig</b>	222	0,022	<b>0,022</b>
<b>Innenwand, formschlüssig</b>	186	0,019	<b>0,019</b>
<b>Deckenplatten</b>	176	0,018	<b>0,018</b>

### 5.4.5 Ausbildung der Fugen

Durch die unterschiedliche Einbausituation der gebrauchten Betonfertigteile in den Varianten der Oberflächen- und Innendichtung ergeben sich auch Unterschiede in der Ausbildung der Fugen zwischen den Bauteilen. Einfluss auf die Art und Weise der Fugendichtung nehmen vor allem die Ausbildung der anschließenden Stirnseiten der Bauteile, die Breite der abzudichtenden Fuge und der vertikal oder fast horizontale Verlauf dieser Fugen bei Innen- und Oberflächendichtung.

Für die Abdichtung von Fugen bestehen 2 grundlegende Möglichkeiten. Zum einen können die Fugen mit einem wasserundurchlässigen Füllstoff (z.B. WU-Beton) abgedichtet werden. Zum anderen kann die Fuge auf der Wasserseite der Dichtung durch ein oberflächiges Dichtungssystem (z.B. Dichtblech) wasserdicht abgedeckt werden.

Bei Einsatz von Füllstoffen muss dieser ohne Fehlstellen eingebracht und optimal verdichtet werden. Dafür müssen die Fugen entsprechend breit gewählt werden. Ausnahme bilden aufquellende oder selbstverdichtende Füllstoffe, wie zum Beispiel Schäume oder selbstverdichtender Beton. Hier sollte die Fugenbreite so schmal wie möglich gewählt werden, wobei ein homogener Eintrag des Füllstoffes gewährleistet werden muss. Zudem darf auch an den Grenzflächen zwischen Dichtungsmaterial und Betonelement kein Wasser durchdringen. Dies kann über den Einsatz von Quellbändern unterbunden werden. Vertikale Fugen müssen zumeist entsprechend verschalt werden. Ausnahme bildet hierbei der Einsatz von Schäumen. Untersucht wurde jeweils der Einsatz von folgenden Fugenfüllstoffen:

1. Beton (mit verschiedenen Optionen),
2. Brunnenschaum,
3. Ton / Bentonit-Packung.

Bei einer oberflächigen Abdichtung ist der maximale Fugenabstand abhängig von der Breite und Art dieser Dichtbleche. Ein minimaler Fugenabstand verringert den Aufwand und Materialeinsatz und somit die Kosten der Abdichtung. Die oberflächige Abdichtung wird verklebt oder vernagelt.

Des Weiteren wurden folgende oberflächige Dichtungssysteme näher betrachtet:

4. Betonelemente,
5. Bentonit-Fugendichtbleche,
6. Orbit-Flex.B (Oberflächendichtungssystem).

Aufgrund der geplanten technologischen Abfolge der Errichtung der einzelnen Ausführungsvarianten und der voraussichtlich genutzten Anschlagmöglichkeiten werden folgende Fugenbreiten angenommen:

- Innendichtung: ca. 2 cm (an den Außenkanten),
- Oberflächendichtung ca. 10 cm (an den Außenkanten).

Für den Einsatz zum Abdichten der vertikalen Fugen der Innendichtung eignen sich eher oberflächig anzubringende Dichtungssysteme wie Dichtbleche oder das versetzte Anordnen von Betonelementen bzw. expandierende Dichtstoffe, wie Brunnenschaum. Aufgrund der geringen Fugenbreite ist ein dichtes Einbringen von abdichtenden Füllstoffen in die Fuge, wie z.B. Beton oder Bentonitpackungen, sehr schwierig.

Durch die größere Fugenbreite und die horizontale Lage der Fugen der Oberflächendichtung eignen sich zu deren Abdichtung dichtende Füllstoffe, wie Beton, Ton oder auch Brunnenschaum. Das Anbringen von oberflächigen Dichtungssystemen, wie Dichtblechen, ist aufgrund der großen Bauteilabstände kaum möglich.

Die spezifischen Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Dichtungsvarianten für Innen- und Oberflächendichtung werden im Folgenden näher erläutert.

### **5.4.6 Erläuterungen zu möglichen Dichtungsvarianten**

Im Folgenden sollen ausgewählte Möglichkeiten zum Abdichten der Fugen von Oberflächen- und Innendichtungen untersucht werden. Dies stellt nur eine Auswahl möglicher Dichtungsvarianten dar, da für die Fugendichtung unzählige Möglichkeiten bestehen und am Markt angeboten werden.

#### **5.4.6.1 Beton**

Hauptaugenmerk der Untersuchung zu Dichtungsvarianten lag auf dem Einsatz von Beton. Dieser muss wasserundurchlässig sein und das Fugenvolumen gut ausfüllen können. Aufgrund der vorhandenen Fugenquerschnitte eignet sich nur ein Beton mit geringem Größtkorn und einer fließfähigen Konsistenz um einen homogenen Eintrag zu ermöglichen. Der Beton muss gut verdichtet werden. Die Fugen der Innendichtung sind zu verschalen.

- **Beton – Quellband**

Beim Einsatz von Beton kann Sickerwasser entlang der Grenzschicht zwischen dem alten Beton des Bauteils und dem neuen Beton des Fundamentes austreten, da eine druckwasserdichte Verbindung beider Betone nur schwer herstellbar ist. Hier ist der Einsatz von Quellbändern an den Stirnseiten der Betonelemente möglich, welche bei Wasserzutritt diese abdichten. Dies bedeutet einen höheren Arbeitsaufwand und Mehrkosten für den Einbau der Quellbänder.

<b>Einbau:</b>	Ankleben/ Annageln der Quellbänder auf beiden Stirnseiten Verschalen der Fuge (Innendichtung) Einbringen des Betons (ggf. Verdichten) Ausschalen (Innendichtung)
----------------	---

<b>Bemerkungen:</b>	sehr arbeitsaufwendig durch Anbringen der Quellbänder Verschalung der Fuge bei Innendichtung Schwierige Verdichtung des Betons bei Innendichtung
---------------------	--

- **XYPEX-Beton plus XYPEX-Schlämme**

XYPEX ist ein Material zur Herstellung wasserdichter Betonoberflächen. Dieses kann als Betonzusatzmittel (XYPEX-Admix) in den Fugenbeton eingebracht werden. Zusätzlich wird die Sickerwasserdichtigkeit im Randbereich der Fuge durch das Auftragen einer Schlämme aus XYPEX-Concentrate an den Stirnseiten der Bauelemente hergestellt. Die Dichtung des Betons erfolgt über die Auskristalli-



sation der XYPEX-Wirkstoffe in den Kapillaren oder entstandenen Rissen des Betons unter Einwirkung des Wassers. XYPEX-Beton ist somit auch nach der Fertigstellung der Fugendichtung als „selbstheilend“ einzustufen. D.h. bei einem Sickerwasserdurchbruch durch nachträglich entstandene Risse in den Fugen, werden diese durch Kristallisation wieder verschlossen.

Von XYPEX empfohlene Vorgehensweise

<b>Einbau:</b>	<p>Vornässen der Elementekanten der Fugen</p> <p>Aufbringen der Schlämme aus XYPEX-Concentrate auf den Altbeton der Elemente</p> <p>Einmischen von XYPEX-admix in einzubauenden Ort beton</p> <p>Einbringen des Betons und Verdichten</p> <p>Ver- und Entschalen bei Innendichtung erforderlich</p>
<b>Bemerkungen:</b>	<p>Einschlämmen der Fuge weniger aufwendig als Anbringen von Quellbändern</p> <p>Verschalung der Fuge bei Innendichtung</p> <p>Schwierige Verdichtung des Betons bei Innendichtung</p>

#### 5.4.6.2 Brunnenschaum (PU-Schaum)

Eine weitere Möglichkeit des wasserdichten Verfüllens der Fugen ist das Ausschäumen mit Brunnenschaum. Dieser wird beim Abdichten der Fugen zwischen vorgefertigten Betonelementen (Brunnenringen) im Brunnenbau eingesetzt. Er weist eine Wasserdichtigkeit bis zu 0,8 bar auf. Dies entspricht einer anstehenden Wassersäule von 8 m Höhe.

<b>Einbau:</b>	Ausschäumen
<b>Bemerkungen:</b>	sehr leichte Handhabung

#### 5.4.6.3 Ton - Packungen

Eine Möglichkeit der Abdichtung der Fugen der Oberflächendichtung ist das Einbringen einer Tonpackung. Dazu wird der zwischen die Bauteile eingebrachte Ton durch Stampfen verdichtet. Es wirkt das gleiche Prinzip der Dichtung wie bei Basisabdichtungen. Eine ausreichend gute Verdichtung ist bei der Innendichtung aufgrund des geringen Fugenquerschnitts und der relativ großen Höhe der zu verdichtenden Säule nicht möglich.

<b>Einbau:</b>	Einbringen und Verdichten des Tons durch Stampfen
<b>Bemerkungen:</b>	Einbringen und Stampfen des Tons muss per Handarbeit erfolgen Aufwendig und fehlerstellenanfällig

#### 5.4.6.4 Überlappung der Fugen mit Betonelementen

Die Fugen werden durch zusätzliche versetzt angeordnete Betonelemente abgedeckt. Um ein Durchsickern zwischen den Bauteilen zu unterbinden werden die Zwischenräume mit Quellbändern ange-dichtet. Diese Variante kann nur bei der Innendichtung eingesetzt werden. Ein Einsatz dieser Variante bei der Oberflächendichtung ist nicht möglich.

<b>Einbau:</b>	Verbreiterung des Fundamentes Ankleben/ Nageln des Quellbandes beidseitig der Fuge Vorsichtiges Absetzen der hinteren abdeckenden Bauteile
<b>Bemerkungen:</b>	Befestigen der Quellbänder (Einfaches Handling) Breiteres Fundament erforderlich Fugenabdichtung kann auch mit Brunnenschaum erfolgen

#### 5.4.6.5 Bentonit-Fugendichtbleche

Dies ist der Einsatz eines Dichtungssystems auf Quellbentonitbasis. Dazu wird eine Quellbentonitmatte durch das Aufnageln eines Bleches über der Fuge zwischen der Bauteiloberfläche und dem Blech verpresst. Bei eindringendem Wasser quillt das Bentonit auf und dichtet somit die Fuge ab. Die maximale Fugenbreite ist durch die angebotenen Dichtungsblechbreiten (bis 25 cm) begrenzt.

<b>Einbau:</b>	Fuge verspachteln/ Oberfläche glätten Annageln der Dichtbleche mit Bentonitmatte ca. 0,3 h/m
<b>Bemerkungen:</b>	aufwendiges Verfahren nur für beschränkte Fugenbreiten geeignet

#### 5.4.6.6 Orbit-Flex.B

Orbit-Flex.B ist wie die Bentonitfugenbleche ein oberflächlich abdichtendes System. Dabei werden flexible Abdichtungsprofile auf der Betonoberfläche mit einem Spezialkleber verklebt. Die Wasserdichtigkeit entsteht durch die Verklebung. Die maximale Fugenbreite ist durch die angebotenen Streifenbreiten (bis 18 cm) begrenzt.

<b>Einbau:</b>	Abkleben der Fugen mit o.g. System
<b>Bemerkungen:</b>	Arbeitsaufwand hoch

## 5.5 Allgemeine Standsicherheit der entwickelten Varianten

Die Standsicherheit von Deichen muss nach DIN V 4084 – 100 für alle in Betracht kommenden Belastungsfälle gewährleistet sein. Sie wird dadurch nachgewiesen, dass für jede mögliche Gleitfläche, durch den Deichkörper bzw. durch Deichkörper und Untergrund, ein Bruch ausgeschlossen werden kann.

Für diese Betrachtung müssen Deich und Untergrund als Einheit gesehen werden. Das bedeutet, sowohl die Beschaffenheit des Deichkörpers als auch die des Untergrundes spielen eine entscheidende Rolle für die Standsicherheit.

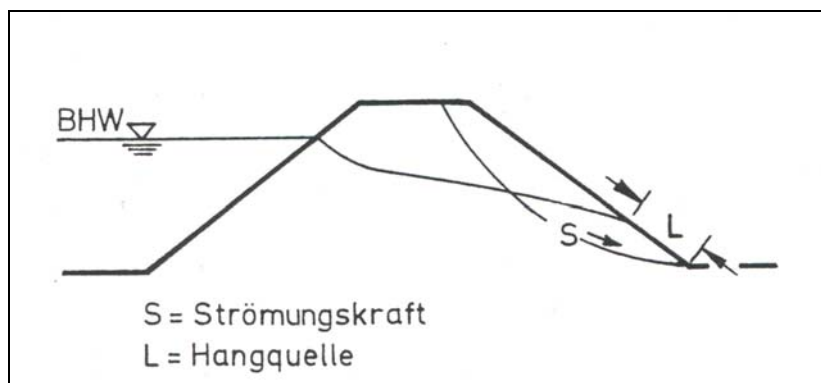
### 5.5.1 Lastfälle

Mit einer von der DIN 19712 – Flusssdeiche bewusst abweichenden Festlegung der Böschungsneigung von 1:2 sind die Nachweise für zwei Lastfälle (LF 2 und LF 3) nach DIN 1054 erbracht worden.

Folgende Lasten und Sicherheiten wurden angesetzt:

- **Lastfall LF 2** Lasten:
  - Eigenlast
  - Verkehrslast auf der Krone und Berme
  - Wasserstand BHW

erforderliche Sicherheit:  $\eta = 1,3$



**Abb. 60** : Sickerlinie für ein Bemessungshochwasserstand (BHW) – LF 2

- **Lastfall LF 3** Lasten:
  - Eigenlast
  - Verkehrslast auf der Krone und Berme
  - Wasserstand bis Deichkrone (Volleinstau)
  - bzw. absinkendes Hochwasser, BHW/3
  - Versagen der Dränung

erforderliche Sicherheit:  $\eta = 1,2$

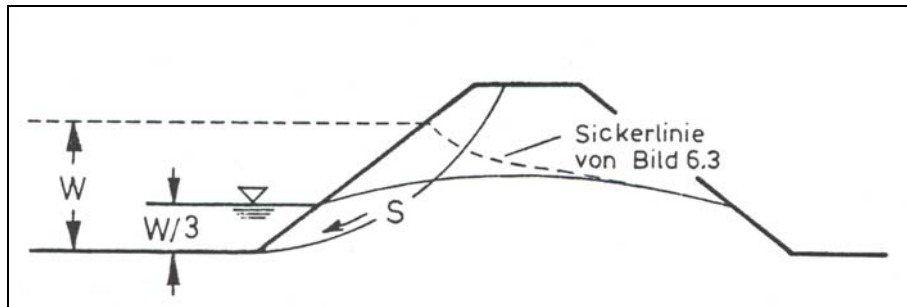


Abb. 61 : Sickerlinie bei fallendem Wasserspiegel

## 5.5.2 Grundlagen der Standsicherheitsüberprüfung

Im Rahmen der Planung des Großversuches im Tagebau Welzow-Süd (s. Abschn. 8) wurden für die erarbeiteten konstruktiven Einsatzvarianten der Betonelemente im Deichbau Standsicherheitsuntersuchungen durchgeführt.

Um Berechnungen durchführen zu können, wurden im Vorfeld die allgemeinen Randbedingungen sowie die gestellten Ansprüche an die Deichbaumaterialien geprüft (s. Abschn. 5.1.1 ff.). Im Anschluss wurden verschiedene Böden aus dem Tagebau auf ihre Eignung ( $k_f$ -Wert, Verdichtbarkeit) als Einbaumaterial geprüft.

### 5.5.2.1 Randbedingungen

Für die Modellierung des Versuchsdeiches sind folgende Randbedingungen definiert worden:

- BHW: 2,40 m über Planum
- Zur Entwässerung des Deiches wird am landseitigen Böschungsfuß ein umlaufender Filter ( $h = 0,5$  m) ausgebildet.
- Die RC-Betonbauteile werden nicht bis zur Deichkrone geführt, aber höher als das BHW.
- Im Versuchsdeich wird das Planum mit einer Tonschicht mineralisch abgedichtet.
- Die Fugen zwischen den RC-Betonbauteilen sind dicht.
- Die RC-Betonbauteile sind in den wasserundurchlässigen Untergrund (Ton) eingebunden, so dass eine Umströmung des Deichfußes ausgeschlossen werden kann.

### 5.5.2.2 Ansprüche an die Deichbaumaterialien

Der Versuchsdeich sollte lt. ursprünglicher Planung im Tagebau Meuro mit einer ca. 0,5 – 1,0 m dicken Tonschicht mit einem Durchlässigkeitswert von  $k_f \approx 3,3 \cdot 10^{-10}$  m<sup>3</sup>/s errichtet werden. Ein für die Abdichtung geeigneter Ton war im Tagebau Meuro vorhanden. Die Klassifizierung ergab, dass es sich bei diesem Ton um einen mittelplastisch bis ausgeprägt plastischen Ton (TM bzw. TA) handelt.

Der Deichgrundkörper wird aus einem gut einbaufähigem, schluffigen Sand der Bodengruppe SU\* mit einem Durchlässigkeitswert von  $k_f \approx 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  errichtet. Dieser Erdstoff wurde im Tagebau Welzow Süd entnommen und weist einen Feinkornanteil  $< 0,063 \text{ mm}$  von ca. 20 % auf.

Als Filter am luftseitigen Böschungsfuß wird ein Mischfilter verwendet. Hier eignet sich ein weitgestufter schlufffreier Kiessand. Dieser wird von zwei Lagen Geotextil ummantelt. Das Dränmaterial muss gegenüber dem Deichbaustoff filterstabil sein.

### **5.5.3 Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchung am Versuchsdeich**

Für die im Großversuch geplanten Einsatzvarianten der Betonelemente zum Hochwasserschutz wurden die Standsicherheitsuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden folgende Varianten untersucht:

- homogener Deich,
- Innendichtung,
- Oberflächendichtung,
- Überlaufstrecke.

Unter Verwendung zweier Wasserbauprogramme GGU-SS Flow und GGU stabiliiy wurden im Jahr 2005 die Nachweise nach DIN V 4084 – 100 durch Mitarbeiter der Fachgruppe Bauliches Recycling und des Lehrstuhls Bodenmechanik und Grundbau / Geotechnik der BTU Cottbus durchgeführt.

Für den Lastfall LF 2 wurde auf der Deichkrone eine Verkehrslast von  $5 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt.

#### **5.5.3.1 Homogener Deich**

Die Ergebnisse der zu erwartenden Sickerlinienausbildung mit den oben genannten Randbedingungen für die Lastfälle 2 und 3 sind in den Abbildungen 62 und 63 dargestellt.

Im Vergleich dazu wurde die Sickerlinie des homogenen Deiches ohne Filter am landseitigen Deichfuß gerechnet (s. Abb. 64). Es wird deutlich, dass es beim Ausfall des Filters zu einem Austritt des Sickerwassers aus der landseitigen Böschung kommt und damit eine Erosion der Böschung sowie Standsicherheitsprobleme auftreten können.

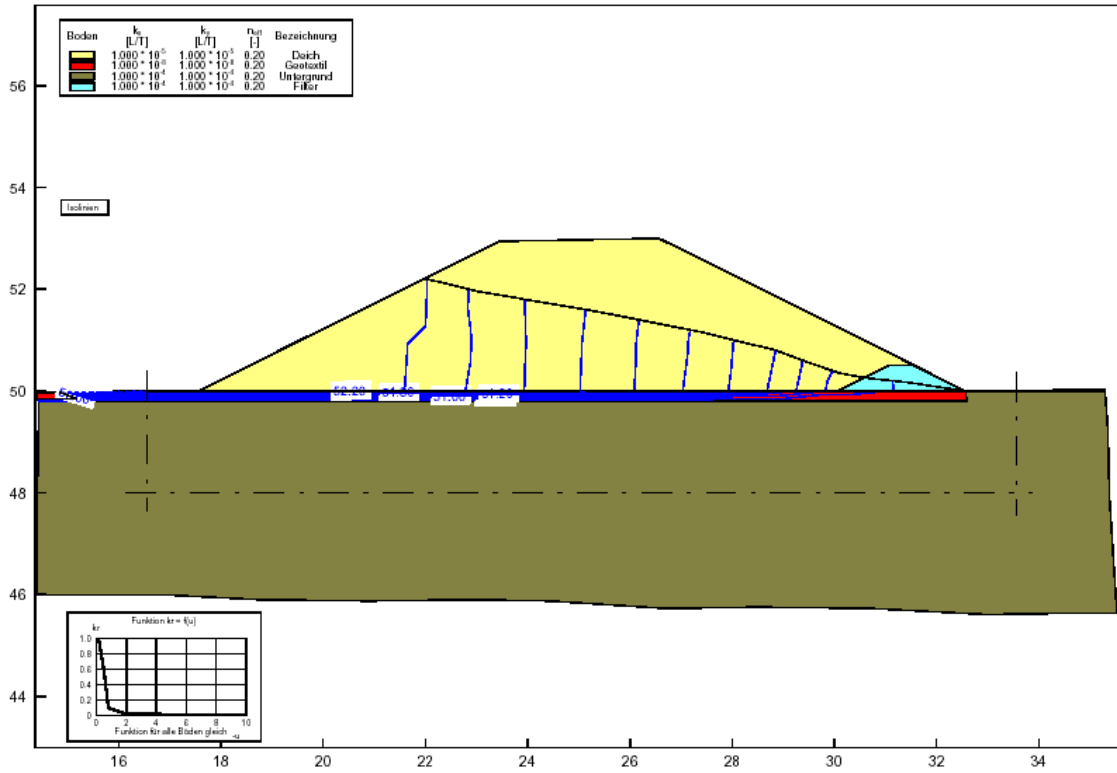


Abb. 62 : Berechnete Sickerlinie des homogenen Deichs - LF 2 (BHW)

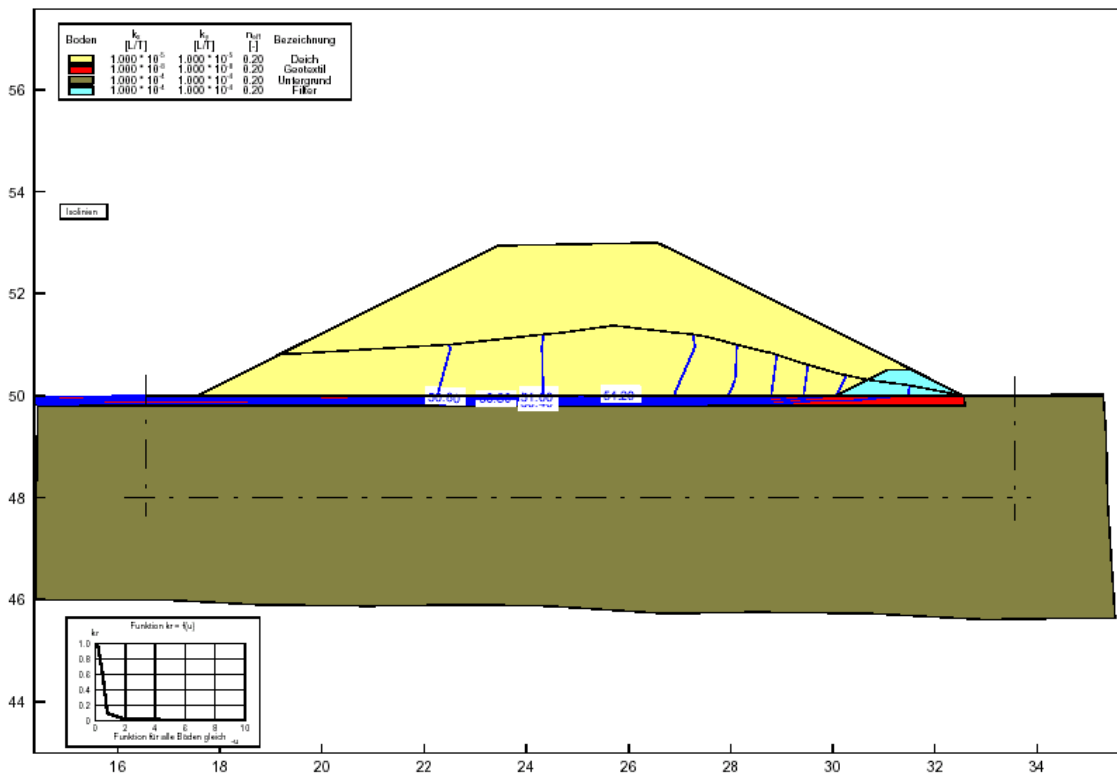


Abb. 63 : Berechnete Sickerlinie des homogenen Deichs - LF 3 (sinkender Wasserspiegel)

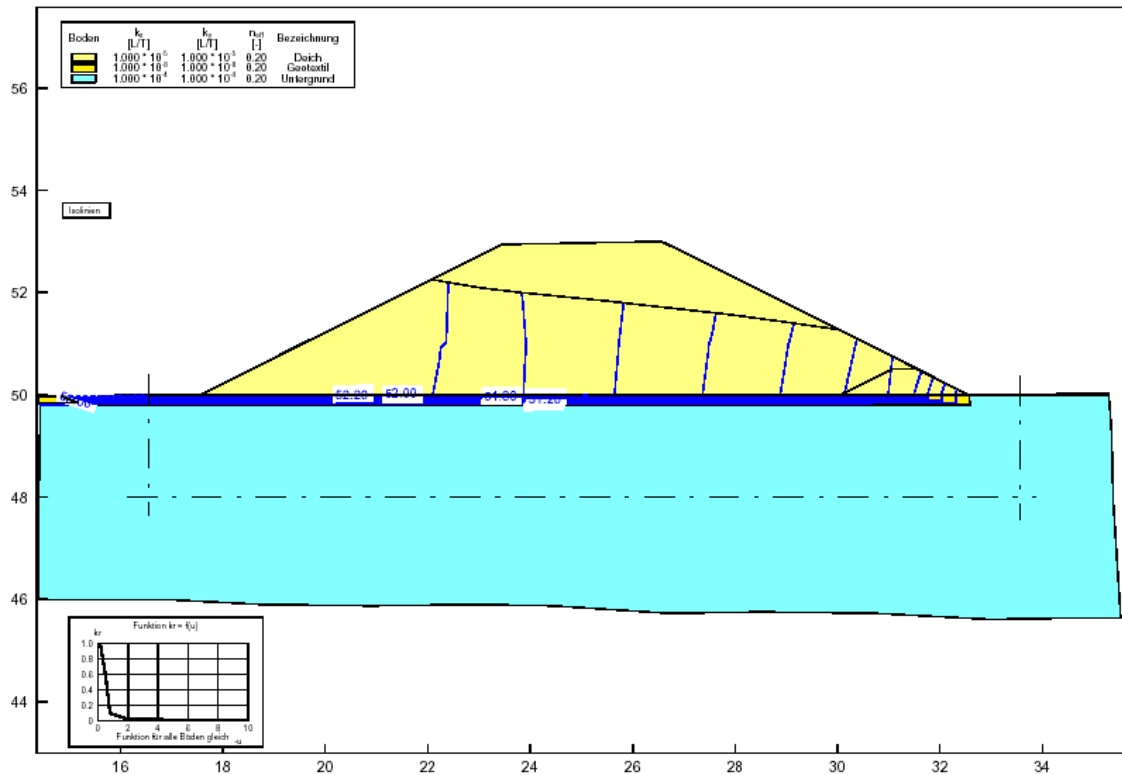


Abb. 64 : Berechnete Sickerlinie des homogenen Deichs ohne Filter – LF 2

Die anschließende Standsicherheitsüberprüfung des homogenen Deiches ergab für die maßgebenden Lastfälle folgende Ergebnisse.

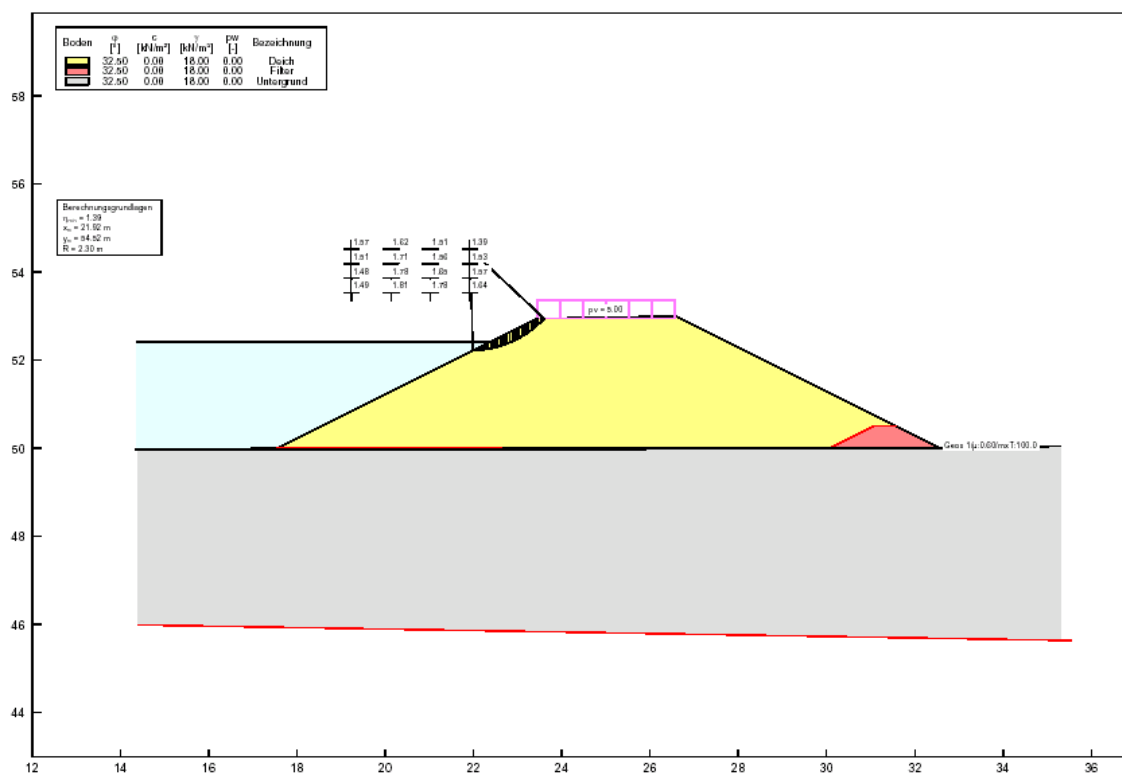


Abb. 65 : Standsicherheitsberechnung homogener Deich, LF 2, wasserseitige Böschung

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,4 > 1,3 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

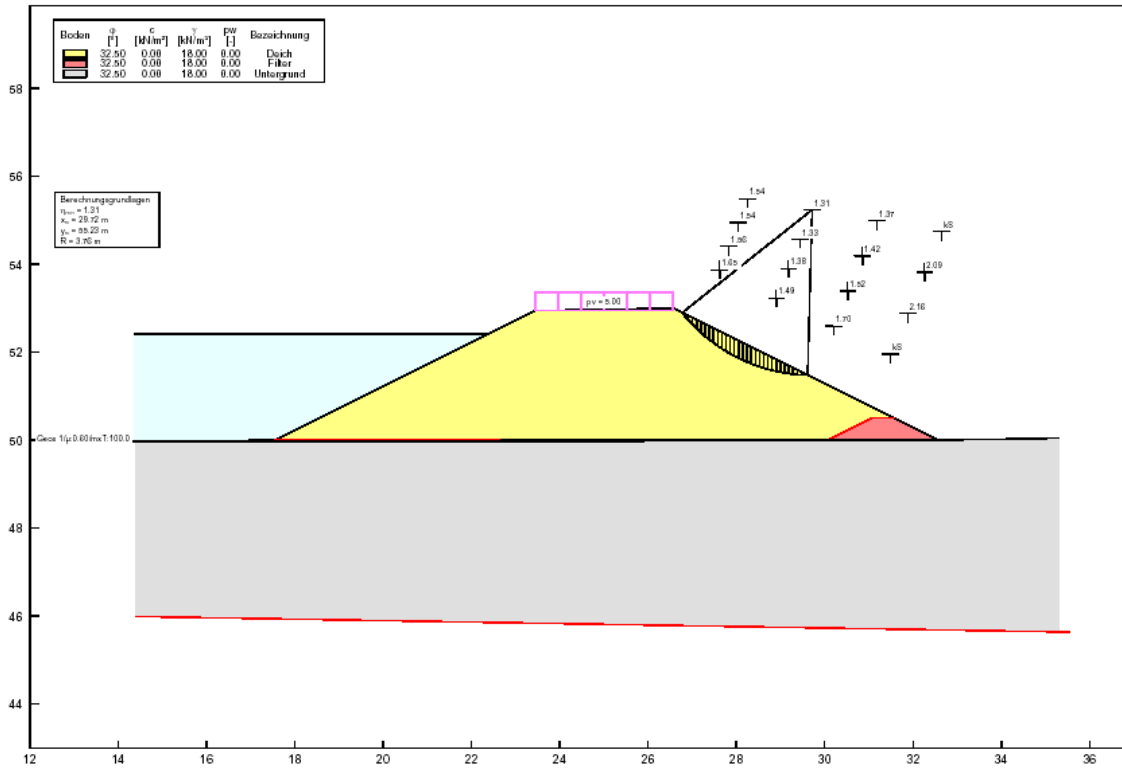


Abb. 66 : Standsicherheitsberechnung homogener Deich, LF 2, landseitige Böschung

$$\eta_{\text{landseitig}} = 1,31 > 1,3 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

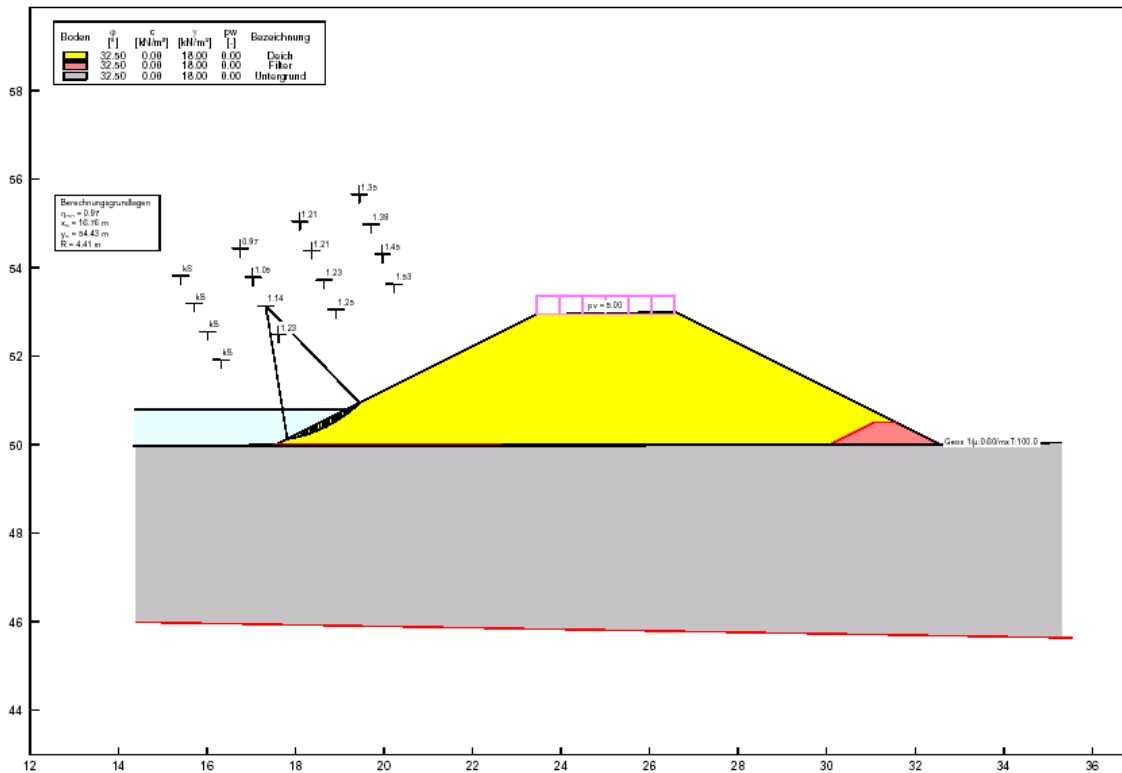


Abb. 67 : Standsicherheitsberechnung homogener Deich, LF 3, wasserseitige Böschung

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,14 \approx 1,2 = \eta_{\text{erforderlich}}$$



### 5.5.3.2 Oberflächendichtung

Die Ergebnisse der zu erwartenden Sickerlinienausbildung mit den oben genannten Randbedingungen für die Lastfälle 2 und 3 sind in den Abbildungen 68 und 69 dargestellt.

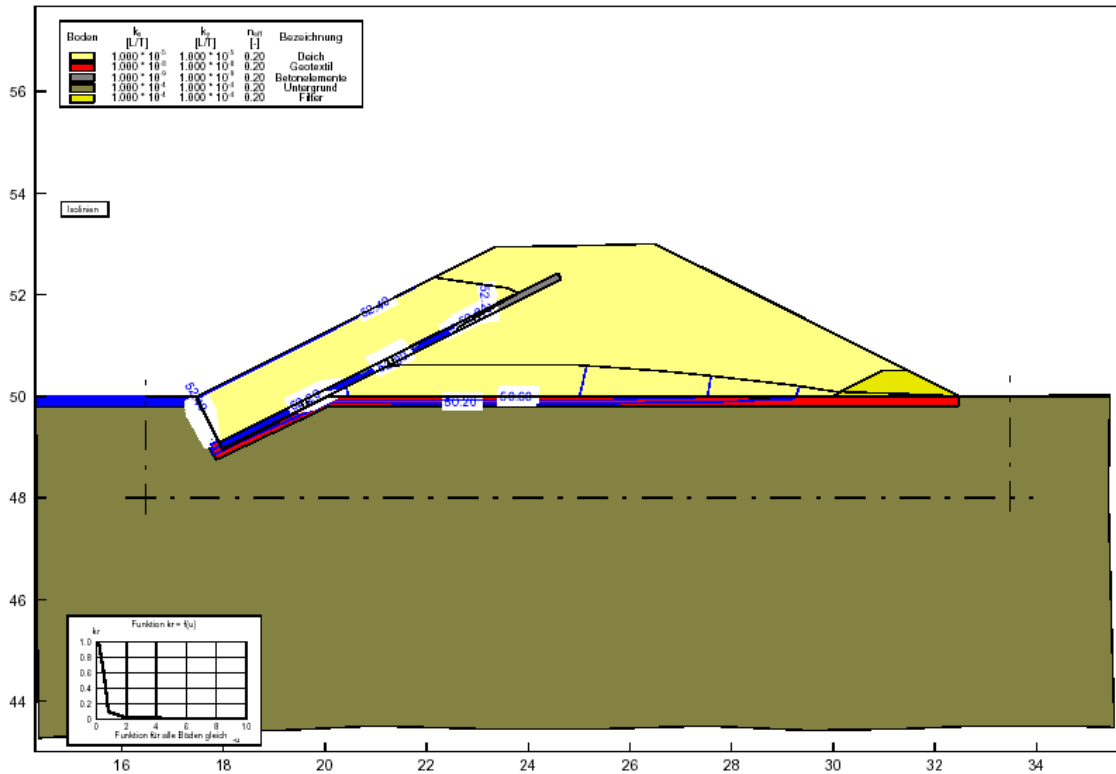


Abb. 68 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Oberflächendichtung - LF 2 (BHW)

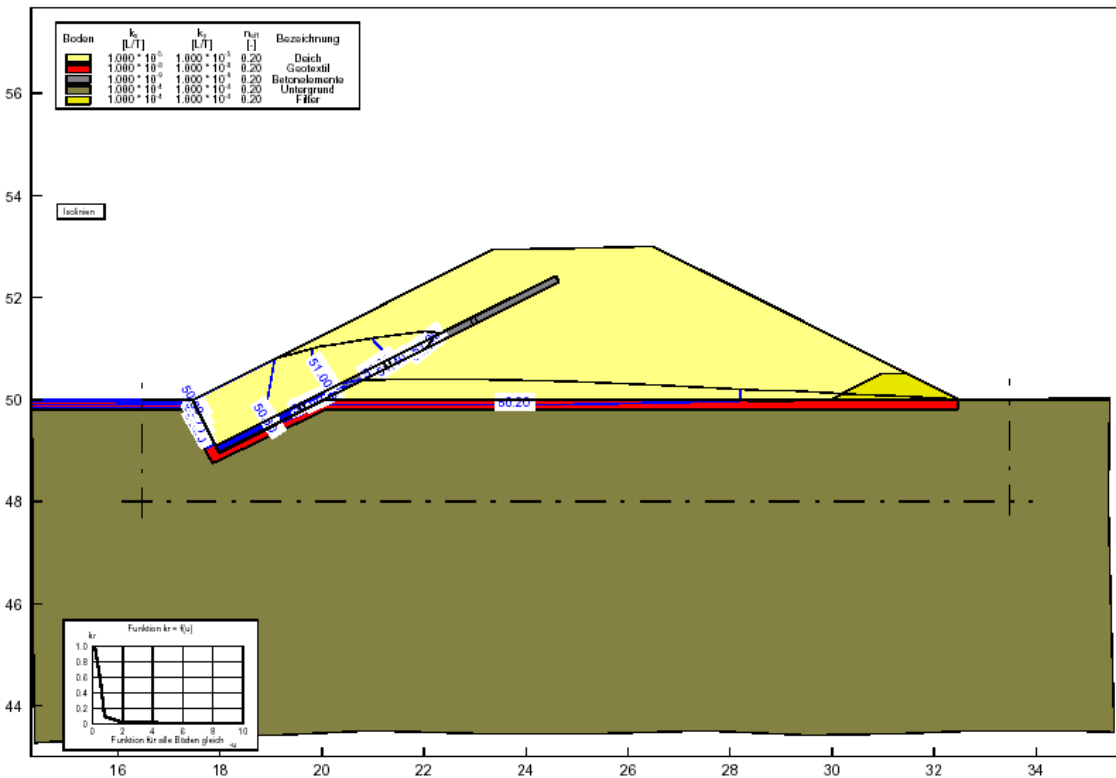


Abb. 69 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Oberflächendichtung - LF 3 (sinkender Wasserspiegel)

Die anschließende Standsicherheitsüberprüfung der Einsatzvariante Oberflächendichtung ergab für die maßgebenden Lastfälle folgende Ergebnisse.

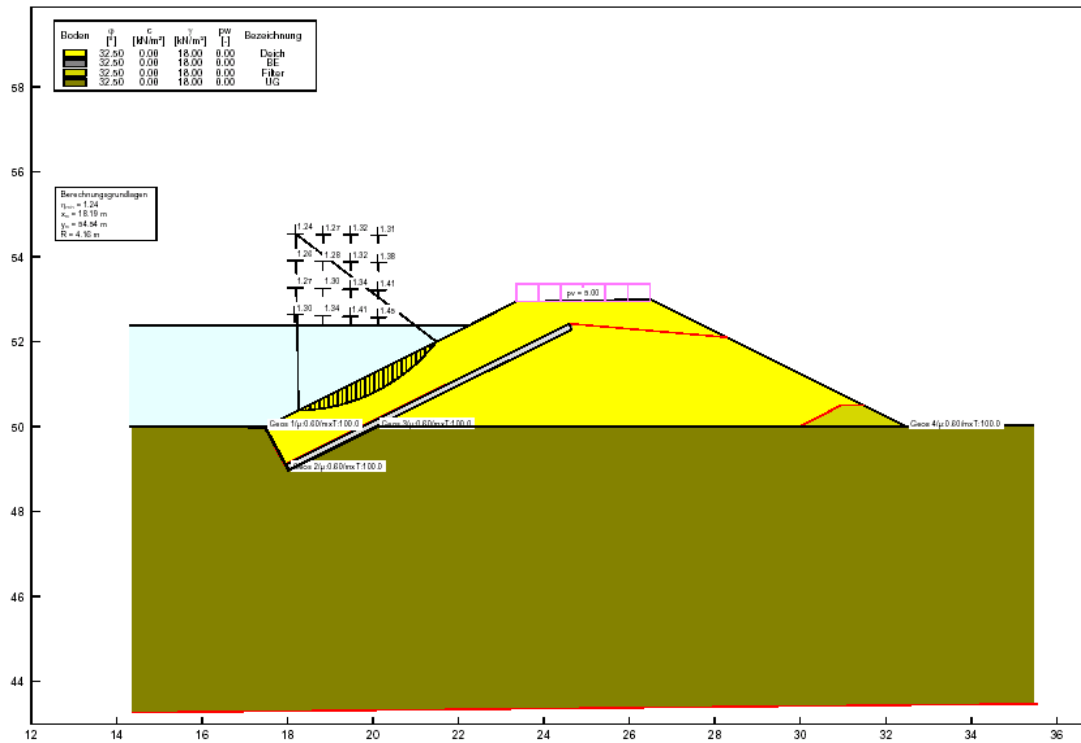


Abb. 70 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Oberflächendichtung, LF 2, wasserseitige Böschung

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,24 \approx 1,3 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

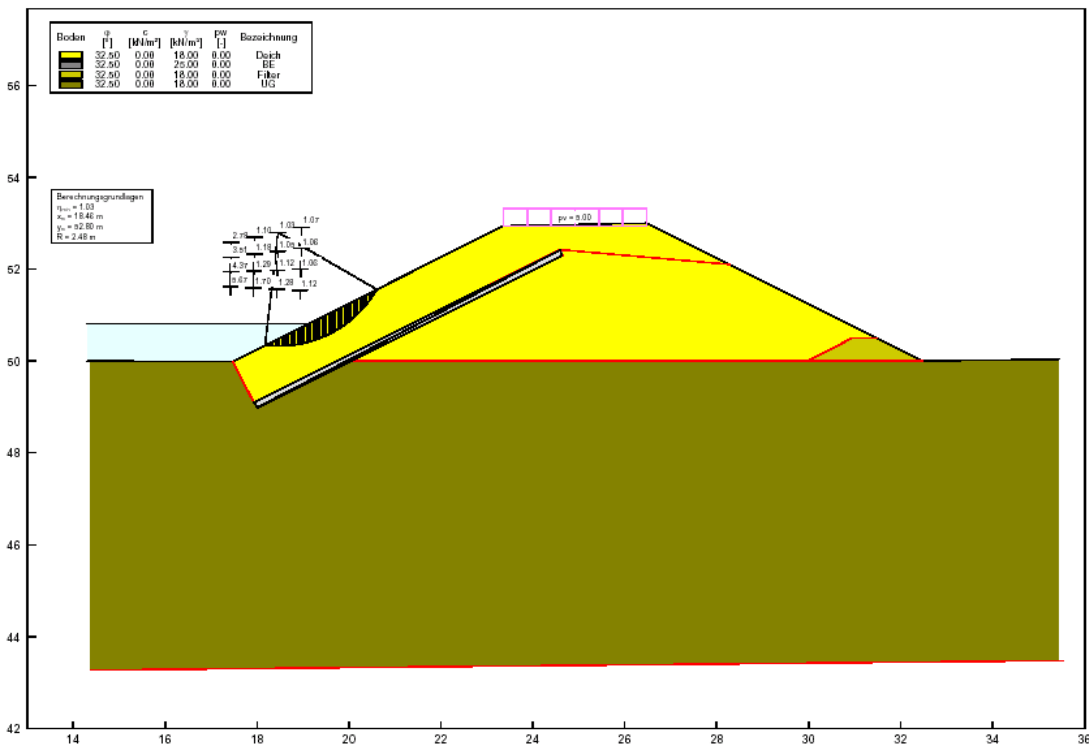


Abb. 71 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Oberflächendichtung, LF 3, wasserseitige Böschung

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,03 \approx 1,2 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

### 5.5.3.3 Innendichtung

Die Ergebnisse der zu erwartenden Sickerlinienausbildung mit den oben genannten Randbedingungen für die Lastfälle 2 und 3 sind in den Abbildungen 72 und 73 dargestellt.

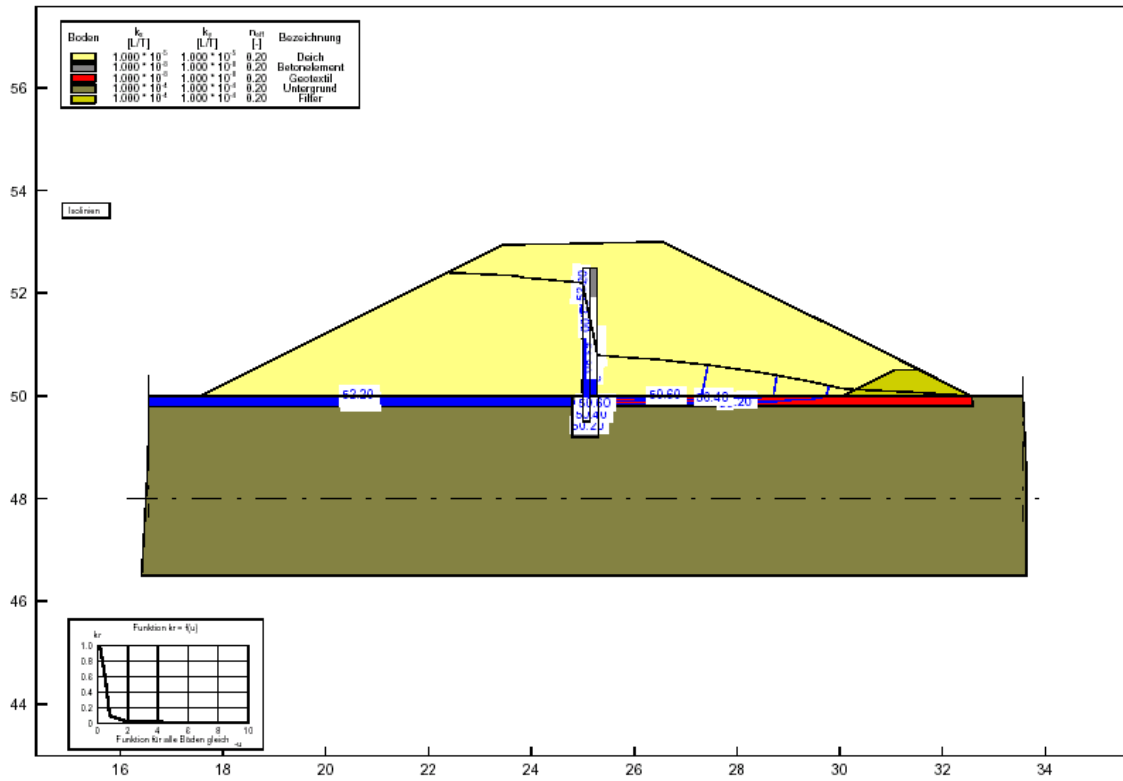


Abb. 72 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Innendichtung - LF 2 (BHW)

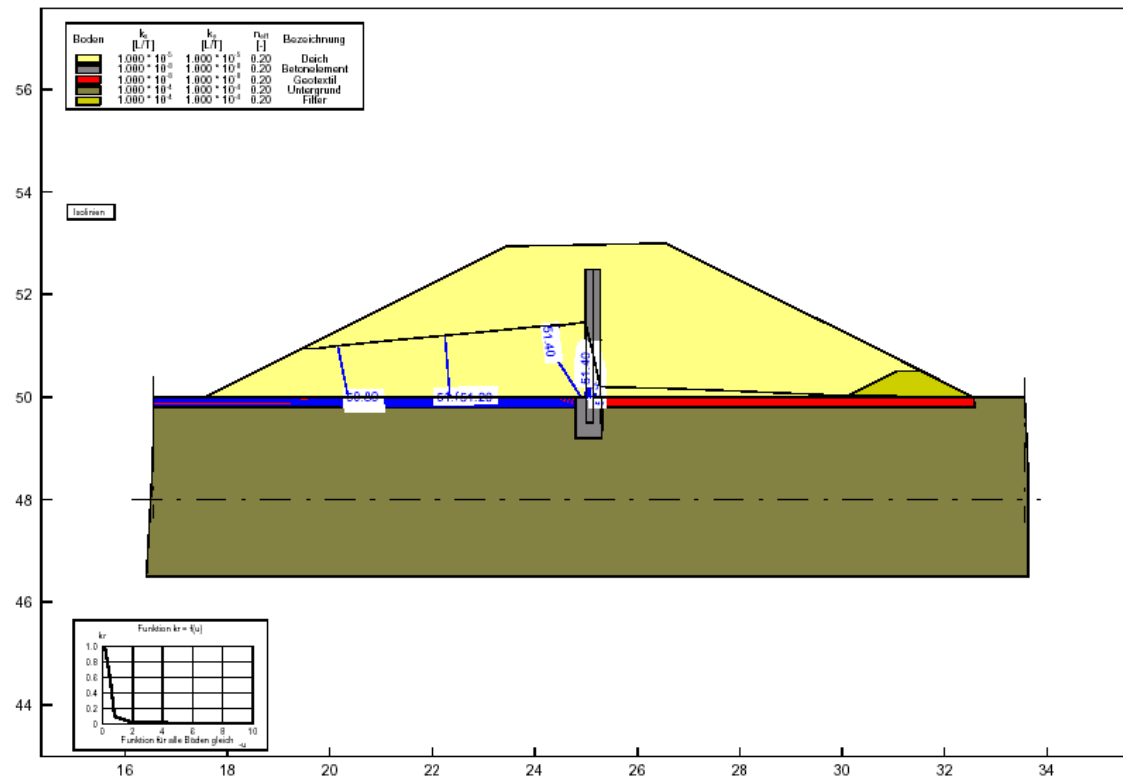


Abb. 73 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Innendichtung - LF 3 (sinkender Wasserspiegel)

Die anschließende Standsicherheitsüberprüfung der Einsatzvariante „Innendichtung“ ergab für die maßgebenden Lastfälle folgende Ergebnisse.

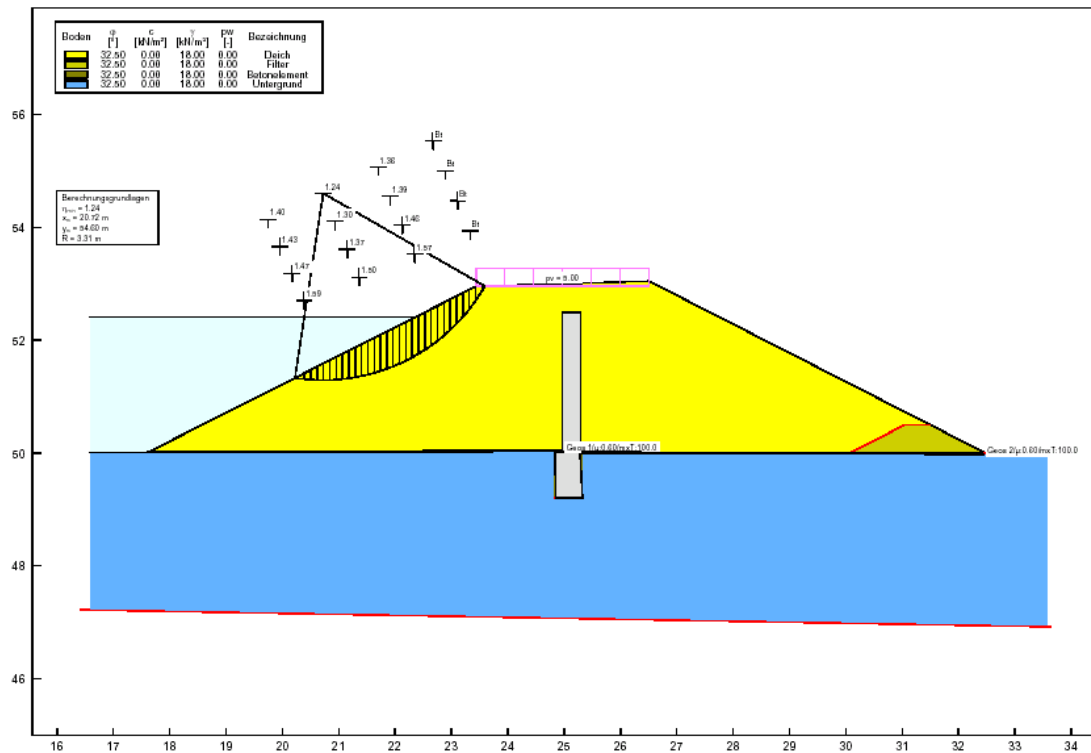


Abb. 74 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Innendichtung, LF 2, wasserseitige Böschung

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,24 \approx 1,3 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

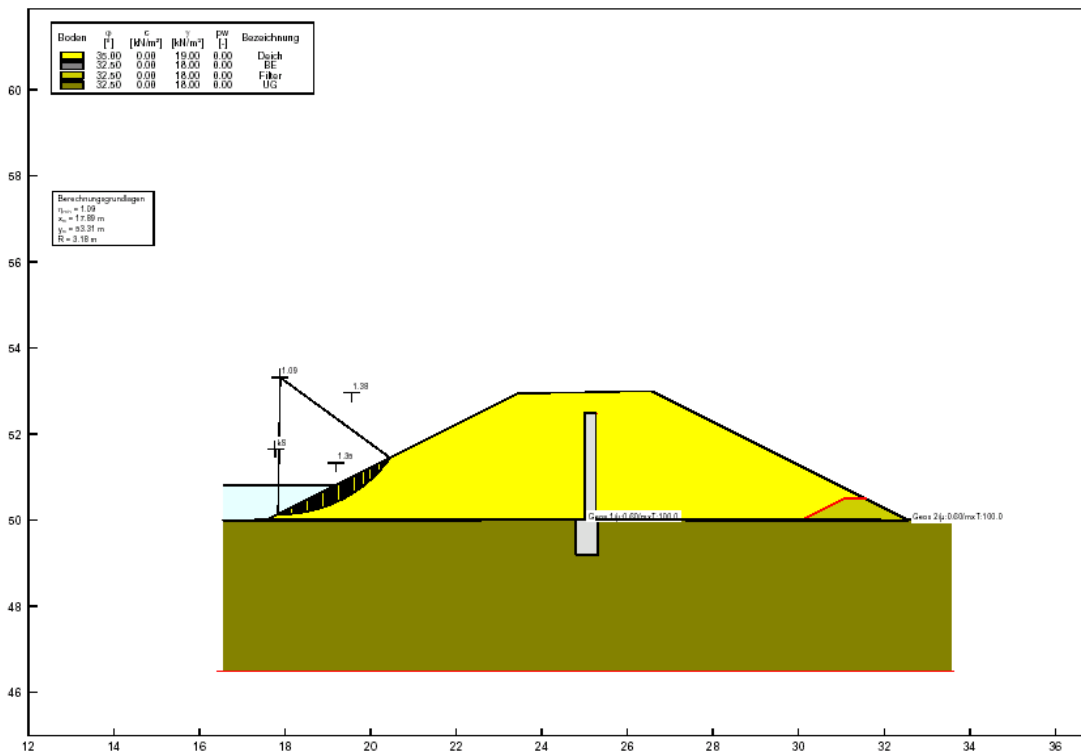


Abb. 75 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Innendichtung, LF 3, wasserseitige Böschung

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,09 \approx 1,2 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

### 5.5.3.4 Überlaufstrecke

Bei der Überlaufstrecke werden die Betonelemente direkt auf der gesamten Deichoberfläche (Böschungen und Krone) verlegt (vgl. Variante 3.1, Abschn. 5.3). Sie binden in die untergrundabdichtende Tonschicht ein. Die Fugen werden wasserdicht verschlossen. Die zu erwartende Sickerlinie mit den oben genannten Randbedingungen für die der Überlaufstrecke ist in der Abb. 76 dargestellt.

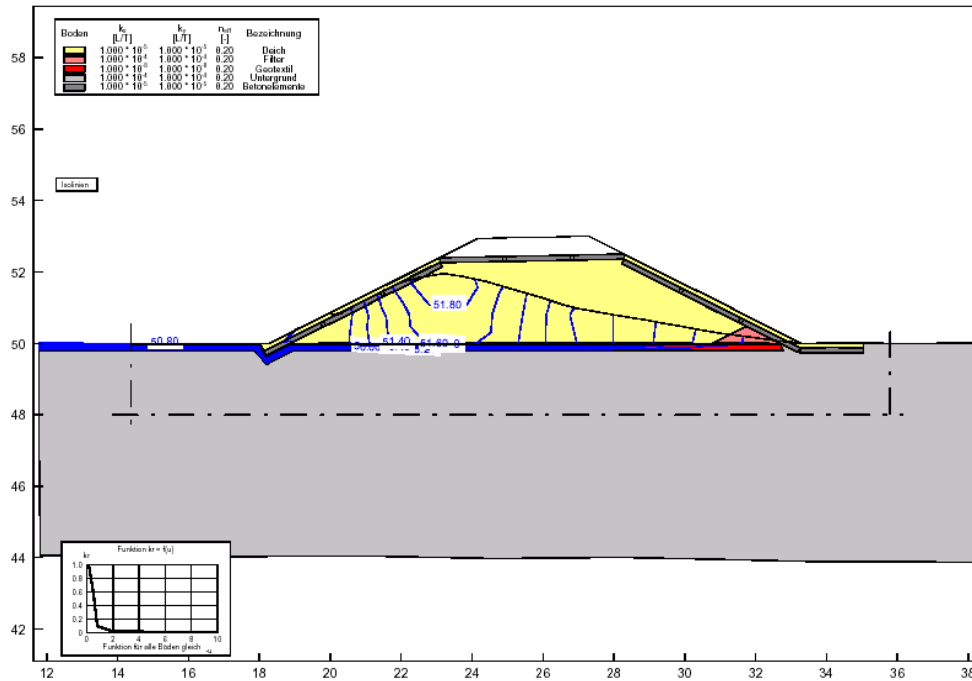


Abb. 76 : Berechnete Sickerlinie der Überlaufstrecke - LF 2 (BHW)

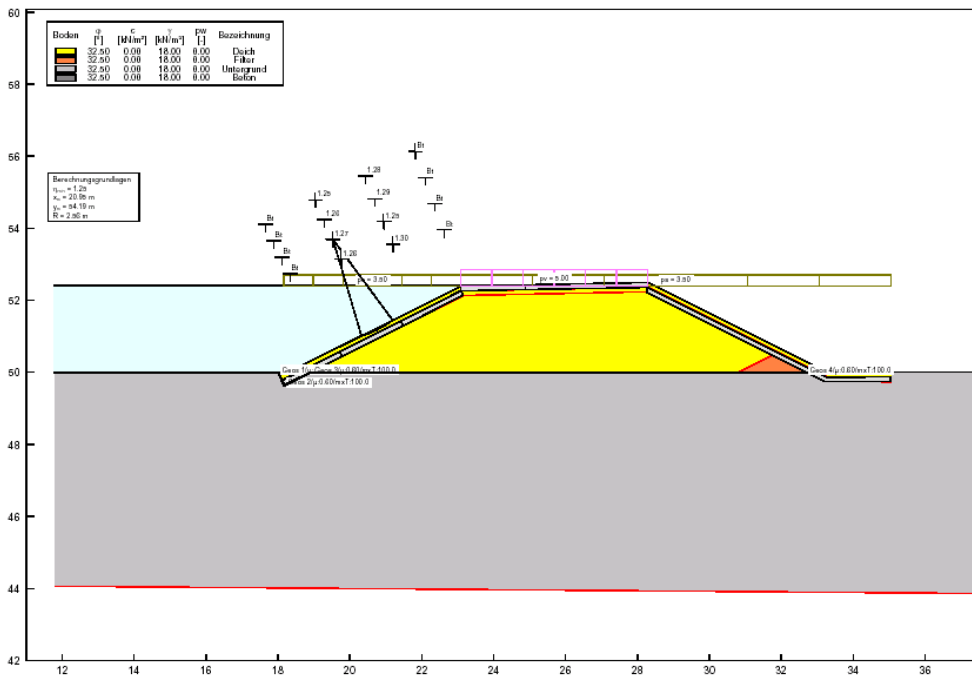


Abb. 77 : Standsicherheitsberechnung Überlaufstrecke, LF 3, Volleinstau

$$\eta_{\text{wasserseitig}} = 1,25 > 1,2 = \eta_{\text{erforderlich}}$$

### 5.5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tab. 21 sind die maßgebenden Ergebnisse der Standsicherheitsnachweise der einzelnen geplanten Versuchsvarianten zusammengestellt.

**Tab. 21:** Zusammenfassung der Ergebnisse zur Standfestigkeitsberechnung

Variante	Lastfall	nachgew. Sicherheit $\eta_{\text{ist}}$	erforderl. Sicherheit $\eta_{\text{soll}}$	$\eta_{\text{ist}} \geq \eta_{\text{soll}} ?$
<b>homogener Deich</b>	2	1,4	1,3	erfüllt
	3	1,14	1,2	erfüllt
<b>Oberflächendichtung</b>	2	1,24	1,3	erfüllt
	3	1,03	1,2	erfüllt
<b>Innendichtung</b>	2	1,24	1,3	erfüllt
	3	1,09	1,2	erfüllt
<b>Überlaufstrecke</b>	3	1,25	1,2	erfüllt

Die ermittelten Berechnungsergebnisse wurden zusätzlich von der Firma IHC GmbH eingeschätzt, bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft.

Die Standsicherheitsanforderungen konnten in allen Varianten des Versuchsaufbaues nach DIN V 4084 – 100 nachgewiesen werden (Lastfall 2:  $\eta=1,3$  und bei Lastfall 3:  $\eta=1,2$ ). Allerdings können aufgrund der Böschungsneigung von 1:2 lokale Instabilitäten an der wasserseitigen Böschung nicht ausgeschlossen werden. Um diesen Problemen entgegen zu wirken, kann durch geeignete Geogitter eine zusätzliche Stabilisierung erfolgen.

## 6 Wirtschaftliche Betrachtung des RC-Einsatzes<sup>97</sup>

Für die Bewertung wirtschaftlicher Konkurrenzfähigkeit der entwickelten Einsatzvarianten von rückgebauten Betonfertigteilen im Deichbau werden die Einsatzvarianten zunächst mit herkömmlichen Deichbautechnologien verglichen (s. Abschn. 6.1). Hiernach werden die für die Ausführung ausgewählten Betonfertigteile dargestellt und deren Transportkosten untersucht (s. Abschn. 6.2). Es folgt eine Baukalkulation mit und ohne Einsatz von Betonfertigteilen, basierend auf der Sirados - Baukostensoftware (s. Abschn. 6.3.1) sowie Konsultationen mit verschiedenen Vertretern planender und ausführender Unternehmen der Deichbaubranche. Anschließend werden die ermittelten Baukosten den Baukosten für vergleichbare Ausführungen ohne den Einsatz von Betonfertigteilen gegenübergestellt (s. Abschn. 6.3.4). Im Weiteren wird auf die Wirtschaftlichkeitsinstrumente Kostenvergleichsrechnung (s. Abschn. 6.4.1) sowie Kosten-Nutzen-Analyse eingegangen (s. Abschn. 6.4.2). Hierauf basierend folgt anschließend eine Schaden-Nutzen-Betrachtung (s. Abschn. 6.4.3).

Die Betrachtung hat zum Ziel, den Nachweis der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der entwickelten Deichbauvarianten zu erbringen.

### 6.1 Vergleich konventioneller und neu entwickelter Deichbauweisen<sup>98</sup>

Der Vergleich umfasst folgende Varianten:

- zwei Ausführungsvarianten für den Deichneubau im Vergleich mit einem herkömmlichen Drei-Zonen-Deich
- eine Ausführungsvariante für die Deichsanierung im Vergleich mit einer Verstärkung eines bestehenden Deiches
- Herstellung einer Überlaufstrecke aus Betonfertigteilen im Vergleich mit dem Neubau eines überströmbaren Deiches

Nachstehend sind die nötigen Arbeitsschritte in den Bauabläufen der verschiedenen Varianten nebeneinander gestellt. Diese Herangehensweise erlaubt eine Abschätzung des Mehr- und Minderaufwandes und damit auch der Mehr- und Minderkosten für die verschiedenen Einsatzvarianten. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Einsatzvarianten werden anschließend kurz zusammengefasst.

---

<sup>97</sup> Unter Verwendung von: Kania, G.: Wiederverwendung gebrauchter großformatiger Betonfertigelemente im Deichbau und bei der Deichsanierung, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2008, S. 65 ff..

<sup>98</sup> vgl. Mettke A., Czyganowski J.: Kostenabschätzung für den Einsatz rückgebauter Betonelemente (BE) im Deichbau, BTU Cottbus, 2005.

**Tab. 22:** Deichneubau - Drei-Zonen-Deich im Vergleich zu einem Deich mit Oberflächen- oder Innendichtung aus Betonfertigteilen

<b>Drei-Zonen-Deich</b>	<b>Deich mit Oberflächendichtung</b>	<b>Deich mit Innendichtung</b>
<b>Arbeitsschritte:</b> (zusätzliche Arbeitsschritte grau unterlegt)		
Vorbereitung des Untergrundes	Vorbereitung des Untergrundes	Vorbereitung des Untergrundes
Lagenweise Erstellen des Deichkörpers und Verdichten (Einbau verschied. Bodenmaterials: Dichtungsschicht, Stützkörper,	Lagenweise Erstellen des Deichkörpers (homogenes Material), inkl. Filter und Verdichten	Transport und Zwischenlagerung der Betonfertigteile
Begrünung der Deichoberfläche	Transport und Zwischenlagerung der Betonfertigteile	Errichten der Innendichtung (Streifenfundament, Stellen, Sichern der Betonfertigteile)
	Erstellen der Oberflächendichtung (Auflegen der Betonfertigteile, herstellen der Fugendichtung)	Lagenweise Erstellung des Deichkörpers (homogenes Material) beidseitig der Innendichtung
	Überdecken der Oberflächendichtung mit Deichmaterial (Einbau der Deckschicht)	Begrünung der Deichoberfläche
	Begrünung der Deichoberfläche	
<b>Vor- und Nachteile</b> (Vorteile grau unterlegt)		
	zusätzliche Arbeitsschritte, d.h. zusätzliche Kosten Transport der Betonfertigteile ist eine zusätzliche Kostenposition	
Deichquerschnitt von Bodenmaterial abhängig – Durchsickerung verhindern, d.h. flache Böschung mind. 1:3	höhere Standsicherheit, wegen geringerer Durchfeuchtung des Stützkörpers (steilere Böschungsneigung möglich, geringerer Platzbedarf, weniger Bodenmaterial)	
Gefährdung durch Erosion bei Überströmung und Suffosion bei Durchfeuchtung	Gefährdung durch Erosion bei Überströmung	zusätzliche Sicherheit bei Erosion nach Überströmung



**Tab. 23:** Deichsanierung: Sanierung eines Drei-Zonen-Deiches im Vergleich zum Aufbringen einer Oberflächendichtung aus Betonfertigteilen

Drei-Zonen-Deich mit nachträglicher Verstärkung	Deich mit nachträglicher Oberflächendichtung
<b>Arbeitsschritte:</b> (zusätzliche Arbeitsschritte grau unterlegt)	
Abtragen des Bewuchses	Abtragen des Bewuchses
Verdichtung des Deichkörpers	Verdichtung des Deichkörpers
Antransport des Bodenmaterials für Verstärkung	Transport und Zwischenlagerung der Betonfertigteile
Aufbringen zusätzlicher Verstärkung aus Bodenmaterial	Erstellen der Oberflächendichtung (Auflegen der Betonfertigteile, Fugenabdichtung)
Begrünung der Deichoberfläche	Antransport des Bodenmaterials für Überdeckung
	Überdecken der Oberflächendichtung mit Deichmaterial
	Begrünung der Deichoberfläche
<b>Vor- und Nachteile:</b> (Vorteile grau unterlegt)	
großer Bodenmaterialbedarf, um ähnliche Auflast wie durch Betonfertigteile zu erreichen	zusätzliche Arbeitsschritte, d.h. zusätzliche Kosten
Gefahr der Durchsickerung	höhere Standsicherheit, wegen geringer Durchfeuchtung des Stützkörpers
steigender Platzbedarf	gleich bleibender Platzbedarf

**Tab. 24:** Deichneubau und -sanierung: Überströmbarer Deich aus Bodenmaterial im Vergleich zu einer Überlaufstrecke aus Betonfertigteilen

Überströmbarer Deich mit einer flachen Böschung	Überlaufstrecke aus Betonfertigteilen
<b>Arbeitsschritte:</b> (zusätzliche Arbeitsschritte grau unterlegt)	
Neubau: Erstellen des Deichkörpers/ Sanierung: Erweitern des vorhandenen Deichkörpers	Erstellen des Deichkörpers
Sicherung des Deichfußes (z.B. Betonsteine)	Transport und Zwischenlagerung der Betonfertigteile
Begrünung der Deichoberfläche	Erstellen der Überlaufstrecke (Auflegen der Betonfertigteile, Fugenabdichtung)
	Überdecken der Überlaufstrecke mit Vegetationsträger
	Begrünung der Deichoberfläche
<b>Vor- und Nachteile:</b> (Vorteile grau unterlegt)	
wesentlich mehr Erdarbeiten und Bodenmaterial notwendig	zusätzliche Arbeitsschritte
großer Platzbedarf, da Neigung landseitiger Böschung 1:10 bis 1:20 empfohlen	gleich bleibender Platzbedarf
Gefahr von landseitiger Erosion	größere Sicherheit gegen Erosion bei Überströmung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in allen Ausführungsvarianten der Transport und die Zwischenlagerung der Betonfertigteile zusätzliche Kostenpositionen beim Einsatz der Betonfertigteile im Deichbau darstellen. Ein weiterer Kostenfaktor entsteht durch das Auflegen bzw. Einbauen der Betonfertigteile.

Der Einsatz von Betonfertigteilen im Deichbau bietet jedoch auch Vorteile. Da ein kleinerer Erdkörper benötigt wird, besteht ein wesentlich geringerer Platzbedarf für den Deich. Resultierend aus der geringeren Durchfeuchtung des Stützkörpers und der niedrigeren Erosions- und Suffosionsgefahr, werden sowohl eine höhere Standsicherheit als auch eine höhere Dauerhaftigkeit erreicht.

Um etwaige Nicht-Verfügbarkeit von Betonfertigteilen beim Zeitpunkt des Bauvorhabens zu vermeiden und damit dem Projekt zum Nachteil zu gereichen, ist es von größter Wichtigkeit in der Anfangsphase der Bauplanung, die Ressourcen an gebrauchten Betonfertigteilen zu erschließen (z.B. durch Koordination mit anstehenden Rückbaumaßnahmen oder durch Schaffung von Zwischenlagerplätzen).

## 6.2 Betrachtung der Betonfertigteile und ihrer Transportkosten

Wie in Kap. 6.1 festgestellt, stellt der Transport der Betonfertigteile einen Kostenfaktor dar. Um einen Überblick über dessen Höhe zu bekommen, wird zur Abschätzung der notwendigen Transportkosten - zur Erstellung einer Deichstrecke von 100 m mit einer Böschungsneigung von 1:2 - eine Überschlagskalkulation durchgeführt. Dieses geschieht in Abhängigkeit der Entfernung der Rückbaustelle bzw. dem Lagerplatz vom Einbauort.

Als Betonfertigteile sind Deckenplatten (DP) aus den Gebäudetypen WBS 70 und P 2 angesetzt worden. Die Anzahl dieser Elemente beträgt in einem 11-geschossigen WBS 70 Gebäude 307 Stück, in einem 5-geschossigen P2 Gebäude 132 Stück<sup>99</sup>. Die meisten Deckenplatten haben eine Länge von ca. 6 m, eine Breite von ca. 1,80 bzw. ca. 3 m und eine Dicke von 140 mm. Etwaig vorhandene Öffnungen und Aussparungen müssen verschlossen werden. Dies bedeutet jedoch zusätzliche Aufwendungen / Kosten und wird an dieser Stelle zwecks Vereinfachung nicht konkretisiert. Die angesetzten Betonfertigteile können des Weiteren aufgrund ihrer Geometrie ohne aufwendige und kostspielige Betonsägearbeiten verbaut werden<sup>100</sup>.

### Beispielrechnung:

- für die Oberflächendichtung (aus Elementen des Typs WBS 70, 20000) einer Deichstrecke von 100 m benötigt man:
  - $100 \text{ m} / 2.980 \text{ m} = 33,56 \text{ Elemente} \rightarrow \text{aufgerundet: } 34 \text{ Elemente}$
- für die Innendichtung (aus Elementen des Typs WBS 70, 20000) einer Deichstrecke von 100 m benötigt man:
  - $100 \text{ m} / 5.980 \text{ m} = 16,72 \text{ Elemente} \rightarrow \text{aufgerundet: } 17 \text{ Elemente}$

---

<sup>99</sup> <http://betonelemente.net/content/anwendungen.html> [eigene Entwicklung].

<sup>100</sup> nach Konsultation mit Herrn Dipl.-Ing. Opitz (DDC Dresden) liegen die Preise für Betonsägen (Sägetiefe 14 cm) bei 18 €/m. Hinzu kommen die Entsorgungskosten der Betonreste.

Die nachfolgenden Tabellen 25 und 26 geben einen Überblick über die Geometrie, die Masse sowie die benötigte Anzahl der Betonfertigteile je nach geplanter Ausführung und Anordnung.

**Tab. 25:** Geometrie, Masse und die benötigte Anzahl der Betonfertigteile

Betonfertigteile		WBS 70, 20000	WBS 70, 20020	WBS 70, 20040	P2, 21000
Geometrie [mm]	Länge	5.980	5.980	5.980	5.970
	Breite	2.980	2.980	1.780	1.785
	Dicke	140	140	140	140
Masse [kg]		5.872	5.902	3.418	3.536
Anzahl der Elemente für 100 m Deich- länge	Oberflächen- dichtung	34	34	x	x
	Innendichtung	17	17	x	x
	Überlaufstrecke	x	x	169	169

**Tab. 26:** Anordnung der Betonfertigteile in der jeweiligen Ausführung

	Oberflächendichtung	Innendichtung	Überlaufstrecke
WBS70: 20000 / 20020	hochkant nebeneinander auf Böschung	quer nebeneinander gereiht	x
WBS70: 20040 P2: 21000	x	x	je 1 DP hochkant auf was- serseitiger/landseitiger Böschung sowie Krone

Für den Transport sind insbesondere die Abmaße und das Gewicht der Betonfertigteile zu beachten. So ist beispielsweise für die Deckenplatten des Typs WBS 70 20000/20020 – aufgrund ihrer Abmaße von ca. 3,0 x 6,0 Metern - eine Überbreitengenehmigung für den deutschen Straßenverkehr erforderlich<sup>101</sup>.

#### Kalkulationsannahmen<sup>102</sup>:

- Transportdistanzen von 25 km, 100 km und 250 km, Ausgangspunkt - die Stadt Cottbus
- Zwei Angebote T1 und T2, eingeholt von Transportunternehmen<sup>103</sup>
  - Angebot T1 – Preise je Fahrt bzw. je km zuzgl. MwSt.
    - 25 km – 250 € / 10 €
    - 100 km – 350 € / 3,50 €
    - 250 km – 500 € / 2,00 €
    - die Be- und Entladezeit von jeweils 1 Stunde ist im Preis enthalten, eine Überschreitung führt zu Kostenerhöhung
  - Angebot T2 - Preise je Fahrt bzw. je km zuzgl. MwSt.

<sup>101</sup> nach § 22 Abs. 2 StVO dürfen Fahrzeug und Ladung nicht höher als 4 m und nicht breiter als 2,55 m sein. Wenn diese Abmessungen überschritten sind, können die Straßenverkehrsbehörden in bestimmten Einzelfällen oder allgemein für bestimmte Antragsteller Ausnahmen genehmigen (nach § 46 Abs. 1 Nr. 2 und 5 StVO).

<sup>102</sup> vgl. Lüdtko, M.: Kostenuntersuchungen zum Einsatz von Altbetonteilen anhand eines Referenzobjektes, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2007, S. 46 ff.

<sup>103</sup> für die Baukalkulation wird im Weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Mittel aus Angebot T1 und T2 errechnet und angewandt.

- 25 km – 250 € / 10 €
- 100 km – 480 € / 4,80 €
- 250 km – 850 € / 3,40 €
  - die Be- und Entladezeit von jeweils 1 Stunde ist ebenfalls im Preis enthalten, jede weitere angefangene halbe Stunde wird mit 30 € berechnet
- Für beide Angebote gilt eine Begrenzung der maximalen Zuladung von 25 Tonnen je Fahrt

**Beispielrechnung:**

- für die Oberflächendichtung (aus Elementen des Typs WBS70, 20000) einer Deichstrecke von 100 m benötigt man 34 Elemente
- bei 34 Elementen mit einer Einzelmasse von 5.872 kg ergibt sich die gesamt zu transportierende Masse zu 199,648 t
- bei der maximalen Zuladung von 25 Tonnen je Fahrt können 4 Elemente (Gesamtmasse 23,488 t) auf einmal transportiert werden
- damit ergibt sich die Anzahl der insgesamt zu absolvierenden Fahrten zu 9 Fahrten

Der nachfolgenden Tabellen 27 und 28 lassen sich die notwendige Fahrtenanzahl zur Erstellung der jeweiligen Deichvariante entnehmen sowie die hierzu notwendigen Transportkosten (in Abhängigkeit von dem verwendeten Plattentyp):

**Tab. 27:** Fahrtenanzahl in Abhängigkeit von Element – und Deichvariante

Betonfertigteil	Anzahl der BE pro Fahrt (25-tonner)	Anzahl der Fahrten (25-tonner)		
		Oberflächendichtung	Innendichtung	Überlaufstrecke
WBS 70, 20000	4	9	5	x
WBS 70, 20020	4	9	5	x
WBS 70, 20040	7	x	x	25
P2, 21000	7	x	x	25

**Tab. 28:** Transportkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Transporte und Entfernung – Angebot T1 und T2

	Fahrt-anzahl	Angebot T1 [€]			Angebot T2 [€]		
		25	100	250	25	100	250
Entfernung [km]	x	25	100	250	25	100	250
Preis pro Fahrt	x	250,00	350,00	500,00	250,00	480,00	850,00
Oberflächendichtung	9	2.250,00	3.150,00	4.500,00	2.250,00	4.320,00	7.650,00
Innendichtung	5	1.250,00	1.750,00	2.500,00	1.250,00	2.400,00	4.250,00
Überlaufstrecke	25	6.250,00	8.750,00	12.500,00	6.250,00	12.000,00	21.250,00

## 6.3 Baukalkulation

Auf Grundlage der im Abschn. 6.3.3 aufgeführten Baubeschreibung und unter Verwendung von Leistungspositionen und Baupreisen der sirAdos - Baukostensoftware (Version März 2008) sowie nach Konsultationen mit fachkundigen Ingenieuren erfolgt die Baukalkulation. Betrachtet werden hierbei drei verschiedene Einsatzvarianten von Betonfertigteilen im Deichbau:

- Deich mit Oberflächendichtung – Variante 1 (s. Abb. 78)
  - Deichstrecke von 100 m Länge, Deichquerschnitt von 3 m Höhe und 3 m Kronenbreite, Böschungsneigungen von 1:2

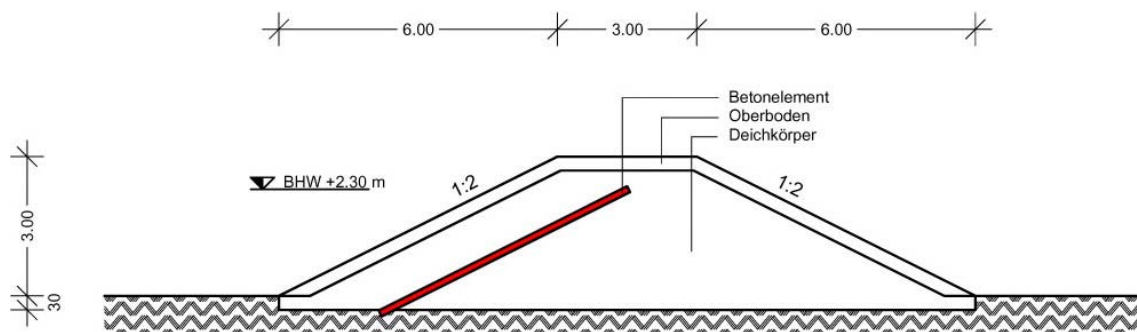


Abb. 78 : Variante 1: Oberflächendichtung aus Betonfertigteilen

- Deich mit Innendichtung – Variante 2 (s. Abb. 79)
  - Deichstrecke von 100 m Länge, Deichquerschnitt von 3 m Höhe und 3 m Kronenbreite, Böschungsneigungen von 1:2

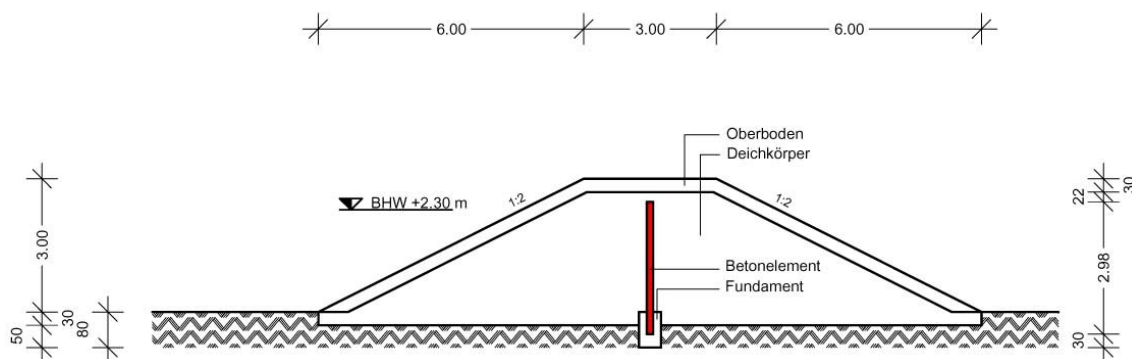
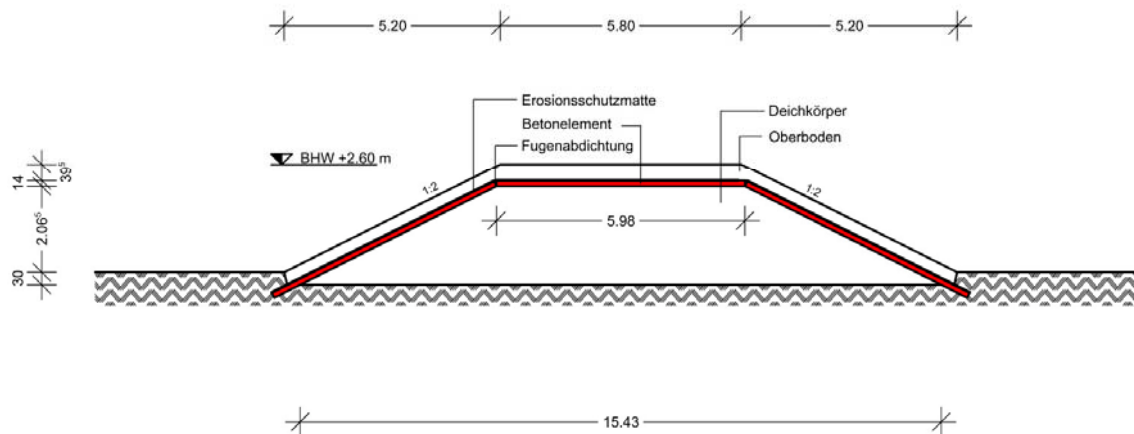


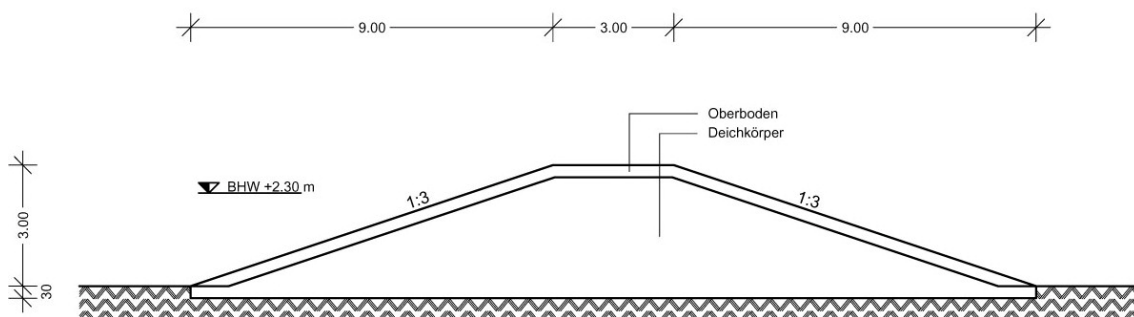
Abb. 79 : Variante 2: Innendichtung aus Betonfertigteilen

- Deich mit Überlaufstrecke – Variante 3 (s. Abb. 80)
  - Deichstrecke von 100 m Länge, Deichquerschnitt von 2,60 m Höhe und 5,80 m Kronenbreite, Böschungsneigungen von 1:2



**Abb. 80** : Variante 3: Überlaufstrecke aus Betonfertigteilen

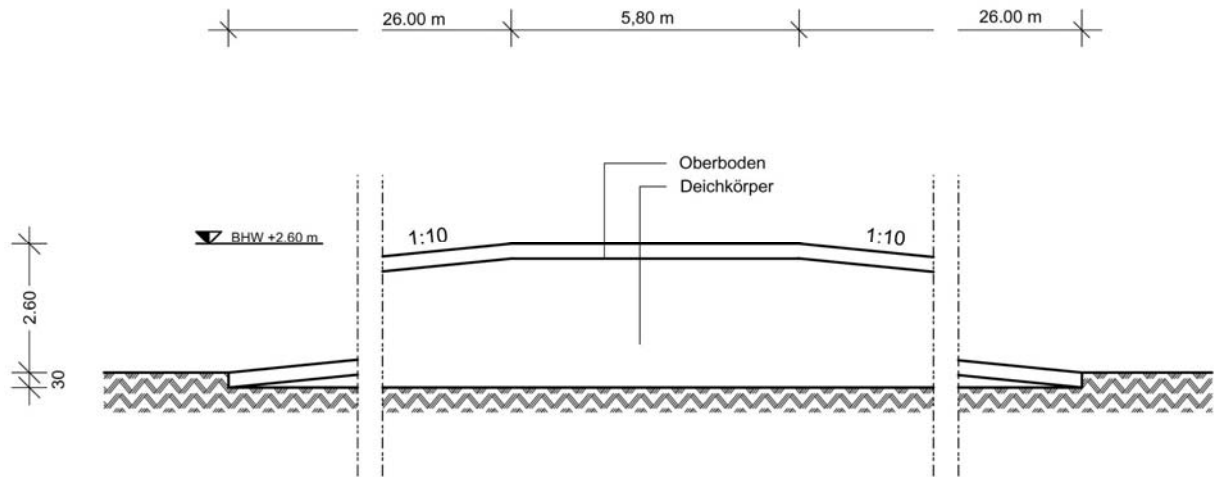
Als Vergleichsdeich für die Variante 1 und 2 wird ein konventioneller homogener Deich von 100 m Länge, 3 m Höhe, einer Kronenbreite von 3 m und einer Böschungsneigung von 1:3 kalkuliert (Variante I/II – s. Abb. 81).



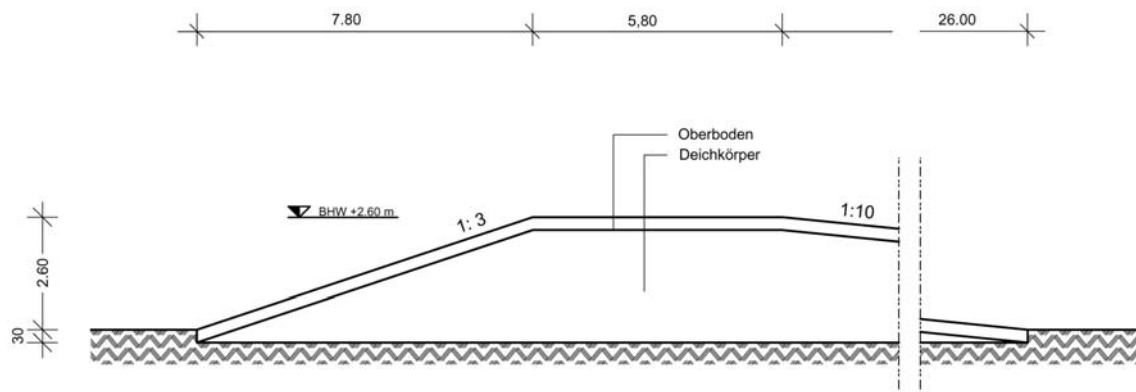
**Abb. 1:**

**Abb. 81** : Variante I/II.: Homogener Deich mit Böschungsneigung 1:3

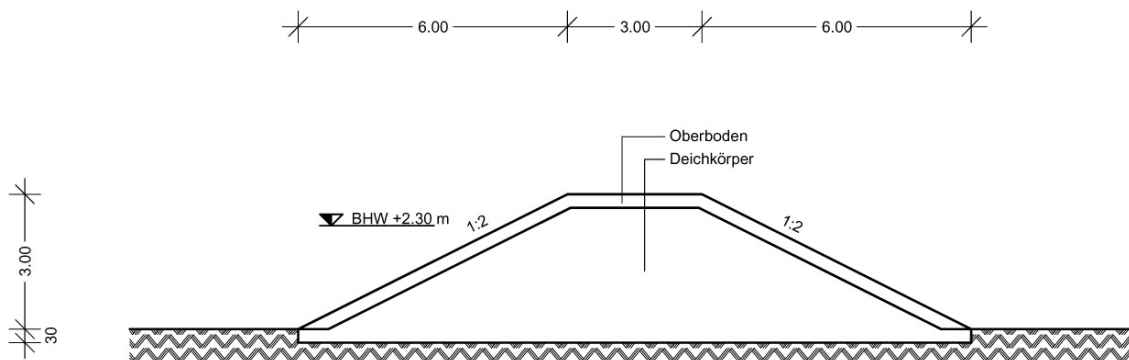
Der Vergleichsdeich für die Variante 3 umfasst eine homogene Überlaufstrecke von 100 m Länge, 2,60 m Höhe und 5,80 m Kronenbreite. Hierfür werden zwei Varianten kalkuliert, zum einen mit einer land- und wasserseitigen Böschungsneigung von 1:10 (Variante IIIa – Abb. 82), zum anderen mit einer landseitigen Böschungsneigung von 1:10 und einer wasserseitigen Böschungsneigung von 1:3 (Variante IIIb – Abb. 83).



**Abb. 82** : Variante IIIa: Homogene Überlaufstrecke mit land- und wasserseitiger Böschungsneigung 1:10 (Darstellung geschnitten)



**Abb. 83** : Variante IIIb: Homogene Überlaufstrecke mit einer landseitigen Böschungsneigung von 1:10 und einer wasserseitigen Böschungsneigung von 1:3 (Darstellung geschnitten)



**Abb. 84** : Variante 0: Homogener Deich mit Böschungsneigung 1:2

Des Weiteren wird analog zum Versuchsaufbau (s. Abschn. 8) ein homogener Deich von 100 m Länge, 3 m Höhe, einer Kronenbreite von 3 m und einer Böschungsneigung von 1:2 kalkuliert (Variante 0 – s. Abb. 84). Diese Variante wird für den der Baukostenermittlung anschließenden Variantenvergleich nicht herangezogen.

Bei den Varianten 1, 2 und I/II sowie 0 wird analog dem Versuchsaufbau ein Bemessungshochwasserstand BHW von 2,30 m, bei den Überlaufstrecken 3, IIIa und IIIb konstruktionsbedingt ein BHW von 2,60 m angenommen (die Betonfertigteile der Variante 3 wurden mit einer Oberbodenschicht überdeckt, um die Ausführungshöhe der Variante IIIa und IIIb zu erreichen).

Der Variantenvergleich erfolgt auf Basis einer Umrechnung pro laufenden Meter Deich.

### **6.3.1 sirAdos - Leistungspositionen und Baupreise**

Die sirAdos-Baukostensoftware und ihre Leistungsbereiche können als Grundlage für die Ausschreibung von Baumaßnahmen in den Bereichen Wohnungs- und Verwaltungsbau dienen. Sie stellen Informationen zur aktuellen Baupreissituation im gesamten Bundesgebiet zur Verfügung. Bei den Ausschreibungstexten handelt es sich um frei vorformulierte Standardtexte, die den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen und die Regelwerke neueren Datums berücksichtigen.

Die dokumentierten Baupreise sind durch die Auswertungen von Preisspiegeln (Nettopreise) aus dem gesamten Bundesgebiet ermittelt worden. Hierbei werden Preiseingänge aktueller Ausschreibungen bis ca. 3 Monate vor Erscheinungstermin der entsprechenden Version in die Datenbank eingegeben und berechnet<sup>104</sup>. Die so ermittelten Preise werden auf Plausibilität geprüft und als "von-mittel-bis"-Preise in Euro abgebildet. Preisabweichungen nach oben und unten sind möglich, dies ergibt sich u. a. aus:

- der Art und Lage der Baumaßnahme
- der Menge der Einzelleistung und der Gesamtgröße des Bauvorhabens
- dem vorgegebenen Zeitrahmen der Baumaßnahme
- der Auslastung von anbietenden Unternehmen sowie der örtlichen Wettbewerbssituation
- den Witterungsverhältnissen zum Ausführungstermin

Alle Baupreise verstehen sich entsprechend der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) als fertige Leistung inkl. Lohn und Material, ohne Mehrwertsteuer. Im Folgenden werden zunächst die für den konventionellen Deichbau relevanten Positionen samt ihrer Baupreise dargestellt. Die in Klammern befindliche Zahl stellt einen 10-stelligen sirAdos - Nummernschlüssel dar.

---

<sup>104</sup> damit entsprechen die im Folgenden aufgeführten Preise dem Stand vom Dezember 2007.



- **Kurztext:** **Baustelleneinrichtung, Standard (100005010)<sup>105</sup>**  
**ME:** psch / prozentueller Anteil an der Bauleistung  
**Preise:** Von 5 % Mittel 7,5 % Bis 10 %  
**Langtext:** Einrichten, Vorhalten über die vereinbarte Leistungszeit sowie Räumen der Baustelle und Wiederherstellen des Geländes einschl. Entfernen von Fundamenten und Verunreinigung, mit folgenden in den Pauschalpreis einzurechnenden Leistungen:  
- Freimachen des Baugeländes  
- Baustraßen, Bauwege  
- Lager- und Arbeitsplätze<sup>106</sup>
- **Kurztext:** **Baugelände abräumen, Schutt entsorgen, (102001070)**  
**ME:** m<sup>2</sup>  
**Preise:** Von 1,40 € Mittel 2,05 € Bis 2,80 €  
**Langtext:** Baugelände in zusammenhängender Fläche von lose umherliegenden Gegenständen (Steine, Mauerreste, Holzreste, Schutt usw.) säubern, unbrauchbares Material entsorgen.
- **Kurztext:** **Oberboden<sup>107</sup> abtragen, seitlich lagern, 30 cm (1002010010)**  
**ME:** m<sup>2</sup>  
**Preise:** Von 1,70 € Mittel 2,30 € Bis 3,20 €  
**Langtext:** Oberboden abtragen und nach Angabe der Bauleitung im Bereich der Baustelle in Mieten aufsetzen.  
Abtragsdicke: i. M. 30 cm  
Entfernung zur Lagerstelle: max. 50 m
- **Kurztext:** **Oberboden liefern, andecken (1002010325)**  
**ME:** m<sup>3</sup>  
**Preise:** Von 12,90 € Mittel 16,50 € Bis 20,50 €  
**Langtext:** Oberboden liefern, im Baustellenbereich verteilen und andecken. Oberbodenmaterial frei von sichtbaren Verunreinigungen, Steine > 5 cm, frei von Wurzelwerk, Unkräutern und Ästen mit Durchmesser über 2 cm.  
Auftragsdicke: i. M. 30 cm  
Förderweg: nach Planungsausführung

<sup>105</sup> bei dieser Position erfolgte nach Konsultation mit Herrn Dipl.-Ing. Opitz (DDC Dresden) eine Anpassung der Preise. Der Anteil der Baustelleneinrichtung liegt hiernach bei 5 bis 10 % der Gesamtbauleistung. Die sirAdos - Zahlen liegen hier bei 1.275,00 bis 5.470,00 € und beziehen sich auf den Neubau von freistehenden Wohnhäusern und kleineren Verwaltungs-, Produktions- und Lagerstätten.

<sup>106</sup> Die Betonelemente sind zur Baustelle zu transportieren und dort zwischenzulagern. Die für die Lagerung notwendigen Flächen sind in der Baustelleneinrichtung einkalkuliert.

<sup>107</sup> in der Literatur wird auch der synonyme Begriff Mutterboden verwendet. In dieser Arbeit wird zwecks Einheitlichkeit der Begriff Oberboden benutzt.

- **Kurztext: Oberboden andecken, gelagert 30 cm (1002010210)**

ME: m<sup>2</sup>

Preise: Von 2,30 € Mittel 3,10 € Bis 4,30 €

Langtext: Oberboden ab Lagerfläche im Baustellenbereich aufladen, transportieren und wieder andecken.

Abtragsdicke: i. M. 30 cm

Entfernung zur Lagerstelle: max. 50 m
- **Kurztext: Untergrund Böschung/Damm<sup>108</sup> verdichten (1002028390)**

ME: m<sup>2</sup>

Preise: Von 0,60 € Mittel 0,80 € Bis 1,20 €

Langtext: Untergrund verdichten für Böschung/Damm.

Verdichtungsgrad DPr: 97 %

Böschungs-/dammneigung: nach Ausführung

Verformungsmodul EV2: mind. 100 MN/m<sup>2</sup>

Bodenklasse: 3 bis 5
- **Kurztext: Boden Dämme (1002043300)**

ME: m<sup>3</sup>

Preise: Von 20,20 € Mittel 24,30 € Bis 29,50 €

Langtext: Bodeneinbau für Dämme, profilgerecht, mit Liefermaterial; maschineller Einbau in Lagen von max. 30 cm, einschl. lagenweisen Verdichten, Mengenermittlung nach Auftragsprofilen

Material: bindiger Boden der Bodenklasse 4

Verdichtungsgrad DPr: 97 %

Einbautiefe: bis 3,0 m
- **Kurztext: Oberboden begrünen (1002010540)**

ME: m<sup>2</sup>

Preise: Von 0,26 € Mittel 0,31 € Bis 0,36 €

Langtext: Mit Oberboden angedeckte Flächen maschinell oder per Hand begrünen Kahlflächen sind nachzusäen. Pflegearbeiten sind nicht erforderlich. Zu verwenden ist folgende Samenmischung:

  - 20 % Festuca rubra rubra
  - 20 % Festuca rubra com utata
  - 20 % Festuca ovia
  - 5 % Poa annua
  - 10 % Poa pratensis
  - 5% Agrostis tennius
  - 15 % Lolium perenne

<sup>108</sup> die sirAdos - Datenbank verwendet den Begriff Damm. Dieser Begriff wird dem Begriff Deich gleichgesetzt. Wasserwirtschaftlich gesehen ist ein Damm quer zur erwarteten Hauptströmung (Staudamm, Hochwasserschutzdamm) ausgerichtet, während ein Deich in der Regel entlang eines Gewässers (Flussdeich oder Uferdeich) ausgerichtet ist.

- 2 % Lotus corniculatus
- 2 % Medicago lupulina
- 1 % Chichorium intybum
- Samenmenge : 25 g/m<sup>2</sup>

Es folgen die relevanten Positionen für den Einbau der Betonfertigteile:

- **Kurztext: Fundamentaushub, Streifenf., Bkl.3-4, ents. (1002015045)**  
 ME: m<sup>3</sup>  
 Preise: Von 17,10 € Mittel 23,60 € Bis 28,90 €  
 Langtext: Boden ab Baugrubensohle für Streifenfundament profilgerecht lösen und laden, einschl. Herstellen des Planums der Sohle. Aushubmaterial entsorgen.  
 Förderweg: max 50 m  
 Aushubtiefe: bis 1,25 m
  
- **Kurztext: Fundamente C 20/25, Stb, gegen Erdreich (1013004150)**  
 ME: m<sup>3</sup>  
 Preise: Von 102,00 € Mittel 124,50 € Bis 153,00 €  
 Langtext: Fundamente aus Stahlbeton, als Einzel-, Streifen- oder Plattenfundamente, Frostriegel u. dgl., in verschiedenen Querschnitten auf Sauberkeitsschicht gegen Erdreich betonieren; mit Bewehrung<sup>109</sup>  
 Betongüte: C 20/25  
 Expositionsclassen: XC2
  
- **Kurztext: Autokran<sup>110</sup> (1017199110)**  
 ME: h  
 Preise: Von 136,50 € Mittel 153,30 € Bis 179,60 €  
 Langtext: Stundensatz für das Gerät, einschl. der Vorhaltekosten (Abschreibung und Verzinsung) sowie Betriebskosten (Betriebs- und Wartungstoffe, Reparaturkosten) und Lohnkosten für das Bedienungspersonal
  
- **Kurztext: Stundensatz Helfer, Erdarbeiten (1002097030)**  
 ME: h  
 Preise: Von 26,00 € Mittel 31,90 € Bis 36,60 €  
 Langtext: Arbeiten, die nicht in den Positionen erfasst sind und gegen Nachweis zur Ausführung kommen.
  
- **Kurztext: Stundensatz Vorarbeiter, Betonarbeiten (1013097020)**  
 ME: h  
 Preise: Von 33,10 € Mittel 37,30 € Bis 42,70 €  
 Langtext: Arbeiten, die nicht in den Positionen erfasst sind und gegen Nachweis zur Ausführung kommen.

<sup>109</sup> nach Konsultation mit Herrn Dipl.-Ing. Opitz (DDC Dresden) ist die Bewehrung bei den Preisen einkalkuliert.

<sup>110</sup> der Autokran soll die ca. 6 bzw. 3,5 t schweren Betonfertigteile zur Einbaustelle transportieren können.

- **Kurztext: Erosionsschutzgewebe, Jute, Böschung (1002078055)**
- ME: m<sup>2</sup>
- Preise: Von 2,60 € Mittel 4,10 € Bis 7,70 €
- Langtext: Erosionsschutzgewebe aus Jute, chemisch unbehandelt, offenmaschig, mit Drahtbügeln in Boden einbauen
- Maschenweiten: 18 x 11 cm
- Gewicht: 500 g/m<sup>2</sup>
- Neigung: 1 : 2
- Drahtbügel: 3 – 5 St/m<sup>2</sup>
- Bereich: Böschungssicherung

Für die Lagesicherung der Betonfertigteile bei der Variante 2 – Innendichtung - werden des Weiteren Montagestreben benötigt. Der Preis einer Strebe kann samt der Montage und späterer Demontage dieser mit 55 €<sup>111</sup> beziffert werden (nach Auskunft einer ortsansässigen Firma).

### 6.3.2 Fugenabdichtung

Die zu verdichtenden Fugen zwischen den Betonfertigteilen werden idealisiert als Quader betrachtet<sup>112</sup>. Analog zum Versuchsaufbau werden in der Kalkulation folgende Materialien zur Fugenabdichtung verwendet:

- **Orbit-Flex.B**

Orbit-Flex.B ist ein oberflächlich abdichtendes System. Es besteht aus PVC-Profilen (18 cm breit) mit einem flexiblen Mittelteil (Abb. 85). Die Abdichtungsprofile werden auf der Betonoberfläche mit einem Spezialkleber verklebt, die Wasserdichtigkeit entsteht hierbei durch die Verklebung.



**Abb. 85** : Orbit-Flex.B - Lichtgraues PVC-Profil (18cm breit) mit flexiblem Mittelteil<sup>113</sup>

<sup>111</sup> zum Vergleich: eine Richtstrebe des Herstellers Ischebeck mit Standard-Endgelenken und Pistolenstecker, zum schnellen Ausrichten und sicheren Halten von Betonfertigteilen kostet 61,65 € (ohne MwSt.), Quelle: [http://www.mercateo.com/p/174BA-9910210768/Richtstreben\\_TITAN\\_Typ\\_RS\\_Gr\\_2\\_Verstellbereich\\_170\\_290\\_cm.html](http://www.mercateo.com/p/174BA-9910210768/Richtstreben_TITAN_Typ_RS_Gr_2_Verstellbereich_170_290_cm.html), aufgerufen am 01.07.08.

<sup>112</sup> bei der Variante III – Deich mit Überlaufstrecke - ergeben sich die Fugen im Kronenbereich zudem als halbe Quader.

<sup>113</sup> [http://www.orbitsystem.de/bilder/prod\\_pics/flex\\_b\\_gross.jpg](http://www.orbitsystem.de/bilder/prod_pics/flex_b_gross.jpg), aufgerufen am 04.06.08.

Nach Angaben des Herstellers beträgt der Einbau inkl. Materialkosten (Profile und systembedingter Kleber) bei 16,90 €/lfdm<sup>114</sup>. Bei dieser Abdichtungsvariante werden die Betonfertigteile dicht an dicht angeordnet.

- **Brunnenschaum**

Brunnenschaum ist ein handelsübliches Abdichtungsmaterial auf Polyurethanbasis. Dieser wird beispielsweise beim Abdichten der Fugen (durch Ausschäumen) zwischen vorgefertigten Betonelementen (Brunnenringen) im Brunnenbau eingesetzt. Er weist eine Wasserdichtigkeit bis zu 0,8 bar auf (entsprechend einer Wassersäule von 8 m Höhe). Die im Handel erhältlichen 750 ml Brunnenschaumdosen weisen eine freigeschäumte Ausbeute von 35 bis 45 l. Die Preise für ein m<sup>3</sup> freigeschäumtes Material liegen bei 180 bis 312 €<sup>115</sup>. Bei dieser Abdichtungsvariante sollen die Betonfertigteile im Abstand von 2 cm angeordnet werden.

- **XYPEX- Beton**

XYPEX ist ein Material zur Herstellung wasserdichter Betonoberflächen. Es kann als Betonzusatzmittel (XYPEX - Admix) in den Fugenbeton eingebracht werden. Die Dichtung des Betons erfolgt über die Auskristallisation der XYPEX - Wirkstoffe in den Kapillaren oder entstandenen Rissen des Betons unter Einwirkung des Wassers. Bei einem Sickerwasserdurchbruch durch nachträglich entstandene Risse in den Fugen, werden diese damit durch Kristallisation wieder verschlossen. Nach Angaben des Herstellers (telefonisch am 13.05.08) liegt der Preis von XYPEX - Beton bei 166 €/m<sup>3</sup>. Bei dieser Abdichtungsvariante werden die Betonfertigteile im Abstand von 5 cm angeordnet.

- **Ton**

Bei dem ausgewählten Ton handelt es sich um eine DERNOTON® - Fertigmischung. Es ist eine einbaufertige Mischung aus DERNOTON® - Pulver und mineralischem Erdreich. Sie zeichnet sich durch Quellfähigkeit aus, wodurch kleine Beschädigungen wieder verschlossen werden können. Des Weiteren schrumpft sie nicht bei vollkommener Austrocknung und bleibt dicht. Nach Angaben des Herstellers (per Email, am 13.05.08) ist das Material bei Deichneubau und Deichsanierung erfolgreich eingesetzt worden (siehe Abb. 86). Der Preis für kleinere Mengen, wie sie in der folgenden Kalkulation benötigt werden, liegt bei 20 bis 25 €/m<sup>3</sup>. Bei dieser Abdichtungsvariante werden die Betonfertigteile im Abstand von 10 cm angeordnet.

---

<sup>114</sup> Orbit-System Preisliste von 04.05.08.

<sup>115</sup> eigene Recherche, 13.05.08.

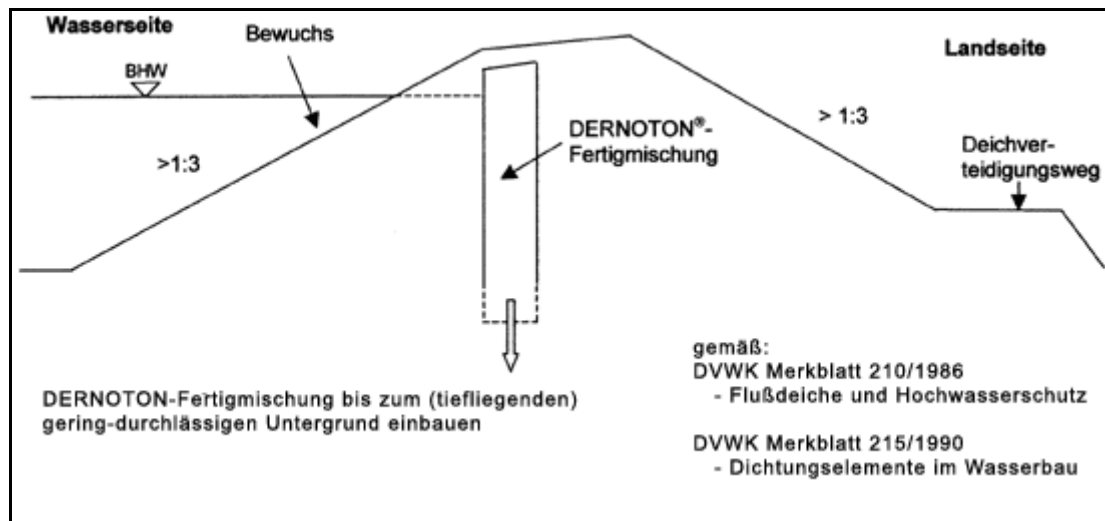


Abb. 86 : Grabenwand mit DERNOTON® -Fertigmischung als Kerndichtung für Erdstaudämme<sup>116</sup>

### 6.3.3 Baubeschreibung

Die Baubeschreibung erfolgt nach den Vorgaben gemäß der DIN 19 712 sowie nach einer Konsultation mit Frau Dipl.-Ing. Ronneberger und Herrn Dipl.-Ing. Zeuschner (beide Ingenieurbüro IHC – IPP Hydro Consult GmbH, Cottbus).

Grundsätzlich muss zunächst bei allen zu kalkulierenden Varianten das Baugelände abgeräumt werden. Dieses schließt die jeweilige Deichaufstandsfläche sowie eine jeweils 4 m breite Baustraße ein. Hierbei gilt es alle störenden Bodenarten und Hindernisse zu beseitigen sowie eventuell vorhandene Vertiefungen aufzufüllen. Im zweiten Schritt erfolgt der Oberbodenabtrag (i. M. 30 cm). Der Oberboden wird seitlich gelagert und samt dem neu anzuliefernden Oberboden zur späteren Andeckung (i. M. 30 cm) auf dem Deichkörper und der Baustraße verwendet. Der Untergrund des Deichlagers muss vor Erstellung des Deichgrundkörpers gut verdichtet werden, um Setzungen durch die Eigenlast des Deichkörpers zu verhindern. Der Deichgrundkörper soll aus homogenem Bodenmaterial (Bodenklasse 4: mittelschwer lösbar Bodenarten) hergestellt - der maschinelle Bodeneinbau erfolgt in Lagen von max. 30 cm, einschl. lagenweisen Verdichtens - und anschließend begrünt werden.

Beim Aufbau aller Varianten ist der Filterfuß vereinfachend nicht berücksichtigt worden.. Bei einem Deich mit einer Böschungsneigung von 1:3 und flacher ist jedoch davon auszugehen dass, das zu verbauende Filtermaterial gleiches bzw. größeres Volumen besitzt als bei einem Deich mit einer Böschungsneigung von 1:2<sup>117</sup>.

In den Tab. 29 und 30 findet sich eine Zusammenstellung aller bodentechnischen Maßnahmen und ihrer Mengen zur Erstellung der Deiche unter Verwendung von Betonfertigteilen<sup>118</sup> bzw. der Vergleichsdeiche:

<sup>116</sup> <http://www.dernoton.de/dernoton/deich/info023.htm>, aufgerufen am 04.07.08.

<sup>117</sup> nach Konsultation mit Herrn Dipl.-Ing. Opitz (DDC Dresden), bei Volumengleichheit heben sich die Positionen in der Bilanz gegeneinander auf.

<sup>118</sup> die Tab. 37 berücksichtigt das jeweils einzubauende Volumen der Betonfertigteile

**Tab. 29:** Notwendige Bodenmengen / Maßnahmen pro laufenden Meter Deich – Deiche mit Betonfertigteilen

	<b>Var. 1</b> Deich mit Oberflächendichtung	<b>Var. 2</b> Deich mit Innendichtung	<b>Var. 3</b> Deich mit Überlaufstrecke
Baugelände- abräumung [m <sup>2</sup> /m]	19	19	20,2
Oberbodenabtrag [m <sup>2</sup> /m]	19	19	20,2
Oberboden- anlieferung /- andeckung [m <sup>3</sup> /m]	0,42	0,42	0,94
Oberboden- andeckung [m <sup>2</sup> /m]	19	19	20,2
Untergrund- verdichtung [m <sup>2</sup> /m]	15	15	16,2
Boden für den Deichgrundkörper [m <sup>3</sup> /m]	26,16	26,5	25,26
Oberboden- begrünung [m <sup>2</sup> /m]	20,4	20,4	21,4

**Tab. 30:** Notwendige Bodenmengen / Maßnahmen pro laufenden Meter Deich - Vergleichsdeiche

	<b>Var. 0</b> Homogener Deich (1:2)	<b>Var. I/II</b> Homogener Deich (1:3)	<b>Var. IIIa</b> Homogener Deich (1:10)	<b>Var. IIIb</b> Homogener Deich (1:10 landseitig, 1:3 wasserseitig)
Baugelände- abräumung [m <sup>2</sup> /m]	19	25	61,6	43,6
Oberbodenabtrag [m <sup>2</sup> /m]	19	25	61,8	43,6
Oberboden- anlieferung /- andeckung [m <sup>3</sup> /m]	0,42	0,3	0,078	0,15
Oberboden- andeckung [m <sup>2</sup> /m]	19	25	61,8	43,6
Untergrund- verdichtung [m <sup>2</sup> /m]	15	21	57,8	39,6
Boden für den Deichgrundkörper [m <sup>3</sup> /m]	27	36	82,68	59,02
Oberboden- begrünung [m <sup>2</sup> /m]	20,4	26	62,06	44,1

### 6.3.3.1 Deich mit Oberflächendichtung

Die Ausführung des Deichgrundkörpers soll in einer Höhe von 2,30 m erfolgen. Die geplante Deichhöhe von 3 m wird durch eine spätere Überdeckung der Oberflächendichtung und der Krone mit Bodenmaterial erreicht. Die Böschungen des Deichgrundkörpers sind zu verdichten und glatt abzuziehen. Die Betonfertigteile (Deckenelemente des Typs WBS70/11 - Rastermaße von 5,98 m x 2,98 m x 0,14 m, Gewicht 5,872 bis 5,902 t) werden hochkant nebeneinander als Oberflächendichtung (2 Deckenelemente für 6 lfdm Deich) direkt auf der hergestellten wasserseitigen Böschung des Deichgrundkörpers verlegt und binden in den Untergrund ein. Der Abstand zwischen den aufgelegten Betonfertigteilen soll je nach der Art des Abdichtungsmaterials 2 cm (Brunnenschaum, Fugenvolumen 0,006 m<sup>3</sup>/lfdm), 5 cm (XYPEX-Beton, Fugenvolumen 0,014 m<sup>3</sup>/lfdm) bzw. 10 cm (Ton, Fugenvolumen 0,028 m<sup>3</sup>/lfdm) betragen. Für das Anheben und das Auflegen der Betonfertigteile werden für 6 lfdm Deich 2 Arbeitskräfte (Helfer, Erdarbeiten) á 1,0 h, sowie 1 Autokran (ca. 1,0 h) benötigt. Für das Schließen der Fugen werden für 6 lfdm Deich (ca. 12 m Fugenabdichtung) 2 Arbeitskräfte (Vorarbeiter, Betonarbeiten) á 1,0 h veranschlagt.

### 6.3.3.2 Deich mit Innendichtung

Der Aufbau der Innendichtung soll aus einzelnen Betonfertigteilen (Deckenelemente des Typs WBS70/11 - Rastermaße von 5,98 m x 2,98 m x 0,14 m, Gewicht 5,872 bis 5,902 t) erfolgen. Die Elemente sollen senkrecht quer aneinander gereiht, entlang der Deichachse eingebracht werden (2 Deckenelemente für 12 lfdm Deich). Die 3 m hohen Betonfertigteile sollen 50 cm in ein Fundament eingebunden werden und reichen bis 52 cm unter Oberkante Deichkrone.

- **Aushub des Streifenfundamentes und Betonieren von Fundamentstreifen**

Der Aushub des Streifenfundament soll profilgerecht erfolgen (Breite x Tiefe = 0,5 m x 0,8 m). Die maximale Grabtiefe ohne Verwendung von Stützflüssigkeit hängt dabei vom anstehenden Erdstoff ab. Gegebenenfalls muss der Graben unter Verwendung einer Stützflüssigkeit (Bentonit) hergestellt werden. In den Fundamentgraben wird ein Bewehrungskorb eingebaut und die erste Schicht des Streifenfundamentes von 0,3 m Höhe betoniert. Nach Erhärtung dient sie der Verteilung der Lasten – resultierend aus den eingestellten Betonfertigteilen.

- **Einstellen der Betonelemente und Lagesicherung, Betonieren des Fundamentes und Fugenabdichtung**

Die Deckenelemente sollen mit einem Autokran aneinander gereiht senkrecht in die Mitte des Fundamentgrabens auf den Fundamentstreifen gesetzt und seitlich mit höhenverstellbaren Streben abgestützt werden (4 Streben pro Betonfertigteil)<sup>119</sup>. Für das Anheben und Ausrichten der Elemente werden für 12 lfdm Deich 2 Arbeitskräfte (Helfer, Erdarbeiten) á 1,0 h sowie ein Autokran (ca. 1,0 h) veranschlagt. Der Abstand zwischen den aufgestellten Betonfertigteilen soll je nach der Art des Abdichtungsmaterials 2 cm (Brunnenschaum, Fugenvolumen 0,0013 m<sup>3</sup>/lfdm), 5 cm (XYPEX-Beton,

<sup>119</sup> zwei jeweils nebeneinander stehende Betonfertigteile sollten zusätzlich an der Oberkante mit U-Profilen miteinander verbunden werden.



Fugenvolumen  $0,0034 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ ) betragen. Für die Fugenabdichtung mit Brunnenschaum und XYPEX-Beton werden für 12 lfdm Deich (ca. 6 m Fugenverdichtung) eine Arbeitskraft (Vorarbeiter, Betonarbeiten) á 1,0 h kalkuliert. Bei der Verwendung von Orbit-Flex.B – Dichtungsprofilen sollen die Betonfertigteile dicht an dicht gestellt werden (Fugenlänge  $0,48 \text{ m}/\text{lfdm}$ ). Ihr Einbau erfolgt durch den Hersteller und wird gesondert abgerechnet.

Anschließend sollen die beiden Seiten zwischen Betonfertigteilen und Grabenwand des Streifenfundamentes mit Beton vergossen werden. Hierbei stellt der Bewehrungskorb eine kraftschlüssige Verbindung zwischen dem vorher erstellten Fundamentstreifen und den Seitenwandungen her. Für das Betonieren des Schlitzes (Fundamentgraben) kann ein schnell erhärtender Beton C 20/25 verwendet werden. Nach Erhärtung des Fundamentes und Entfernung der Streben kann beidseitig der Innendichtung mit lageweiser Erstellung und Verdichtung des Deichkörpers begonnen werden.

An dieser Stelle soll auf die Problematik dieser Einbautechnologie eingegangen werden. Zum einem wird es technologisch problematisch sein, die Arbeitsschritte Oberbodenabtrag und Fundamentaushub samt den anschließendem Einbau der Betonfertigteile in Einklang zu bringen. Wird dieses Problem zufriedenstellend gelöst, ergibt sich ein Weiteres. Im Zuge des Bodeneinbaus und der lageweisen Verdichtung nähert man sich immer wieder unmittelbar den eingestellten Platten an. An den Randbereichen der Platte wird daher eventuell keine ausreichende Bodenverdichtung erreicht werden können. Der Arbeitsschritt lageweises Verdichten verursacht zudem enorme Vibrationen, die sich auf die Standsicherheit der eingestellten Platten auswirken können.

### **6.3.3.3 Deich mit Überlaufstrecke**

Für diese Variante werden Deckenplatten des Typs P2 (Rastermaße von  $5,97 \text{ m} \times 1,785 \text{ m} \times 0,14 \text{ m}$ , Gewicht  $3,536 \text{ t.}$ ) angesetzt. Die Ausführung ist analog zur Oberflächendichtung zu erstellen, wobei die Deckenelemente hochkant auf den Böschungen (in den Untergrund einbindend) sowie auf der Krone aufzulegen sind (9 Elemente für ca. 5,5 lfdm Deich). Der Abstand zwischen den Elementen soll  $5 \text{ cm}$  betragen. Für das Anheben und Auflegen der Betonfertigteile werden für 5,5 lfdm Deich 2 Arbeitskräfte (Helfer, Erdarbeiten) á 4,5 h sowie 1 Autokran (ca. 4,5 h) veranschlagt. Die Fugenabdichtung erfolgt in dieser Variante ausschließlich mit XYPEX-Beton (Fugenvolumen  $0,05 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ ). Hierfür werden für 5,5 lfdm Deich (ca. 43 m Fugenverguss) 2 Arbeitskräfte (Vorarbeiter, Betonarbeiten) á 3,5 h kalkuliert. Zur Fixierung des anschließend auf die Elemente aufzubringenden Oberbodens soll auf den Betonoberflächen ein Erosionsschutzgewebe befestigt werden (ca.  $18 \text{ m}^2/\text{lfdm}$ ). Werden die Betonfertigteile auf der Krone nicht mit Oberboden als Vegetationsschicht überdeckt, so liegen sie direkt an der Oberfläche und können die Funktion einer Oberschicht von Rad- und Gehwegen übernehmen.

### 6.3.4 Baukostenermittlung und -vergleich

In den nachstehen Tab. 31 und Tab. 32 erfolgt die Zusammenstellung der ermittelten Baukosten (pro lfdm) der verschiedenen untersuchten Varianten.<sup>120</sup>

**Tab. 31:** Zusammenstellung der Kosten für homogenen Deich, Deich mit Oberflächen- und Innendichtung

Variante	Fugenabdichtung	Kosten pro lfdm	Transportentfernung (BE) [km]	Preis pro lfdm		
				von	mittel	bis
<b>Var. 0</b> homogener Deich (1:2)	x	x	x	701,11 €	884,62 €	1.128,77 €
<b>Var. I/II</b> homogener Deich (1:3)	x	x	x	929,70 €	1.172,67 €	1.496,23 €
<b>Var. 1</b> Deich mit Oberflächen- dichtung (1:2)	Ton	11,59 bis 14,93 €	25	752,08 €	939,81 €	1.189,03 €
			100	756,97 €	950,06 €	1.205,09 €
			250	771,15 €	975,21 €	1.241,72 €
	XYPEX-Beton	13,35 bis 16,55 €	25	753,93 €	941,63 €	1.190,82 €
			100	758,83 €	951,88 €	1.206,88 €
			250	770,85 €	974,87 €	1.241,34 €
	Brunnenschaum	12,11 bis 16,10 €	25	752,62 €	940,72 €	1.190,32 €
			100	757,52 €	950,97 €	1.206,38 €
			250	771,69 €	976,12 €	1.243,01 €
<b>Var. 2</b> Deich mit Innendichtung (1:2)	Orbit-Flex.B	16,90 €	25	857,79 €	1.056,17 €	1.317,40 €
			100	862,77 €	1.064,56 €	1.329,31 €
			250	870,24 €	1.077,93 €	1.348,85 €
	XYPEX-Beton	3,32 bis 4,12 €	25	852,76 €	1.051,40 €	1.313,01 €
			100	858,01 €	1.060,27 €	1.325,66 €
			250	865,89 €	1.074,24 €	1.346,01 €
	Brunnenschaum	2,99 bis 3,97 €	25	852,41 €	1.051,13 €	1.312,83 €
			100	857,66 €	1.060,00 €	1.325,48 €
			250	865,54 €	1.073,98 €	1.345,83 €

<sup>120</sup> detaillierte Rechenblätter in: Kania, G.: Wiederverwendung gebrauchter großformatiger Betonfertigelemente im Deichbau und bei der Deichsanierung, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2008, Anhang A.

**Tab. 32:** Zusammenstellung der Kosten für Überlaufstrecken

Variante	Fugenabdichtung	Kosten / lfdm	Transportentfernung (BE) [km]	Preis pro lfdm		
				von	mittel	bis
<b>Var. IIIa</b> homogene Überlaufstrecke (1:10)	x	x	x	2.158,46 €	2.726,52 €	3.485,79 €
<b>Var. IIIb</b> homogene Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig 1:3)	x	x	x	1.538,05 €	1.942,34 €	2.482,31 €
<b>Var. 3</b> Überlaufstrecke mit Betonelementen (1:2)	XYPEX-Beton	50,43 bis 62,65 €	25	1.008,73 €	1.256,80 €	1.617,25 €
			100	1.034,98 €	1.301,14 €	1.680,50 €
			250	1.074,36 €	1.371,01 €	1.782,25 €

In den Tab. 33, 34 und 35 erfolgt die Zusammenstellung der reinen Baukostensparnisse gegenüber der jeweiligen Vergleichsvariante (s. Abschn. 6.3):

**Tab. 33:** Zusammenstellung der Baukostensparnis für Deich mit Oberflächen- bzw. Innendichtung gegenüber homogenen Deich (1:3)

Variante	Fugenabdichtung	Transportentfernung (BE) [km]	prozentuelle Ersparnis		
			von	mittel	bis
<b>Var. 1</b> Deich mit Oberflächendichtung (1:2)	Ton	25	19,11 %	19,86 %	20,53 %
		100	18,58 %	18,98 %	19,46 %
		250	17,05 %	16,84 %	17,01 %
	XYPEX-Beton	25	18,91 %	19,70 %	20,41 %
		100	18,38 %	18,83 %	19,34 %
		250	17,09 %	16,87 %	17,04 %
	Brunnenschaum	25	19,05 %	19,78 %	20,45 %
		100	18,52 %	18,91 %	19,37 %
		250	17,00 %	16,76 %	16,92 %
<b>Var. 2</b> Deich mit Innendichtung (1:2)	Orbit-Flex.B	25	7,73 %	9,94 %	11,95 %
		100	7,20 %	9,22 %	11,16 %
		250	6,40 %	8,08 %	9,85 %
	XYPEX-Beton	25	8,28 %	10,34 %	12,25 %
		100	7,71 %	9,59 %	11,40 %
		250	6,86 %	8,39 %	10,04 %
	Brunnenschaum	25	8,31 %	10,36 %	12,26 %
		100	7,75 %	9,61 %	11,41 %
		250	6,90 %	8,42 %	10,05 %

**Tab. 34:** Zusammenstellung der Baukostensparnis gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig 1:3)

Variante	Transportentfernung (BE) [km]	prozentuelle Ersparnis		
		von	mittel	bis
<b>Var. 3</b> Überlaufstrecke mit Betonelementen (1:2)	25	34,41%	35,29%	34,85%
	100	32,71%	33,01%	32,30%
	250	30,15%	29,41%	28,20%

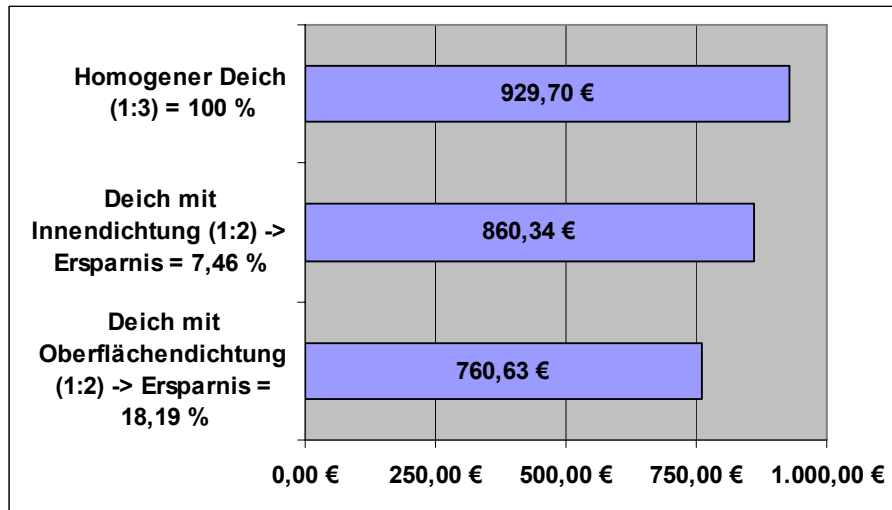
**Tab. 35:** Zusammenstellung der Baukostensparnis gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (1:10)

Variante	Transportentfernung (BE) [km]	prozentuelle Ersparnis		
		von	mittel	bis
<b>Var. 3</b> Überlaufstrecke mit Betonelementen (1:2)	25	53,27%	53,90%	53,60%
	100	52,05%	52,28%	51,79%
	250	50,23%	49,72%	48,87%

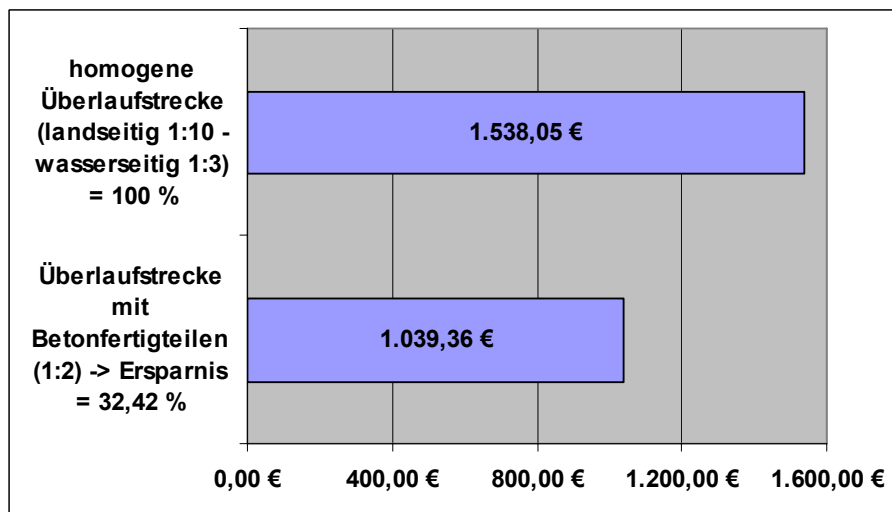
Bei den konventionellen Überlaufstrecken müssen nach Abschn. 3.1.5.4 sowohl an der Krone, an der Böschung und am Deichfuß starke Schutzvorkehrungen getroffen werden. Diese Maßnahmen - die in die Baukalkulation nicht eingeflossen sind - sind sehr aufwendig und erhöhen bei den Varianten IIIa und IIIb zusätzlich die Kosten. Würden Sie einkalkuliert werden, würde die Baukostensparnis noch größer sein und die Bilanz im Sinne dieser Betrachtung noch positiver ausfallen.

Wie aus den vorstehenden Tabellen ersichtlich ist, liegen die Baukosten, unabhängig von der Art des Dichtungsmaterials und der Transportentfernung der Betonfertigteile relativ nah beieinander. Für weitere Betrachtungen wird daher jeweils für die Varianten 1, 2 und 3 ein arithmetisches Mittel aus dem unteren Preisdrittel („von“-Preise)<sup>121</sup> errechnet und dem unteren Preisniveau für die Varianten I/II, IIIa und IIIb gegenübergestellt. Diese Preise - samt den zugehörigen Baukostensparnissen - können den Abb. 87 bis 89 entnommen werden:

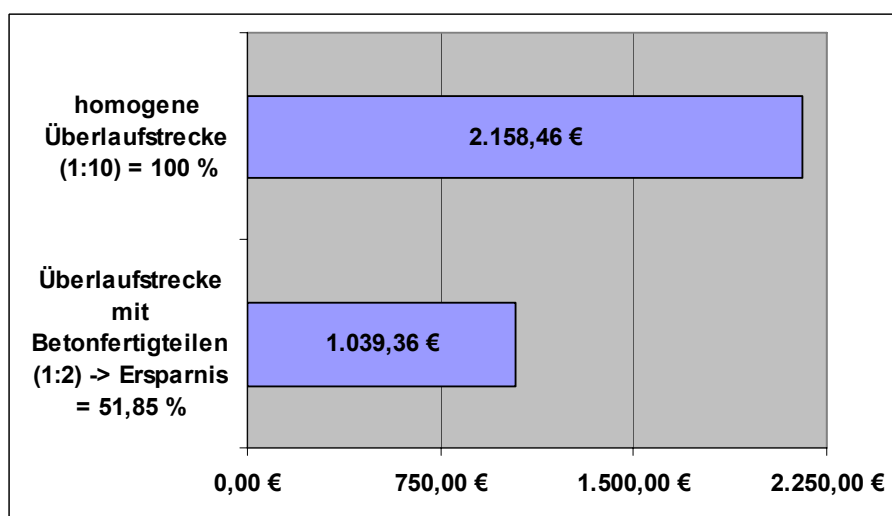
<sup>121</sup> nach Übereinstimmender Auskunft von befragten fachkundigen Vertretern planender und bauausführender Unternehmen ist bei den sirAdos - Preisen - auf denen die Baukalkulation größtenteils beruht - marktrealistisch eher das untere Drittel anzunehmen.



**Abb. 87** : Baukosten und Ersparnispotenzial für Deich mit Oberflächen- bzw. Innendichtung mit RC-Bauteilen



**Abb. 88** : Baukosten und Ersparnispotenzial für die Überlaufstrecke mit RC-Bauteilen gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig 1:3)



**Abb. 89** : Baukosten und Ersparnispotenzial für die Überlaufstrecke mit RC-Bauteilen gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (1:10)

Bei allen kalkulierten Varianten unter Einsatz von rückgebauten Betonfertigteilen kann somit eine Baukostensparnis im Vergleich zu konventionellen Varianten nachgewiesen werden. Diese beträgt bei der Ausführungsvariante 1 Deich mit Oberflächendichtung 18,2 %, bei der Ausführungsvariante 2 Deich mit Innendichtung 7,5 %. Bei der Ausführungsvariante 3 Deich mit Überlaufstrecke liegen die Baukostensparnisse bei 32,4 % bzw. 51,9 %, je nachdem welche konventionelle Überlaufstrecke zum Vergleich herangezogen wird.

## **6.4 Kostenvergleich und Kosten-Nutzen-Betrachtungen**

Die öffentliche Verwaltung als Träger von Hochwasserschutzmaßnahmen handelt nach zwei wichtigen Grundsätzen, der Wirtschaftlichkeit und der Sparsamkeit. In der Zeit immer knapper werdender Haushaltsmittel müssen diese Grundsätze bei der Entwicklung, dem Ausbau und der Sanierung wasserwirtschaftlicher Infrastruktur beachtet werden. Im Fokus der öffentlichen Verwaltung steht daher die bestmögliche Verwendung von vorhandenen Mitteln. Dieses Ziel erreicht man nur, wenn die zur Entscheidung stehenden Projekte auf Grund transparenter und nachvollziehbarer Methoden bewertet werden können.

### **6.4.1 Kostenvergleichsrechnung**

Ein bedeutendes und modernes Instrumentarium bei dem Effizienz und Qualitätssicherung eine zentrale Rolle spielen, ist die Kostenvergleichsrechnung. Auf der Suche nach kostengünstigen Lösungen für wasserwirtschaftliche Probleme ermöglicht sie eine systematische und verifizierbare Darstellung der Alternativen. Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat in ihrem Arbeitskreis „Nutzen-Kosten-Untersuchungen in der Wasserwirtschaft“ die „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)“ ausgearbeitet (LAWA 2005). Für die Auswahl der kostengünstigsten Alternativen stehen demnach Vergleichsmöglichkeiten zur Verfügung, bei denen Projektkostenbarwerte<sup>122</sup> und / oder Jahreskosten gegenübergestellt werden. Zur Ermittlung beider Größen benötigt man verschiedene Parameter bzw. Faktoren, die nachfolgend skizziert werden:

- **Investitionskosten (IK)**

Investitionskosten (auch Anschaffungs- oder Herstellerkosten genannt) sind die zur Erstellung, zum Erwerb oder zur Erneuerung von Anlagen erforderlichen, einmalig aufzuwendenden Kosten. Hierzu zählen:

- Kosten für Flächeninanspruchnahme
- Kosten für Vorarbeiten
- Bau- und Erschließungskosten
- Reinvestitionskosten

---

<sup>122</sup> Den Projektkostenbarwert einer Maßnahme kann man definieren als die Menge an Geld, die heute benötigt wird, um diese Maßnahme zu bauen und über ihre Nutzungsdauer zu unterhalten.

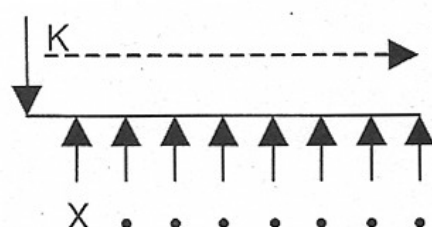
- **Laufende Kosten (LK)**

Laufende Kosten sind die zum Betrieb, zur Wartung, Unterhaltung und Überwachung von Anlagen erforderlichen, in der Betriebsphase regel- oder unregelmäßig wiederkehrenden Aufwendungen. Die laufenden Kosten können aufgeschlüsselt werden nach:

- Personalkosten
- Sachkosten
- Energiekosten

- **Kapitalwiedergewinnungsfaktor (KFAKR)**

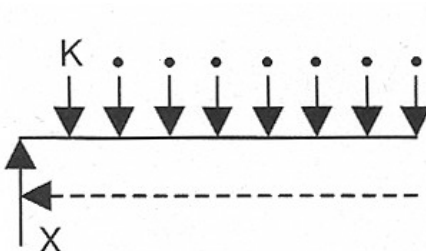
Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor stellt die Umrechnung einer einmaligen Zahlung K (hier Investitionskosten) zum Zeitpunkt 0, unter Berücksichtigung von Zins und Zinseszins, in eine Reihe gleichbleibender Zahlungen X in n nachfolgenden Jahren (Abb. 90).



**Abb. 90** : Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR<sup>123</sup>

- **Diskontierungsfaktor (DFAKR)**

Mit dem Diskontierungsfaktor lässt sich die Abzinsung einer Reihe jährlich gleich bleibender Zahlungen K (hier Laufende Kosten) unter Berücksichtigung von Zins und Zinseszins auf den Betrag X zum Zeitpunkt 0 errechnen (Abb. 91).



**Abb. 91** : Diskontierungsfaktor für eine gleichförmige jährliche Zahlungsreihe DFAKR<sup>124</sup>

Die Faktoren DFAKR und KFAKR können mit folgenden Beziehungen errechnet werden<sup>125</sup>:

$$DFAKR(i;n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \quad \text{bzw.} \quad KFAKR(i;n) = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

mit    i:    Zinssatz [%]  
       n:    Zinseszinszeitraum [a]

<sup>123</sup> LAWA (2005), Anlage 2.0-2.

<sup>124</sup> ebenda.

<sup>125</sup> ebenda.

Eine wesentliche Voraussetzung für den kostenmäßigen Vergleich von Projektalternativen ist die Bedingung, dass die vorgesehene Leistung von allen Alternativen über die gleiche Zeitspanne erbracht wird. Sie ist ohne weiteres Zutun erfüllt, wenn die Alternativen den gleichen Betriebsbeginn und gleiche Nutzungsdauer besitzen. In diesem Fall lassen sich aus den Projektkostenreihen mittels der Umrechnungsfaktoren  $KFAKR(i;n)$  bzw.  $DFAKR(i;n)$  die zugehörigen Projektkostenbarwerte (PKBW) bzw. Jahreskosten (JK) wie folgt ermitteln:

$$PKBW = IK + LK \times DFAKR(i;n)$$

$$JK = LK + IK \times KFAKR(i;n)$$

mit	IK:	Investitionskosten [€]
	LK:	Laufende Kosten [€]
	$DFAKR(i;n)$	Diskontierungsfaktor für eine gleichförmige jährliche Zahlungsreihe
	$KFAKR(i;n)$	Kapitalwiedergewinnungsfaktor

Im Prinzip sind der Vergleich der Projektkostenbarwerte und derjenige der Jahreskosten gleichwertig. Da die Umwandlung eines Barwertes in eine gleichförmige Zahlungsreihe und auch der umgekehrte Vorgang, jeweils nur die Multiplikation mit einem Umrechnungsfaktor ( $KFAKR(i;n)$  bzw.  $DFAKR(i;n)$ ) bedeutet, empfiehlt LAWA 2005 aus Gründen einer verbreiteten Informationsbereitstellung beide Arten der Kostengegenüberstellung vorzunehmen.

Die Gegenüberstellung erfolgt in Form einer Differenzbildung. Benutzt man dabei die kostengünstigste Alternative als Subtrahend, so stellt die Differenz zwischen den Projektkostenbarwerten einer Vergleichsalternative und dieser, die wertmäßig auf den Bezugszeitpunkt der Auf- und Abzinsungen bezogenen relativen Kostenersparnisse bei Realisierung der kostengünstigsten Alternative dar. Diese Barwertdifferenz verkörpert damit die kapitalisierten Kostenersparnisse, die während der Nutzungsdauer des Projekts anfallen. Demgegenüber handelt es sich bei der Differenz zwischen den Jahreswerten einer Vergleichsalternative und der kostengünstigsten Alternative um die durchschnittlichen jährlichen Kostenersparnisse.

Die in Abschn. 6.3.4 ermittelten Baukosten (BK) werden nun mit einem Aufschlag von 20 % für Planung, Gutachten, etc. versehen und ergeben damit die Investitionskosten. Diese Kosten sollen punktförmig zum Zeitpunkt Null anfallen. Die laufenden Kosten für die Unterhaltung der Maßnahmen werden pauschal mit 5 % pro Jahr angesetzt (5 % von Investitionskosten)<sup>126</sup> und sollen über eine Nutzungsdauer von  $n = 100$  Jahren<sup>127</sup> konstant sein. Der angenommene Zinssatz soll  $i = 3$  % p.a. betragen<sup>128</sup>.

Mit der geplanten Nutzungsdauer von  $n = 100$  Jahren und dem realen Zinssatz von  $i = 3$  % p.a. ergibt sich:

$$DFAKR(3;100) = 31,599 \quad \text{und} \quad KFAKR(3;100) = 0,032$$

<sup>126</sup>der Aufschlag und die laufenden Kosten wurden nach dem "Hochwasser-Aktionsplan Lippe", Staatliches Umweltamt Lippstadt, Aachen 2002, angenommen: [http://www.stua-lp.nrw.de/map/p/hwlippe/main/07\\_Bericht/tr/bericht.pdf](http://www.stua-lp.nrw.de/map/p/hwlippe/main/07_Bericht/tr/bericht.pdf), S. 116, aufgerufen am 23.06.08.

<sup>127</sup>die durchschnittliche Nutzungsdauer von Deichen beträgt nach LAWA (2005) – Anlage 1-3 - 80 bis 100 Jahre.

<sup>128</sup>der Zinssatz von 3 % p. a. wird nach dem Zahlenbeispiel 5.2-1 der LAWA (2005), S. 5-3, angenommen.



Die folgende Tab.36 fasst die mit den Faktoren DFAKR(3;100) und KFAKR(3;100) ermittelten Projektkostenbarwerte und Jahreskosten – jeweils auf 100 m Deichlänge bezogen - der untersuchten Varianten zusammen.

**Tab. 36:** Zusammenstellung der Projektkostenbarwerte (PKBW) bzw. Jahreskosten (JK) - bezogen auf 100 m Deichlänge)

Variante	Baukosten (BK)	Investitionskosten (IK)	Laufende Kosten (LK)	Projektkostenbarwert (PKBW)	Jahreskosten (JK)
<b>Var. 1</b> Deich mit Oberflächendichtung (1:2)	76.063,00 €	91.275,60 €	4.563,78 €	235.486,48 €	7.484,60 €
<b>Var. 2</b> Deich mit Innendichtung (1:2)	86.034,00 €	103.240,80 €	5.162,04 €	266.356,10 €	8.465,75 €
<b>Var. I/II</b> Homogener Deich (1:3)	92.970,00 €	111.564,00 €	5.578,20 €	287.829,54 €	9.148,25 €
<b>Var. 3</b> Überlaufstrecke mit Betonfertigteilen (1:2)	103.935,67 €	124.722,80 €	6.236,14 €	321.778,59 €	10.227,27 €
<b>Var. IIIa</b> homogene Überlaufstrecke (1:10)	215.846,00 €	259.015,20 €	12.950,76 €	668.246,27 €	21.239,25 €
<b>Var. IIIb</b> homogene Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig)	153.805,00 €	184.566,00 €	9.228,30 €	476.171,05 €	15.134,41 €

#### Vergleich der Projektkostenbarwerte PKBW:

<b>PKBW<sub>III</sub> – PKBW<sub>1</sub></b>	= 287.829,54 € - 235.486,48 €	= <b>52.343,06 €</b>
<b>PKBW<sub>III</sub> – PKBW<sub>2</sub></b>	= 287.829,54 € - 266.356,10 €	= <b>21.473,44 €</b>
<b>PKBW<sub>IIIa</sub> – PKBW<sub>3</sub></b>	= 668.246,27 € - 321.778,59 €	= <b>346.467,68 €</b>
<b>PKBW<sub>IIIb</sub> – PKBW<sub>3</sub></b>	= 476.171,05 € - 321.778,59 €	= <b>154.392,46 €</b>

Die kapitalisierten Kostenersparnisse der Variante 1 bzw. Variante 2 unter Verwendung von RC-betonbauteilen gegenüber der Vergleichsvariante I/II betragen somit 52.343,06 € bzw. 21.473,44 €. Die kapitalisierten Kostenersparnisse der Variante 3 unter Verwendung von RC-Betonbauteilen gegenüber der Vergleichsvariante IIIa bzw. IIIb betragen 346.467,68 € bzw. 154.392,46 €

#### Vergleich der Jahreskosten JK:

<b>JK<sub>III</sub> – JK<sub>1</sub></b>	= 9.148,25 € - 7.484,60 €	= <b>1.663,65 €</b>
<b>JK<sub>III'</sub> – JK<sub>2</sub></b>	= 9.148,25 € - 8.465,75 €	= <b>682,50 €</b>
<b>JK<sub>IIIa</sub> – JK<sub>3</sub></b>	= 21.239,25 € - 10.227,27 €	= <b>11.011,98 €</b>
<b>JK<sub>IIIb</sub> – JK<sub>3</sub></b>	= 15.134,41 € - 10.227,27 €	= <b>4.907,14 €</b>

Die durchschnittlichen jährlichen Kostenersparnisse bei Realisierung der Variante 1 bzw. Variante 2 unter Verwendung von RC-Betonbauteilen gegenüber der Vergleichsvariante I/II belaufen sich auf 1.663,65 € bzw. 682,50 €. Die durchschnittlichen jährlichen Kostenersparnisse bei Realisierung der Variante 3 unter Verwendung von RC-Betonbauteilen gegenüber der Vergleichsvariante IIIa bzw. IIIb belaufen sich auf 11.011,98 € bzw. 4.907,14 €.

Aus dem Vergleich der Projektkostenbarwerte und der Jahreskosten geht somit eindeutig hervor, dass die entwickelten Einsatzvarianten von Betonfertigteilen im Deichbau bei einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise nicht nur konkurrenzfähig sind, sondern auch wirtschaftliche Vorteile bringen.

## 6.4.2 Schaden-Nutzen-Betrachtung

Wie schon im Abschn. 2.2.3 ausgeführt, können Hochwasser in dicht besiedelten Gebieten hohe volkswirtschaftliche Schäden hervorrufen. Für die Schadenshöhe spielen dabei neben der betroffenen Siedlungsdichte und den Nutzungen auch die Fläche des Überflutungsgebietes, die -tiefe und -dauer eine wesentliche Rolle. Diese ist wiederum abhängig von der Auftretenswahrscheinlichkeit des Hochwassers. Die Beziehung zwischen der Hochwasserwahrscheinlichkeit (der Kehrwert der einem bestimmten Hochwasser zugeordneten Wiederkehrzeit) und dem Schaden ergibt die sog. Schadenswahrscheinlichkeit. Aus dieser Funktion kann durch Integration die jährliche Schadenserwartung berechnet werden<sup>129</sup>.

Um eine monetäre Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen vornehmen zu können, muss die Höhe der durch die Maßnahmen vermeidbaren Schäden bekannt sein. Hierzu dienen das bis zu einer bestimmten Jährlichkeit ermittelte Schadenspotenzial und die aus der Schadenswahrscheinlichkeit ermittelte Schadenserwartung.

Die Schadenswahrscheinlichkeit ist die Beziehung zwischen der Hochwasserwahrscheinlichkeit und dem Schaden. Über die Differenz der Schäden bestimmter Wahrscheinlichkeiten kann durch eine geblockte Integration die Schadenserwartung für einen bestimmten Zeitraum berechnet werden<sup>130</sup>. Die Schadenserwartung gibt an, welche Kosten jedes Jahr durch Hochwasser im Mittel entstehen könnten bzw. wie viel Geld hierfür jährlich angespart werden müsste, um bei einem Hochwasser die möglichen Schäden zu tragen.

Da im Rahmen dieser Arbeit die möglichen Standorte, an denen die Deiche gebaut werden können nicht konkret präzisiert werden, können die möglichen abzuwehrenden Schadenspotenziale (und damit der direkte Nutzen) ebenso nicht determiniert werden. Es muss somit ein anderer Weg gefunden werden, um diese zu bestimmen. Dieser ergibt sich durch Verwendung der im Abschn. 6.4.1 bestimmten Parameter Projektkostenbarwert und Jahreskosten. Diese Parameter können im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse angewandt werden. Wird der Quotient aus dem Schadenspotential und dem Projektkostenbarwert der Maßnahme bzw. aus der Schadenserwartung pro Jahr und der Jahreskosten der Maßnahme gebildet, kann die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme beurteilt werden.

---

<sup>129</sup> vgl. [http://www.stua-lp.nrw.de/map/p/hwlippe/main/07\\_Bericht/tr/bericht.pdf](http://www.stua-lp.nrw.de/map/p/hwlippe/main/07_Bericht/tr/bericht.pdf), S. 53, aufgerufen am 23.06.08.

<sup>130</sup> ebenda.

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Schadenspotential}}{\text{Projektkostenbarwert}}$$

bzw.

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Schadenserwartung pro Jahr}}{\text{Jahreskosten}}$$

Ist der Quotient kleiner 1, kann die Maßnahme als unwirtschaftlich angesehen werden. Ergibt sich der Quotient zu einem Wert größer 1, ist die Maßnahme wirtschaftlich. Wird der Quotient gleich 1 gesetzt, kann die Untergrenze des zu vermeidenden Schadens ermittelt werden (Projektkostenbarwert = Schadenspotenzial bzw. Jahreskosten = jährliche Schadenserwartung). Da die nach Tab. 37 vermiedenen Schäden und der direkte Nutzen in konkretem Zusammenhang stehen, lässt sich mit dieser Vorgehensweise auch gleichzeitig der Nutzen der verschiedenen Maßnahmen monetarisieren (Schadenspotenzial = Gesamtnutzen bzw. jährliche Schadenserwartung = jährliche Nutzen).

Die folgende Tab. 37 gibt einen Überblick über die ermittelten Größen Schadenspotential und jährliche Schadenserwartung:

**Tab. 37:** Untergrenzen – Schadenspotenzial und jährliche Schadenserwartung (bezogen auf 100 m Deichlänge)

Variante	Schadenspotenzial ( = Projektkostenbarwert)	jährliche Schadenserwartung (= Jahreskosten)
<b>Var. 1</b> Deich mit Oberflächendichtung (1:2)	235.486,48 €	7.484,60 €
<b>Var. 2</b> Deich mit Innendichtung (1:2)	266.356,10 €	8.465,75 €
<b>Var. I/II</b> Homogener Deich (1:3)	287.829,54 €	9.148,25 €
<b>Var. 3</b> Überlaufstrecke mit Betonfertigteilen (1:2)	321.778,59 €	10.227,27 €
<b>Var. IIIa</b> homogene Überlaufstrecke (1:10)	668.246,27 €	21.239,25 €
<b>Var. IIIb</b> homogene Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig 1:3)	476.171,05 €	15.134,41 €

So beträgt beispielsweise bei der Variante 1 unter Verwendung von RC-Betonbauteilen (Nutzungsdauer von 100 Jahren) das Schadenspotenzial 235.486,48 € und die jährliche Schadenserwartung 7.484,60 €. Sollten bei möglichen Hochwasserereignissen Schäden unterhalb dieser Höhen vermieden worden sein, war diese Maßnahme unwirtschaftlich. Eine Schadensvermeidung oberhalb dieser monetären Werte macht die Maßnahme wirtschaftlich.

In Anlehnung an die DVWK-Mitteilungen Nr. 10, „Ökonomische Bewertung von Hochwasserschutzwirkungen“, (DVWK 10) kann in diesem Zusammenhang auf folgende Nutzungskategorien bzw. Auswirkungen hingewiesen werden:

- **verhinderte Schäden**
  - Personenschäden
  - verletzte Personen, Grad der Verletzungen
  - Sachschäden
    - privater Wohnbereich (Gebäude, Inventar, Hof und Garten)
    - Öffentliche Einrichtungen
    - Einrichtungen von Handel und Gewerbe (Gebäude, Inventar, Lagerbestände, Produktionsausfall)
    - Industrie (Gebäude, Inventar, Lagerbestände, Produktionsausfall, Folgekosten (Vertragsstrafen))
    - Landwirtschaft (Gebäude, Inventar, Lagerbestände, Produktionsausfall)
    - sonstige Infrastruktureinrichtungen (Verkehrs-, Ver- und Entsorgungseinrichtungen,
    - Folgeschäden (Stromausfall, Verkehrsumleitungen)
    - Landschaft (Landschaftselemente, Bodenabtrag, Verschlammung)
  - Schäden an land- und forstwirtschaftlichen Kulturen und Böden
    - Grünland
    - Ackerland
    - Sonderkulturen
    - Forsten
  - Viehschäden (Verlust, krankheitsbedingte Marktwertminderung, Kosten für zusätzlichen Seuchenschutz)
- **Produktions- und Bodenwertänderungen**
- **Aufwandsänderungen**
- **indirekte und induzierte Einkommenseffekte**

## 6.5 Fazit - Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zusammenfassend soll noch einmal eine Übersicht zu den ermittelten Kalkulationskosten gegeben werden. Verwendet wurden dabei die Kosten für den Deichneubau in konventioneller Bauweise mit einer Böschungsneigung 1:3 und den entwickelten Bauweisen mit Innen- und Oberflächendichtung bei einer Böschungsneigung von 1:2 in Abhängigkeit der verwendeten Fugendichtstoffe und der Transportentfernung für die RC-Betonelemente (RC-BE).

Die nachfolgend aufgeführten errechneten Kosten wurden mit zwei Ingenieurbüros abgeglichen und korrelieren zudem mit den Angaben aus umgesetzten Vorhaben wie bspw. der Bau des 2,3 km langen ertüchtigten Deichs in Lunow-Stolpe-Polder. Rund 2,3 Mio. Euro wurden im Auftrag des Landesumweltamtes verbaut, um die Höhe des bestehenden Deiches zu erhöhen. Die Maßnahmen umfassten

den Einbau eines Filterprismas, eine Abflachung der Deichböschung sowie das Anlegen eines neuen Deichverteidigungsweges auf der Deichkrone.<sup>131</sup>

Die Ergebnisse zeigen deutlich die Konkurrenzfähigkeit der entwickelten Deichbauvarianten unter Verwendung von gebrauchten Betonelementen gegenüber herkömmlichen Ausführungsvarianten. Ausgehend vom mittleren Preisniveau werden bei den Ausführungsvarianten mit Oberflächen- und Innendichtung (Neubau) rund 20 % bzw. 10 % an Kosten eingespart gegenüber der Herstellung eines homogenen Deiches selbst dann, wenn die Betonelemente 250 km zu transportieren sind. Der Einfluss des unterschiedlich verwendeten Fugenmaterials ist dabei fast unerheblich.

Die erzielten Ergebnisse dieser Kostenberechnung stellen sich wie folgt dar:

**Tab. 38:** Gegenüberstellung der Baukosten verschiedener Deichbauausführungsvarianten<sup>132</sup>

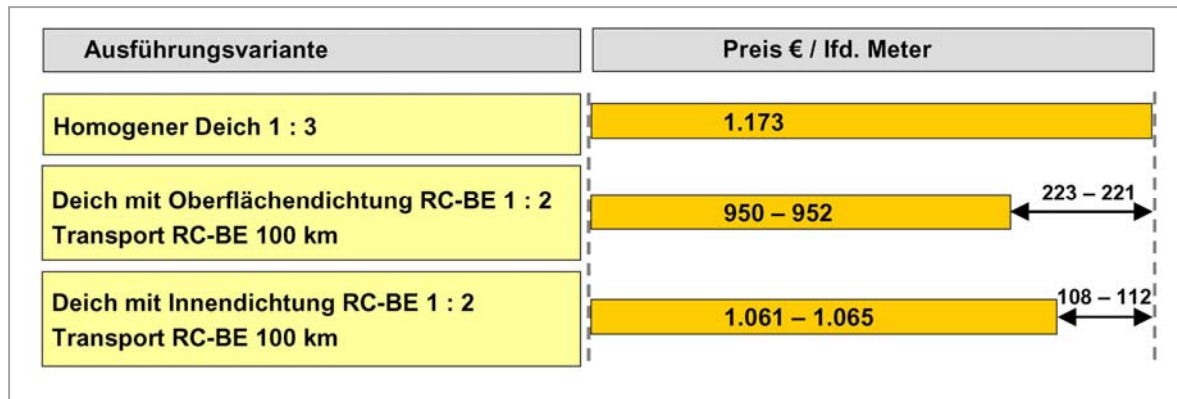
Ausführungsvariante	Preis €/lfd. Meter (Werte gerundet)			Prozentualer Vergleich (mittel)
	von	mittel	bis	
Homogener Deich 1:3	930	1.173	1.497	100 %
Deich mit Oberflächendichtung RC-BE (Ton) <sup>1</sup> , 1:2				
Trapo RC-BE 25 km	753	940	1.190	80,1 %
Trapo RC-BE 100 km	757	950	1.205	81,0 %
Trapo RC-BE 250 km	772	976	1.242	83,2 %
Deich mit Oberflächendichtung RC-BE (XYPEX-Beton) <sup>1</sup> , 1:2				
Trapo RC-BE 25 km	754	942	1.191	80,3 %
Trapo RC-BE 100 km	759	952	1.207	81,2 %
Trapo RC-BE 250 km	771	975	1.242	83,1 %
Deich mit Innendichtung RC-BE (Orbit-Flex.B) <sup>1</sup> , 1:2				
Trapo RC-BE 25 km	858	1.057	1.318	90,1 %
Trapo RC-BE 100 km	863	1.065	1.330	90,8 %
Trapo RC-BE 250 km	871	1.078	1.349	91,9 %
Deich mit Innendichtung RC-BE(XYPEX-Beton) <sup>1</sup> , 1:2				
Trapo RC-BE 25 km	853	1.052	1.313	90,0 %
Trapo RC-BE 100 km	858	1.061	1.326	90,5 %
Trapo RC-BE 250 km	866	1.075	1.346	91,6 %

<sup>1</sup> ( ) Fugendichtstoff

Der Kostenvorteil der neu entwickelten Deichbauvarianten wird in nachfolgender Abbildung noch deutlicher.

<sup>131</sup> Pressemeldung des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz vom 25.03.2008

<sup>132</sup> Mettke, A.: Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Cottbus, Veröffentlichung in 2009.



**Abb. 92** : Gegenüberstellung der Baukosten verschiedener Deichbauvarianten mit Angabe des Einsparpotenzials<sup>133</sup>

Ein Kostenvergleich zu den Überlaufstrecken zeigen noch deutlichere Kosteneinsparungen. Gegenüber der traditionellen Bauweise mit einer beidseitigen Böschungsneigung von 1:10 betragen die Kosten selbst bei einer Transportentfernung von 250 km für die Anlieferung der gebrauchten Betonelemente nur die Hälfte. Im Vergleich zur Überlaufstrecke mit unterschiedlichen Böschungsneigungen (wasserseitig 1:3, landseitig 1:10) belaufen sich die Kosteneinsparungen immer noch auf fast ein Drittel.

**Tab. 39:** Gegenüberstellung der Baukosten zur Herstellung von Überlaufstrecken verschiedener Ausführungsvarianten<sup>134</sup>

Ausführungsvariante	Preis €/lfd. Meter (Werte gerundet)			Prozentualer Vergleich (mittel)
	von	mittel	bis	
Homogene Überlaufstrecke 1:10 beidseitig	2.159	2.727	3.486	100 %
Überlaufstrecke RC-BE, 1:2				
Trapo RC-BE 25 km	1.009	1.257	1.618	46,1 %
Trapo RC-BE 100 km	1.035	1.302	1.681	47,8 %
Trapo RC-BE 250 km	1.075	1.371	1.783	50,3 %
Homogene Überlaufstrecke 1:10 landseitig, 1:3 wasserseitig	1.539	1.943	2.483	71,3 %

In der nachfolgenden Abbildung wird der Kostenvorteil durch die Verwendung von RC-Betonbauteilen bei der Errichtung von Überlaufstrecken noch besser verdeutlicht.

<sup>133</sup> Mettke, A.: Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Cottbus, Veröffentlichung in 2009.

<sup>134</sup> ebenda.

Ausführungsvariante	Preis € / lfd. Meter
Überlaufstrecke 1 : 10	2.727
Überlaufstrecke RC-BE 1 : 2 Transport RC-BE 100 km	1.302 <span style="margin-left: 100px;">← 1.425 →</span>
Überlaufstrecke 1 : 3 wasserseitig 1 : 10 landseitig	1.943 <span style="margin-left: 100px;">← 784 →</span>

**Abb. 93** : Gegenüberstellung der Baukosten von Überlaufstrecken in verschiedenen Ausführungsvarianten mit Angabe des Einsparpotenzials<sup>135</sup>

Der wirtschaftliche Vorteil der neu entwickelten Deichbauvarianten unter Einsatz von Betonelementen aus dem Rückbau industrieller Wohnbausubstanz wird somit nachgewiesen. Für den Neubau mit der Installation einer Oberflächen- oder Innendichtung aus RC-Betonbauteilen ergibt sich eine Kostenersparnis von 10 bis 20 % gegenüber der herkömmlichen Bauweise; für die Errichtung einer Überlaufstrecke von bis zu 50 %.

<sup>135</sup> Mettke, A.: Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Cottbus, Veröffentlichung in 2009.





## 7 Ökologische Relevanz des RC-Einsatzes

### 7.1 Flächen- und Bodenverbrauch

Wie bereits im Abschn. 6.1 festgestellt, bringt der Einsatz der Betonfertigteile im Hochwasserschutz aus ökologischer Sicht zwei wesentliche Vorteile. Die Deiche mit verbauten Betonfertigteilen benötigen weniger Aufstandsfläche und mindern damit den Flächenverbrauch. Wegen ihrer Geometrie wird zu ihrem Bau auch weniger Bodenmaterial benötigt, die natürliche Ressource Boden wird geschont. Die nachfolgende Tab. 40 fasst im Variantenvergleich die prozentuelle Minderung der beiden Größen zusammen.

**Tab. 40:** Variantenvergleich – Flächen- und Bodenverbrauch

	Variantenvergleich			
	Var. 1 ↔ Var. I/II	Var. 2 ↔ Var. I/II	Var. 3 ↔ Var. IIIa	Var. 3 ↔ Var. IIIb
	Oberflächendichtung vs. Homogener Deich (1:3)	Innendichtung vs. Homogener Deich (1:3)	Überlaufstrecke (RC) vs. Überlaufstrecke (1:10)	Überlaufstrecke (RC) vs. Überlaufstrecke (1:3; 1:10)
<b>Flächenverbrauch</b>	<b>71 %</b> (- 6 m <sup>2</sup> /m)	<b>71 %</b> (- 6 m <sup>2</sup> /m)	<b>28 %</b> (- 41,6 m <sup>2</sup> /m)	<b>41 %</b> (- 23,4 m <sup>2</sup> /m)
<b>Bodenverbrauch</b>	<b>73 %</b> (- 9,8 m <sup>3</sup> /m)	<b>74 %</b> (- 9,5 m <sup>3</sup> /m)	31% (- 57,4 m <sup>3</sup> /m)	<b>43 %</b> (- 33,8 m <sup>3</sup> /m)

Wie man erkennt, benötigen z.B. die Varianten 1 und 2 nur rd. 71 bis 73 % an Fläche bzw. Bodenmaterial im Vergleich zur Referenzvariante I/II. Bei den Überlaufstrecken sind die Unterschiede aufgrund enormer Geometrieunterschiede wesentlich größer.

Bezüglich des Bodenverbrauchs kann noch ein weiterer ökologischer Aspekt angesprochen werden - die Ressourcenproduktivität des Produktionsfaktors Boden. Mit Ressourcenproduktivität bezeichnet man das (Mengen-)Verhältnis von Produkten (-> output) zu den dafür beim Produktionsprozess eingesetzten Ressourcen (Rohstoffen und Energie -> input):

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Ausbringungsmenge}}{\text{Einsatzmenge}} = \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

Die effiziente Nutzung der Ressourcen ist zu einem dringlichen Handlungsbereich von Wirtschaft und Politik geworden. Im Zuge des gestiegenen Umweltbewusstseins wird in unserer Gesellschaft die Bedeutung der Ressourcenproduktivität immer deutlicher gesehen und die Gefahr des ungehemmten Ressourcenverbrauchs sowie die Notwendigkeit einer nachhaltigen Entwicklung erkannt und hervorgehoben.

Setzt man nun als „output“ einen lfdm Deich und als „input“ die benötigte Menge an Bodenmaterial zur dessen Erstellung, so ergeben sich die in der Tab. 41 ermittelten Produktivitätsfaktoren:

**Tab. 41:** Variantenvergleich – Produktivitätsfaktor

	Variante					
	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. I/II	Var. IIIa	Var. IIIb
	Oberflächen- dichtung	Innen- dichtung	Überlauf- strecke (RC)	Homogener Deich (1:3)	Überlauf- strecke (1:10)	Überlauf- strecke (1:3; 1:10)
<b>Bodenmaterial [m³/m]</b>	26,2	26,5	25,3	36,0	82,7	59,0
<b>Boden- produktivität</b>	0,04	0,04	0,04	0,03	0,01	0,02

Die Ressourcenproduktivität des Produktionsfaktors Boden ist größer bei den entwickelten Varianten mit Betonfertigteilen, denn mit geringerem Bodenbedarf erreicht man das gleiche Nutzniveau.

## 7.2 Energetische Betrachtung

### 7.2.1 Untersuchte Szenarien

Für die Ermittlung des energetischen Vorteils für den RC-Bauteileinsatz im Deichbau erfolgt die Betrachtung der 2 Szenarien mit folgenden Varianten:

- **Szenario 1:** Deichbau mit RC-Bauteilen (Wiederverwendungsquote 45 %) als
  - **Var. 1:** Oberflächendichtung (Böschungsneigung 1:2),
  - **Var. 2:** Innendichtung (1:2),
  - **Var. 3:** Überlaufstrecke (1:2),
- **Szenario 2:** Deichbau ohne RC-Einsatz als
  - **Var. I/II:** homogener Deich (Böschungsneigung 1:3),
  - **Var. IIIa:** Überlaufstrecke (Böschungsneigung 1:10 beidseitig),
  - **Var. IIIb:** Überlaufstrecke (1:3/1:10 wasser-/landseitig)

Die Szenarien umfassen folgende Prozesse:

- **Szenario 1:** Deichbau mit RC-Bauteilen
  - Transport von 55 % der rückgebauten Betonbauteile zur RC-Anlage,
  - Stoffliche Aufbereitung der 55 % rückgebauter Betonbauteile,
  - Transport der 45 % rückgebauter Betonbauteile zum Einbauort (Deich)
  - Einbau der RC-Betonbauteile,
  - Transport der erforderlichen Erdmassen,
  - Herstellung des Erdkörpers.

- **Szenario 2:** Deichbau ohne RC-Bauteilen
  - Transport von 100 % der rückgebauten Betonbauteile zur RC-Anlage,
  - Stoffliche Aufbereitung der 100 % rückgebauter Betonbauteile,
  - Transport der erforderlichen Erdmassen,
  - Herstellung des Erdkörpers.

## 7.2.2 Gewähltes Fallbeispiel

Der Nachweis des energetischen Vorteils durch den Einsatz von RC-Betonbauteilen soll an einem Fallbeispiel erbracht werden. Hierfür soll die Herstellung eines Deichabschnittes betrachtet werden, welcher unter Nutzung aller geeigneten Betonbauteile aus dem kompletten Rückbau eines 5-geschossigen Wohngebäudes erstellt wird. Dabei werden die Variante 1 – Oberflächendichtung und Variante 2 – Innendichtung (Böschungsneigung 1:2) dem Bau eines homogenen Deiches (Böschungsneigung 1:3; Variante I/II) gegenübergestellt. Die Höhe der eingebauten Dichtungsschicht soll dabei mind. 2,5 m erreichen. Die Höhe der Deichkrone soll 3,0 m betragen. Desweiteren erfolgt der Vergleich der entwickelten Überlaufstrecke Variante 3 mit den Vergleichsüberlaufstrecken in homogener Ausführung (Variante IIIa – beidseitige Böschungsneigung 1:10 und Variante IIIb – wasserseitige Böschungsneigung 1:3, landseitig 1:10). Die Kronenhöhe beträgt hier 2,6 m.

Als virtuelles Spendergebäude des Fallbeispiels wird ein 5-geschossiger Wohnbau der Typenserie P2 mit 3 Segmenten (Eingangsbereichen) gewählt. Ein solches Gebäude umfasst ca. 1020 Betonelemente mit einer Gesamtmasse von ca. 2.320 t (vgl. Tab. 42).

**Tab. 42:** Elementanzahl und –masse eines 5-geschossigen Wohngebäudes P2

Einzelgeschossangaben													
Geschoss	Bemerkungen	Bauwerksteil I		Bauwerksteil II		Bauwerksteil III		Bauwerksteil IV		Gebäude aus 3 Segmenten		Gebäude aus 4 Segmenten	
		Anzahl der Elemente	Gesamtmasse der Elemente	Anzahl der Elemente	Gesamtmasse der Elemente	Anzahl der Elemente	Gesamtmasse der Elemente	Anzahl der Elemente	Gesamtmasse der Elemente	Anzahl der Elemente	Gesamtmasse der Elemente	Anzahl der Elemente	Gesamtmasse der Elemente
		in t		in t		in t		in t		in t		in t	
Dachgeschoss	Flachdach	3	8,4	34	40,4	1	0,3	3	8,4	110	138,6	145	179,3
Normalgeschoss 4.		3	17,1	42	98,4	3	9,6	3	17,1	138	348,6	183	456,6
Normalgeschoss 3.		3	17,1	46	102,2	3	9,6	3	17,1	150	360	199	471,8
Normalgeschoss 2.		3	17,1	46	102,2	3	9,6	3	17,1	150	360	199	471,8
Normalgeschoss 1.		3	17,1	46	102,2	3	9,6	3	17,1	150	360	199	471,8
Erdgeschoss		3	17,1	53	115,1	3	9,6	3	17,1	171	398,7	227	523,4
Kellergeschoss	ohne Kellerausgang	3	12,9	47	104,8	3	6,9	3	12,9	153	354	203	465,7
Bei Demontage von Dachgeschoss bis Keller (Flachdach)													
Dachgeschoss	Flachdach	3	8,4	34	40,4	1	0,3	3	8,4	110	138,6	145	179,3
Normalgeschoss 4.		6	25,5	76	138,8	4	9,9	6	25,5	248	487,2	328	635,9
Normalgeschoss 3.		9	42,6	122	241	7	19,5	9	42,6	398	847,2	527	1107,7
Normalgeschoss 2.		12	59,7	168	343,2	10	29,1	12	59,7	548	1207,2	726	1579,5
Normalgeschoss 1.		15	76,8	214	445,4	13	38,7	15	76,8	698	1567,2	925	2051,3
Erdgeschoss		18	93,9	267	560,5	16	48,3	18	93,9	869	1965,9	1152	2574,7
Kellergeschoss	ohne Kellerausgang	21	106,8	314	665,3	19	55,2	21	106,8	1022	2319,9	1355	3040,4

Vom Gebäudetyp P2 sind gemäß den Untersuchungen lt. Abschn. 4.1 ca. 45 % im Deichbau einsetzbar (Deckenplatten und Innenwände).

### 7.2.3 Stoffliche Aufbereitung - Fallbeispiel

Erfolgt nach dem Rückbau des virtuellen Spendergebäudes keine Wiederverwendung der gewonnenen Bauteile, müssen die Elemente stofflich aufbereitet werden. Dafür werden energetische Aufwendungen in Form des maschinentechnischen Einsatzes notwendig. Als allgemeiner Ansatz zur Ermittlung sind die in Tab. 43 dargestellten Durchschnittswerte zu berücksichtigen.

**Tab. 43:** Durchschnittlicher Energiebedarf für Teile einer Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle<sup>136</sup>

Anlagenteil	Energiebedarf [MJ/t]
Zerkleinerung (Brecher)	2,9
Staubabscheidung (Sichter)	2,2
Klassierung (Siebe)	0,4
Förderbänder	0,2 - 0,4
Beschickung (Radlader)	4,3 - 10,5
Störstoffauslese (Bagger)	36,8 <sup>137</sup>
<b>Anlagendurchschnitt</b>	<b>50</b>

Der rechnerische Ansatz ergibt sich wie folgt:

$$E_{SRC} = m \cdot E_{Auf}$$

$E_{SRC}$	Gesamtenergiebedarf für das Stoffrecycling [MJ]
m	Masse [t]
$E_{Auf}$	Energiebedarf für die Aufbereitung [MJ/t].

Im Fall des Einsatzes geeigneter Bauteile im Deichbau werden nur die Bauelemente einer stofflichen Aufbereitung unterworfen, welche nicht für eine Wiederverwendung vorgesehen sind. Dies sind bei einer Gesamtelementemasse von 2.320 t und einem Wiederverwendungsgrad von 45 % ca. 1.276 t. Ohne Wiederverwendung ist die komplette Elementemasse von 2.320 t aus dem demontierten Gebäude einer RC-Anlage zuzuführen.

**Tab. 44:** Gesamtenergiebedarf für die stoffliche Aufbereitung

Szenario	Beschreibung	Elementemasse zur stofflichen Aufbereitung	Energiebedarf für stoffliche Aufbereitung
1	Aufbereitung der nicht weiterverwendeten Elemente (55 %)	1.276 t	63.800 MJ
2	Aufbereitung aller demontierten Elemente (100 %)	2.320 t	116.000 MJ

Durch den Einsatz aller verwendbaren Betonelemente aus dem Rückbau des virtuellen Spendergebäudes im Deichbau können ca. 52,2 GJ an Prozessenergie für die stoffliche Ausbereitung eingespart werden.

<sup>136</sup> nach Thomas, C.; Birle, A.: Stoff- und Energieflüsse bei der Aufbereitung mineralischer Baureststoffe, Studienarbeit, BTU Cottbus; aktualisiert 2007.

<sup>137</sup> entspricht einem Baggereinsatz (30 t, 130 kW) über ca. 2 Minuten bei 100 % Auslastung.

## 7.2.4 Transportaufwendungen für rückgebaute Betonbauteile - Fallbeispiel

Die Transportaufwendungen umfassen zum einen den Transport der nicht weiterverwendeten Bauteile zur RC-Anlage für die stoffliche Aufbereitung. Zum anderen müssen die Betonelemente für den Deichbau an ihren Einsatzort gebracht werden. Für den Transport zur RC-Anlage werden im vorliegenden Fallbeispiel Solo-LKW angesetzt. Die Primärenergieaufwendungen (KEA-Gesamt<sup>138</sup>) belaufen sich dafür auf 1,97 MJ/t\*km<sup>139</sup>. Der Transport der Betonbauteile zum Einsatzort am Deich erfolgt durch Sattelzüge mit einem Primärenergieinput von 1,36 MJ/t\*km<sup>140</sup>.

Als Transportentfernungen werden für den Wiedereinsatz der Betonelemente 25 km, 100 km bzw. 250 km von der Demontagebaustelle zum Einbauort angenommen. Die Wegstrecke von der Demontage zur RC-Anlage wird mit 30 km angesetzt. Ebenso der Transportweg für die Erdmassen. Zu berücksichtigen ist auch die Rückführung der Fahrzeuge, wodurch sich die zurückzulegende Fahrtstrecke verdoppelt. Die ermittelten energetischen Aufwendungen für diese Transporte können nachfolgender Tab. 45 entnommen werden.

**Tab. 45:** Gesamtenergiebedarf für den Transport der Bauteile aus dem Rückbau

	Energiebedarf	Masse	Entfernung	Transportstrecke - Hin- und Rückweg	Gesamtenergiebedarf Transport
Transport aller demontierten Elemente zur RC-Anlage (100 %)	1,97 MJ/t*km	2.320 t	30 km	60 km	274.224 MJ
Transport der nicht weiterverwendeten Elemente zur RC-Anlage (55 %)	1,97 MJ/t*km	1.276 t	30 km	60 km	150.823 MJ
Transport der weiterverwendeten Elemente zum Einsatzort Deichbau (45 %)	1,36 MJ/t*km	1.044 t	25 km	50 km	70.992 MJ
			100 km	200 km	283.968 MJ
			250 km	500 km	709.920 MJ

Für den Transport der gesamten Elementemasse aus dem Rückbau zur RC-Anlage mit einer Entfernung von 30 km müssen ca. 274 GJ Energie aufgewandt werden. Für Transport und stoffliche Aufbereitung ergeben sich somit rd. 390 GJ Energieaufwand.

Der Transport der nicht wieder verwendbaren Bauteile zur RC-Anlage erfordert einen Energieaufwand von 151 GJ, inkl. der stofflichen Aufbereitung 215 GJ. Hinzu kommen die Aufwendungen für die Bereitstellung der geeigneten Betonbauteile am Einsatzort. Je nach Entfernung der Demontagebaustelle zu diesem von 25, 100 oder 250 km ergeben sich weitere Energieaufwände von 71, 284 bzw. 710 GJ.

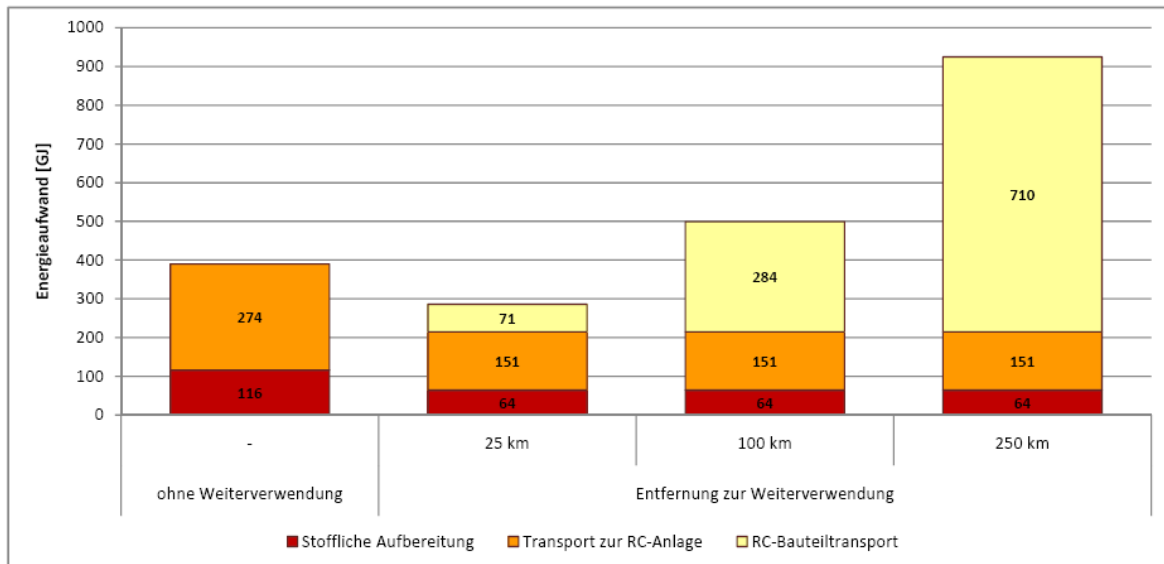
<sup>138</sup> KEA-Gesamt ist die Summe der Kumulierten Energie-Aufwände aus nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen Primärenergien, welche für das Produkt/den Prozess eingesetzt werden müssen. Die vorliegenden Daten wurden der Datenbank „Probas“ des Umweltbundesamtes (<http://www.probas.umweltbundesamt.de>) entnommen.

<sup>139</sup> s. unter LKW-DE-2000-Solo-23t in: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={7F0489F9-E2AA-41F0-BFC9-4806D90F4A9F}&id=13456441344&step=4&search=>; aufgerufen am 03.02.2009.

<sup>140</sup> s. unter LKW-DE-2000-Zug-30t in: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={0AB33AC7-7ED9-457D-8F40-B501F12E2CE0}&id=13456572416&step=4&search=>; aufgerufen am 03.02.2009.

Die Gesamtaufwendung für die Bereitstellung der Bauteile vor Ort und die Verwertung der Restmassen ergeben somit:

- 286 GJ bei 50 km Entfernung zum Einsatzort,
- 499 GJ bei 100 km Entfernung zum Einsatzort,
- 925 GJ bei 250 km Entfernung zum Einsatzort.



**Abb. 94** : Vergleich der Energieaufwendungen für den Transport und die stoffliche Aufbereitung der rückgebauten Bauteile

### 7.2.5 Resultierende Deichlängen des RC-Bauteileinsatzes - Fallbeispiel

Zur Vereinfachung sollen zunächst nur die anfallenden Spannbetondeckenplatten (6,0 x 1,8 m) herangezogen werden. Einschließlich Kellergeschoss sind 144 solcher Elemente im Bauwerk enthalten. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von ca. 14 %. Zu berücksichtigen ist dabei, dass ca. 5 – 10 % der Bauteile durch Beschädigungen während der Demontage- und TUL-Prozesse unbrauchbar werden können. Somit ergibt sich eine Spanne von 130 bis 137 nutzbarer Spannbetondeckenplatten.

Durch das vertikale Verlegen (quer zur Deichachse) dieser Bauteile als Oberflächendichtung in einer Böschungsneigung 1:2 und einer Einbindung in den Untergrund des Deichfußes von 20 cm beträgt die Dichtungshöhe 2,5 m. 130 bis 137 nebeneinander verlegte Bauteile ergeben eine mögliche Deichlänge von ca. 250 m.

Für die Herstellung einer Innendichtung mit einer Dichtungsschichthöhe von 2,5 m können die Spannbetondeckenplatten durch Betonsägearbeiten halbiert werden. Die Einspannung in das Streifenfundament beträgt somit 0,5 m, die Kronenhöhe unter Berücksichtigung der Frostsicherheit der Bauteile 3,0 m. Aus den zur Verfügung stehenden 130 bis 137 Spannbetondeckenplatten kann somit eine Deichlänge mit Innendichtung von ca. 500 m errichtet werden.

Mit 10 Spannbetondeckenplatten können ca. 6 Längenmeter einer Überlaufstrecke mit beidseitigen einer Böschungsneigung 1:2 hergestellt werden. Dabei werden jeweils 3 Deckenplatten quer zur Deichachse auf beiden Böschungsseiten sowie auf der Deichkrone verlegt. Das 10. Element sichert den landseitigen Böschungsfuß. Somit können aus den zur Verfügung stehenden Deckenplatten ca. 80 m Überlaufstrecke errichtet werden.

Der Einsatz von allen Spannbetondeckenplatten des virtuellen Spendergebäudes (Wiederverwendungsquote ca. 14 %) ermöglicht die Herstellung eines 3 m hohen Deiches

- mit einer Oberflächendichtung von rd. 250 m Länge,
- mit einer Innendichtung von rd. 500 m Länge oder
- einer 2,6 m hohen Überlaufstrecke von rd. 80 m Länge.

Erfolgt nun eine Hochrechnung der Dichtungs- resp. Deichlänge auf eine maximale Wiederverwendungsquote von 45 % durch die Wiederverwendung aller geeigneten Decken- und Innenwandplatten (ohne Berücksichtigung notwendiger Einbauvarianten aufgrund unterschiedlichen der Bauteilgeometrien) ergeben sich folgende optionale Deichlängen:

- Oberflächendichtung rd. 800 m,
- Innendichtung rd. 1.600 m,
- Überlaufstrecke rd. 250 m.

## 7.2.6 Energetische Aufwendungen für die Herstellung der Dichtungsvarianten aus RC-Bauteilen - Fallbeispiel

### • Kraneinsatz

Für den Einbau der RC-Betonbauteile wird ein Fahrzeugkran eingesetzt. Ausgehend von den Beobachtungen zum Bauverlauf am Versuchsdeichkörper kann davon ausgegangen werden, dass für das Verlegen eines RC-Betonbauteils für die Oberflächendichtung ca. 10 Minuten benötigt werden. D.h. in einer Stunde werden 6 Elemente der Oberflächendichtung eingebaut. Gleiches gilt für die Überlaufstrecke. Das Aufstellen der Bauteile für die Innendichtung einschl. der Sicherung der Elemente durch Montagstreben benötigt ca. 15 Minuten. Somit werden ca. 4 Bauteile pro Stunde verbaut. Dies bedeutet, dass für die Herstellung von einem Meter Dichtungslänge folgende Kraneinsatzzeiten beansprucht werden.

**Tab. 46:** Kraneinsatzzeit für die Herstellung der Dichtungsschicht für 1m Deichlänge

Variante	Bauteilmenge	Erzielte Dichtungslänge	Bauteilmenge pro 1 m Dichtungslänge	Kraneinsatzzeit pro Bauteil	Kraneinsatzzeit pro 1 m Dichtungslänge
Oberflächendichtung	1	1,8 m	0,55	10 min	5,5 min
Innendichtung	1	2,6 m	0,38	15 min	5,7 min
Überlaufstrecke	10	6 m	1,66	10 min	16,6 min

Aus den so ermittelten Kraneinsatzzeiten ergeben sich die Gesamteinsatzzeiten für die Herstellung der Dichtungsschichten aus dem gewählten Fallbeispiel.

**Tab. 47:** Kraneinsatzzeit für die Herstellung der Dichtungen für die ermittelten Deichlängen - Fallbeispiel

Variante	Kraneinsatzzeit pro 1 m Dichtungslänge	Deichlänge des Fallbeispiels	Resultierende Kraneinsatzzeit	
Oberflächendichtung	5,5 min	800 m	4.400 min	74 h
Innendichtung	5,7 min	1.600 m	9.120 min	152 h
Überlaufstrecke	16,6 min	250 m	4.150 min	70 h

Für die Berechnung des Energieaufwandes für den Kraneinsatz sind neben der Einsatzzeit folgende Parameter von Bedeutung:

Kranleistung: 150 kW

Kranauslastung: 50 %

Energieträger: Diesel

Zur Erzeugung von 1 kWh Leistung werden bei einer Auslastung von 50 % ca. 0,28 l Diesel benötigt<sup>141</sup>. Somit ergibt sich für den Betrieb des Fahrzeugkrans über eine Stunde ein Dieselverbrauch von ca. 42 l. Der Primärenergiegehalt von 1 l Diesel beträgt 35,3 MJ. Somit ergeben sich für den erforderlichen Kraneinsatz folgende Primärenergieaufwendungen:

**Tab. 48:** Energieaufwand für den Kraneinsatz zum Herstellen der Dichtungen - Fallbeispiel

Variante	Deichlänge	Kraneinsatzzeit	Dieselverbrauch	Resultierender Primärenergieeinsatz
Oberflächendichtung	800 m	74 h	3.108 l	109.712 MJ
Innendichtung	1.600 m	152 h	6.384 l	225.355 MJ
Überlaufstrecke	250 m	70 h	2.940 l	103.782 MJ

#### • **Betoneinsatz**

Desweiteren wird für die Errichtung der Dichtungen Beton benötigt, zum einen für die Herstellung des Fundamentes der Innendichtung, zum anderen an diesem Fallbeispiel zur Schließung der Bauteilfugen.

Das Fundament mit einer Höhe von 0,80 m, einer Breite von 0,50 m und der Gesamtlänge von 1.600 m (abzüglich der eingebundenen RC-Betonplatte mit einer Einbindungshöhe von 0,5 m und einer Breite von 0,14 m) fasst ca. 528 m<sup>3</sup> Beton C 20/25. Bei einer Betonrohddichte von 2.300 kg/m<sup>3</sup> ergeben sich 1.214 t Beton.

Ausgehend von der ausschließlichen Verwendung halbirter Spannbetondeckenplatten mit einer Breite von 1,8 m zur Herstellung der Innendichtungen müssen zwischen ca. 889 Bauteilen 888 Fugen

<sup>141</sup> Mettke, A.; Thomas, C.: Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen, Materialien zur Abfallwirtschaft 1999, S. 150.



verschlossen werden. Diese haben eine Länge von 3 m und einen Querschnitt von 0,006 m<sup>2</sup> (vgl. Abschn. 5.4.3). Daraus ergibt sich eine Gesamtmenge an Beton C 20/25 von 16 m<sup>3</sup> Beton mit einer Gesamtmasse von 37 t.

Bei der Herstellung der Oberflächendichtung mit einer Länge von 800 m werden im Vergleichsfall 444 Bauteile mit 443 Fugen verbunden. Diese weisen jeweils eine Länge von 6 m und einen Querschnittsfläche von 0,018 m<sup>2</sup> auf. Das zu verschließenden Fugenvolumen beträgt somit 47 m<sup>3</sup>. Dies entspricht einer Betonmasse von 110 t.

Die Überlaufstrecke weist eine zu verschließende Fugenlänge von 12 m/lfdm Dichtung auf. Die Querschnittsfläche beträgt wie bei der Oberflächendichtung 0,018 m<sup>2</sup>. Bei einer Gesamtlänge der Überlaufstrecke von 250 m ergibt sich somit ein Gesamtvolumen von 54 m<sup>3</sup> Beton C 20/25 mit einer Masse von ca. 124 t.

Für den Herstellung von 1 kg Beton werden 0,994 MJ an Primärenergie (KEA gesamt)<sup>142</sup> eingesetzt. Die Produktion einer Tonne Beton C20/25 verbraucht somit 994 MJ. Bei einer angenommenen Transportentfernung von 25 km vom Transportbetonhersteller zum Einbauort ergeben sich weitere 49 MJ/t. Der Energieverbrauch für den Betoneinsatz der einzelnen Varianten des Fallbeispiels kann nachfolgender Tab. 49 entnommen werden.

**Tab. 49:** Energieaufwand für den Betoneinsatz zum Herstellen der Dichtungen - Fallbeispiel

Variante	Betonmenge	Energieverbrauch Beton	Energieverbrauch Transport	Resultierender Primärenergieeinsatz
Oberflächendichtung (Fugen)	110 t	109.340 MJ	5.390 MJ	114.730 MJ
Innendichtung (Fundament plus Fugen)	1.214 + 37 t = 1.251 t	1.243.494 MJ	61.299 MJ	1.304.793 MJ
Überlaufstrecke (Fugen)	124 t	123.256 MJ	6.076 MJ	129.332 MJ

## 7.2.7 Transportaufwendungen für die Erdmassen - Fallbeispiel

Der Transport der Erdmassen soll im vorliegenden Fallbeispiel mit Solo LKW ausgeführt werden. Diese ermöglichen eine direkte Zufahrt bis zur Einbaustelle am Deichkörper ohne zusätzliche Rangierprozesse. Der notwendige Energie-Input für den Transport von einer Tonne über 1 Kilometer beträgt 1,97 MJ<sup>143</sup>. Die Transportentfernung zum Einbauort soll 10 km betragen. Hin- und Rückweg beinhalten somit eine Wegstrecke von 20 km.

Somit ergeben sich folgende Energieaufwendungen für den Transport der Erdmassen zur Herstellung des Deiches mit RC-Bauteilen.

<sup>142</sup> <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={0E0B2C81-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=10183770112&step=4&search=>, aufgerufen am 04.02.2009.

<sup>143</sup> s. unter LKW-DE-2000-Solo-23t in: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={7F0489F9-E2AA-41F0-BFC9-4806D90F4A9F}&id=13456441344&step=4&search=>; aufgerufen am 03.02.2009.

**Tab. 50:** Energieaufwand für den Transport der benötigten Erdmassen für die Deichvarianten mit RC-Bauteileinsatz- Fallbeispiel

Variante	Deichlänge	Erdstoffvolumen pro lfdm.	Gesamtvolumen	Gesamtmasse	Resultierender Primärenergieeinsatz
Oberflächendichtung	800 m	26,16 m <sup>3</sup>	20.928 m <sup>3</sup>	41.856 t	1.649.126 MJ
Innendichtung	1.600 m	26,50 m <sup>3</sup>	42.400 m <sup>3</sup>	84.800 t	3.341.120 MJ
Überlaufstrecke	250 m	25,26 m <sup>3</sup>	6.315 m <sup>3</sup>	12.630 t	497.622 MJ

Für die Ausführung der homogenen Vergleichsdeiche ergeben sich folgende Transportaufwände.

**Tab. 51:** Energieaufwand für den Transport der benötigten Erdmassen für die Deichvarianten ohne RC-Bauteileinsatz- Fallbeispiel

Varianten Homogener Deich	Deichlänge	Erdstoffvolumen pro lfdm.	Gesamtvolumen	Gesamtmasse	Resultierender Primärenergieeinsatz
Var. I/II (1:3)	800 m	36,00 m <sup>3</sup>	28.800 m <sup>3</sup>	57.600 t	2.269.440 MJ
	1.600 m	36,00 m <sup>3</sup>	57.600 m <sup>3</sup>	115.200 t	4.538.880 MJ
Var. IIIa (1:10)	250 m	82,68 m <sup>3</sup>	20.670 m <sup>3</sup>	41.340 t	1.628.796 MJ
Var. IIIb (1:3; 1:10)	250 m	59,02 m <sup>3</sup>	14.755 m <sup>3</sup>	29.510 t	1.162.694 MJ

## 7.2.8 Aufwendungen für den Einbau der Erdmassen - Fallbeispiel

Für die energetischen Aufwendungen zum Aufbau des Erdkörpers eines Deiches liegen derzeit keine Daten vor. Daher soll an dieser Stelle der maschinelle Einsatz, die Auslastung der Baumaschinen wie auch die Einsatzdauer wie folgt hergeleitet werden.

Die Einsatzdauer der Baumaschinen orientiert sich am Baufortschritt der Errichtung der Dichtungen also der Kraneinsatzzeit, da diese besonders im Fall der Oberflächendichtung wie auch der Überlaufstrecke direkt voneinander abhängig sind. Die Verlegung der RC-Betonbauteile erfolgt hier auf dem Deichgrundkörper. Der weitere Aufbau des Erdkörpers über der Dichtungsschicht kann erst nach deren Fertigstellung erfolgen. Beide Prozesse müssen daher parallel verlaufen und benötigen somit die gleiche Zeit.

Für den Aufbau des Erdkörpers des Fallbeispiels werden folgende Baumaschinen angesetzt.

- 1 Radlader mit Leistung 86 kW,
- 1 Planierdrape mit einer Leistung 150 kW,

- 1 Walze mit einer Leistung von 150 kW.

Zur Erzeugung von 1 kWh Leistung werden bei einer Auslastung von 50 % ca. 0,28 l Diesel benötigt<sup>144</sup>. Somit ergibt sich für den Betrieb der Fahrzeuge über eine Stunde ein Dieserverbrauch von ca. 24 l für den Radlader und jeweils 42 l für Raupe und Walze, insgesamt also 108 l/h. Der Primärenergiegehalt von 1 l Diesel beträgt 35,3 MJ. Somit ergeben sich für die Reduktion der Erdmassen durch den RC-Bauteileinsatz folgende Einsparungen an Primärenergie:

**Tab. 52:** Energieaufwand für den Maschineneinsatz zum Herstellen des Erdkörpers mit RC-Einsatz – Fallbeispiel

Variante	Deichlänge	Maschineneinsatzzeit	Dieserverbrauch	Resultierender Primärenergieeinsatz
Oberflächendichtung	800 m	74 h	7.992 l	282.118 MJ
Innendichtung	1.600 m	152 h	16.416 l	579.484 MJ
Überlaufstrecke	250 m	70 h	7.560 l	266.868 MJ

Entsprechend der Ergebnisse des Vergleiches des Bodenverbrauchs (s. Abschn. 7.1) können nun über die prozentuale Hochrechnung auch die Energieaufwendungen für den Mehraufwand der konventionellen Bauweisen ermittelt werden.

**Tab. 53:** Gesamtenergiereduktion für den Boden- bzw. Erdstofftransport durch den RC-Bauteileinsatz

Ausführung mit RC-Betonbauteilen	Ausführung als homogener Deich - Böschungsneigung	Mehraufwand der homogenen Ausführung	Resultierender Primärenergieeinsatz
Oberflächendichtung	1:3 (Var. I/II)	27 %	358.290 MJ
Innendichtung	1:3 (Var. I/II)	26 %	730.149 MJ
Überlaufstrecke	1:10 (Var. IIIa)	69 %	451.007 MJ
	1:3; 1:10 (Var. IIIb)	57 %	418.983 MJ

## 7.2.9 Vergleich der energetischen Aufwendungen - Fallbeispiel

Die Zusammenstellung der Energieaufwendungen für die Teilprozesse zur Errichtung der verschiedenen Deichbauvarianten mit und ohne RC-Bauteileinsatz ist in den nachfolgenden Tab. 54 und 55 aufgeführt. Diese Teilprozesse umfassen

- die stoffliche Verwertung,
- den Einbau der Dichtungen,
- den Aufbau des Erdkörpers sowie
- sämtlicher Transportprozesse.

<sup>144</sup> Mettke, A.; Thomas, C.: Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen, Materialien zur Abfallwirtschaft 1999, S. 150.

**Tab. 54:** Energieaufwendungen für die Teilprozesse zur Errichtung der Deichbauvarianten mit RC-Bauteileinsatz

Varianten	Deichlänge [m]	Transport- entfernung (RC-Bauteile) [km]	Energieaufwand [GJ]							
			Transport zur	Stoffliche	Transport der	Einbau der		Transport der	Einbau der	Gesamt
			RC-Anlage (30 km)	Aufbereitung	RC-Bauteile zur Baustelle	RC-Bauteile Kraneinsatz    Betoneinsatz		Erdmassen	Erdmassen	
Var. 1 Oberflächen- dichtung	800	25 100 250	151 151 151	64 64 64	71 284 710	110 110 110	115 115 115	1.649 1.649 1.649	282 282 282	2.442 2.655 3.081
Var. 2 Innen- dichtung	1.600	25 100 250	151 151 151	64 64 64	71 284 710	225 225 225	1.305 1.305 1.305	3.341 3.341 3.341	579 579 579	5.736 5.949 6.375
Var. 3 Überlauf- strecke	250	25 100 250	151 151 151	64 64 64	71 284 710	104 104 104	129 129 129	498 498 498	267 267 267	1.284 1.497 1.923

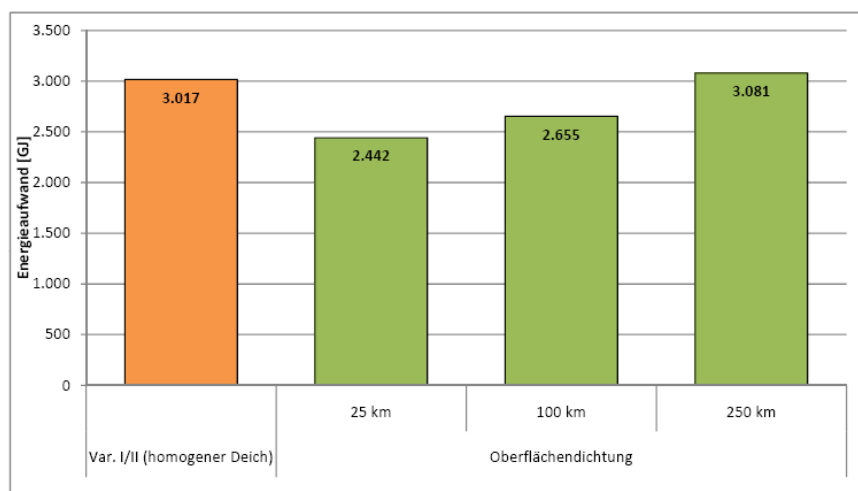
**Tab. 55:** Energieaufwendungen für die Teilprozesse zur Errichtung der Deichbauvarianten ohne RC-Bauteileinsatz

Vergleichs- varianten	Deichlänge [m]	Energieaufwand [GJ]				
		Transport zur	Stoffliche	Transport der	Einbau der	Gesamt
		RC-Anlage (30 km)	Aufbereitung	Erdmassen (10 km)	Erdmassen	
homogener Deich						
Var. I/II	800 1600	274 274	116 116	2.269 4.539	358 730	3.017 5.659
Var. IIIa	250	274	116	1.629	451	2.470
Var. IIIb	250	274	116	1.163	418	1.971

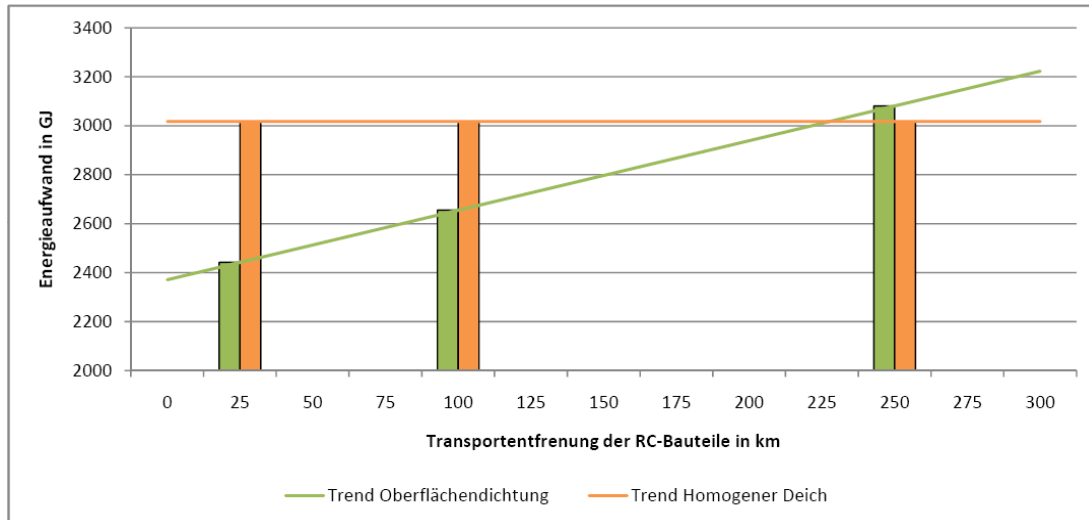
In nachfolgenden den Abbildungen werden die Energieaufwände für die Herstellung der Deichbauvarianten mit Oberflächendichtung und Innendichtung sowie der Überlaufstrecken mit RC-Bauteileinsatz den Vergleichsvarianten gegenübergestellt. Dabei erfolgt zunächst die Betrachtung der Gesamtenergieaufwendungen bei einem RC-Bauteiltransport über 25, 100 und 250 km Entfernung vom Demontageort zum Deichbaustandort. In einer weiteren Grafik sind die erforderlichen Energieeinsätze für die Teilprozesse bei einem Bauteiltransport über 25 km denen der Vergleichsvariante gegenübergestellt, um so weiteres Einsparpotenzial besser herauszuarbeiten.

- **Oberflächendichtung:**

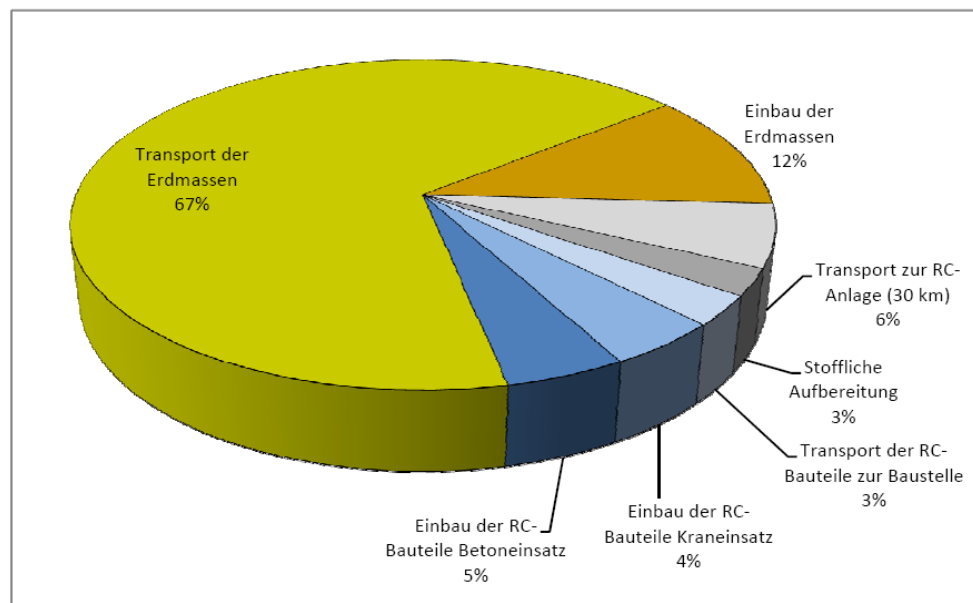
Ein Vergleich der Deichbauvariante mit Oberflächendichtung (Böschungsneigung 1:2) über eine Deichlänge von 800 m (Fallbeispiel) mit der Vergleichsvariante in homogener Ausführung (Böschungsneigung 1:3) über die gleiche Deichlänge zeigt Abb. 95.

**Abb. 95 :** Vergleich der Energieaufwendungen für den Deich mit Oberflächendichtung aus RC-Bauteilen und der homogenen Ausführung

Anhand der ermittelten Daten aus dem Fallbeispiel konnte für dieses der Break-even-point der Transportentfernung der RC-Bauteile für die Umsetzung einer Oberflächendichtung gegenüber der homogenen Ausführung bei ca. 225 km hergeleitet werden (s. Abb. 96). Es sind somit relativ hohe Transportentfernungen immer noch energetisch sinnvoll.



**Abb. 96** : Energetischer Break-even-point der Transportentfernung für die RC-Bauteile der Oberflächendichtung

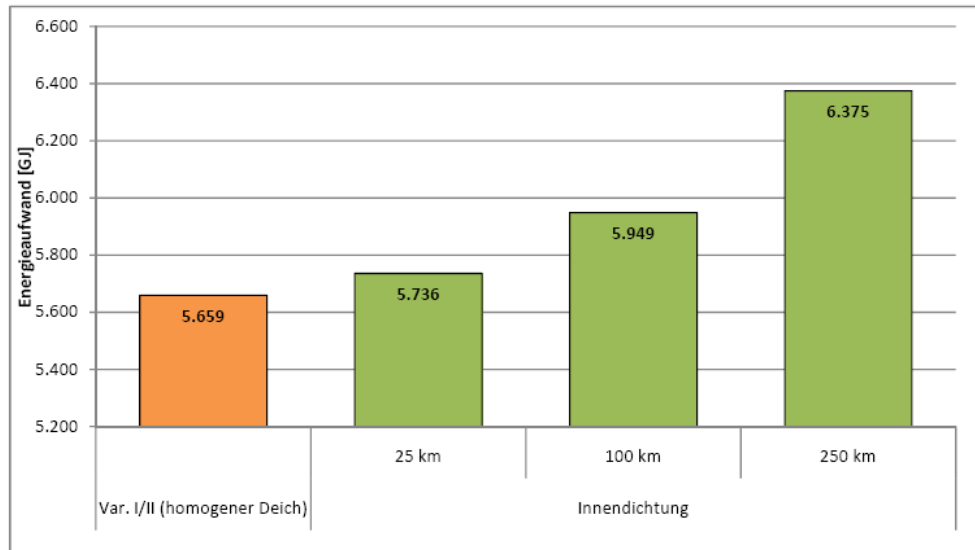


**Abb. 97** : Anteile der Teilprozesse am Energieaufwand für die Herstellung der Oberflächendichtung

Der Vergleich der Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergieaufwand für die Herstellung der Oberflächendichtung zum Fallbeispiel zeigt, dass die Aufwendungen für die stoffliche Verwertung inkl. des Transportes ca. 9 % der ausmachen. Die Prozesse der Erstellung der Oberflächendichtung zzgl. des Transportes der RC-Bauteile vereinnahmen ca. 12 % der Energieaufwendungen. Reduzierungen des energetischen Aufwandes in diesen Bereichen spielen somit nur eine untergeordnete Rolle. Das Haupteinsparpotenzial liegt in einer Verminderungen der Transportaufwendungen für die Erdmassen.

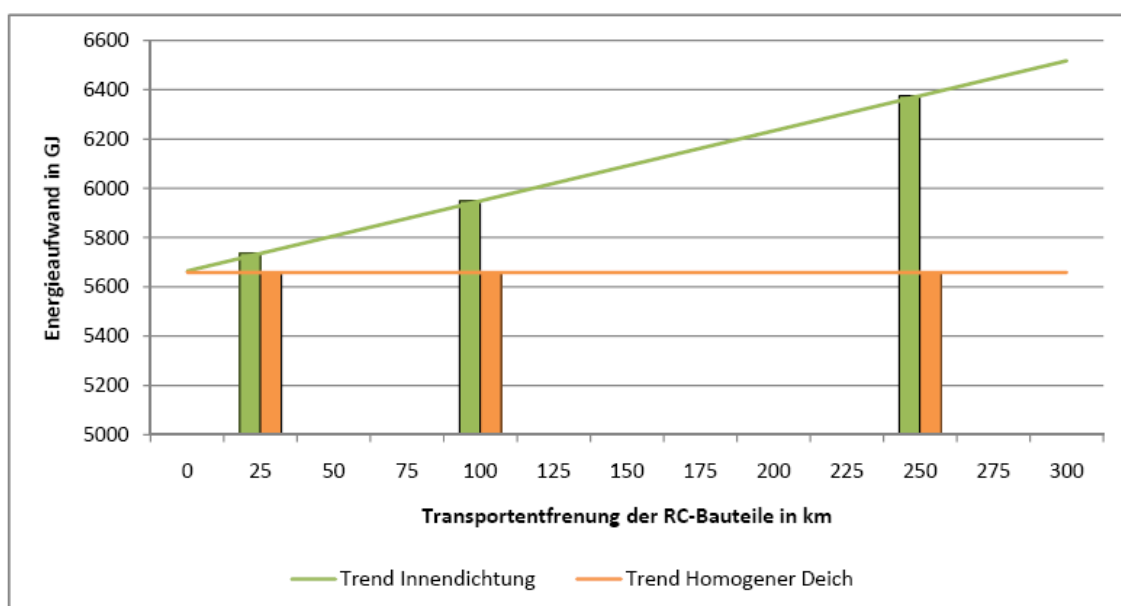
- **Innendichtung**

Abb. 98 vergleicht die energetischen Gesamtaufwendungen für die Errichtung von 1.600 m Deichlänge (ausgeführt mit einer Innendichtung aus RC-Bauteilen in Böschungsneigung 1:2) mit der gewählten konventionellen homogenen Deichausführung (Böschungsneigung 1:3).



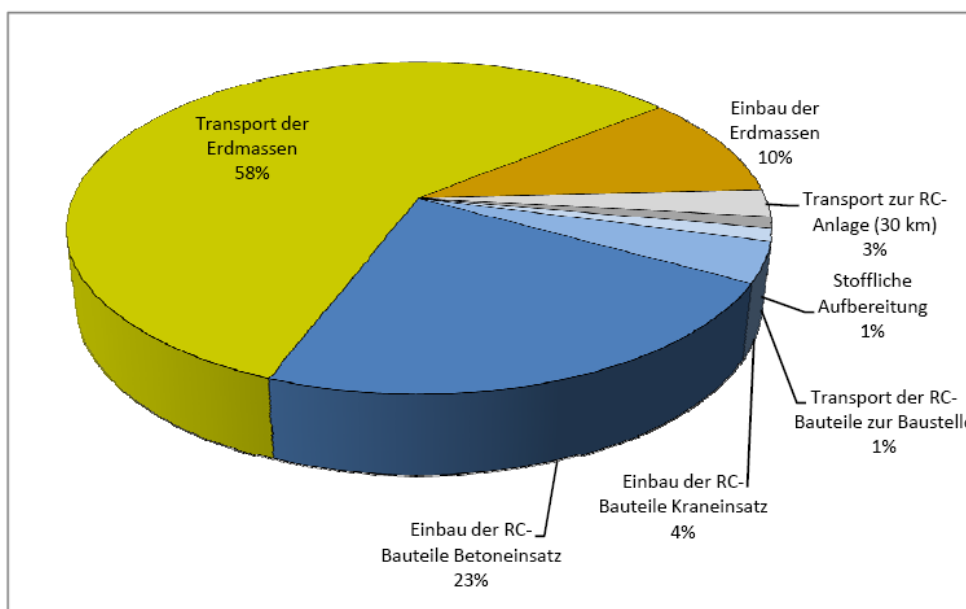
**Abb. 98** : Vergleich der Energieaufwendungen für den Deich mit Innendichtung aus RC-Bauteilen und der homogenen Ausführung

In Abb. 98 wird der deutlich höhere Energieaufwand für die Herstellung des Deiches mit Innendichtung gegenüber der homogenen Variante des Fallbeispiels erkennbar. Abb. 99 zeigt, dass eine vergleichbare energetische Situation nur bei einem sehr nahen Wiedereinsatz am Demontageort erzielt werden kann. Die Transportentfernung vom Demontageort zur Deichbaustelle des energetischen Break-even-point liegt quasi bei null Kilometern.



**Abb. 99** : Energetischer Break-even-point der Transportentfernung für die RC-Bauteile der Innendichtung

Zur Herausstellung der Ursachen für die hohen Energieaufwendungen bei der Deichbauvariante einer Innendichtung soll der Vergleich der energetischen Anteile der Teilprozesse (s. Abb. 100) herangezogen werden.

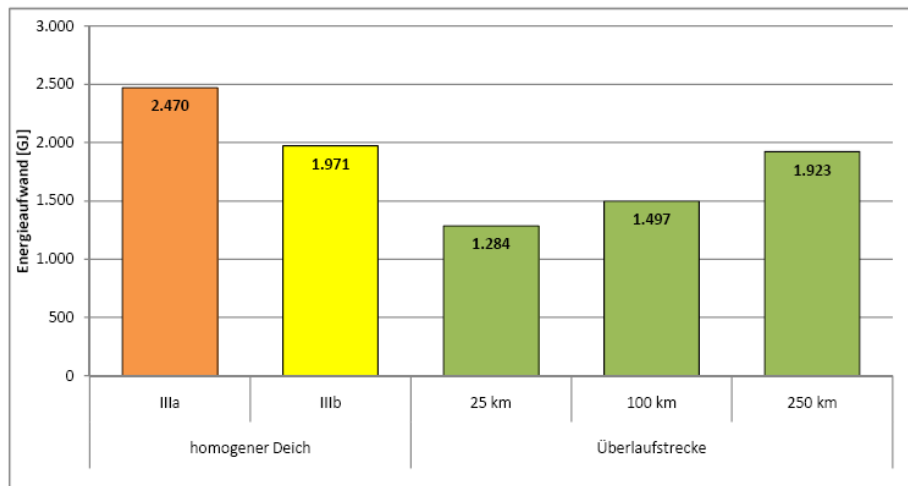


**Abb. 100** : Anteile der Teilprozesse am Energieaufwand für die Herstellung der Innendichtung

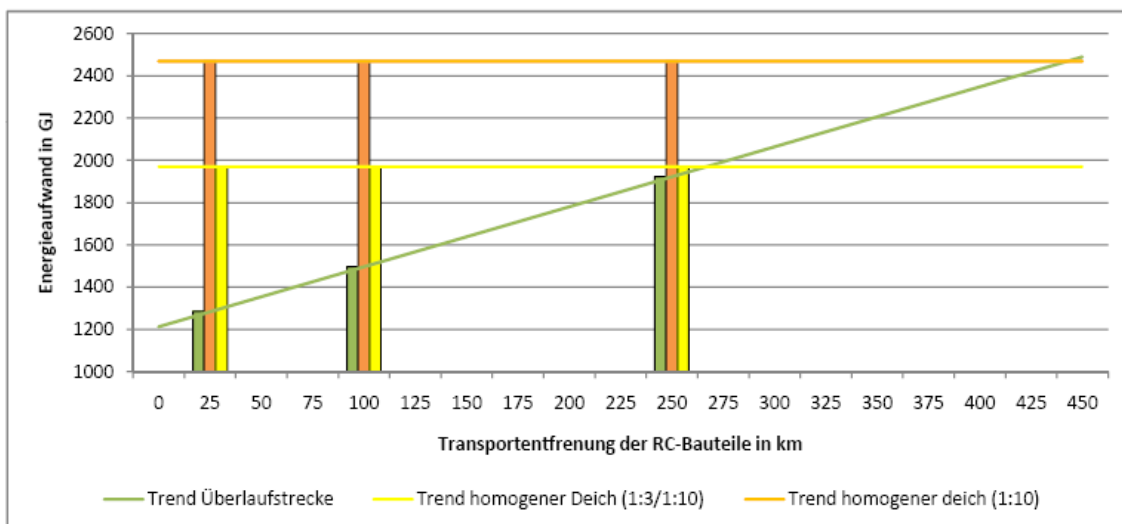
Deutlich wird in Abb. 100 vor allem, dass die Errichtung der Innendichtung inkl. der Transporte, des Kraneinsatzes und überwiegend des Betoneinsatzes fast 1/3 der energetischen Aufwendungen des gesamten Bauprozesses ausmachen. Ursachen liegen vor allem im Betoneinsatz (knapp 1/4 der Gesamtenergieaufwendungen) für die Herstellung des Streifenfundaments und der Fugenabdichtung. Dies ist dem sehr energieaufwendigen Herstellungsprozesses des Betonausgangsstoffes Zement geschuldet. Gerade für die Ausführung des Streifenfundamentes müssen andere Lösungen gefunden werden, um die Bauteile sicher und dauerhaft aufzustellen.

- **Überlaufstrecke**

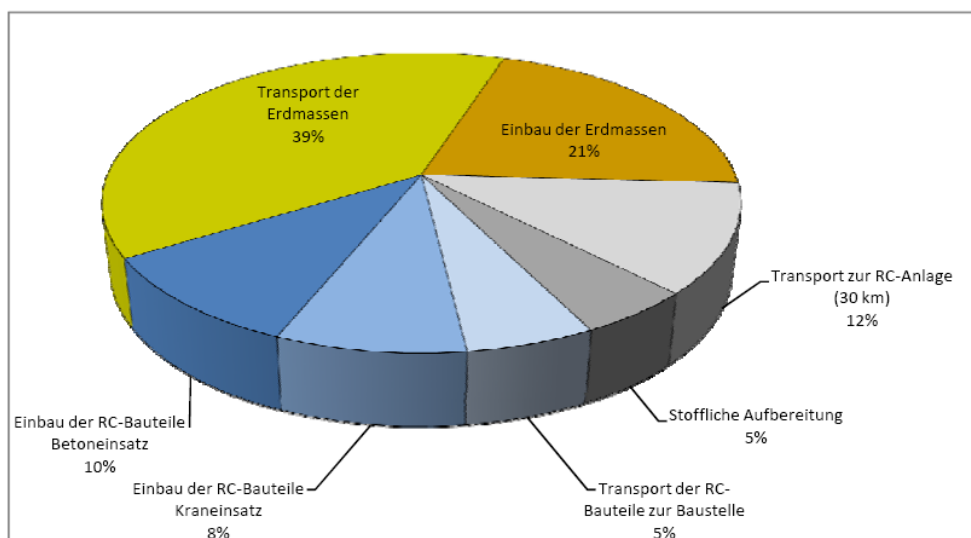
Die Betrachtung der energetischen Gesamtbilanz der Ausführung der Überlaufstrecke gegenüber beiden Vergleichsvarianten in homogener Form zeigt wiederum einen Vorteil für den RC-Bauteileinsatz. Dies liegt in der fehlenden Fundamentierung der Bauteile im Untergrund begründet. Dabei ist der energetische Aufwand gegenüber der Vergleichsvariante IIIa nur die Hälfte des hierfür benötigten Energieeinsatzes. Der energetische Break-even-point für die Transportentfernung der RC-Betonbauteile (s. Abb. 102) liegt beim hier gewählten Fallbeispiel bei über 400 km. Auch im Vergleich der Energieaufwände mit der Vergleichsvariante IIIb ist neu entwickelte Überlaufstrecke bis über 250 km Transportstrecke energetisch rentabel.



**Abb. 101** : Vergleich der Energieaufwendungen für Überlaufstrecken aus RC-Bauteilen und homogenen Ausführungsvarianten



**Abb. 102** Energetischer Break-even-point der Transportentfernung für die RC-Bauteile der Überlaufstrecke

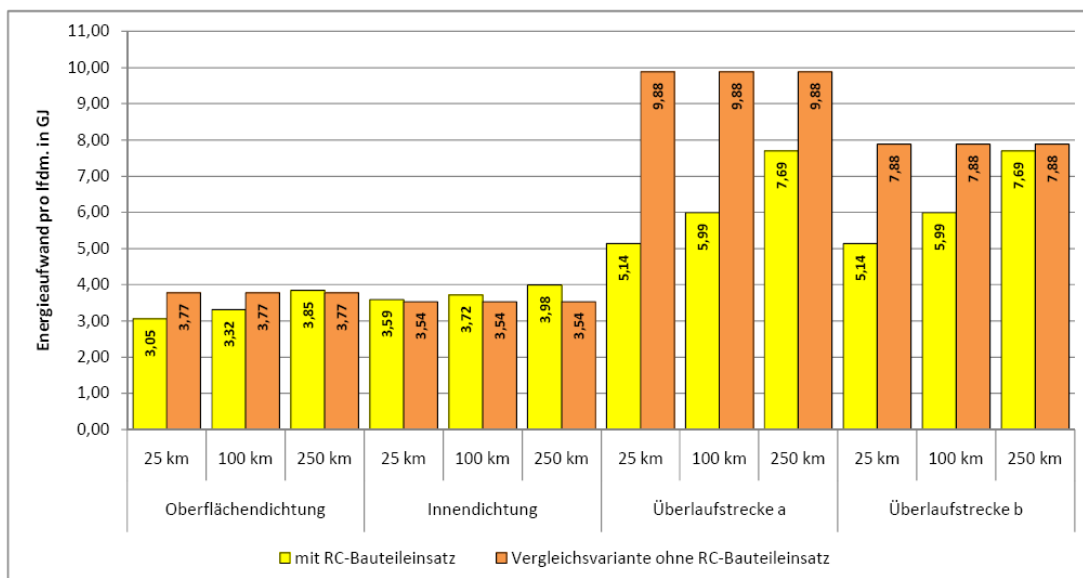


**Abb. 103** : Anteile der Teilprozesse am Energieaufwand für die Herstellung der Oberflächendichtung

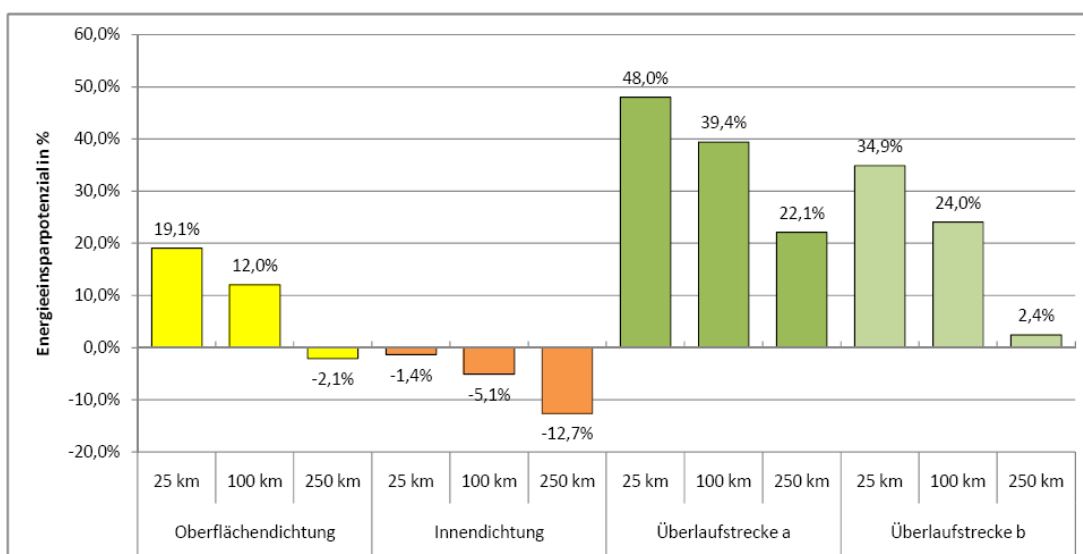


Die Anteile der energetischen Aufwendungen für die Teilprozesse (s. Abb. 103) zeigen auch hier einen hohen Energieeinsatz für den Einbau und Transport der Bauteile. Dies ist vor allem im höheren RC-Bauteilaufkommen je laufenden Meter (lfdm.) Überlaufstrecke gegenüber den Deichbauvarianten mit Oberflächen- und Innendichtung geschuldet. Eine Möglichkeit hier den Energieeinsatz noch weiter zu reduzieren ist die energetisch aufwendige Fugenabdichtung aus Betonmörtel durch alternative energiesparende Abdichtungen zu ersetzen und/oder die Fugenabstände weitestmöglich zu verringern. Dies kann das Einbringen von Ton und tonbasierenden Materialien (wie Bentonit o.ä.) sein.

Abschließend zu den energetischen Betrachtungen zum RC-Bauteileinsatz im Deichbau sollen die für dieses Fallbeispiel ermittelten Energieaufwendungen pro laufenden Meter Deichbauwerk betrachtet werden (vgl. Abb.104). Hier zeigt sich, dass die Überlaufstrecken den durchaus höchsten Energieeinsatz aufweisen. Allerdings beinhalten sie gerade dadurch auch das größte das Einsparpotenzial gegenüber den homogenen Ausführungen der Vergleichsvarianten (s. Abb. 105)



**Abb. 104** : Hochrechnung des Energieaufwandes je laufenden Meter (lfdm.) der geprüften Varianten des Fallbeispiels



**Abb. 105** : Hochrechnung des Energieeinsparpotenzials der geprüften Varianten des Fallbeispiels

### **7.3 Fazit – Ökologische Betrachtungen**

Der ökologische Vorteil des Einsatzes von RC-Betonbauteilen im Deichbau zeigt sich vor allem im Ressourcenschutz. Durch die Umsetzung der entwickelten Varianten können die Flächeninanspruchnahme und der Bodenverbrauch deutlich reduziert werden.

Die Ergebnisse der energetischen Betrachtung können zwar nur als orientierend geltend gemacht werden, da hier aufgrund der geringen Datendichte bisher ein großer Anteil an Annahmen und Hochrechnung die Grundlage bildet. Trotzdem lässt sich aus den durchgeführten Berechnungen ein relativ klarer Trend ablesen: Der Einsatz der RC-Betonbauteile in Oberflächendichtungen und Überlaufstrecken weist einen klaren energetischen Vorteil gegenüber der herkömmlichen Bauweise auf. Für die Herstellung von Innendichtungen müssen neue Lösungen zur Sicherung der Einbaulage (stehend) der Betonbauteile gefunden werden, da insbesondere der große Betoneinsatz zur Herstellung der Streifenfundamente den einzusetzenden Energieaufwand übermäßig nach oben treibt. In der derzeitigen Ausführungsvariante im Deichneubau bzw. bei der Deichertüchtigung mit Teilneubau ist dieser Variante des RC-Betonbauteileinsatzes energetisch nicht sinnvoll. Zu untersuchen sind dabei vor allem Einsatzvarianten in Schlitzwänden bei der Sanierung bestehender Deichbauwerke.

Insgesamt gilt es in den weiteren Arbeiten die Datenbasis für die energetischen Betrachtungen deutlich auszubauen, um im Weiteren klarere Aussagen zum energetischen Wirkungsgrad und Nutzen der entwickelten Varianten treffen zu können. Auf Grund dieser schwachen Datenbasis wurde hier auch auf eine vertiefende Betrachtung der energetisch bedingten Emissionen verzichtet, da diese so nur einen spekulativen Charakter getragen hätte und somit keine wissenschaftliche Grundlage für weitere Interpretationen gegeben hätte.

## 8 Experimentalbau – Versuchsdeichkörper

Im Anschluss der theoretischen Untersuchungen zu den Qualitäten der RC-Betonbauteile aus dem Wohnungsrückbau, zur Standsicherheit der entwickelten Deichbauvarianten unter deren Verwendung, zum wirtschaftlichen und ökologischem Nutzen dieser Varianten galt es auch die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Deichbauvarianten in einem Großversuch nachzuweisen.

Der erwartete Erkenntnisgewinn aus der Durchführung des Großversuchs galt vor allem:

- der technologischen Umsetzung der entwickelten Varianten,
  - konstruktive Anpassung der Varianten,
  - Untersuchung verschiedener Fugendichtungssysteme,
  - Optimierung der Bautechnologie und -organisation,
- dem praktischen Nachweis der Standsicherheit,
  - Simulation von verschiedenen extremen Hochwasserereignissen,
  - Aufnahme von Sickerlinienverläufen und Durchflussmengen,
  - Langzeitverhalten und Dauerhaftigkeit der Konstruktion und der RC-Betonbauteile,
  - Überströmversuche an den Überlaufstrecken.

Zu diesem Zweck wurde ein Versuchsdeichkörper im Maßstab 1:1 entwickelt und auf dem Gelände der Vattenfall Europe AG am Rande des Tagebaus Welzow-Süd errichtet. Die Untersuchung und der Nachweis der Standsicherheit der Konstruktion erfolgte durch die Mitarbeiter der Fachgruppe Bauliches Recycling mit Unterstützung des Ingenieurbüros IHC – IPP Hydro Consult GmbH. Die erforderliche Bauleistung wie auch die Bereitstellung der RC-Betonbauteile wurden durch den Verbundpartner ECOSOIL Ost GmbH bewerkstelligt.

### 8.1 Ausführung des Versuchsdeichkörpers

Der Deichversuchskörper besitzt einen quadratischen Grundriss mit den Außenabmessungen 39,0 m x 39,0 m (s. Abb. 106). Sein Untergrund ist durch eine Tonschicht in einer Stärke von 0,5 m auf einer Fläche von 40,0 x 40,0 m abgedichtet, um eine unkontrollierte Versickerung des Wassers in den Untergrund zu unterbinden. Diese Tonbasisabdichtung ist zum Schutz gegen Ausspülung im Bereich des Speicherbeckengrundes mit einer Schotterschicht geschützt.

Das von vier Seiten eingedeichte Speicherbecken dient der Wasserhaltung während der Versuchsdurchführung. Durch die Stauhaltung im eingedeichten Bereich können die wirklichen Bedingungen und Belastungen an einem Deich bei Hochwasser simuliert werden. Zum Befüllen und Entleeren des Beckens ist untergründig eine Rohrleitung mit entsprechendem Ein- und Auslauf verlegt worden. Der Zu- und Abfluss ist über einen Schieber regulierbar. Die Wasserversorgung erfolgt über einen Anschluss an eine Tiefbrunnenableitung der Vattenfall Europe AG. Für den Einstau werden ca. 550 m<sup>3</sup> Wasser benötigt.

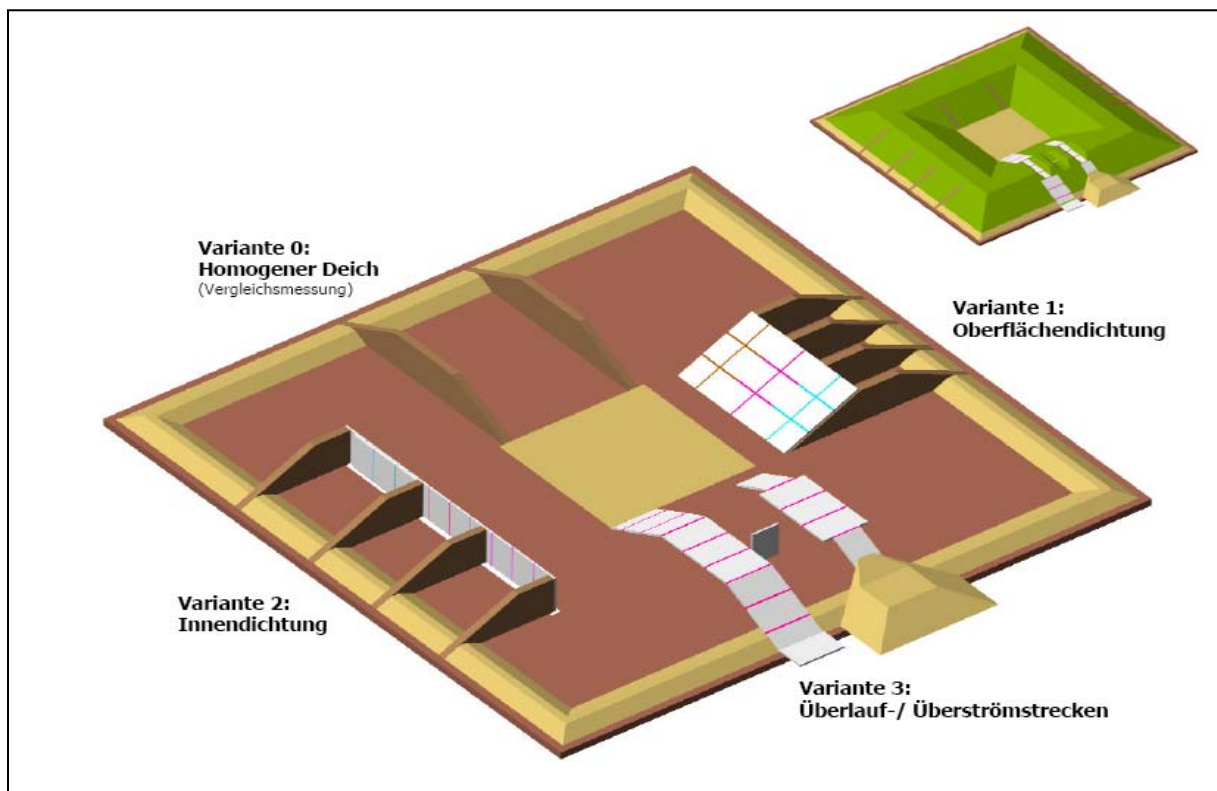
Der Deich ist 3,0 m hoch und weist eine Kronenbreite von 3,0 m auf. Bei der gewählten Böschungsneigung von 1:2 (entgegen den Empfehlungen der DIN 19 712) ergibt sich damit eine Gesamtbreite des Deichquerschnitts von 15,0 m. Damit kann der Versuchsdeich (nach Abschn. 3.1.2) den großen Deichen (hohe Schadenspotenziale) zugeordnet werden. Nach Abschn. 3.1.3 werden für diese Deiche Mindestfreiborde von 0,5 m empfohlen. Bei einem für den Versuchsdeichkörper gewählten Bemessungshochwasserstand (BHW) von 2,30 m ist dieser Empfehlung Rechnung getragen. Die Überlauf-/Überströmstrecken (drei Einzelabschnitte) wurden in einer Deichhöhe von 2,3 m mit einer Kronenbreite von 5,8 m und einer Böschungsneigung von 1:2 ausgebildet.

Der Deichkörper ist aus homogenem Bodenmaterial (Rekultivierungsboden der Vattenfall Europe AG) erstellt und begrünt. Umlaufend um den gesamten Deichkörper ist ein Filterfuß aus Kies mit einer Höhe und Kronenbreite von 0,5 m sowie einer Basisbreite von 2,5 m angeordnet und gegen das anstehende Deichbaumaterial mit einem Filtertextil (Breite 2 m) gesichert. (s. Skizze Abb. 109)

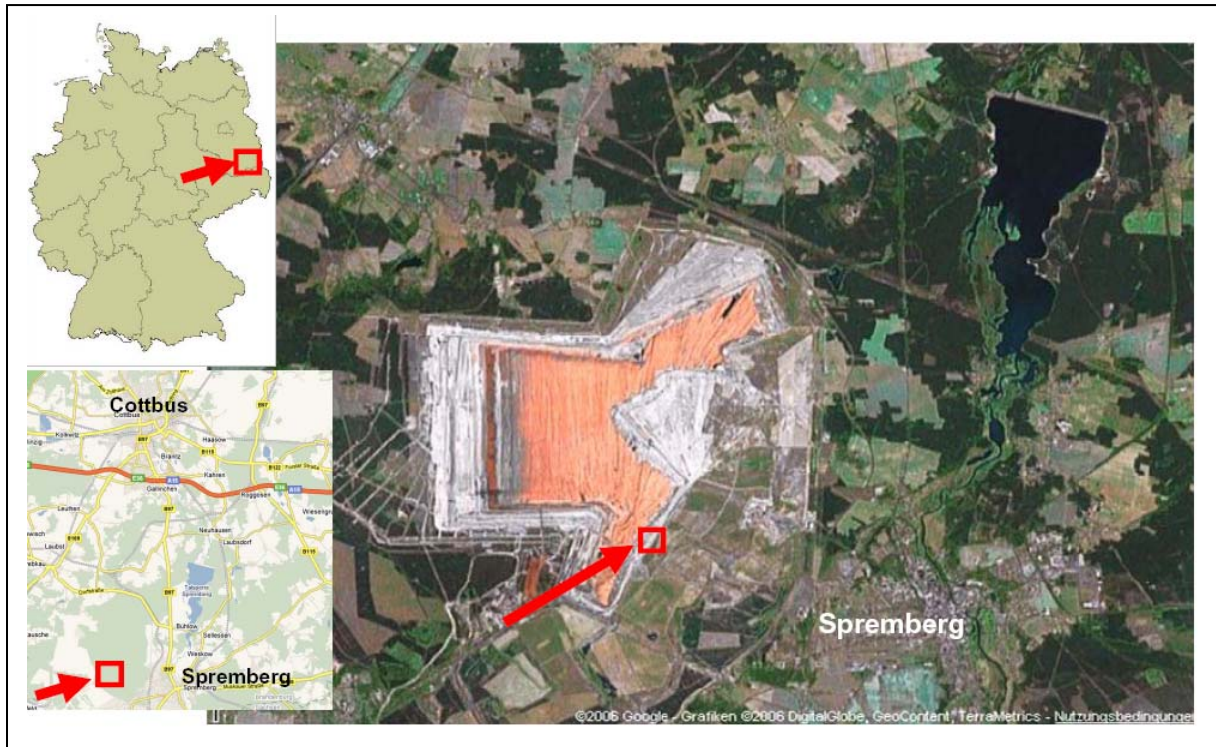
Auf den vier Seiten des Versuchskörpers werden verschiedene Einsatzvarianten für rückgebaute Betonelemente errichtet. Diese sind:

- Variante 0: Homogener Deich (Vergleichsmessung)
- Variante 1: Oberflächendichtung,
- Variante 2: Innendichtung.
- Variante 3: Überlauf- und Überströmstrecken

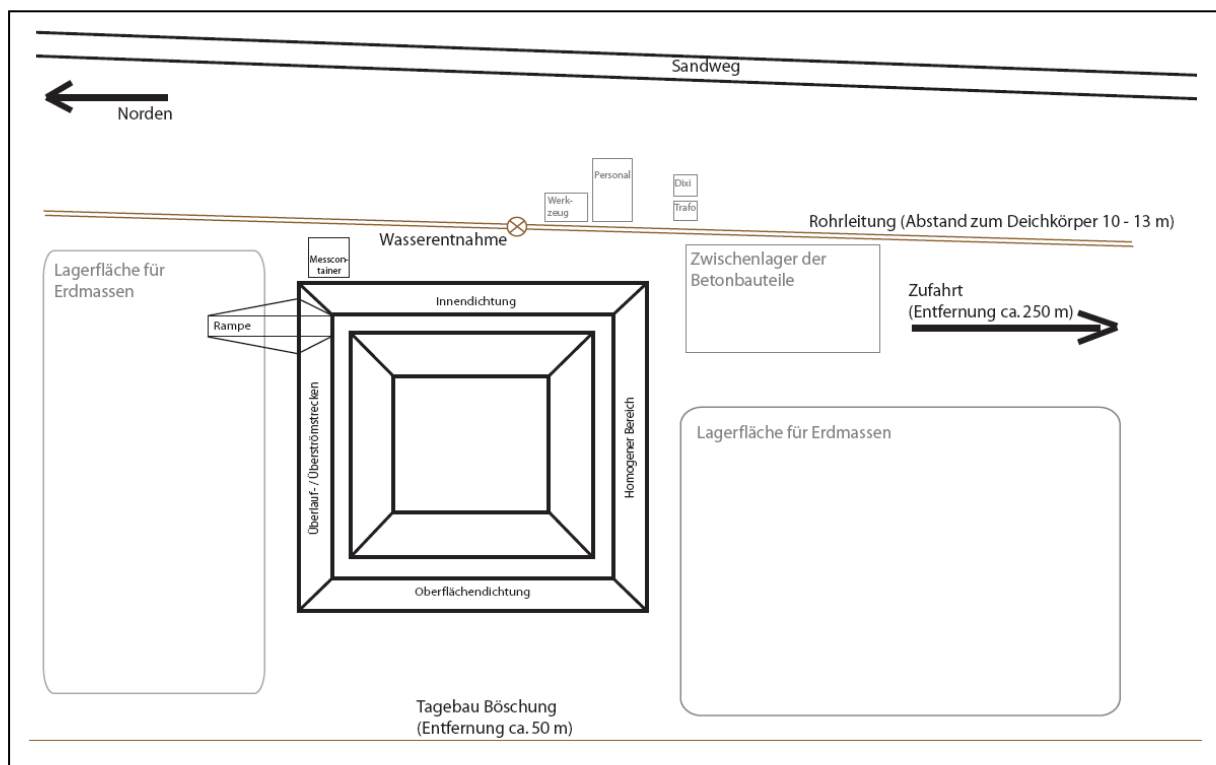
Die einzelnen Varianten und Untersuchungsabschnitte verwendeter verschiedener Fugendichtungsmaterialien wurden durch vertikale Tonschichten voneinander getrennt.



**Abb. 106** : Modell des Versuchsdeichkörpers



**Abb. 107** : Standort des Versuchsdeichkörpers am Rand des Tagebau Welzow-Süd (Vattenfall Europe AG)



**Abb. 108** : Lageskizze des Versuchsdeichkörpers einschl. der Baustelleneinrichtung (grau)

## 8.1.1 Verwendete Erdstoffe und Materialien

### • Tonbasisabdichtung und Tonschotts

Unter dem gesamten Baukörper des Versuchsdeiches war eine Tondichtung in einer Stärke von 50 cm und der notwendigen Wasserundurchlässigkeit von mind.  $k_f = 10^{-8}$  einzubringen. Durch diese Abdichtung des Untergrundes wird eine Versickerung des Wassers in tiefer gelegene Bodenschichten minimiert und eine optimale Beobachtung der Durchsickerung des Deichkörpers ermöglicht. Ein für die Untergrundabdichtung geeigneter Ton konnte direkt im Tagebau Welzow Süd entnommen und untersucht werden.

- Proctorversuch (DIN 18127)
  - Ergebnis: optimale Verdichtung ( $D_{pr} = 100\%$ ),  
Trockendichte  $\phi_d = 1,670 \text{ g/cm}^3$   
bei einem Wassergehalt von  $w_{opt} = 15,8\%$
- Wasserdurchlässigkeitsversuch (DIN 18130)
  - Ergebnis: bei 100% Proctordichte ergab  
 $k_f$ -Wert von  $k_f \approx 9,4 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$

Damit konnte dieser Ton für die Untergrundabdichtung als auch für die Herstellung der Tonschotts als geeignet eingestuft und eingesetzt werden. Dafür waren ca.  $800 \text{ m}^3$  verdichteter Ton (ca. 1.440 t) von der ca. 3,5 km entfernten Tonlagerstätte der Vattenfall AG anzutransportieren und einzubauen. Der Einbau als Basisabdichtung erfolgte in 3 Lagen.

### • Schotterschicht

Im Bereich des Speicherbeckens (9 m x 9 m) ist die Basistondichtung mit einer 20 cm starken Schotterschicht gegen Ausspülungen durch das einströmende Wasser gesichert worden. Dazu waren ca.  $16 \text{ m}^3$  (ca. 30 t) Schotter anzutransportieren und einzubauen.

### • Deichgrundkörper

Für die Standsicherheit des Deichgrundkörpers mussten aufgrund der bewusst gewählten steileren Böschungsneigung von 1:2 hohe Anforderungen, vor allem bezüglich der Wasserdurchlässigkeit, an das Bodenmaterial gestellt werden. Der Erdstoff für den Deichgrundkörper sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- schluffiger Sand SU oder SU mit dichter Lagerung,
- Reibungswinkel  $\varphi = 35^\circ$ ,
- Wichte  $\psi = 19 \text{ kN/m}^3$ ,
- Durchlässigkeit  $k_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Im Vorfeld wurden verschiedene Bodenmaterialien vom Tagebau Welzow Süd untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tab. 59 zusammengefasst.

**Tab. 56:** Zusammenfassung der Voruntersuchungen zum Bodenmaterial des Deichgrundkörpers

Entnahme- datum	Entnahme- ort im Ta- gebau Wel- zow Süd	entnommen durch:	durchgeführte Untersuchungen				als Deich- material geeig- net
			Bodenart	Proctor- dichte $\rho_d$	optimaler Wasserge- halt $w$	Wasser- durchläs- sigkeit $k_f$	
			DIN 18123	DIN 18127	DIN 18127	DIN 18130	
			[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[m/s]	ja / nein
Mai 2006	Kippe	Fr. Reinfeld	SU	1,669	20,4	$4 \cdot 10^{-5}$	ja
August 2006	nicht be- kannt	Hr. Heyn	SE	-	-	-	nein
September 2006	Haufen an Versuchs- deichstelle	Fr. Tobias Hr. Heyn,	SE	-	-	-	nein
September 2006	Nordrand	Fr. Tobias	SU	1,679	15,6	$5,51 \cdot 10^{-8}$	nein
September 2006	Vorfeld	Fr. Tobias	SU	1,875	10,3	$1,24 \cdot 10^{-6}$	ja
September 2006	Vorfeld	Fr. Tobias	SU	1,955	8,3	$2,95 \cdot 10^{-7}$	ja
Oktober 2006	Vorfeld	Fr. Tobias	SU	1,820	9,4	$2,50 \cdot 10^{-6}$	ja
November 2006	Nähe Ton- deponie	Fr. Tobias Hr. Heyn	SU	2,015	10,5	$7,71 \cdot 10^{-8}$	ja

Die Bereitstellung der Erdstoffmassen für den Deichgrundkörper in den erforderlichen Qualitäten stellte sich als äußerst schwierig dar. Die am Standort verfügbaren Böden waren nicht geeignet. Beprobte Erdstoffe in Standortnähe wurden ebenso als ungeeignet eingestuft. Zum Teil wurden geeignete Materialien auf der Kippe bzw. im Tagebauvorfeld durch den laufenden Tagebaubetrieb überschüttet oder abgebaggert bevor diese sichergestellt werden konnten.

Somit wurde auf einen sehr wasserundurchlässigen Boden ( $k_f = 7,71 \times 10^{-8}$ ) zurückgegriffen, welcher durch die Vattenfall Europe AG als Rekultivierungsmaterial in der Nähe der Tondeponie des Tagebaus Welzow-Süd abgelagert wurde. Aufgrund des geplanten Einsatzes des Materials zur Rekultivierung durch die Vattenfall Europe AG wurde im Einverständnis aller beteiligten Partner auf den zusätzlichen Einbau einer Oberbodenschicht verzichtet. Die weiteren ermittelten Parameter sind in Tab. 60 grau unterlegt. Benötigt wurden ca. 2.300 m<sup>3</sup> verdichteter Erdstoff. Dies entspricht einer zu transportierenden Masse von ca. 4.600 t, welche aus einer Entfernung von ca. 3,5 km antransportiert werden musste.

- **Filterkies**

Als Filtermaterial wurde ein Kies der Korngruppe 2/8 nach DIN 4226 eingesetzt. Benötigt wurden ca. 300 m<sup>3</sup> mit einer Gesamtmasse von ca. 480 t.

- **Geotextil**

Um ein Versanden des Filterfußes durch ausgespültes Bodenmaterial aus dem Deichgrundkörper zu verhindern, wurde das Kiesfilterprisma mit einer Lage Geotextil umschlossen. Verwendet wurde ein Geotextil F-30 der Fa. Fibertex.

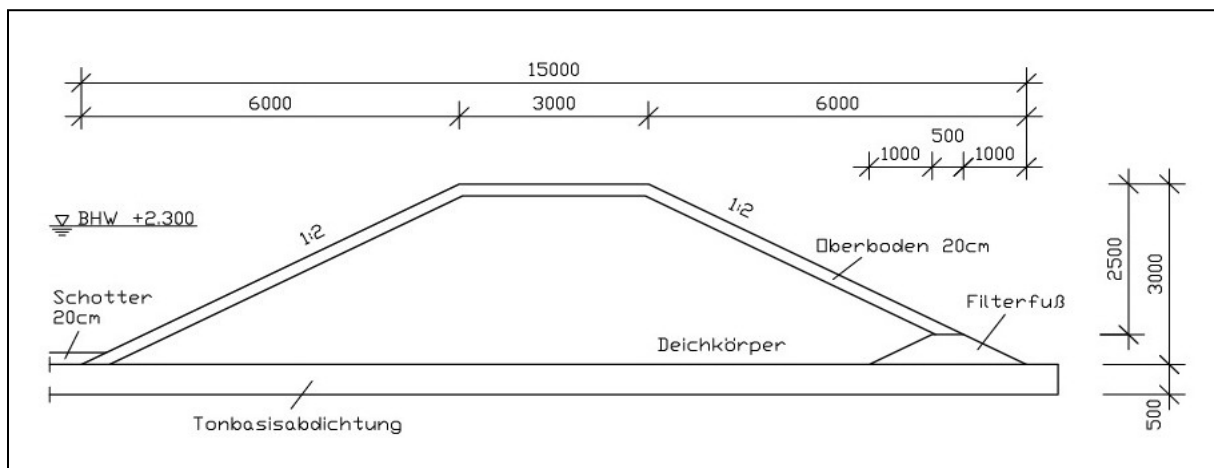
- **RC-Betonbauteile**

Verbaut worden sind 20 Jahre alte Spannbetondeckenplatten eines WBS 70 Spendergebäudes aus Dresden (5,98 m x 1,78 m x 0,14 m) mit den Bauteilnummern D 410, D 412, D 413, D 481, D 482. Die Deckenplatten wiesen keine Risse oder größeren Beschädigungen auf. Die Betondruckfestigkeitsklasse C 35/45 nach DIN EN 206-1 der Bauteile wurde über die beschädigungsfreie Rückprallmessung ermittelt. Die weiteren Qualitäten geeigneter RC-Betonbauteile wurden ausführlich in Abschn. 4 beschrieben.

Die Deckenplatten wurden in ihrer Länge auf 3 m halbiert, um ihre Anzahl und somit die Anzahl der Fugen zu erhöhen und damit den erwarteten Schwachpunkt der Dichtigkeit zu testen.

### 8.1.2 Variante 0: Homogener Deich

Diese Variante dient als Referenzkörper für die vergleichende Nullmessung (s. Abb. 109). Nach der Terminologie der DIN 19 712 handelt es sich hierbei um einen 2-Zonen-Deich. Der Filterfuß des homogenen Deichs entspricht dem Dränkörper des 2-Zonen-Deichs (vgl. Abschn. 3.1.4.2, Abb. 13). Die Abb. 63 veranschaulichte bereits die errechnete Entwicklung der Sickerwasserlinie.

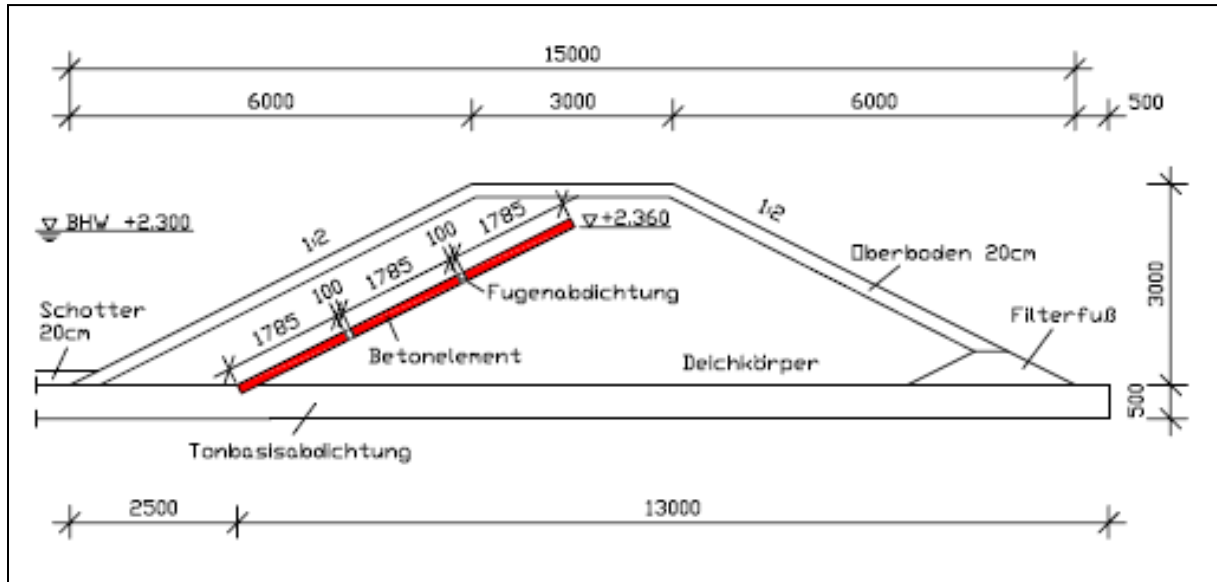


**Abb. 109** : Schnittdarstellung der Variante 0: Homogener Deich



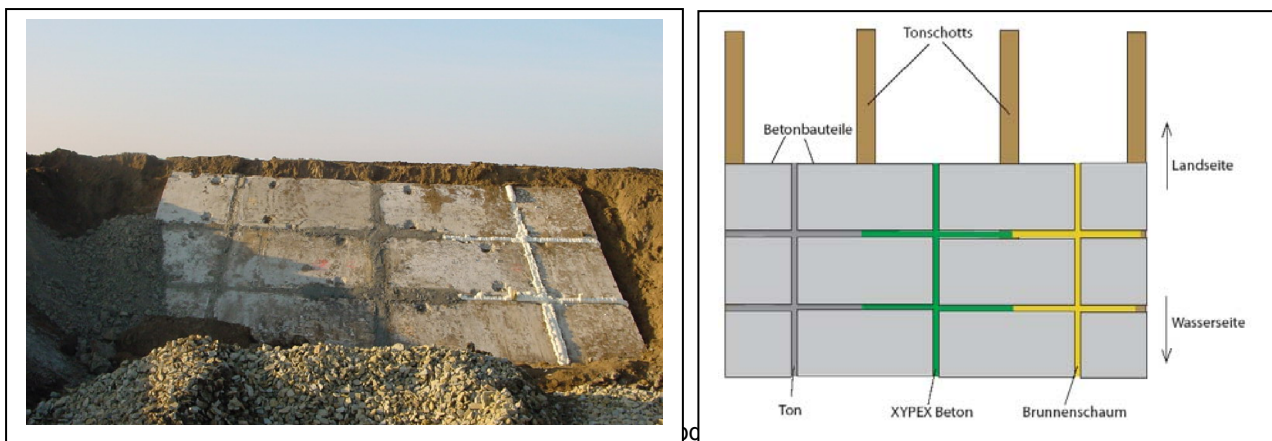
### 8.1.3 Variante 1: Oberflächendichtung

Diese Variante kann für den Deichneubau als auch zur Sanierung bestehender Deiche verwendet werden. Zu ihrer Erstellung wurden Betonelemente als Flächendichtung auf der wasserseitigen Böschung des Deiches aufgelegt und mit ca. 1 m Deichmaterial als Vegetationsträger überdeckt. Diese Bodenschicht übernahm gleichzeitig die Frostschutzfunktion der Elemente. Die Betonbauteile wurden direkt auf der hergestellten Böschung des Deichgrundkörpers verlegt (s. Abb. 110).



**Abb. 110** : Schnittdarstellung der Variante 1 – Oberflächendichtung

Die Plattenfugen wurden mit drei verschiedenen Fugendichtstoffen XYPEX-Beton, gestampften Ton sowie Brunnenschaum abgedichtet (vgl. Abb. 111). Die einzelnen Abschnitte wurden durch vertikale Tonschichten voneinander getrennt. Flankierend der Oberflächendichtung erfolgte auf beiden Seiten der Einbau einer Tonschüttung, um ein seitliches Umströmen dieser zu unterbinden (s. Abb. 112, li.).



Die errechnete Entwicklung der Sickerwasserlinie bei der Oberflächendichtung wurde bereits in Abb. 69 dargestellt.

### 8.1.4 Variante 2: Innendichtung

Diese Variante wurde insbesondere für den Bau neuer Deichanlagen entwickelt. Die 3 m hohen Bauteile wurden längs der Deichachse senkrecht aneinander gereiht und in ein bewehrtes Streifenfundament gestellt (Abb. 112). Über eine Länge von ca. 5,50 m wurden die Platten doppelwandig, direkt gegen die 1. Reihe gestellt (Abb. 113).

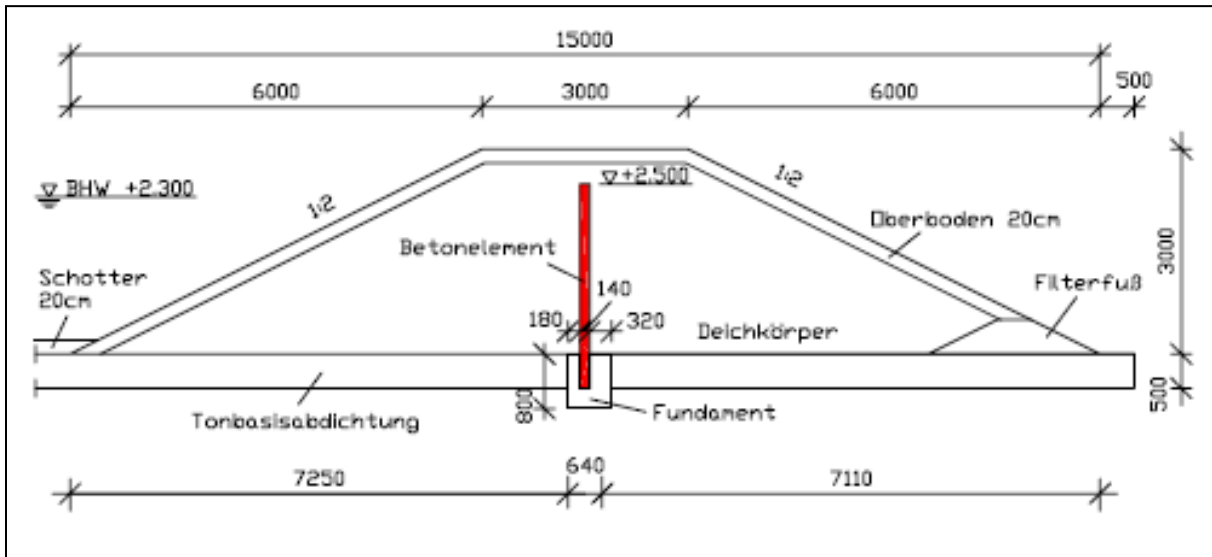


Abb. 112 : Schnittdarstellung der Variante 2 – Innendichtung (einwandig)

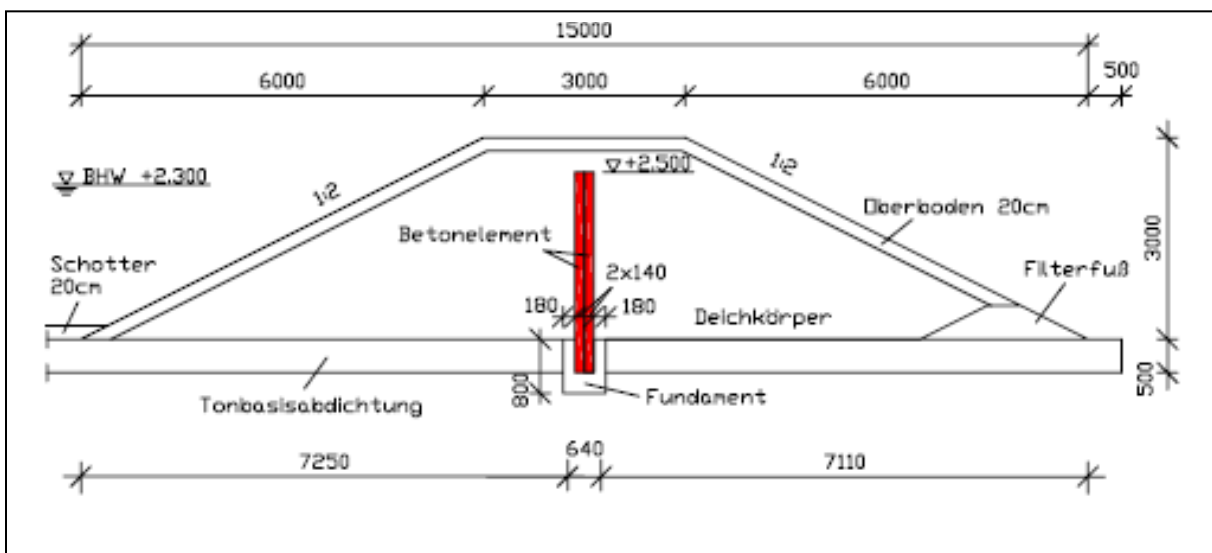


Abb. 113 : Schnittdarstellung der Variante 2 – Innendichtung (doppelwandig)

Für die Herstellung des Streifenfundamentes wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 verwendet, welcher den Anforderungen der Expositionsklasse XC2 nach Din EN 206-1 entspricht. Die Bewehrung besteht aus einem Betonstahl BSt 500. Die Betondeckung  $nom\ c$  ist 3,5 cm. Die Bewehrung des Streifenfundamentes wurde gemäß den in Abb. 114 dargestellten Bewehrungsplänen ausgeführt.

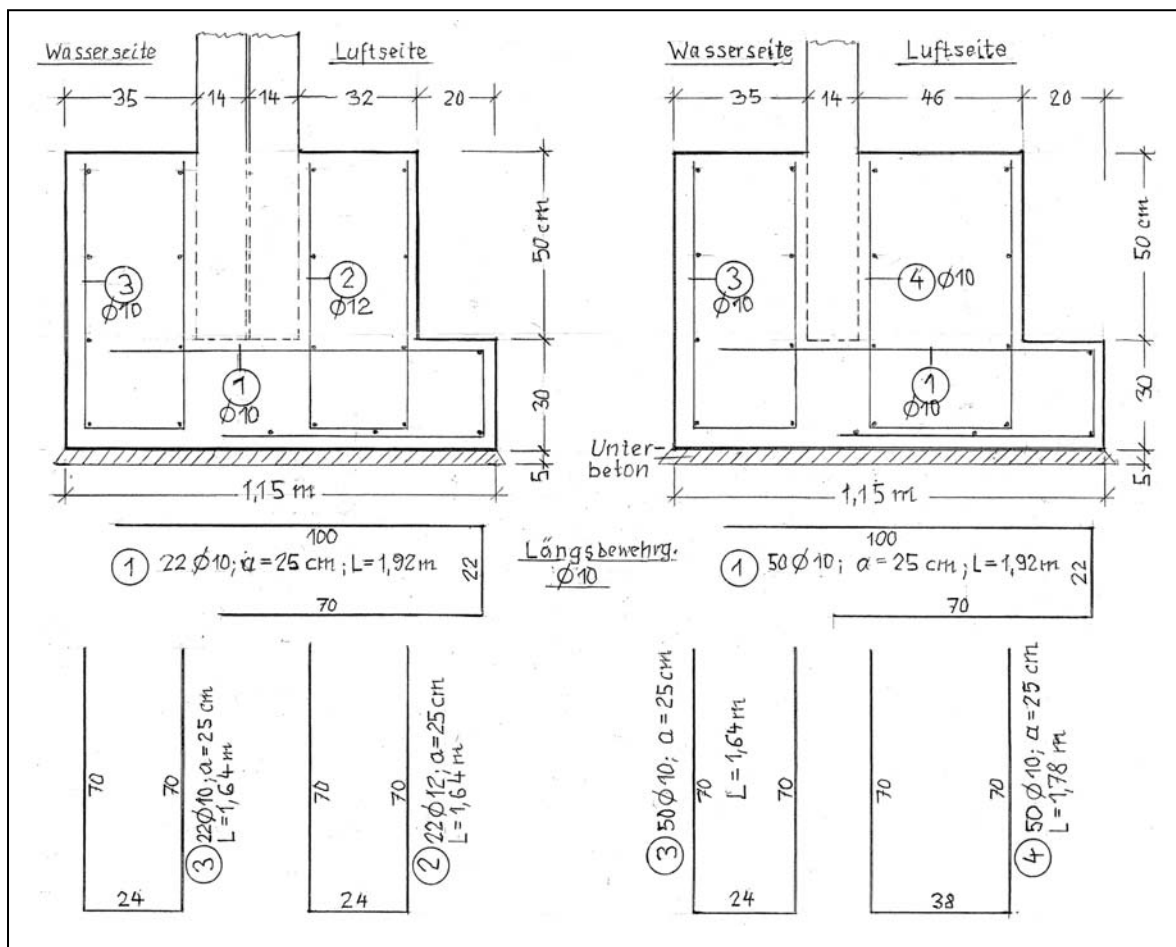


Abb. 114 : Bewehrungsplan des Streifenfundaments

Die eingesetzten Spannbetondeckenplatten dürfen keine Beschädigungen aufweisen und sind mit ihrer ehemaligen Unterseite in Wasserrichtung aufgestellt. Die Fugen wurden mit verschiedenen Dichtstoffen (Dichtungsprofile Orbit-Flex.B der Fa. Orbit-System GmbH, XYPEX-Beton und Brunnen-schaum) abgedichtet (Abb. 115).

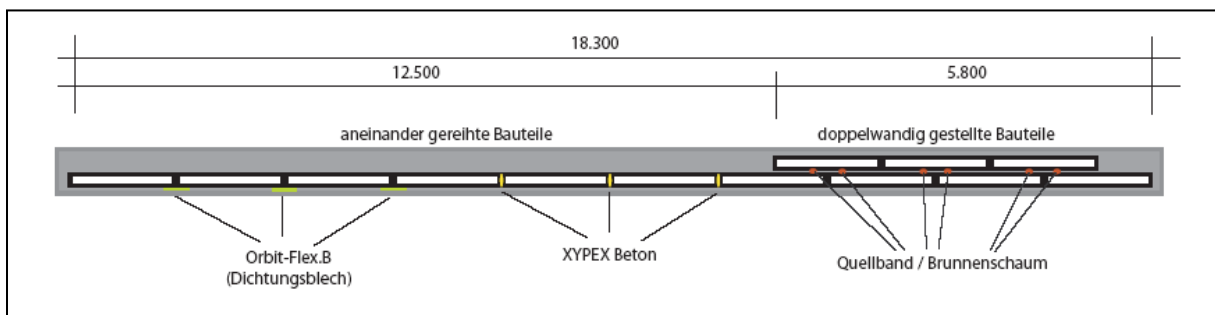


Abb. 115 : Draufsicht Ausführung der Fugenabdichtungen - Innendichtung

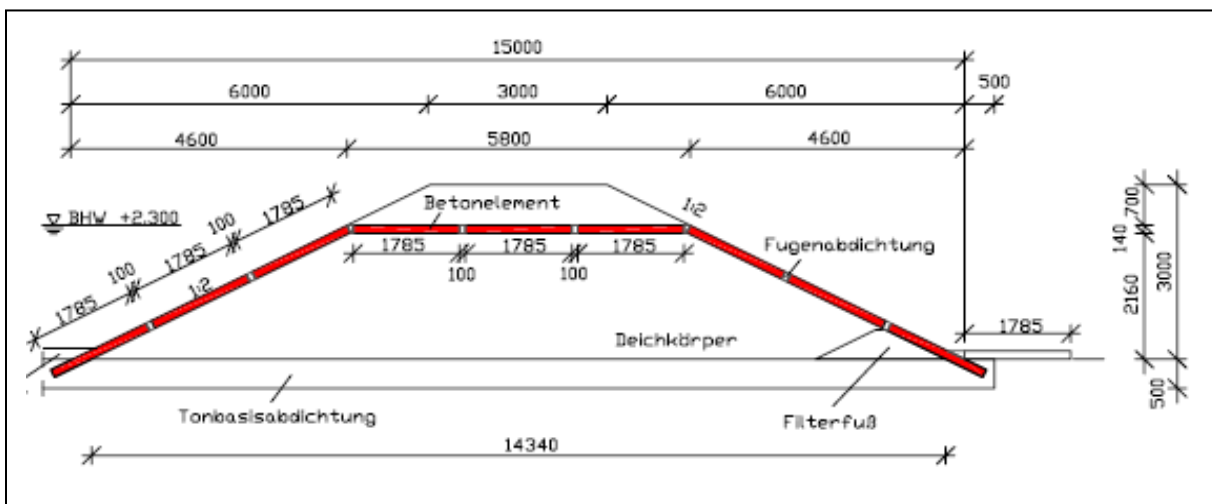


**Abb. 116** : Herstellung der Innendichtung

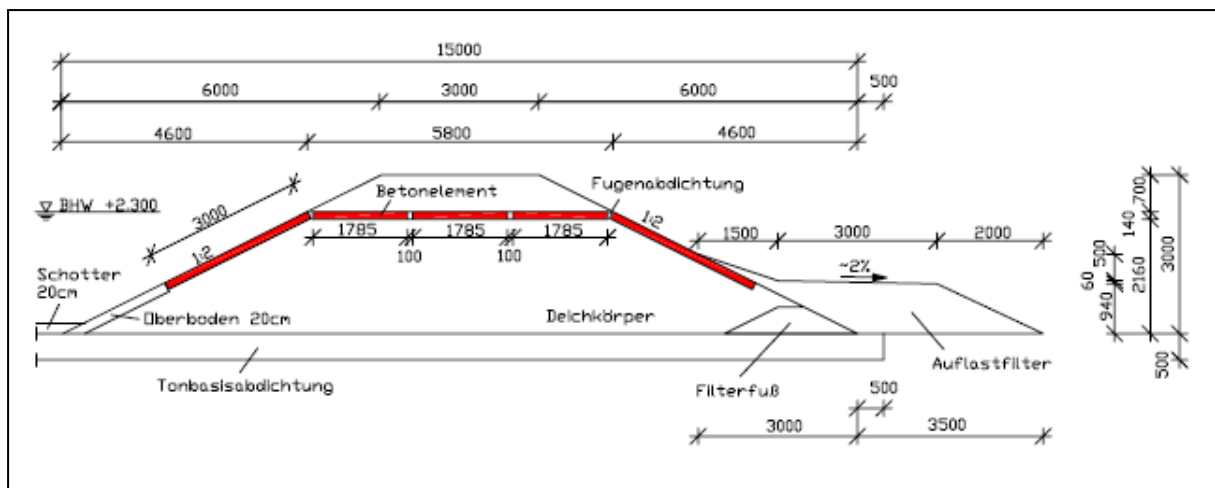
Aufgrund der verschiedenen Fugendichtstoffe sind im Deichkörper drei getrennte Sickerbereiche mittels Querschotts aus Ton geschaffen worden. Die Abb. 73 zeigte bereits die errechnete Entwicklung der Sickerwasserlinie bei der Innendichtung.

### 8.1.5 Variante 3: Überlauf- /Überströmstrecken

Die Errichtung von Überlauf-/Überströmstrecken unter Verwendung von Betonfertigteilen kann sowohl beim Deichneubau sowie Deichsanierung erfolgen. Durch den Einsatz der Betonfertigteile wird der Deich im Falle einer Überströmung vor Erosion geschützt. Durch die oberflächige Auflage von Betonfertigteilen im Bereich der Deichkrone wird hierbei eine Auflast erzeugt, die zur Erhöhung der Standfestigkeit des Deichkörpers dient. Eine zusätzliche Auflast wurde erzeugt auf der landseitigen Deichoberfläche mittels Betonfertigteile - Variante 3.1 (Abb. 117) oder einer Berme aus Recyclingschotter - Variante 3.2 (Abb. 118). In der Variante 3.1 sind zum Erosionsschutz auch wasserseitig Betonfertigteile bis zum Deichfuß verlegt. In der Variante 3.2 erfolgte nur die wasserseitige Verlegung im oberen Bereich des Deichkörpers mit einem Element. Zum Schutz des landseitigen Deichfußes vor Auskolkung bei Überströmung wurde hier ebenfalls ein zusätzliches Betonfertigteil verbaut. Die Fugen zwischen den Bauteilen wurden mit Fugendichtstoff (XYPEX-Beton) geschlossen.

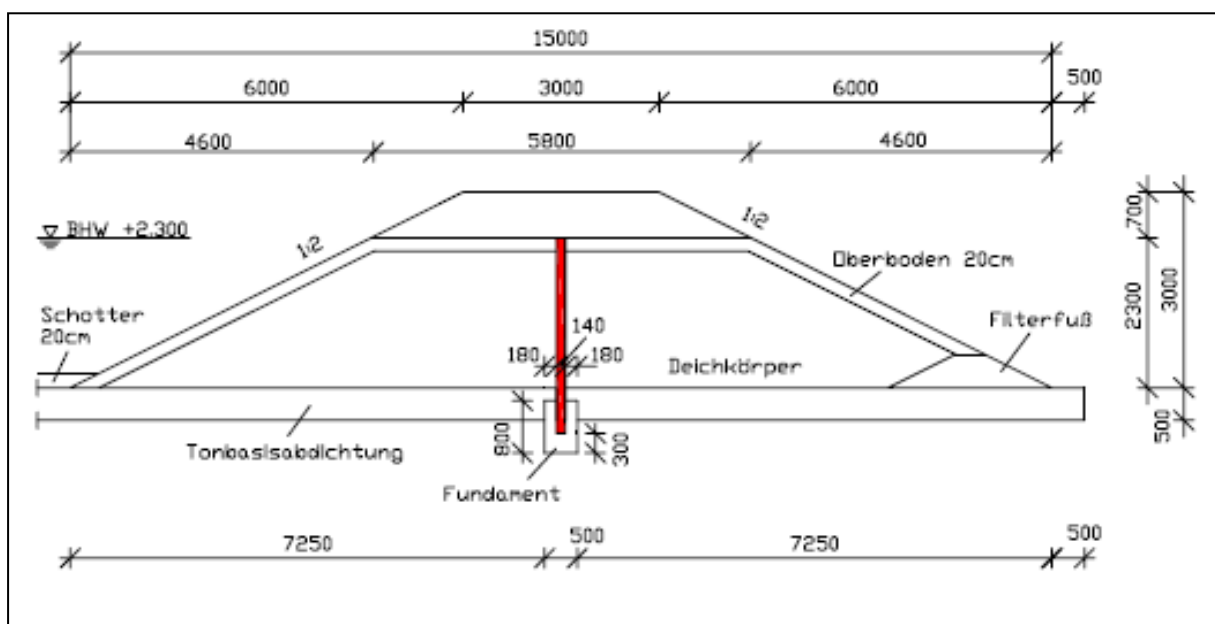


**Abb. 117** : Schnittdarstellung der Variante 3.1 – Überlaufstrecke komplett aus RC-Betonbauteilen



**Abb. 118** : Schnittdarstellung der Variante 3.2 – Überlaufstrecke mit Auflastfilter

Zusätzlich zu den beiden Überlaufstrecken Var. 3.1 und 3.2, welche auf dem Prinzip der Variante 1 Oberflächendichtung basieren, ist eine Überströmstrecke angelegt. Diese beruht auf dem Grundgedanken der Innendichtung. (s. Abb. 119)



**Abb. 119** : Schnittdarstellung der Variante 3.3 – Überströmstrecke mit Innendichtung

## 8.2 Bauausführung

Die Baustelle für die Herstellung des Versuchsdeichkörpers wurde am 04.09.2006 eingerichtet. Dazu wurden ab diesem Tag die Sozialeinrichtungen wie Bauwagen, Mobiltoilette und Werkzeugcontainer aufgestellt und 2 Bagger, eine Walze angeliefert.

### 8.2.1 Erstellen der Tonbasisabdichtung

Am 05.09.2006 wurde die ca. 50 cm tiefe Baugrube für die Tonbasisabdichtung ausgehoben, die Rohrleitung zur Befüllung und Entleerung des Speicherbeckens verlegt und am folgenden Tag das erforderliche Planum hergestellt. Nach dem ein Bagger zur Tondeponie umgesetzt wurde, konnten am 06.09.2006 mit dem Einbringen der ersten Tonlage begonnen werden. Für den Transport der Tonmassen waren an 2 Arbeitstagen 4 an einem Tag 6 LKW im Einsatz. Die 2. Lage der Tonschicht war am 11.09.2006 eingebaut und verdichtet, die Basisabdichtung somit fertig gestellt

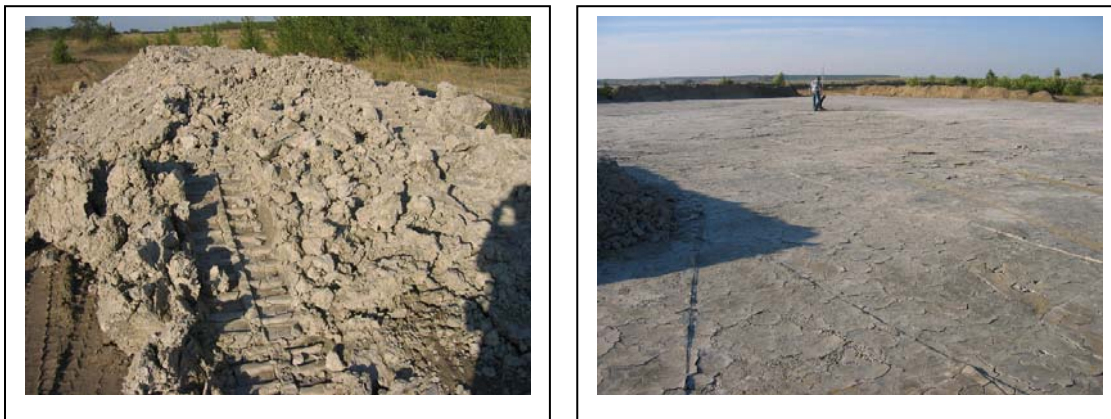


Abb. 120 : Herstellung der Tonbasisabdichtung



Abb. 121 : Rohrleitungsenden zur Befüllung und Entleerung

### 8.2.2 Erstellen des Streifenfundamentes der Innendichtung (Var. 2)

Am 18.09.2006 wurden die Bewehrungseinlagen für die Streifenfundamente der Innendichtung vorbereitet und die Bewehrungskörbe verflochten. Am darauffolgenden Tag wurde die Baugrube für das Fundament aus der Tonschicht ausgekoffert und die Bewehrungskörbe verlegt. Am 20.09.2006 wurde die Schalung der Fundamente gesetzt und mit Beton vergossen. Dabei wurde eine Aufkantung hergestellt, welche wasserseitig der Dichtung bereits bis zur endgültigen Fundamenthöhe reichte (s. Abb. 122). An dieser Aufkantung sollten die Betonbauteile besser ausgerichtet werden können. So sollte das Stellen der Betonbauteile vereinfacht und beschleunigt werden. Allerdings entstand durch die gewählte Ausführung ein schwer verschließbarer Spalt entlang der Fuge dieser Aufkantung zum Betonbauteil. Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass die Herstellung des Streifenfundamentes zunächst nur bis in Höhe der Auflagerfläche der Betonbauteile zu erfolgen hat. Abschließend muss das Fundament auf beiden Seiten vergossen werden. So kann der Frischbeton des Fundamentes beidseitig eine dichte Bindung mit den Betonbauteilen eingehen und ein Unterströmen der Bauteile im Fundament unterbunden werden.



Abb. 122 : Streifenfundament der Innendichtung – Var. 2

### 8.2.3 Stellen der RC-Betonbauteile der Innendichtung (Var. 2)

Die Anlieferung der RC-Betonbauteile erfolgte am 21. und 22.09.2006. Die angelieferten RC-Betonbauteile wurden daraufhin in ihrer Länge mit einem Betonschneider halbiert.



Abb. 123 : Anlieferung der RC-Betonbauteile



**Abb. 124** : Halbieren der RC-Betonbauteile

Am 26.09.2006 wurde mit dem Stellen der Innendichtung begonnen. Dabei wurden die Bauteile mit dem Bagger transportiert. Der Anschlag erfolgte über Dübel an den oberliegenden Stirnseiten der RC-Bauteile. Die Elemente wurden beidseitig mittels Montagestreben ausgerichtet und gesichert.



**Abb. 125** : Anschlag der RC-Betonbauteile



**Abb. 126** : Gestellte und gesicherte RC-Bauteile der Innendichtung

Am 29.09.2006 wurde das Streifenfundament im Bereich der einfach gestellten Innendichtung fertig ausbetoniert. Parallel des Aufstellens der RC-Betonbauteile der Innendichtung wurde auch das Bauteil für die Überströmstrecke eingebaut und das zugehörige Streifenfundament ausbetoniert.





**Abb. 127** : Gestelltes und gesichertes RC-Bauteil der Überströmstrecke und fertig ausbetonierter Teil der Innendichtung

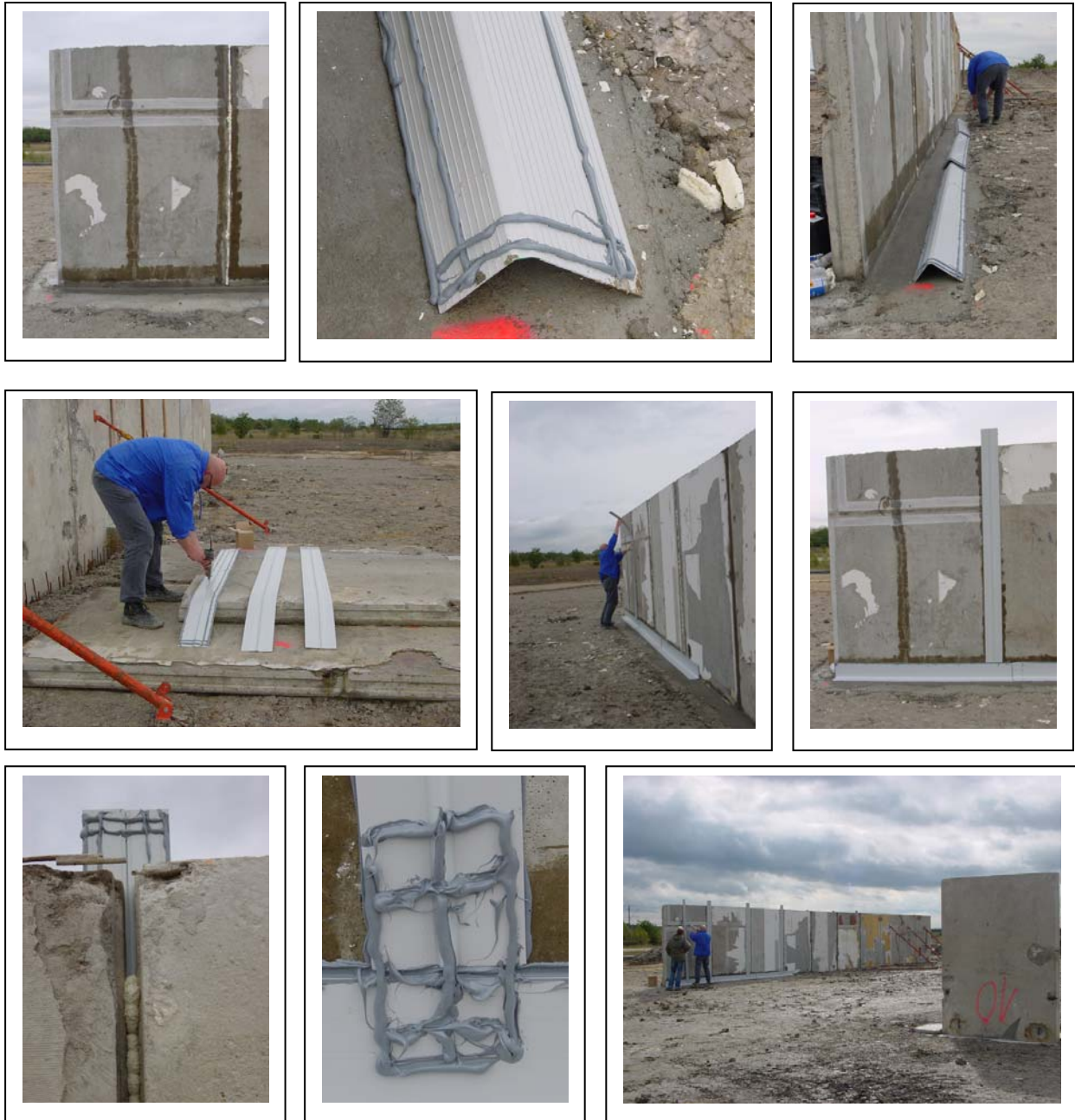
### 8.2.4 Fugenabdichtung Innendichtung (Var. 2)

Am 05.10.2006 wurden die mittleren drei Fugen der Innendichtung mit Betonmörtel verschlossen. Dafür wurden an diesen Fugen beidseitig Schalbretter angebracht. Der Fertigbetonmörtel (C 25/30) wurde mit XYPEX-Addmix entsprechend den Angaben der Herstellerfirma versetzt und von oben in die Fugen eingebracht. Das Zusatzmittel soll Haarrisse und kleinste Hohlstellen in der Mörtelmatrix durch Auskristallisation abdichten.



**Abb. 128** : Herstellen der Fugendichtung aus Betonmörtel im mittleren Untersuchungsabschnitt der Innendichtung

Der zweite Untersuchungsabschnitt wurde am 06. und 07.10.2006 mit Orbit.Flex-Profilen abgedichtet. Ausgeführt wurde dies durch einen Mitarbeiter der anbietenden Firma. Dazu wurden die RC-Bauteiloberflächen im Fugenbereich mit einer Grundierung versehen und die Fugen mit Bauschaum ausgefüllt. Dies soll ein Einknicken der PVC-Profile bei anstehenden Erd- und /oder Wasserdruck verhindern. Die Orbit.Flex-Profile wurden mit zweilagig ausgeführten Streifen eines Spezialklebers versehen und manuell an die RC-Bauteiloberfläche gepresst. Zusätzlich zu den vertikalen Fugen zwischen den Bauteilen wurde ein vertikaler Haarriss im äußeren Bauteil überklebt. Im Bereich des Spaltes zwischen dem Fundament und den eingestellten RC-Bauteilen wurden horizontal Winkelprofile eingesetzt, um hier ein Unterströmen des Bauteils durch das Fundament hindurch zu verhindern.



**Abb. 129** : Herstellen der Fugendichtung der RC-Bauteilfugen mit Orbit.Flex-Profilen (Innendichtung)

Am 11.10.2006 wurden die Fugen des 3. Untersuchungsabschnitts der Innendichtung verschlossen. Hierfür wurden in einer zweiten Reihe auf der landseitigen Seite der Dichtung zusätzliche RC-Betonbauteile in das Fundament eingestellt. Zuvor wurden die abzudichtenden Fugenränder beidseitig mit Quellband versehen. Durch das Ausrichten der zusätzlichen RC-Betonbauteile und damit verbundenes Querverschieben der Elemente wurde das Quellband zwischen beiden Bauteilen gequetscht und zum Teil verdreht. Somit war hier eine dichtende Wirkung des Bandes nicht mehr garantiert. Ein praktischer Einsatz in größeren Bauumfängen ist somit ausgeschlossen. Zur Fixierung der RC-Bauteile der 2. Reihe wurden diese über Schraubzwingen an die Elemente der 1. Reihe verbunden.



**Abb. 130** : Herstellung der doppelwandigen Innendichtung mit Dichtungsband

Nach Stellen des letzten RC-Bauteils der doppelwandigen Fugenabdichtung im 3. Untersuchungsabschnitt der Innendichtung wurde das Streifenfundament mit wasserundurchlässigem Ortbeton C 25/30 abschließend ausbetoniert.



**Abb. 131** : Fertigstellen des Streifenfundamentes (Innendichtung)

Um die Fugen des dritten Untersuchungsabschnittes abzudichten wurde im Nachgang am 07.11.2006 Brunnenschaum in die Fugen zwischen erster und zweiter Elementereihe eingebracht. Die Arbeiten wurden von einer Arbeitskraft in 2 Stunden ausgeführt.



**Abb. 132** : Herstellen der Fugendichtung mit doppeltgestellten RC-Bauteilen und Brunnenschaum (Innendichtung)

### 8.2.5 Aufbau des Erdkörpers

Der Aufbau des Erdkörpers verzögerte sich im weiteren Bauverlauf, da zunächst keine geeigneten Erdmassen in Standortnähe gefunden werden konnten. Der Vorort anstehende Boden wurde als ungeeignet eingestuft. Die Standsicherheit des Bauwerks konnte bei Einsatz dieses Erdstoffes nicht gewährleistet werden. Geeignete Böden aus dem Tagebaumfeld wurden im fortschreitenden Abbau-betrieb bereits vor ihrer Sicherstellung abgebaggert oder überschüttet. Im Endeffekt musste auf einen Erdstoff zurückgegriffen werden, der in der Nähe der Tondeponie durch die Vattenfall Europe AG als Rekultivierungsschicht aufgeschüttet wurde. Dieser Boden weist jedoch ein sehr geringe Durchlässigkeit mit einem  $k_f$ -Wert von  $7,7 \cdot 10^{-8}$  auf und gilt somit selbst als sehr dicht. Die Standsicherheit des Versuchsdeichkörpers war damit aber gegeben.



**Abb. 133** : Entnahmestelle des Erdstoffs für den Versuchsdeichgrundkörper

Antransport und Einbau des Bodens begannen am 14.11.2006. Eingesetzt waren dabei 1 Bagger zum Beladen und 5 LKW im Einsatz. Diese benötigten 5 Arbeitstage von 10 bis 10,5 Stunden. Insgesamt wurden für den Transport ca. 306 Arbeitsstunden aufgewendet.

Der Einbau erfolgte parallel dem Antransport. Die Erdmassen wurden zum Teil direkt an den Deichkörper abgelagert oder gesondert gelagert. Am Deichkörper kamen ein Bagger zum Aufschütten und Verteilen der Erdmassen, später auch ein Radlader sowie eine Walze zum Verdichten zum Einsatz.

Der Erdkörper wurde in Schichten von ca. 0,5 m Höhe eingetragen und verdichtet. Im Abschluss wurde die Böschung durch Abziehen der Oberfläche mit dem Bagger gestaltet.



**Abb. 134** : Einbau des Erdstoffs in den Versuchsdeichgrundkörper

Während der Bauphase des Versuchsdeiches wurde die Dichte des Bodenmaterials im Feldversuch nach DIN 18125-2 bestimmt. Mittels des Ausstechzylindersverfahrens wurden an verschiedenen Stellen und Lagen Bodenproben gewonnen. Die Ausstechzylinder mit den gewonnenen Bodenproben wurden mit Deckeln versehen und mit Klebeband luftdicht abgeschlossen. Anschließend erfolgte im Labor die Wägung der Proben mit Ausstechzylinder. Abzüglich der Masse des Ausstechzylinders wurde die Dichte der Probe über dessen Volumen bestimmt. Darauffolgend wurde die Probe im Trocknungsofen bei 105°C getrocknet und abermals gewogen. Mit der Trockenmasse erhielt man somit die Trockendichte der Probe. Insgesamt wurden 19 Dichtebestimmungen des Bodenmaterials

im Feldversuch durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst und der Vergleichsprobe (Probe aus der Voruntersuchung, identisches Bodenmaterial) gegenübergestellt.

**Tab. 57:** Ergebnisse der Dichtebestimmung des verbauten Erdstoffs aus verschiedenen Lagen

Nr.	Entnahme- datum	Entnahmestelle / Bereich	Dichte der Probe $\rho$	Wasser- gehalt $w$	Trocken- rohdichte $\rho_d$	Differenz der Dichte $\Delta\rho$
			[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
	03.11.2006	Probe aus Voruntersuchung / Vergleichsprobe		10,5	2,015	
1	16.11.2006	Homogener Deich 1. Lage	2,034	9,65	1,855	-0,160
2	16.11.2006	Oberflächendichtung 2. Lage	2,163	10,59	1,956	-0,059
3	16.11.2006	Oberflächendichtung 2. Lage	2,149	10,25	1,949	-0,066
4	16.11.2006	Überlaufstrecke 3. Lage	2,152	8,88	1,977	-0,038
5	16.11.2006	Innendichtung landseitig 3. Lage	2,125	12,18	1,894	-0,121
6	16.11.2006	Homogener Deich 2. Lage	2,064	10,69	1,865	-0,150
2	24.11.2006	Homogener Deich 4. Lage	2,078	9,76	1,893	-0,122
3	24.11.2006	Homogener Deich 4. Lage	2,020	8,64	1,859	-0,156
4	01.12.2006	Innendichtung landseitig 3. Lage	2,136			
7	01.12.2006	Homogener Deich 4. Lage	2,142	8,68	1,971	-0,044
5	01.12.2006	Innendichtung wasserseitig 4. Lage	2,142	9,45	1,957	-0,058
8	06.12.2006	Überlaufstrecke wasserseitig oberste Lage	2,111	9,48	1,928	-0,087
9	06.12.2006	Innendichtung luftseitig vorletzte Lage	2,151	10,83	1,941	-0,074
10	06.12.2006	Innendichtung wasserseitig vorletzte Lage	2,152	10,00	1,957	-0,058
11	06.12.2006	Homogener Deich vorletzte Lage	2,106	10,93	1,899	-0,116



**Abb. 135 :** Entnahme der Erdstoffproben mittels Ausstechzylinder für die Dichtebestimmung

Vier Bodenproben wurden vom fertiggestellten Versuchsdeich an der wasserseitigen, schrägen Oberfläche entnommen. An der schrägen Oberfläche wurden die Ausstechzylinder mittels Platte und Hammer in den Boden gebracht. Mit dieser Methode konnte nicht verhindert werden, dass während des Einschlagens der Boden aufgelockert wurden. Daher sind die in der Tabelle 5 dargestellten Trockendichten der vier Bodenproben mit Fehlern behaftet. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass eine gute Verdichtung an der Schräge des Versuchsdeiches erfolgte.

**Tab. 58:** Ergebnisse der Dichtebestimmung des verbauten Erdstoffs an den Böschungsschrägen

Nr.	Entnahmedatum	Entnahmestelle / Bereich	Dichte der Probe $\rho$	Wassergehalt $w$	Trockenrohdichte $\rho_d$	Differenz der Dichte $\Delta\rho$
			[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
2	19.12.2006	Innendichtung wasserseitig; Oberfläche schräg	1,929	6,58	1,810	-0,205
3	19.12.2006	Oberflächendichtung wasserseitig; Oberfläche schräg	1,889	7,50	1,758	-0,257
4	19.12.2006	Homogener Deich wasserseitig; Oberfläche schräg	2,118	8,10	1,959	-0,056
1	19.12.2006	Überlaufstrecke wasserseitig; Oberfläche schräg	2,041	6,03	1,925	-0,090

Insgesamt zeigen die Werte der ermittelten Trockendichten, dass die Differenzen zur Vergleichsprobe (Probe in der Voruntersuchung) gering sind. Demzufolge konnten der Versuchsdeich mit der erforderlichen Verdichtung aufgebaut werden.

### 8.2.6 Einbau der Tonschotts

Die Tonschotts zur Angrenzung der einzelnen Untersuchungsabschnitte wurden nachträglich schichtenweise eingebaut. Dafür wurde der zunächst 1,0 m hohe Erdkörper in diesen Bereich aufgegraben, der Ton eingebracht und lagenweise mit einer Rüttelplatte und zusätzlich mit der Walze verdichtet. Darauf hin wurde der Erdkörper über seine gesamte Länge und Breite weiter aufgebaut, um so eine ausreichende Verdichtung mit der Walze zu ermöglichen. Über den begonnenen Tonschotts wurde der aufgebaute Erdkörper wiederum aufgegraben, die nun verschmutzte Oberfläche des Tonsstreifens abgezogen und die Tonschotts weiter geführt.



**Abb. 136 :** Arbeitsschritte zum lagenweisen Einbauen der Tonschotts unter der Oberflächendichtung



**Abb. 137** : Weiterer Einbau des Deichgrundkörpers über den zum Teil fertiggestellten Tonschotts

### 8.2.7 Verlegen der RC-Betonbauteile der Oberflächendichtung

Der Aufbau des Erdkörpers der Oberflächendichtung wurde bis zur Auflagerfläche der RC-Betonbauteile vorangetrieben und die Böschung geebnet. Die RC-Betonbauteile wurden über ein Kettengehänge an den vorhandenen Tragösen oder an Dübeln angeschlagen und mit dem Bagger positioniert. Als Abstandshalter zwischen den Bauteilen dienten Holzkeile. Der Einbau der RC-Betonbauteile in die Oberflächendichtung erfolgte am 24. und 28.11.2006.



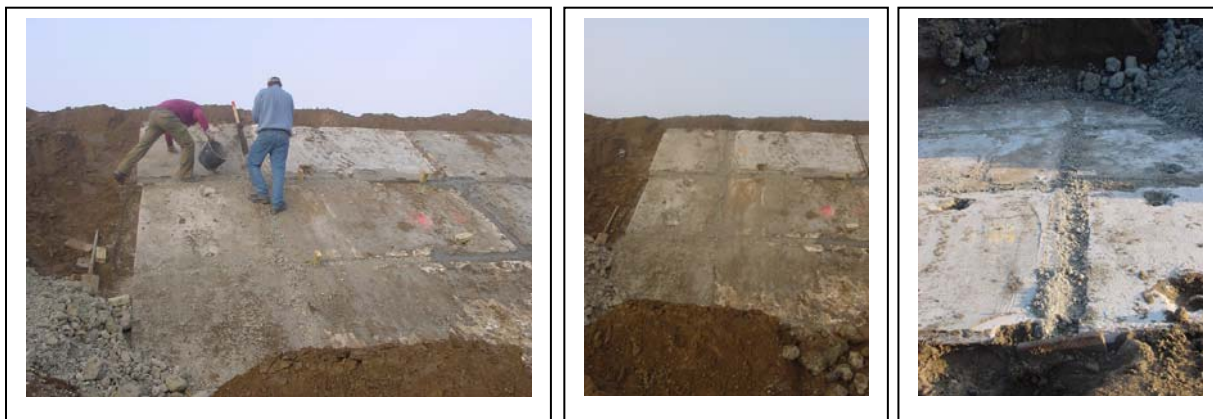
**Abb. 138** : Verlegen der RC-Bauteile der Oberflächendichtung



## 8.2.8 Fugenabdichtung Oberflächendichtung

Am 28.11.2006 wurden die Fugen zwischen den RC-Bauteilen verschlossen. Zuvor wurde in die Fugen unterhalb der einzubringenden Dichtungsschichten des Temperatursensorkabel für die Leckageortung (s. Abschn. 8.3) verlegt.

Im ersten Untersuchungsabschnitt wurde dafür per Hand Ton eingebracht und in die Bauteilzwischenräume gestampft. Dabei erwiesen sich die ca. 10 cm breiten Zwischenräume als sehr eng, was die Verdichtung des Tonmaterials erschwerte.



**Abb. 139** : Fugenabdichtung mit gestampften Ton (Oberflächendichtung)

Im 2. Untersuchungsabschnitt wurde wie bei der Innendichtung mit XYPX-addmix versetzter Betonmörtel eingebracht. Dieser folgte zu Teil der Schwerkraft und bildete vor allem im oberen Anschlussbereich der Fugen schmale Spalte. Hier wurde nach beginnendem Abbinden wiederholt Mörtel aufgetragen, um auch diese zu verschließen.



**Abb. 140** : Fugenabdichtung mit Betonmörtel (Oberflächendichtung)

Der 3. Untersuchungsabschnitt wurde mit Brunnenschaum verschlossen. Dafür musste der Brunnenschaum in mehreren Lagen eingebracht werden, da hierfür die Fugenbreiten zu groß waren.



**Abb. 141** : Fugenabdichtung mit Brunnenschaum (Oberflächendichtung)

Der Bereich der Oberflächendichtung wurde beidseitig der verbauten RC-Betonbauteile bis in die Eckbereiche der Bauwerksinnenseite mit einer Tonschüttung versehen. Durch diese soll ein Umströmen der Oberflächendichtung unterbunden werden.



**Abb. 142** : Fertiggestellte Fugenabdichtung der Oberflächendichtung

Anschließend wurde der Versuchsdeichkörper auf den Seiten des homogenen Deiches, der Innen- und Oberflächendichtung bis zu seiner endgültigen Höhe aufgebaut.



**Abb. 143** : Abdeckung der Oberflächendichtung mit Erdstoff und fortgesetzter Aufbau des Deichkörpers

## 8.2.9 Aufbau der Überlaufstrecken

Am 29.11.2006 wurde im Bereich der Überlaufstrecke Var. 3.1 der bisher erstellte Deichgrundkörper auf eine Breite von 1 m aufgeschichtet. Hier wurde das Temperatursensorkabel für die Aufnahme der Sickerwasserentwicklung unter der Überlaufstrecke verlegt (s. Abschn. 8.3). Danach wurde der Deichgrundkörper fertiggestellt.

Am 05. und 06.12.2006 wurden die RC-Bauteile der Überlaufstrecken verlegt. Der Anschlag erfolgte über die vorhandenen Tragösen und mit alternativen Anschlagpunkten (Dübeln). Für das Verlegen der RC-Bauteile wurde ein Bagger und im unteren Bereich der landseitigen Böschung ein Radlader eingesetzt.



**Abb. 144** : Bereitstellung der RC-Bauteile am Lagerplatz



**Abb. 145** : Verlegen der RC-Bauteile für die Überlaufstrecken Var. 3.1 und 3.2

Die Bauteilabstände betragen ca. 10 cm. Im Böschungsbereich wurden die RC-Bauteile durch Pflöcke gesichert. Die Fugen wurden mit Betonmörtel geschlossen. Auf die RC-Bauteile der Überlaufstrecke Var. 3.2 wurde eine XYPEX-Schlämme aufgetragen, um deren Einfluss auf die Verwitterung der Bauteile im Langzeitversuch visuell zu untersuchen.



**Abb. 146** : Schließen der Fugen der Überlaufstrecken mit Betonmörtel

Der weitere Aufbau des Erdkörpers wurde zunächst über die gesamte Seite der Überlaufstrecken ausgeführt, um eine gleichmäßige Verdichtung dieser Strecke zu ermöglichen. Im Folgenden wurden die Überlaufstrecken mit einer Basisbreite von 1 m und einer Böschungsneigung von ca. 1:1 ausgekoffert und fertiggestellt.



**Abb. 147** : Fertigstellung der Überlaufstrecken

Am 14.03.2007 mussten die RC-Betonbauteile auf der Böschung der Überlaufstrecke 3.2 mittels Stahlprofilen vor dem Abrutschen gesichert werden. Rissbildungen an den Fugenrändern wiesen auf eine instabile Lagerung dieser Bauteile hin.



**Abb. 148** : Sicherung der RC-Bauteile auf den Böschungen der Überlaufstrecke Var. 3.2

### 8.2.10 Einbau des Filterfußes (Drainageschicht)

Zur Herstellung des Filterprismas als Drainageschicht am landseitigen Böschungsfuß wurde dieser bis in eine Höhe von ca. 1,5 m mit dem Bagger aufgegraben. Das Geotextil wurde ausgelegt, der Filterkies (2/8-Körnungsbereich) mit dem Radlader eingebracht und verteilt. Das Geotextil wurde darüber umgeschlagen und das Filterprisma anschließend wieder mit Erdstoff abgedeckt. Im Bereich der Untersuchungsabschnitte der Oberflächen- und Innendichtung sowie des homogenen Deiches wurde unter dem Filterprisma Folie verlegt, um das austretende Sickerwasser in eine Sickerrinne abführen zu können (s. Abschn. 8.3).



**Abb. 149** : Freilegen des landseitigen Böschungsfußes und Einbringen der Folienbahn und des Geotextils für die Drainageschicht (Filterprisma)



**Abb. 150** : Verlegen des Geotextils für die Drainageschicht (Filterprisma)



**Abb. 151** : Einbau der Filterkiesschicht und Umschlagen des Geotextils



**Abb. 152** : Abdecken des Filterfußes mit Erdstoff

### 8.2.11 Aussaat der Rasenmischung zur Deichbegrünung

Am 14.03.2007 wurde mit der Aussaat der Rasenmischung für die Deichbegrünung begonnen. In den folgenden Monaten wurde die Oberfläche manuell mit einem Gartenschlauch später dann über eine Bewässerungsanlage besprengt. Zudem erfolgten mehrere Nachsaaten und Bodenlockerungsarbeiten. Durch auftretende starke Niederschlagsereignisse wurde die Deichoberfläche teilweise ausgespült. Erosionsrinnen wurden durch Bodeneintrag möglichst zeitnah beseitigt, um ein Aufweiten dieser zu unterbinden. Insgesamt wies der Rasen auf dem Rekultivierungsboden unter der Zugabe von

Brunnenwasser ein sehr schlechtes Wachstum auf. Die geforderte dichte Grasnarbe konnte zu keinem Zeitpunkt der Versuchsdurchführung erzielt werden.



**Abb. 153** : Erstaussaat des Rasens zur Deichbegrünung



**Abb. 154** : Manuelle Bewässerung mit dem Gartenschlauch (li.) Bewässerungsanlage (re.)



**Abb. 155** : Erosionserscheinungen an den Böschungen des Versuchsdeichkörpers



**Abb. 156** : Nachsaat und Beseitigung von Erosionsrinnen auf der Deichoberfläche

## 8.2.12 Auswertung der Bauausführung

Der Bau des Versuchsdeichkörpers startete mit der Baustelleneinrichtung am 04.09.2006 und war am 20.12.2006 weitestgehend abgeschlossen. Die Begrünung des Deiches konnte aufgrund der jahrzeitlichen Witterung erst im darauffolgenden Frühjahr beginnen. Der Bau verzögerte sich um mehrere Wochen durch die bereits beschriebenen Schwierigkeiten bei der Bereitstellung geeigneten Erdstoffes für den Deichkörper. Zudem wurde der Bauablauf gebremst, da bereits beim Bau des Versuchsdeichkörpers verschiedene Messtechnik im Deich installiert wurde. Somit lassen sich kaum verallgemeinerbare Vergleiche zwischen der Herstellung der einzelnen Varianten erstellen und somit Rückschlüsse zur Optimierung des Bauprozesses für die Ausführung in der Baupraxis ziehen.



**Abb. 157** : Fertiggestellter Versuchsdeichkörper, landseitig



**Abb. 158** : Homogener Deich (Vergleichsvariante, Var. 0), landseitig



**Abb. 159** : Oberflächendichtung (Var. 1), landseitig





**Abb. 160** : Innendichtung (Var. 2), landseitig



**Abb. 161** : Überlauf-/Überströmstrecken (Var. 3.1 links, Var. 3.2 rechts und Var. 3.3 mittig), landseitig



**Abb. 162** : Oberflächendichtung / Überlauf-/Überströmstrecken (li.) und Homogener Deich / Oberflächendichtung (re.), wasserseitig



**Abb. 163** : Innendichtung (li.), wasserseitig und gefülltes Speicherbecken (re.),

In der Bauausführung zeigte sich, dass die Herstellung des Streifenfundaments überdacht werden muss. Durch die Ausbildung einer Aufkantung zur besseren Ausrichtung der RC-Bauteile wurde wasserseitig ein schmaler Spalt zwischen Fundament und RC-Bauteil geschaffen. Dieser ist nur sehr schwer abzudichten und bildet somit eine Schwachstelle in der Dichtung, durch welche die Bauteile im

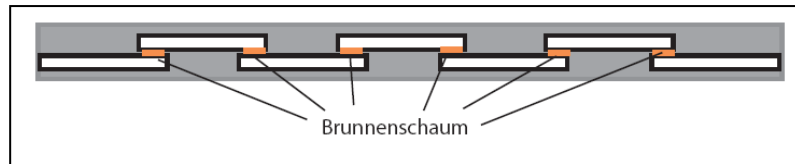
Fundament unterströmt werden könnten. Eine Lösung wäre die Herstellung des Streifenfundamentes ohne Aufkantung. Das Stellen der Bauteile wird dadurch nur unwesentlich verzögert. Durch die Fertigstellung des Streifenfundaments wird der Anschluss zum RC-Bauteil abgedichtet. Zusätzlich kann im Auflagerbereich des Bauteils ein Dichtungsband angebracht werden, welches ein Unterströmen durch evtl. unvollkommene Anbindung des neuen an den alten Beton ausschließen kann. Zudem sollte das Fundament erst nach Fertigstellung der senkrechten Fugendichtung zwischen den RC-Bauteilen vollständig ausgegossen werden, um so auch eine enge (dichte) Verbindung zu den Fugendichtstoffen zu schaffen.

Die vollkommene Verbindung zwischen Altbetonbauteiloberfläche und den neuen Beton bildet auch die Schwachstelle beim Einsatz von Betonmörtel als Fugendichtstoff. Die RC-Bauteiloberfläche muss im Fugenbereich von losen Stoffen befreit und vor dem Betonieren angefeuchtet werden. So kann ein optimaler Verbund zwischen Alt- und Neubeton hergestellt werden. Die Konsistenz des Frischbetons ist so zu wählen, dass bei den vertikalen Fugen der Innendichtung eine bestmögliche Verdichtung (ohne Hohlräume) erzielt werden kann. Für Fugen der Oberflächendichtung muss der Frischbeton so plastisch sein, dass der Frischbeton nicht nach unten absackt und so einen Spalt zum oberen Fugenabschluss frei gibt. Betonmörtel birgt noch einen weiteren Nachteil. Die Fugenabschlüsse sind steif. Jede Bewegung der Bauteile durch die Vibrationen beim Erdstoffeinbau als auch bei evtl. Setzungsereignissen im Erdkörper kann zu Rissbildungen im Fugenbereich und somit zu Undichtigkeiten führen.

Orbit.Flex-Profile sind deutlich flexibler bei kleinen Bauteilbewegungen. Ihr großer Nachteil ist die sehr langwierige Installation. Die somit benötigte Arbeitszeit von Fachleuten macht neben dem Materialeinsatz die Verwendung von Orbit.Flex-Profilen teuer.

Arbeitsaufwendig ist ebenfalls der händische Einbau von Ton in die Fugen der Oberflächendichtung. Um ein gute Abdichtung herzustellen muss der Ton einen entsprechenden Wassergehalt aufweisen, um verdichtbar zu sein. Gleichzeitig muss die Fugenbreite eine gute Verdichtungsarbeit mit dem Stampfer ermöglichen. Die so abgedichteten Fugen zeigen auch die notwendige Flexibilität bei kleinen RC-Bauteilbewegungen. Zusätzlich weist eine Tonschicht einen so genannten Selbstheilungseffekt auf. D.h. entstandene Risse schließen sich durch das Quellen des Tons bei Wasserzutritt.

Sehr gute Verarbeitungseigenschaften bei schmalen Fugenbreiten zeigte der Einsatz von Brunnen-schaum. Durch das Quellen des Schaums werden auch kleinste Lücken geschlossen. Der Schaum weist eine Flexibilität bei kleinen Bauteilbewegungen auf. Die Handhabung ist einfach und schnell. Bei einem Einsatz für Innendichtungen empfiehlt es sich die Bauteile versetzt aneinander zu reihen. Dabei sollten diese ca. 20 cm überlappen. Der Schaum kann dann von beiden Seiten in die Fuge eingebracht werden. Somit ist diese doppelt abgesichert. Nachteilig ist dabei wiederum das breiter auszubildende Streifenfundament. Zudem wird die Verdichtung des anstehenden Erdkörpers bis dicht an die Innendichtung heran erschwert.



**Abb. 164** : Versetzte Anordnung der RC-Bauteile der Innendichtung bei einer Fugenabdichtung mit Brunnen-schaum

Bei einem Einsatz von Brunnen-schaum zur Abdichtung der Oberflächendichtung müssen die Bauteile auf ca. 2 cm Abstand also dicht aneinander verlegt werden. So können auch diese Fugen dicht und ausreichend flexibel verschlossen werden.

Ein weiteres Problem zeigt sich, wie vorn bereits angedeutet, in der Ausführung der Verdichtungsarbeit direkt an den Dichtungselementen der Innendichtung und über der Oberflächendichtung. Der Einsatz von schwerem Gerät (Walze) im Nahbereich der verbauten RC-Bauteile führt zu Erschütterung der Dichtungsschichten. Dies kann insbesondere bei starren Fugenverschlüssen zu Rissen und somit zu Undichtigkeiten führen. Andersherum können Setzungen und Standsicherheitsprobleme des Deichkörpers durch eine ungenügende Verdichtung im Bereich der Dichtungen auftreten. Dies bedeutet die Fugendichtungen müssen gegenüber auftretenden Schwingungen durch Verdichtungsarbeiten am anstehenden Deichkörper flexibel genug ausgebildet werden.

Große Probleme bereitete die mangelhafte Ausbildung einer Grasnarbe auf der Deichkörperoberfläche. Der eingesetzte Rekultivierungserdstoff zeigte nur ein ungenügendes Potenzial an Wachstumsanreizen für die mehrfach ausgeführte Saat von Rasen. Grundsätzlich hätte hier der Einbau einer Oberbodenschicht erfolgen müssen. Zudem wäre das Aufbringen von Saatmatten aus Naturfaserge-webe als Dammbewehrung zum Schutz vor Böschungserosion vorteilhaft. Aufgrund der eingebauten Messtechnik war dies im Nachgang nicht mehr möglich. Die Nacharbeiten an der Deichoberfläche beschränkten sich somit auf die Beseitigung entstandener Erosionsrinnen, die oberflächige Auflocke-rung des Materials sowie Nachsaat und die regelmäßige manuelle als auch anlagentechnische Be-wässerung.

### 8.2.13 Nachträgliche Standsicherheitsbewertung

Nach Fertigstellung des Versuchsdeichkörpers erfolgte im März 2009 eine erneute Bewertung der Standsicherheit durch den beratenden Diplom-Geologen Max Wiederspahn der Fa. GUG Gesellschaft für Umwelt- und Geotechnik mbH in Simmern. Dabei wurden die aktuelle Normenlage sowie die verwendeten Erdstoffe und Materialien berücksichtigt. Betrachtet wurde die Ausbildung des homogenen Deichabschnitts mit und ohne Einbeziehung einer zusätzlichen Belastung der Deichkrone durch die Befahrung mit Fahrzeugen zur Deichbewirtschaftung. In beiden Fällen ist die Standsicherheit des errichteten Deichkörpers voll gegeben.

Das Ergebnis zur Standsicherheit des Deiches mit Oberflächendichtung mit Einbeziehung der Lasten aus der Deichbewirtschaftung mit Fahrzeugen auf der Deichkrone ist ebenfalls zufriedenstellend. Einzig im Fall einer schnell ablaufenden Welle konnte die geforderten Parameter für die wasserseitige Böschung nicht erfüllt werden. Ähnliche Situationen durch die dicht unter der Deichkörperoberfläche

liegende Dichtungsschicht ergeben sich auch beim Einsatz von Bentonitmatten. Auch hier muss die Böschung zusätzlich gesichert werden.

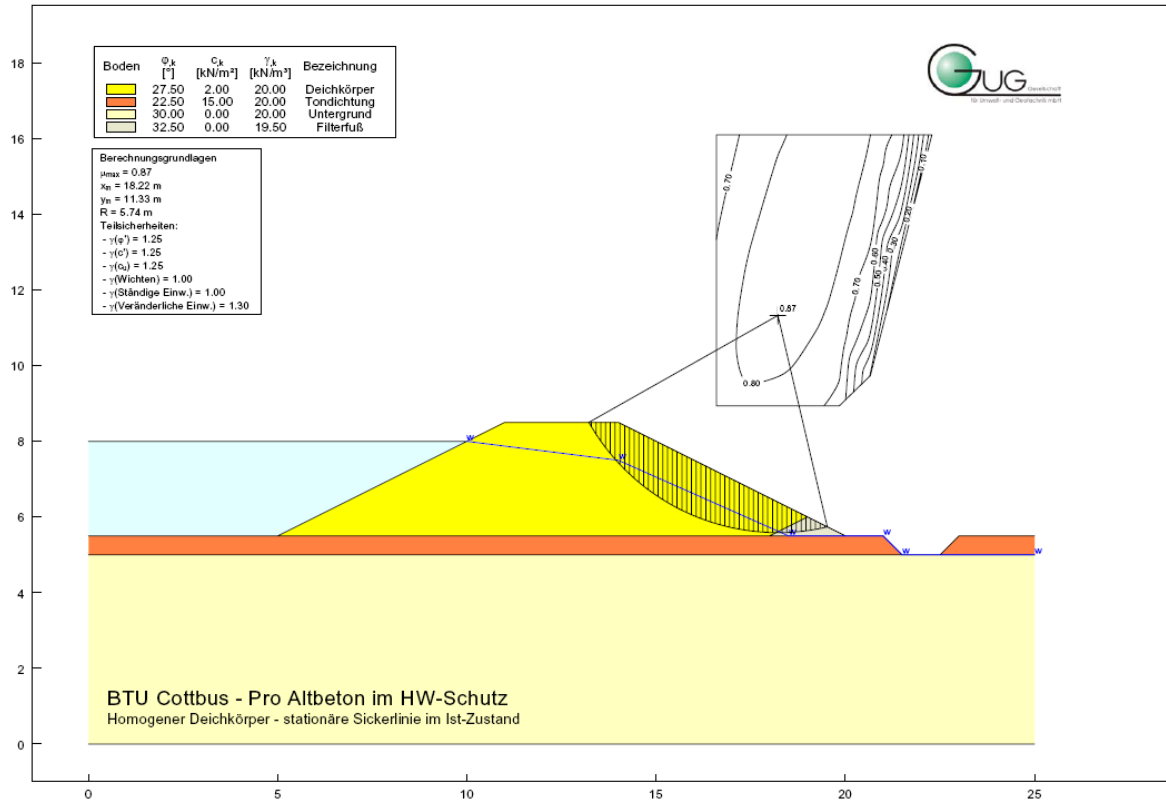


Abb. 165 : Nachweis de Standsicherheit für den homogenen Untersuchungsabschnitt ohne Belastung

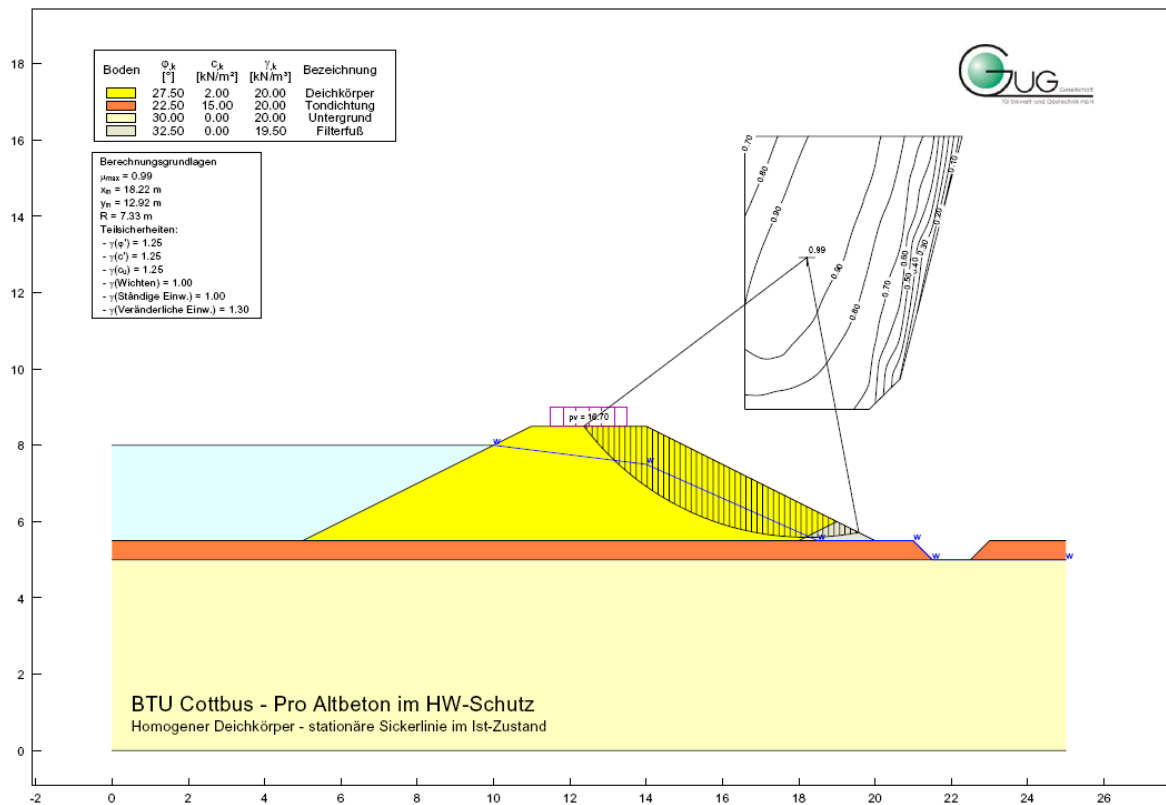


Abb. 166 : Nachweis de Standsicherheit für den homogenen Untersuchungsabschnitt mit Belastung

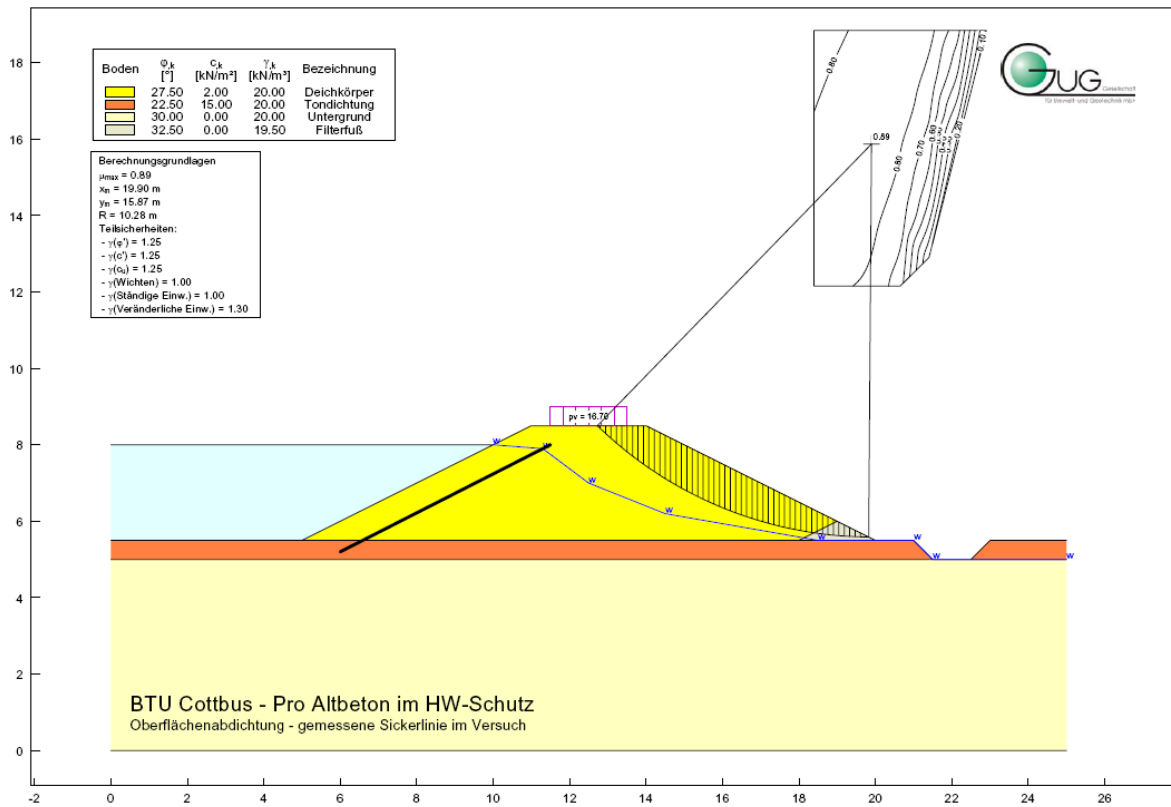


Abb. 167 : Nachweis de Standsicherheit für die Oberflächendichtung Var. 1, landseitig, mit Belastung

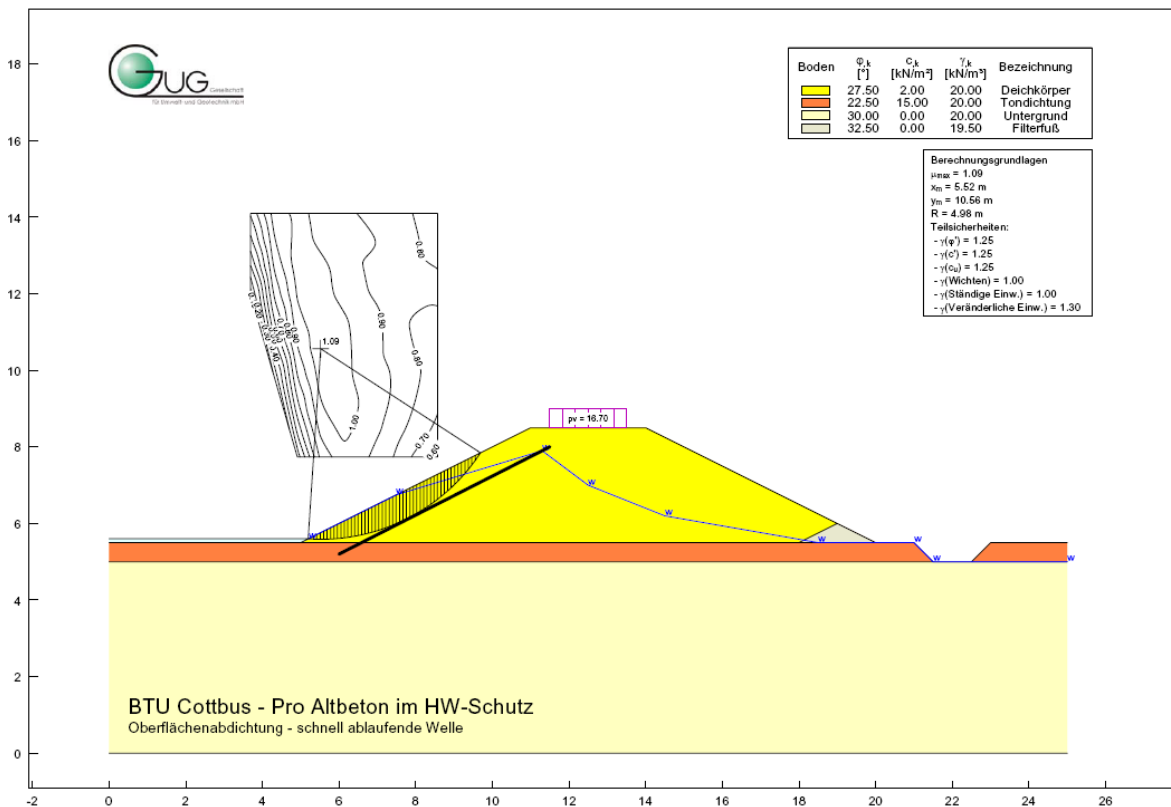


Abb. 168 : Nachweis de Standsicherheit für die Oberflächendichtung Var. 1, wasserseitig, mit Belastung, bei schnell ablaufender Welle

## 8.3 Messtechnik

Um gesicherte Daten zum Setzungsverhalten und Sickerwasserentwicklung und somit zur Standsicherheit der verschiedenen Untersuchungsabschnitte im Deichkörper zu erhalten, wurden verschiedene Messsysteme installiert.

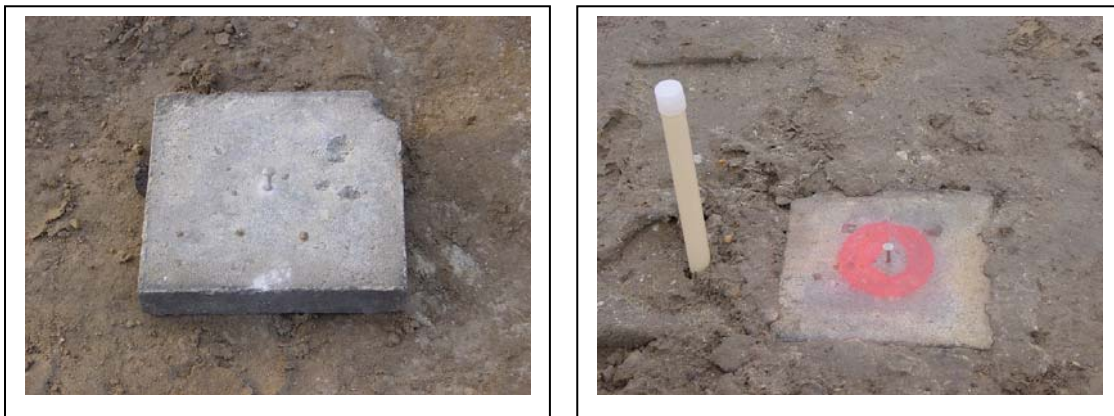
### 8.3.1 Untersuchungen zum Setzungsverhalten

Die eingebauten Systeme zur Untersuchung des Setzungsverhaltens beruhen auf der Messung der Deichkörperverformung und der Aufnahme evtl. Bewegungen der Betonbauteile. Dazu wurden feste Messpunkte an der Deichoberfläche und an den verbauten Betonelementen eingerichtet. Zur Aufnahme evtl. Deichkörperbewegungen im Deichinneren wurden Stangenextensometer genutzt.

Als Referenzpunkte (RP 1-3) dienten drei definierte Messpunkte an der Brunnenwasser-Rohrleitung der Vattenfall AG sowie zwei direkt auf der Rohrleitung. Zudem wurde außerhalb des Deichkörpers im Bereich der Innendichtung ein Nullpunkt (NP) festgelegt. Ein weiterer Vergleichsmesspunkt wurde auf dem Fuß eines Betonpfeilers (BP) im Speicherbecken eingerichtet. Dieser Betonpfeiler dient der Halterung der Wassertemperatur- und Wasserstandsensoren sowie der analogen Wasserstandanzeige (Pegellatte).

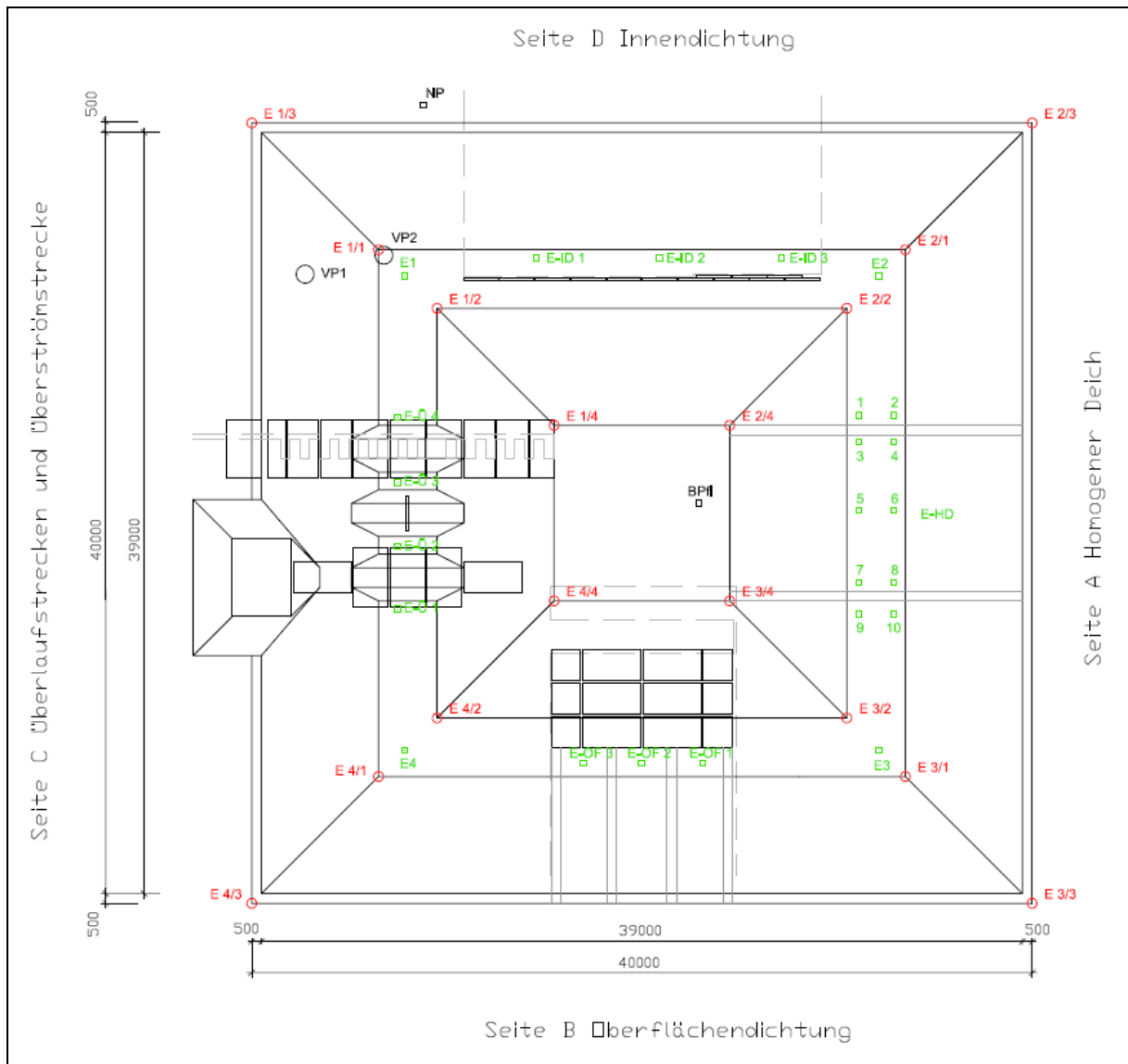
Die geodätische Aufnahme aller Messpunkte erfolgte vor und nach jeder Versuchskampagne (Befüllung des Speicherbeckens) durch eine Nivellierung. Der Vermessungsstandort (VP) befand sich im oberen Bereich der Rampe.

Die Messpunkte der Deichkörperoberfläche bestanden aus gebrauchten Betongehwegplatten, in welche mittig Metallstifte eingeklebt wurden. Diese Platten wurden in die waagerechten Deichoberflächen so eingebracht, dass die Plattenoberkante mit der Deichoberfläche abschloss.



**Abb. 169** : Setzungsmesspunkte der Deichoberfläche

Die Messpunkte für die Deichkörperoberfläche erhielten die Bezeichnung E für Erdkörper plus die Variantenkürzel I für Innendichtung, HD für Homogenen Deich; OF für Oberflächendichtung und Ü für Überlaufstrecken sowie eine jeweils fortlaufende Nummerierung.



**Abb. 170** : Lage der Messpunkte zur Vermessung der Deichkörperoberfläche

**Tab. 59**: Einbautiefen der Extensometer

Lage	Bezeichnung	Länge [m]
Innendichtung	Ex 1-ID	1,00
	Ex 2-ID	2,00
	Ex 3-ID	2,50
Homogener Deich	Ex 4-HD	1,00
	Ex 5-HD	2,00
	Ex 6-HD	3,00
Oberflächendichtung	Ex 7-OF	2,50
	Ex 8-OF	2,00
	Ex 9-OF	1,00

Lage	Bezeichnung	Länge [m]
Überlaufstrecken und Überströmstrecke	Ex 10-Ü	2,50
	Ex 11-Ü	2,00
	Ex 12-Ü	1,50
	Ex 13-Ü	1,50
	Ex 14-Ü	2,00
	Ex 15-Ü	2,50

Um Erdkörperbewegungen im Deichinneren aufzunehmen wurden Stangenextensometer in verschiedenen Höhen eingebracht. Diese bestehen aus einem Fiberglasstab, welcher am unteren Stabende mit Betonmörtel im Erdkörper verankert wurde, und einem Hüllrohr. Bei Erdbewegungen wird so der Fiberglasstab mitgezogen und verändert seine Höhenposition am oberen Stabende.

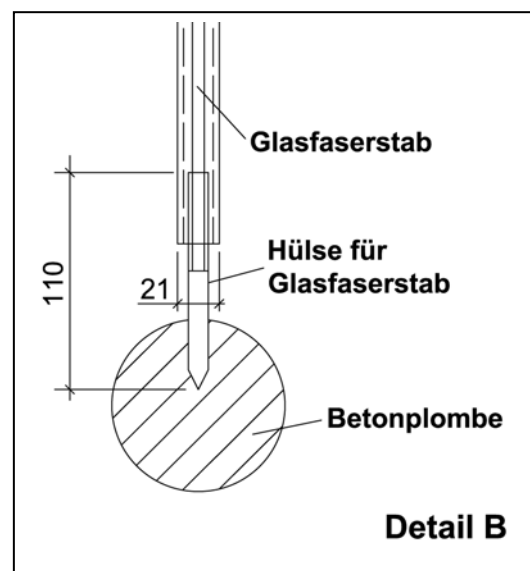
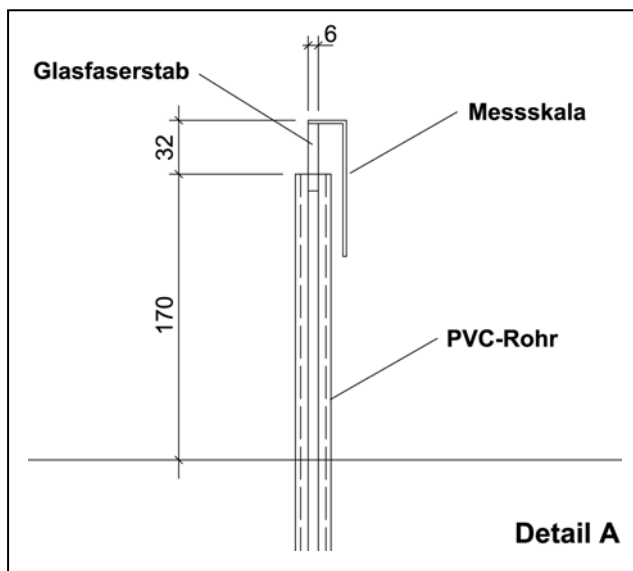
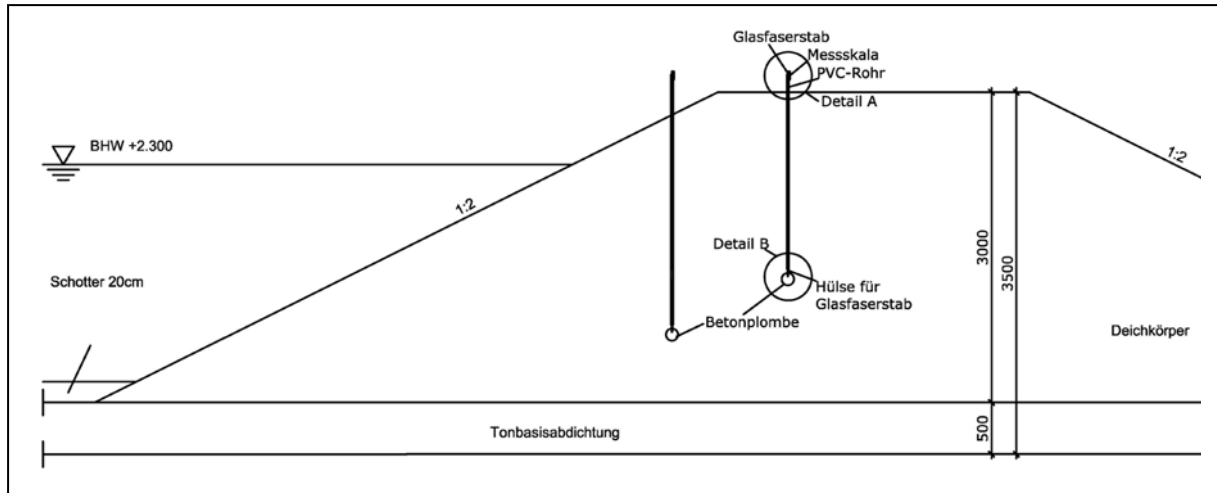


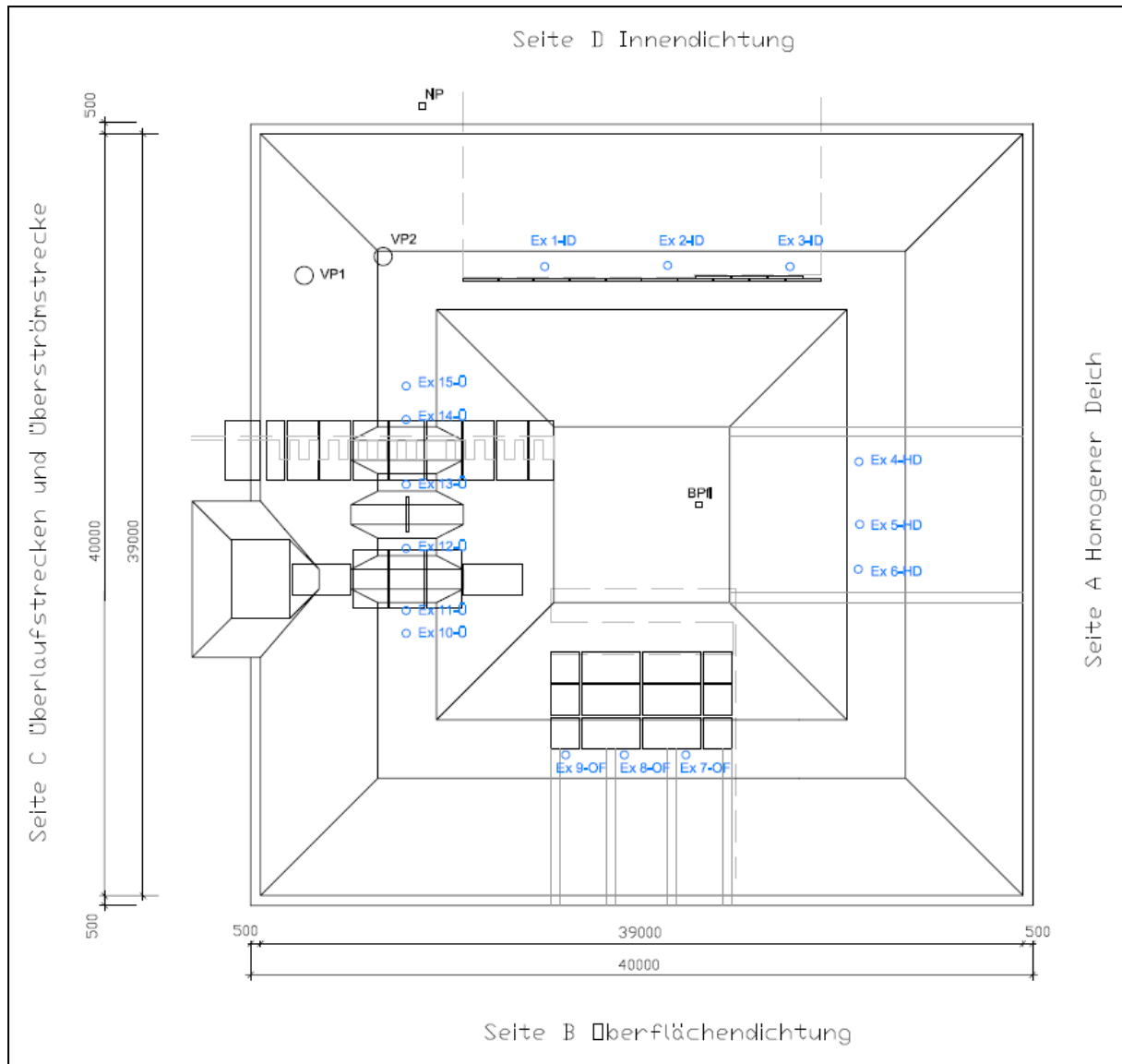
Abb. 171 : Ausbildung der Stangenextensometer



Abb. 172 : Stangenextensometer für die Setzungsmessung im Erdkörper



Die Messstellen für die Erdkörperbewegungen im Deichinneren erhielten die Bezeichnung Ex für Extensometer plus laufender Nummerierung und Variantenbezeichnung (s. oben).



**Abb. 173** : Lage der Extensometer zur Setzungsmessung im Deichinneren

Zur Festlegung der Messpunkte an den verbauten Betonbauteilen der Innendichtung und Überlaufstrecken wurden in die Bauteiloberflächen Metallstifte geklebt. An den oberflächlich liegenden Bauteilen der Überlaufstrecken wurden die Messpunkte mit Farbe markiert.

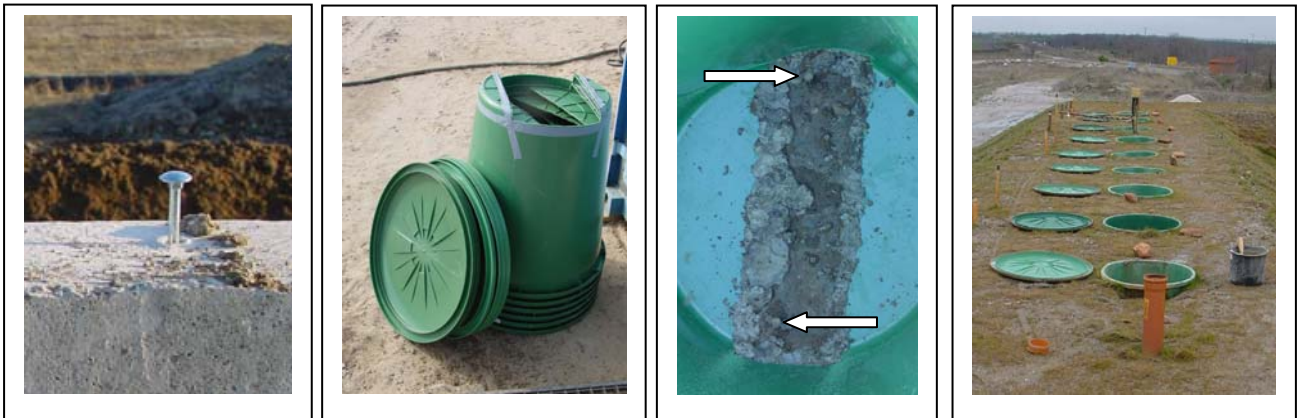
Die Messpunkte an der Oberseite der Innendichtung liegen ca. 50 cm unter der Deichoberfläche. Um diese erreichbar zu machen, wurden über den Messpunkten Regentonnen eingebracht. Über jede Regentonne sind somit Messpunkte an den Ecken von zwei benachbarten Betonbauteilen zugänglich. Die Zugänglichkeit der Messpunkte an den äußeren Ecken der Innendichtung wurde über eingebrachte Plastikrohre ermöglicht.

Zur Bestimmung der Lageveränderung der Oberflächendichtung wurden Stahlstangen in die abdeckende Bodenschicht geschlagen bis diese auf die Bauteiloberfläche stießen. Vor jeder Vermessung

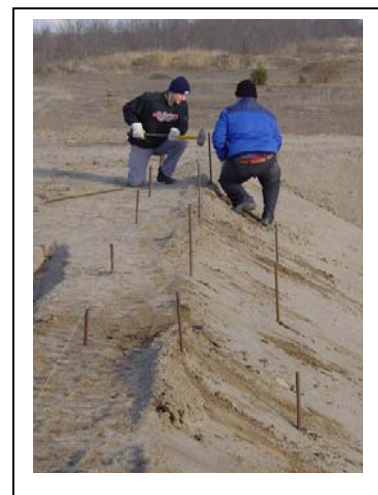
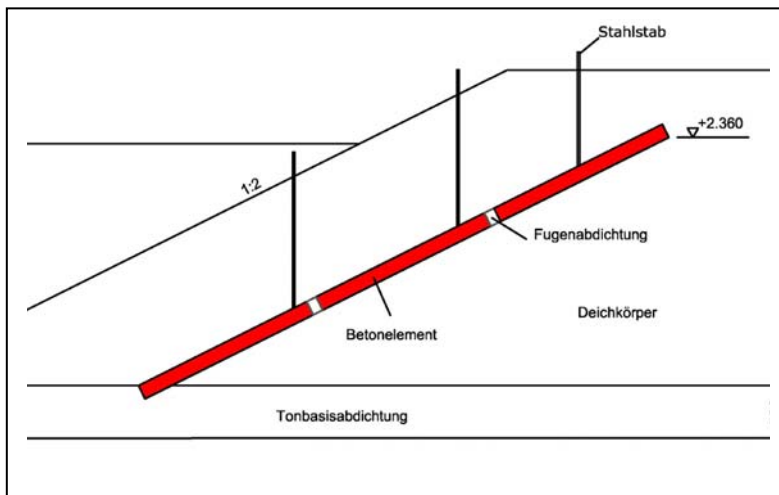
wurden dann die Stahlstangen durch Hammerschläge wiederholt bis auf die Bauteiloberfläche getrieben, um so evtl. Absenkungen der Oberflächendichtung zu verfolgen.



**Abb. 174** : Setzungsmesspunkte der RC-Bauteile der Überlaufstrecken



**Abb. 175** : Setzungsmesspunkte der RC-Bauteile der Innendichtung



**Abb. 176** : Setzungsmesspunkte der RC-Bauteile der Oberflächendichtung

Die Messpunkte für die Bauteilsetzung erhielten die Bezeichnung BE für Erdkörper plus die Variantenkürzel sowie eine jeweils fortlaufende Nummerierung.

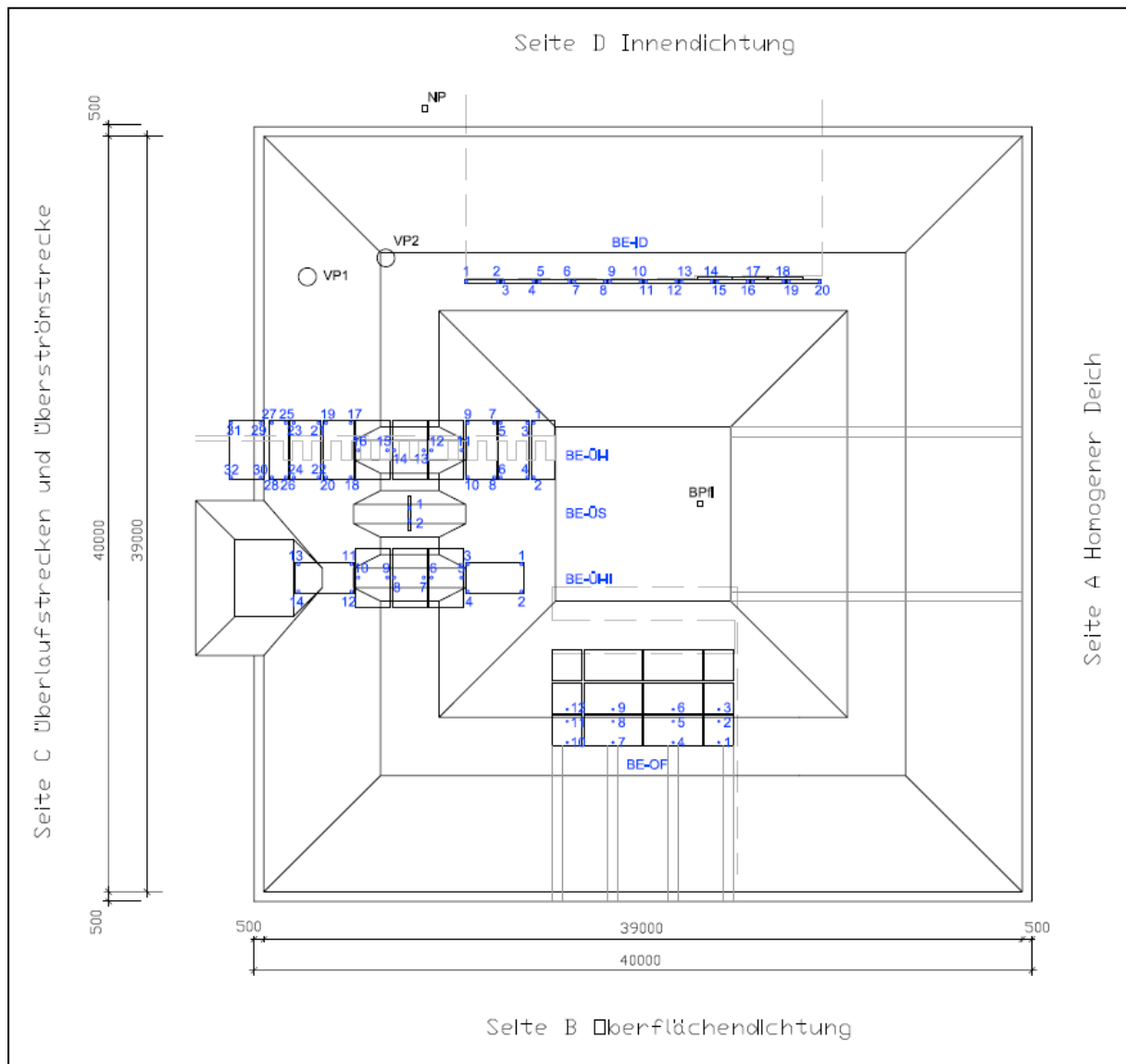


Abb. 177 : Lage der Messpunkte zur Vermessung der Bauteillage

## 8.3.2 Untersuchungen zur Durchsickerung

### 8.3.2.1 Aufbau des Pegelnetzes

Für die Untersuchung des Durchsickerungsverhaltens der verschiedenen Varianten wurden in den einzelnen Versuchsabschnitten Pegelrohre gesetzt und zum Teil mit Drucksensoren versehen. Diese übermittelten permanent Druckdaten und die daraus errechneten Pegelstände über eine Mobilfunkverbindung auf eine Internetseite. Somit konnten die Pegelstandsdaten kontinuierlich abgerufen werden. Die Pegel ohne Drucksensoren sollten manuell mittels Brunnenpfeife oder einem Lichtlot geprüft werden.

Die Pegel wurden im Rammkernverfahren bis auf die Tonbasis abgeteuft. Die Bohrung für den Pegel D2K erreichte wegen eines Steinhindernisses in 2,50 m Tiefe die geplante Endteufe nicht. Im Bereich

der Oberflächen- und Innendichtung sind je Untersuchungsabschnitt zwei Pegel in Fließrichtung hintereinander eingebaut. Wobei der jeweils hintere mit einem Drucksensor bestückt wurde.

Im homogenen Deichabschnitt wurden 7 Pegel in Fließrichtung hintereinander eingebaut. Die Abstände sind so gewählt, dass eine optimale Ermittlung der Sickerlinie bei einem Einstau von 1 m bis zum Höchsteinstau gegeben ist. Aufgrund des stärkeren Gefälles der Sickerlinie wurden wasserseitig die Pegelabstände verringert.

Ein Pegelmesspunkt ist als kontinuierlicher Wasserstandsmesser in den Betonpfeiler im Speicherbecken angeordnet.

Die Bezeichnung der Pegelmesspunkte beruht auf der Angabe der Bauwerksseite (A, B, C, D) der Nummerierung des Untersuchungsabschnitts der Oberflächen- und Innendichtung sowie der Querschnittslage der Messpunkte (W-wasserseitig, K-Krone, L-landseitig).

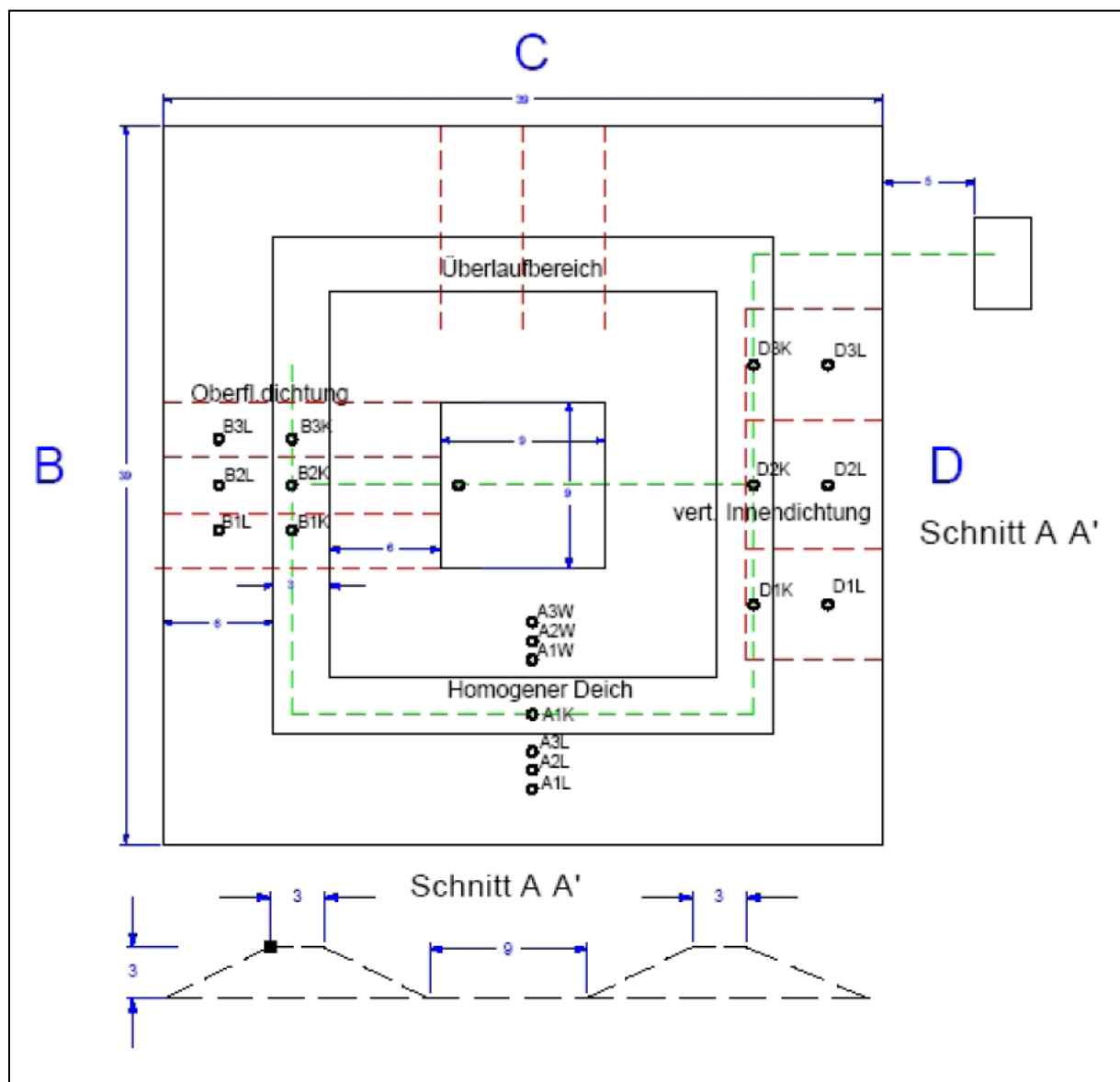
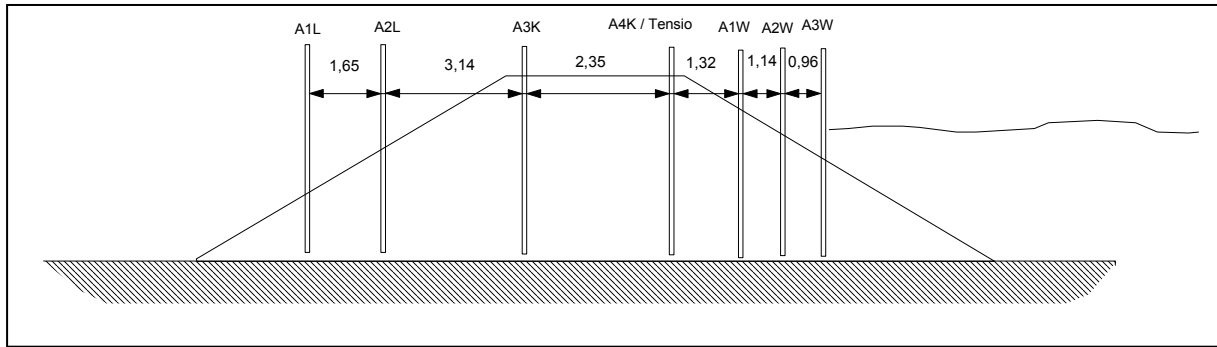


Abb. 178 : Lage der Pegelmesspunkte

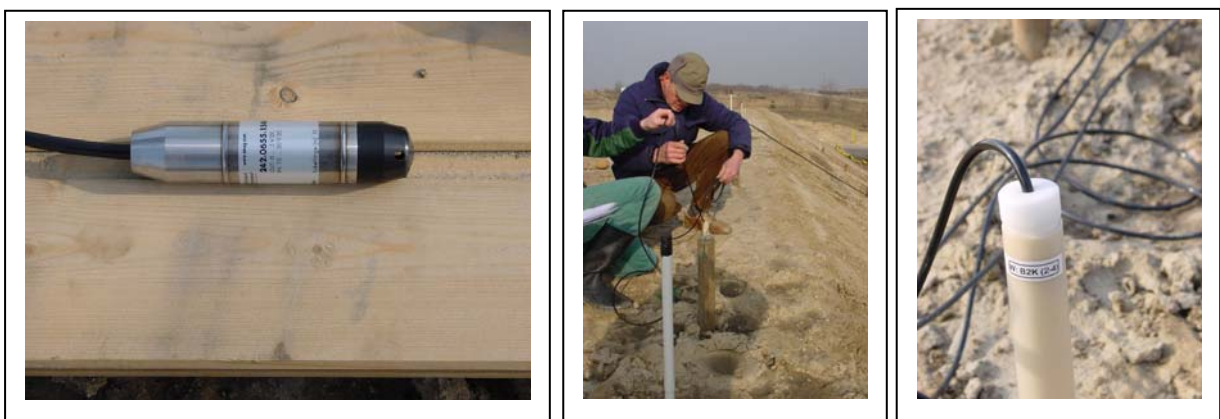


**Abb. 179** : Pegelabstände im homogenen Deich



**Abb. 180** : Einbau der Pegel und Pegelmesspunkte mit Anschlusskasten (re.)

Die Drucksensoren (Typ Keller PR 41-0,02) ermitteln über Druckmessungen die Wassersäule in den Pegeln. Sie sind über Kabel in der Deichkörperoberfläche und programmierbare Sensormodule an einen Datenlogger angeschlossen. Die Datenermittlung erfolgt alle 10 min. Bei der Ermittlung der Pegelstände werden die Abweichungen durch den schwankenden Luftdruck berücksichtigt. Dieser wird über die installierte Wetterstation ebenso kontinuierlich gemessen.

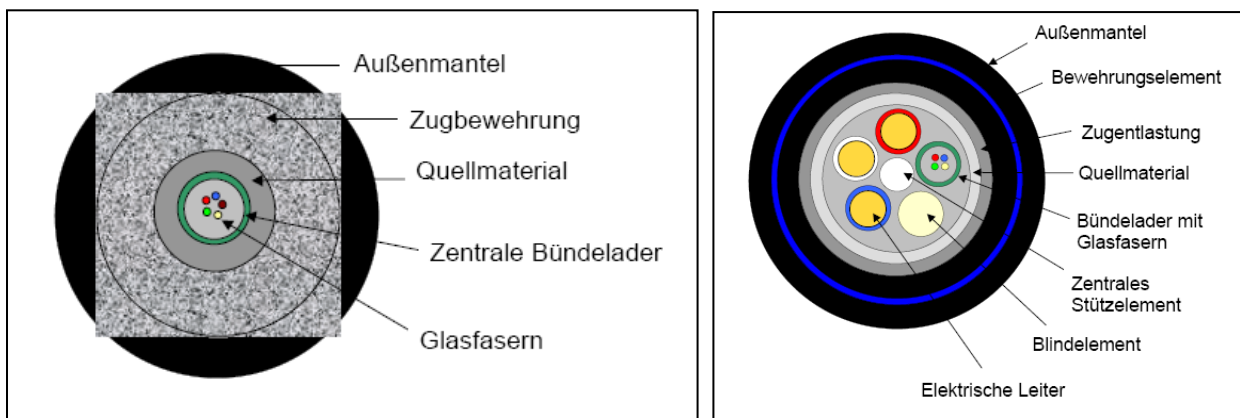


**Abb. 181** : Drucksensor und deren Einbau in einen Pegel der Oberflächendichtung

### 8.3.2.2 Ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmesstechnik

Zur Lokalisierung der Sickerwasserpfade und somit zur Ermittlung von Leckagen an den Fugen der Dichtungen wie auch zur Ermittlung der Sickerlinie im Bereich der Überlaufstrecke Var. 3.1 wurde ein faseroptisches Laserrader-Temperaturmessverfahren der Fa. GESO GmbH Jena angewandt.<sup>145</sup>

Dabei werden kurze Laserlichtimpulse in die Lichtwellenleiter des Sensorkabels eingekoppelt. Ein Teil des Laserlichtes wird zurückgestreut. Dabei sind bestimmte Bereiche des Rückstreuungsspektrums temperaturunabhängig (Stokes-Band IS), andere wiederum temperaturabhängig (Anti-Stokes-Band Ia). Über die Bildung des Quotienten aus beiden Intensitäten kann die Temperatur des rückstreuenden Lichtwellenleiterabschnitts berechnet werden. Das dafür verlegte spezielle Glasfaserkabel (s. Abb. 182) weist alle 0,5 m einen Messpunkt auf, über welchen die Temperatur mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,3$  K erfasst wird. Ausgehend von der Überlegung, dass das Sickerwasser eine andere Temperatur aufweist als das umgebende Erdreich, kann über diese Temperaturmessung der Zeitpunkt und der Ort des Sickerwasserzutritts ermittelt werden. Dieser sollte sich durch Temperatursprünge an den betroffenen Datenpunkten zeigen. Über die Verwendung eines elektrisch aufheizbaren Sensorkabels kann sich der Bereich mit Sickerwasserzutritt durch ein verändertes Aufheiz- und Abkühlungsverhalten deutlicher von seiner Umgebung abheben. Ein solches Kabel wurde unterhalb der Überlaufstrecke Var. 3.1 installiert. Insgesamt weist das Temperatursensorkabel eine Gesamtlänge von rd. 500 m mit 931 Datenpunkten auf.

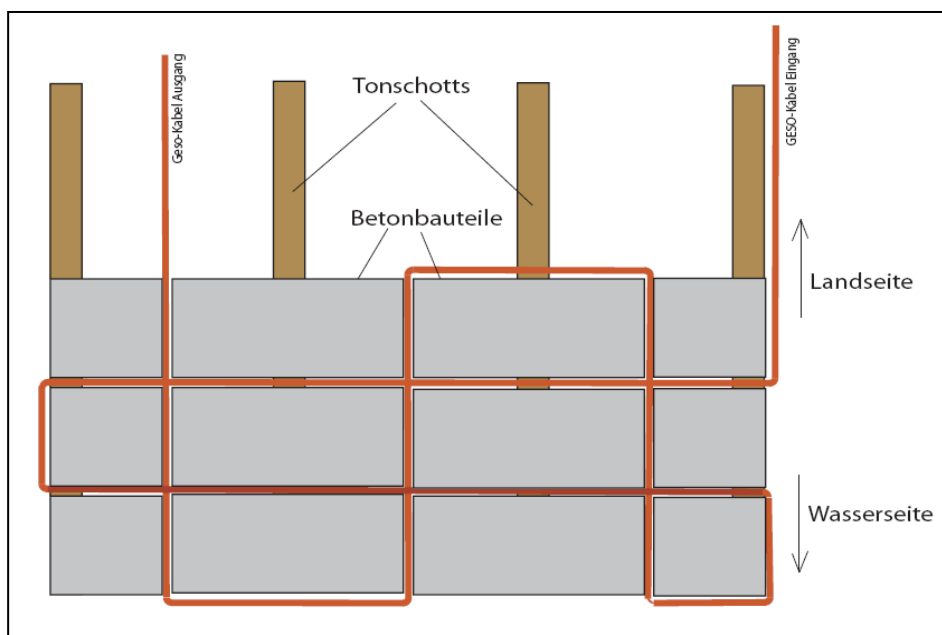


**Abb. 182** : Aufbau des Temperatursensorkabels<sup>146</sup>

Das Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Oberflächendichtung wurde nach Verlegung der RC-Bauteile unterhalb der noch zu verschließenden Fugen angebracht. Die Kabelenden wurden auf der Krone des Deichgrundkörpers zur Landseite und weiter zum Messcontainer mit der Steuer- und Rechereinheit gezogen und die Anschlüsse hergestellt. Das Kabel wurde durch Mitarbeiter der Fa. GESO GmbH Jena und Mitarbeiter der BTU Cottbus verlegt und die Lage markanter Datenpunkte dokumentiert. Verbaut wurde hier wie auch zur Leckageüberwachung der Innendichtung ein LWL-Kabel A-DQ(ZN)B2Y.

<sup>145</sup> Graupner, A.; Großwig, S.; Inaudi, D.: Faseroptische Messtechnik im Wasserbau – Erläuterung der Systemkomponenten, Mittweida, 2002.

<sup>146</sup> ebenda.

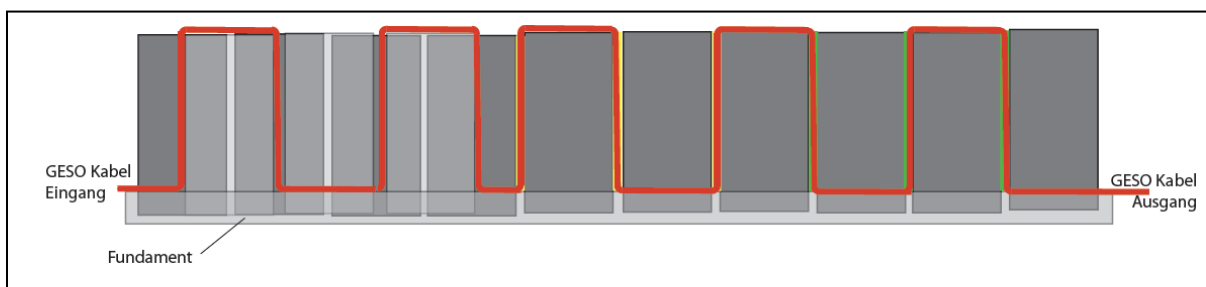


**Abb. 183** : Verlegeskizze für GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Oberflächendichtung, Draufsicht Wasserseite



**Abb. 184** : Verlegtes GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Oberflächendichtung

Das Temperatursensorkabel wurde nach Fertigstellung der Innendichtung auf der wasserabgewandten Seite entlang der verschlossenen Fugen angebracht. Die Kabelenden wurden durch den Deichkörper zur Steuer- und Rechneinheit im Messcontainer gezogen und angeschlossen. An den RC-Bauteilen befestigt wurde das Kabel durch Montagebänder.

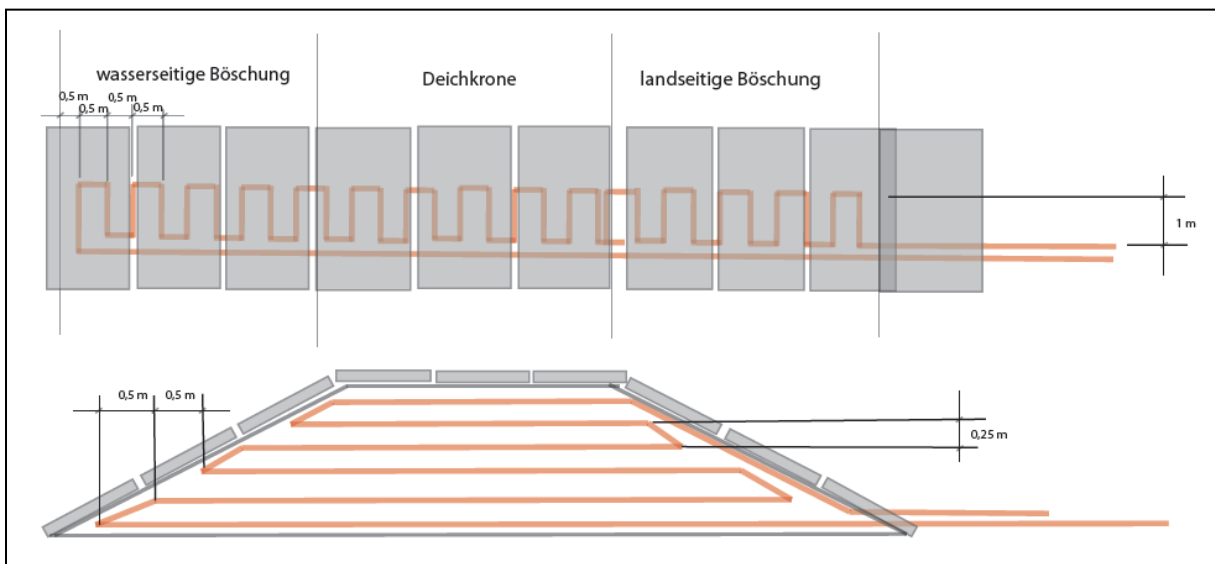


**Abb. 185** : Verlegeskizze für GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Innendichtung, Ansicht Landseite



**Abb. 186** : Verlegtes GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Innendichtung

Bei der Überlaufstrecke wurde das Temperatursensorkabel analog dem schichtenweisen Aufbau des Deichgrundkörpers lagenweise mäandrierend eingebaut. Die Breite der Mäander beträgt 1 m bei einem Abstand der horizontalen Schleifen von 0,5 m. Der Abstand der vertikalen Lagen beträgt ca. 0,50 m. Die übereinander liegenden Lagen verjüngen sich um je 0,5 m pro Seite und folgen somit dem Böschungsverlauf. Verbaut wurde ein aufheizbares Kabel - LWL-Kabel hybrid A-DSQ(ZN)B2Y.



**Abb. 187** : Verlegeskizze für GESO-Temperatursensorkabel zur Ermittlung der Sickerwege unterhalb der Überlaufstrecke Var. 3.1



**Abb. 188** : Verlegtes GESO-Temperatursensorkabel unterhalb der Überlaufstrecke Var. 3.1



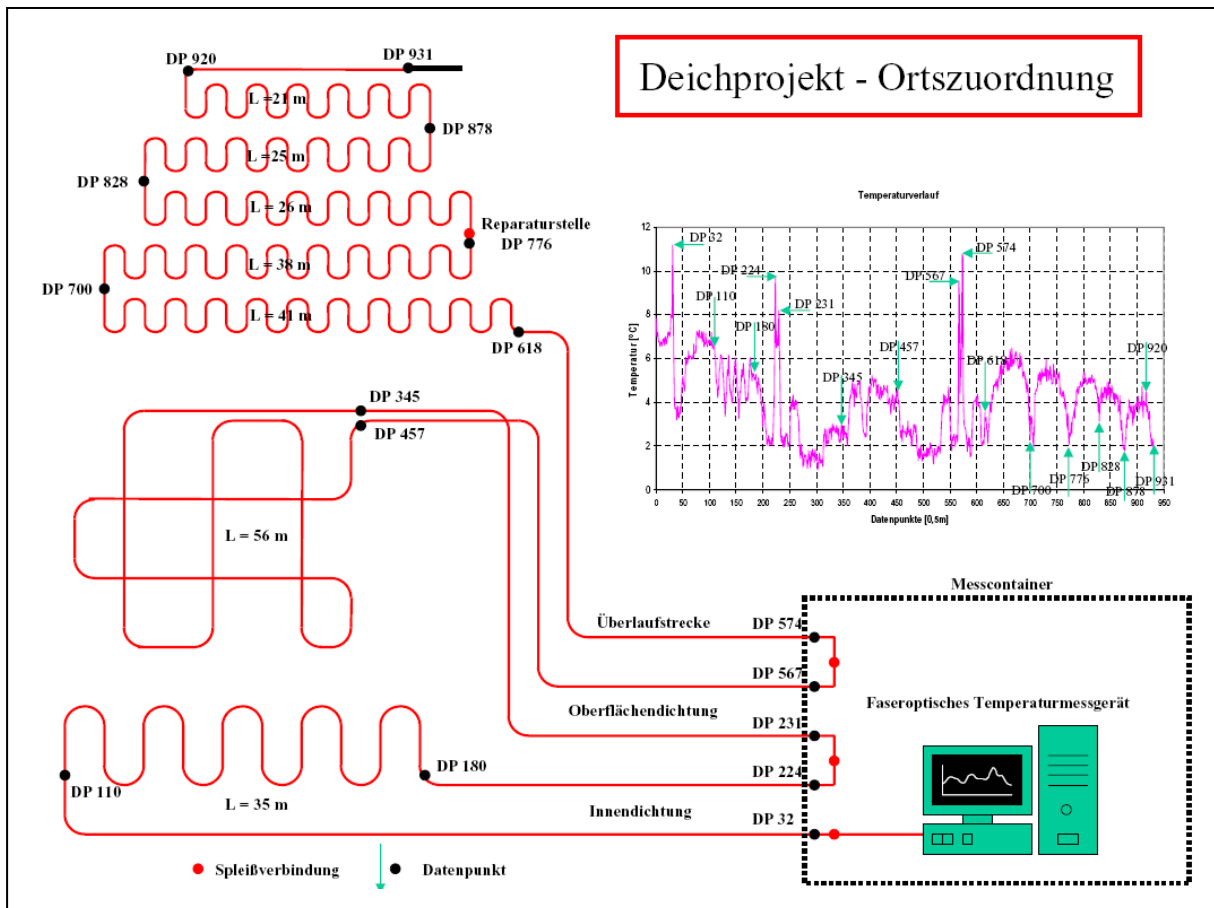


Abb. 189 : Prinzipskizze der Temperaturmessung und Ortszuordnung der Datenpunkte



Abb. 190 : Sensorkabelführung zum Messcontainer; Steuer- und Rechneinheit (re.)

### 8.3.2.3 Messgerinne zur Durchflussmessung

An den landseitigen Böschungsfüßen der Oberflächen- und Innendichtung wie auch des homogenen Bereiches wurde jeweils eine Abflussrinne für die Durchflussmessung installiert. Der Zufluss aus dem Deichkörper in die Abflussrinne wird über eine Folienbahn gewährleistet, welche unterhalb des Filterfußes ausgelegt ist und bis in die Rinne reicht. Die Rinnen münden in KG-Rohre DN 300 (Kanalgrundrohre) mit 0,7 bis 1,2 m Tiefe, welche als Sammler und der Versickerung des Durchflusses dienen. In diese Sammler können Behälter (bspw. Eimer) zum Auffangen des Sickerwassers gehängt werden.

Über einen bestimmten Zeitraum kann so die Durchflussmenge aus dem jeweiligen Untersuchungsreich ermittelt werden.



**Abb. 191** : Abflussrinne und Sammler zur Durchflussmessung

Infolge der ungenügenden Ausbildung der Grasnarbe auf dem Deichkörper wurden bei starken Regengüssen kleinstkörnige Sedimentbestandteile in die Rinne gespült. Die Abflussrinne wie auch die Sammler versandeten zunehmend. Dadurch war eine Durchflussmessung nicht mehr möglich. Gleichzeitig versickerte das Wasser in den Sammlern nicht mehr. Die Rinnen mussten in regelmäßigen Abständen gesäubert werden und die Sammler wasserstandsabhängig abgepumpt bzw. leer geschöpft werden.



**Abb. 192** : Versandete Abflussrinne zur Durchflussmessung

Im homogenen Deichabschnitt und später auch an den Abflussrinnen der Oberflächen- und Innendichtung wurden Abdeckungen installiert. Diese sollten oberflächlich abströmendes Niederschlagswasser und Sedimente über die Rinne hinweg ableiten. Leider erwies sich diese Abdeckung als windanfällig.

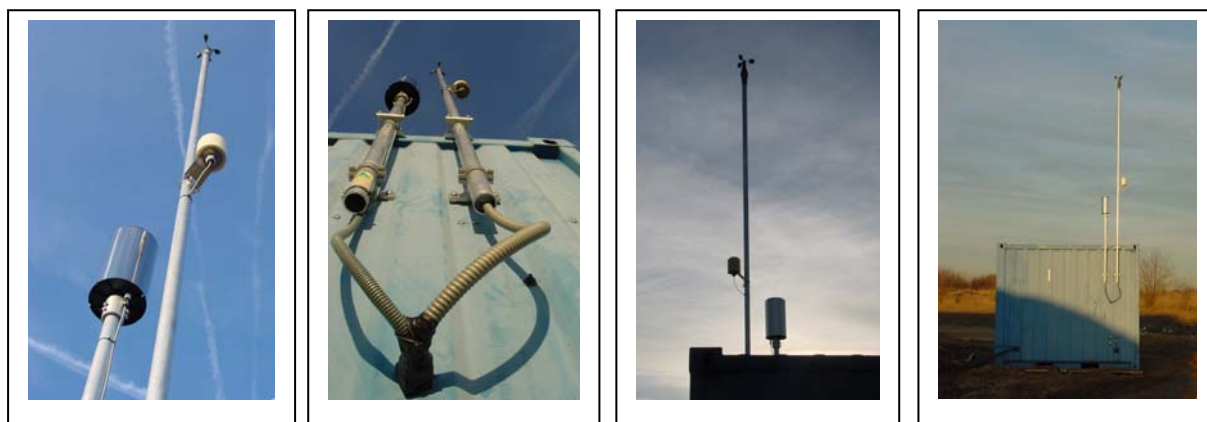


**Abb. 193** : Abdeckung der Abflussrinne zur Durchflussmessung

### 8.3.3 Untersuchung der Wettereinflüsse

#### 8.3.3.1 Wetterstation

Zur Untersuchung der vorhandenen Wettereinflüsse wurde am Messcontainer eine Wetterstation eingerichtet. Diese zeichnet Wetterdaten kontinuierlich auf und sendet diese über eine Mobilfunkverbindung an eine Webseite zur Datenauslese. Über diese Wetterstation wurden Informationen zu Windgeschwindigkeiten, Niederschlagsmengen, Luftdruck und Luft- sowie Wassertemperaturen im Speicherbecken ermittelt.



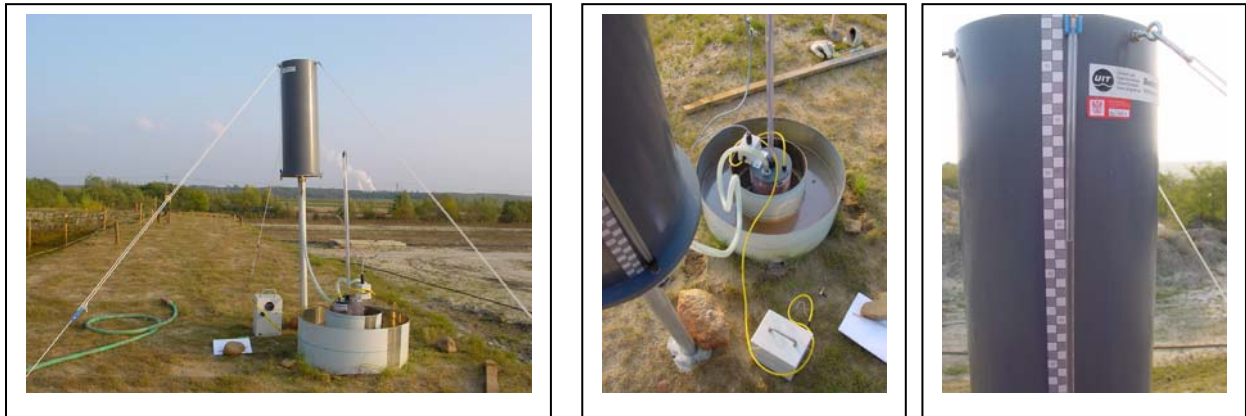
**Abb. 194** : Niederschlags-, Wind- und Luftdruckmesser am Messcontainer

Die Luftdruckangaben fließen direkt in die Bestimmung der Pegelstände über Drucksensoren ein. Die Wassertemperaturmessung erfolgte über drei Messpunkte in verschiedenen Höhen im Speicherbecken. Die Messsonden dafür wurden am Betonpfeiler im Speicherbecken befestigt. Diese Temperaturangaben sollen als Basis und Vergleichsoption für die faseroptische Temperaturmessung dienen. Die Niederschlagsmessung bildet die Grundlage für die Bestimmung des Einflusses von versickerndem Regenwasser in den Deichkörper. Um die Niederschlagsversickerung genauer definieren zu können sollten punktuell Versickerungsmessungen mittels Infiltrationsmessgerät durchgeführt werden.

### 8.3.3.2 Infiltrationsmessgerät für die Bestimmung der Versickerungsrate von Böden

Über ein Infiltrationsmessgerät (Infiltrometer) sollte die Infiltrationsrate (Versickerungsrate) des eingebauten Erdstoffes überprüft werden. Somit kann der Einfluss des versickernden Regenwassers auf die Entwicklung der Sickerlinie und des Durchflusses im Deichkörper bestimmt werden. Die Infiltrationsrate  $k_i$  bezeichnet dabei die versickerte Wassermenge pro Zeit und Fläche.

Auf der Versuchsdeichkörperoberfläche wurde hierfür ein Doppelringinfiltrometer nach DIN 19682, Blatt 7 eingesetzt. Die Ablesung der Daten erfolgte manuell.



**Abb. 195 :** Infiltrationsmessgerät, Aufbau auf dem Versuchsdeichkörper (Ecke homogener Bereich/Oberflächendichtung)

## 8.4 Versuchsdurchführung

Im Verlauf der Untersuchungen am Versuchsdeichkörper wurden 5 Messkampagnen mit Volleinstau (2,3 m Wasserstand im Speicherbecken) durchgeführt. Dem vorangestellt wurde eine Vorversuchsreihe mit einer Einstauhöhe von 1,0 m. Die fünfte und letzte Messkampagne diente der Untersuchung der Überlaufstrecken mit unterschiedlichen Überströmungshöhen von ca. 20 cm und ca. 40 cm (2,5 m und 2,7 m Einstau).

Es erfolgten Untersuchungen zu verschiedenen Jahreszeiten mit unterschiedlicher Einstaudauer von 15 bis 70 Tagen und länger. Zusätzlich wurden die Leerstandszeiten des Speicherbeckens zwischen den Messkampagnen variiert. Somit erfolgte der Wiedereinstau des Speicherbeckens und die daraus resultierenden Belastungen des Versuchsdeichkörpers bei unterschiedlichen Restsickerwasserständen. D.h. es war noch nicht alles Wasser aus dem vorherigen Einstau aus dem Deichkörper gesickert.

**Tab. 60:** Übersicht der durchgeführten Messkampagnen am Versuchsdeichkörper

Kampagnen-Nr.	Einlasswasserstand [m]	Einlassdatum	Ablassdatum	Einstaudauer [d]	Leerstand zuvor [d]
0	1	11.06.2007	07.08.2007	57	
1	2,3	07.08.2007	16.10.2007	70	0
2	2,3	06.02.2008	28.03.2008	51	113
3	2,3	15.04.2008	30.04.2008	15	18
4	2,3	04.06.2008	11.07.2008	37	35
5	2,3	12.08.2008		>200	32
5a	2,5	21. bis 24.2008	Überströmung am 23./24.	4	
5b	2,7	05.11.2008	Überströmung am 5.11.	1/2	

Die Dauer der Einlassphase für das Befüllen des Speicherbeckens auf die volle Einstauhöhe betrug je nach anstehendem Wasserdruck auf der Brunnenwasserleitung ca. 6 – 7 Stunden. Befüllt wurde das Speicherbecken über eine unterirdisch verlegte Rohrleitung, welche über eine Schlauchleitungssystem mit dem Entnahmestutzen an der Brunnenwasserleitung der Vattenfall Europe AG verbunden war.



**Abb. 196** : Wasserentnahme, Schlauch- und Rohrleitung zum Befüllen des Speicherbeckens



**Abb. 197** : Ersteinstau auf 1 m Wasserstand (0. Messkampagne) vom 11.06.2007



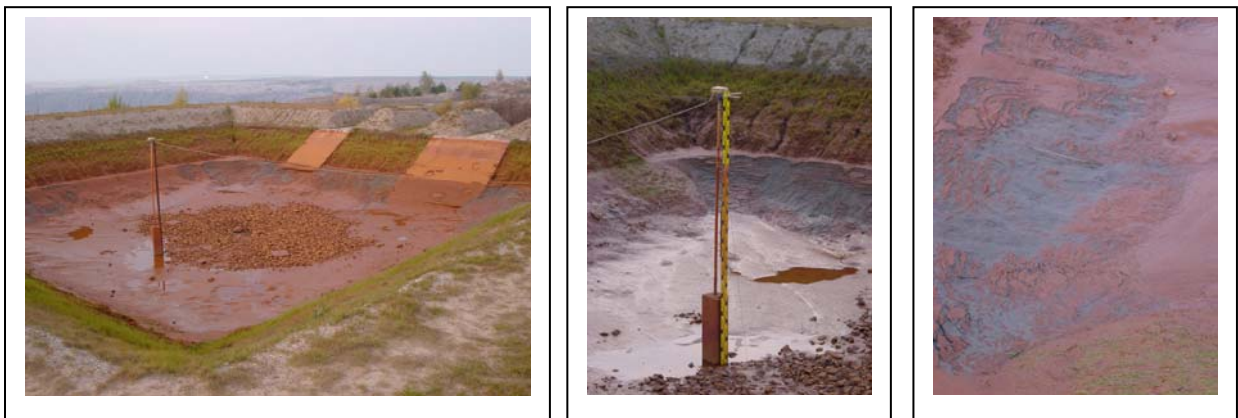
**Abb. 198** : Volleinstau auf 2,3 m Wasserstand (1. Messkampagne) vom 07.08.2007

Das Entleeren des Beckens dauerte 24 bis 30 Stunden und erfolgte ebenfalls über die unterirdische Rohrleitung. Das Wasser wurde über Schläuche abgeleitet und versickerte weit außerhalb des Versuchsdeichkörpers.



**Abb. 199** : Entleeren des Speicherbeckens

Durch das eisenhaltige Brunnenwasser setzten sich im Speicherbecken ausgefallene Eisen(II und III)oxidverbindungen als Schlamm ab. Die feinen Bestandteile des Sedimentes führten zu einer weiteren Abdichtung der wasserseitigen Deichoberfläche, wodurch die Durchsickerung des Deichkörpers weiter erschwert wird.



**Abb. 200** : Eisenschlammablagerungen im Speicherbecken nach dem Entleeren

## 8.5 Untersuchungsergebnisse

### 8.5.1 Ergebnisse zum Setzungsverhalten

Die geodätische Vermessung der Messpunkte auf der Deichkörperoberfläche, an den Bauteilen sowie der installierten Stangenextensometer wurde zumeist zwischen den Einstauphasen durchgeführt. Somit gelten die Messungen zum einen als Bestimmung der Endresultate der vorherigen Messkampagne wie der Ausgangswerte der nachfolgenden. Die Vermessungen erfolgten

- am 11.06.2007 vor dem Ersteinstau als Nullmessung (0. Messkampagne),
- am 01.08.2007 vor dem ersten Volleinstau (1. Messkampagne),
- am 22.08.2007 während dem 1. Volleinstau (1. Messkampagne),
- am 15.04.2008 nach der 2. vor der 3. Messkampagne,
- am 13.08.2008 nach der 4. Messkampagne.

Zunächst soll an dieser Stelle eine Betrachtung der Ergebnisse der letzten Vermessung nach der 4. Kampagne im Vergleich zur Nullmessung erfolgen.

Die Höhenwerte der Messpunkte an der Deichoberfläche zeigen eine durchschnittliche Senkung der Oberfläche um 1,29 cm. Dabei fallen die überdurchschnittlichen Differenzen der Messpunkte E1 (-3,5 cm), E-HD-8 (-6,5 cm) und E-Ü-3 (-2,9 cm) deutlich aus der Gesamtheit der Werte heraus. Berücksichtigt man diese als Ausreißerwerte nicht in der Mittelwertbestimmung ergibt sich eine durchschnittliche Senkung von -0,9 cm. Diese resultieren zum einen aus einem leichten Einsinken der verwendeten Betongehwegplatten in den Boden. Zum anderen können hierfür durchaus Messfehler verantwortlich gemacht werden, da auch die Werte der Referenzpunkte Differenzen von -0,2 bis -0,3 cm aufweisen. Zudem weist jeder künstliche Erdkörper trotz guter Verdichtungsergebnisse beim Einbau eine gewisse Setzung auf, was die nahe liegendste Begründung der Senkung der Bauwerksoberfläche ist.

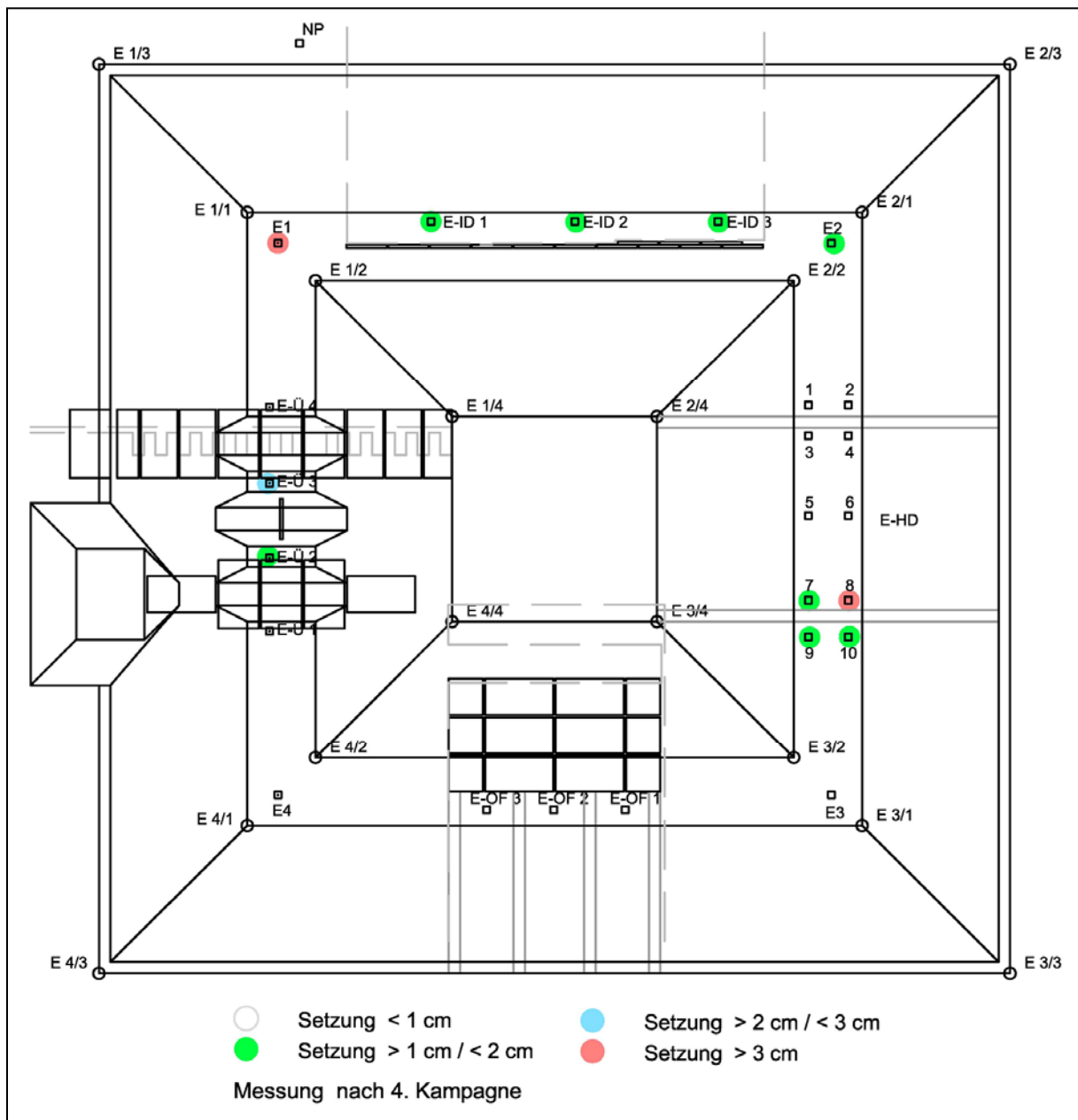


Abb. 201 : Setzungen der Oberflächenmesspunkte

Auf ein allgemeines Setzen des Erdkörpers lässt sich auch aus der Tatsache schließen, dass fast alle Messpunkte eine leichte Absenkung aufweisen (s. Abb. 202).

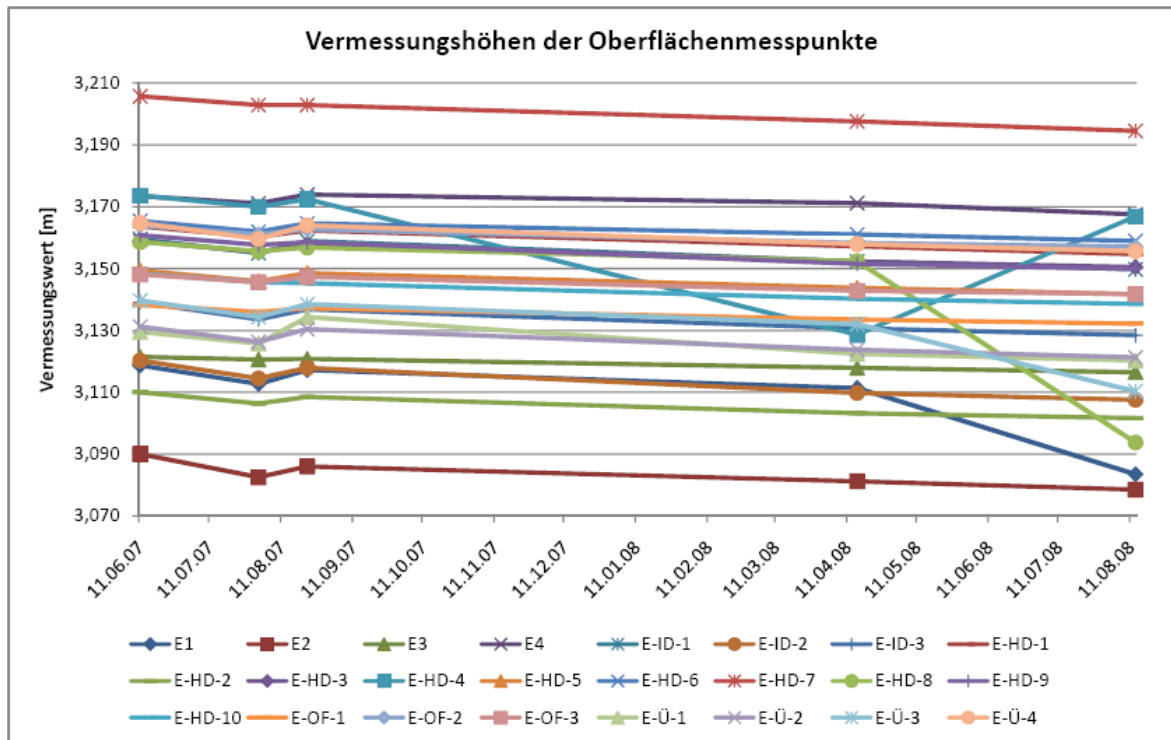


Abb. 202 : Verlauf der Setzungen der Oberflächenmesspunkte

Die oben genannten Ausreißerwerte müssen dennoch gesondert betrachtet werden. Die Setzung des Messpunktes E1 um 3,5 cm kann durchaus auf mechanische Einwirkung von außen zurückgeführt werden. Dieser Messpunkt liegt in unmittelbarer Nähe der Rampe zur Begehung der Deichkrone. Hier kann der Messpunkt durch wiederholte Belastung durch unvorsichtiges direktes Betreten der verlegten Gehwegplatte nach unten gedrückt worden sein. Zudem kann die Patte auch durch die bei Regen oder Bewässerung zertretene Oberfläche in der unmittelbaren Umgebung leicht versackt sein.

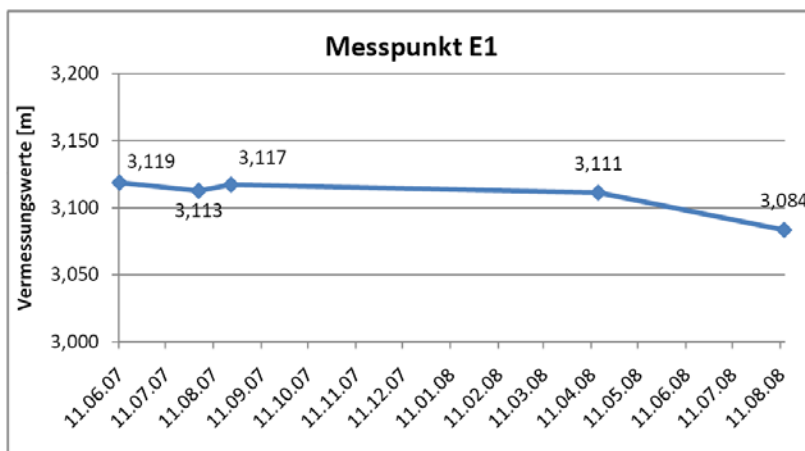
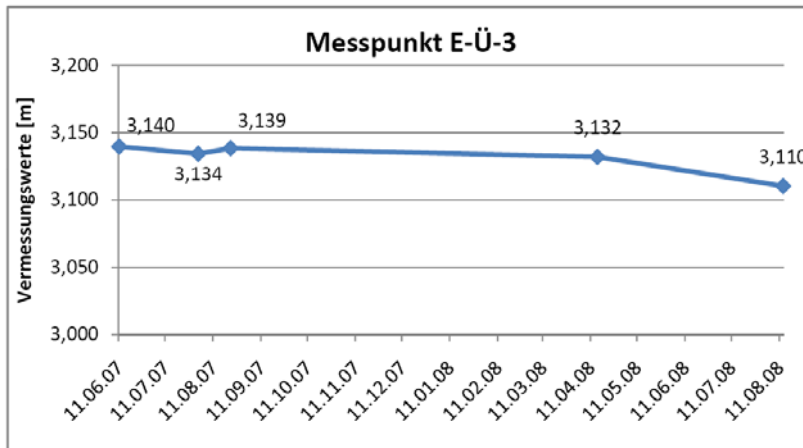


Abb. 203 : Setzung des Messpunktes E1

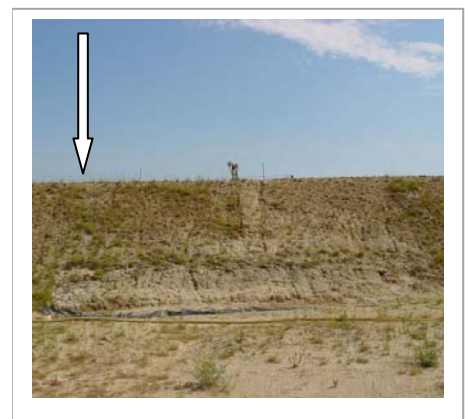
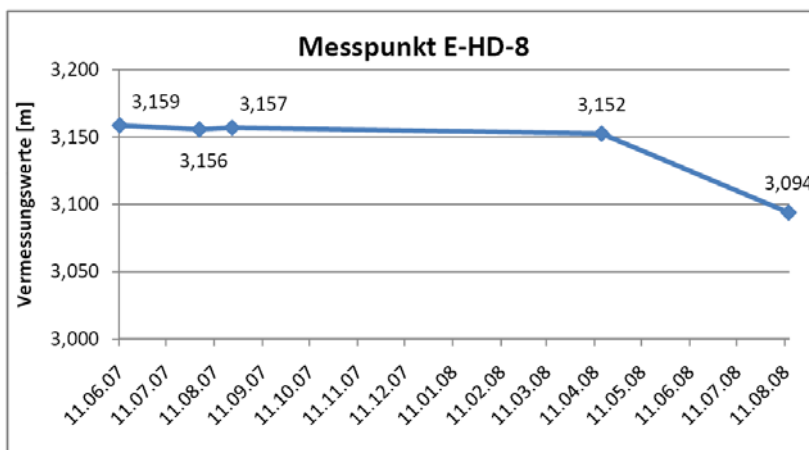


Der Messpunkt E-Ü 3 befindet sich zwischen der Überlaufstrecke Var. 3.1 und der Überströmstrecke Var. 3.3. Die Setzung kann hier auf das Ausspülen der Feianteile aus der Böschung in die Überlaufstrecke, aber auch auf direktes Betreten des Messpunktes zurückgeführt werden. Da die Verbindungen zwischen den Überlaufstrecken sehr schmal ausgeprägt sind, können hier durchaus Setzungen im oberflächigen Bereich auftreten. Das hier verbaute Stangenextensometer weist lediglich eine Setzung von 0,8 cm auf, was diese Aussage bestätigen würde. Im Vergleich dazu senkte sich der Oberflächenmesspunkt im anderen Verbindungsbereich der Überlaufstrecke Var. 3.2 zu Var. 3.3 um 1,0 cm. Das in diesem Bereich eingebrachte Extensometer wies eine Setzung von 0,7 cm auf.



**Abb. 204** : Setzung des Messpunktes E-Ü-3

Das Absinken des Messpunktes E-HD-8 lässt sich nicht ausschließlich auf mechanische Einwirkungen durch Betreten des Messpunktes zurückführen. Dafür ist die Setzung von 6,5 cm in diesem Bereich zu groß. Ebenso sanken die benachbarten Messpunkte H-HD-7, E-HD-9 und E-HD-10 um 1,0 bis 1,1 cm ab. Diese vier Messpunkte gruppieren sich um das Tonschott des homogenen Untersuchungsabschnitts. Dieses kann als Auslöser der Setzung betrachtet werden. So kann der Ton in diesem Bereich bei wiederholtem Sickerwasserzutritt bei unzureichender Verdichtung abgesackt sein. Der umgebende Erdkörper folgte dieser Bewegung. Die Setzung ist örtlich begrenzt, da die umliegenden Messpunkte wie auch das Extensometer Ex-6-HD nur Setzungen von 0,6 bis 0,9 cm aufweisen.



**Abb. 205** : Setzung des Messpunktes E-HD-8

Einen weiteren Ausreißer stellt der Messpunkt E-HD-4 dar. Die Gesamtsetzung über den Untersuchungszeitraum beträgt hier zwar nur 0,7 cm, aber während der 4. Messkampagne weist dieser Messpunkt ein Anhebung von +3,8 cm auf. Dies lässt sich nur über ein Aufquellen dieses Bereichs der Tonschotts und einer daraus resultierenden Anhebung des umliegenden Erdkörpers erklären. Allerdings folgen die benachbarten Oberflächenmesspunkte E-HD 1 (-0,9 cm), E-HD-2 (-0,8 cm) und E-HD-3 (-0,8 cm) wie auch das Extensometer Ex 4-HD (-0,8 cm) dieser Bewegung nicht. Somit muss der Messpunkt bewegt worden sein oder es liegt ein anderweitiger Messfehler vor.

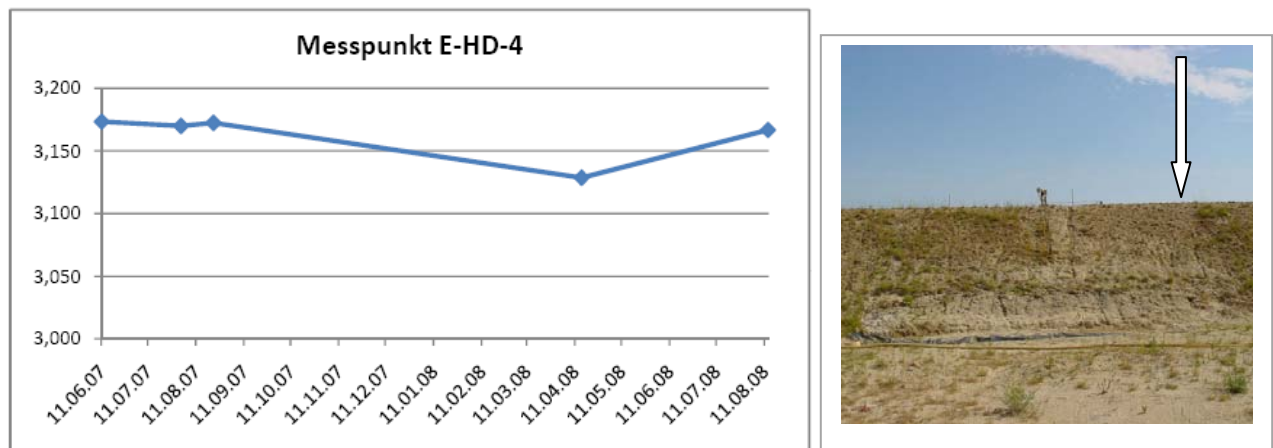


Abb. 206 : Setzung des Messpunktes E-HD-4

Die Extensometer zur Untersuchung von Erdbewegungen (Setzungen) im Deichinneren weisen eine mittlere Setzung um 0,7 cm auf. Dabei liegen die höchsten ermittelten Setzungswerte im Bereich der Innendichtung mit Orbit.Flex-Dichtung (1,0 cm) und mit der Betonmörteldichtung (1,2 cm).

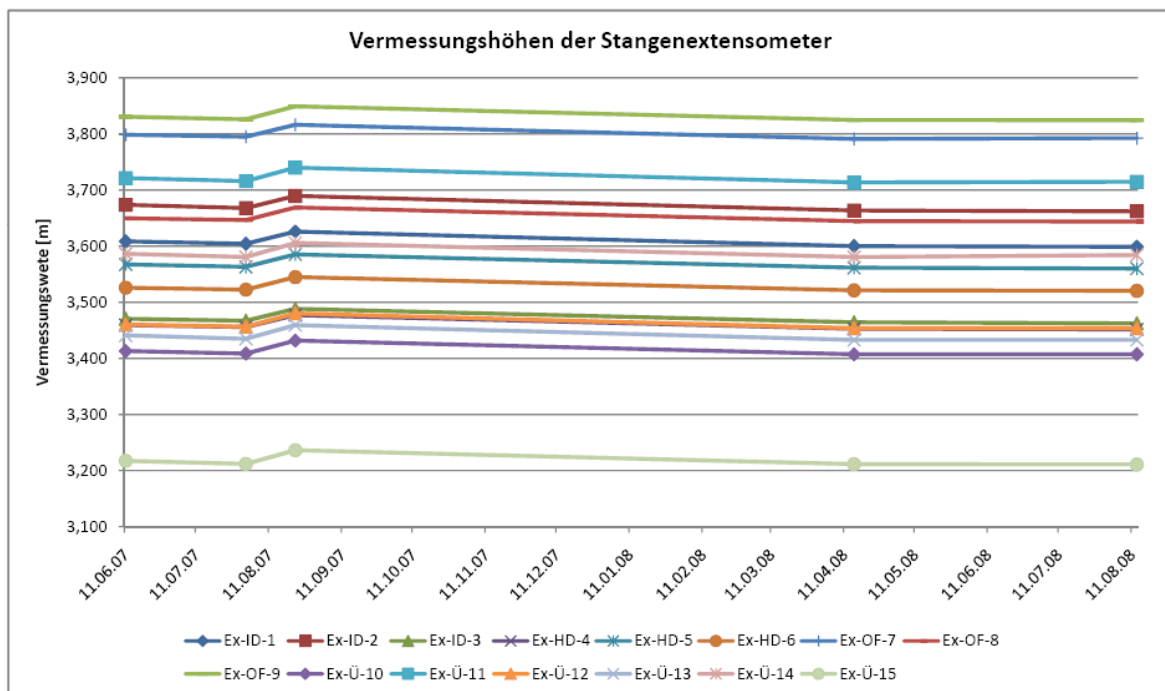
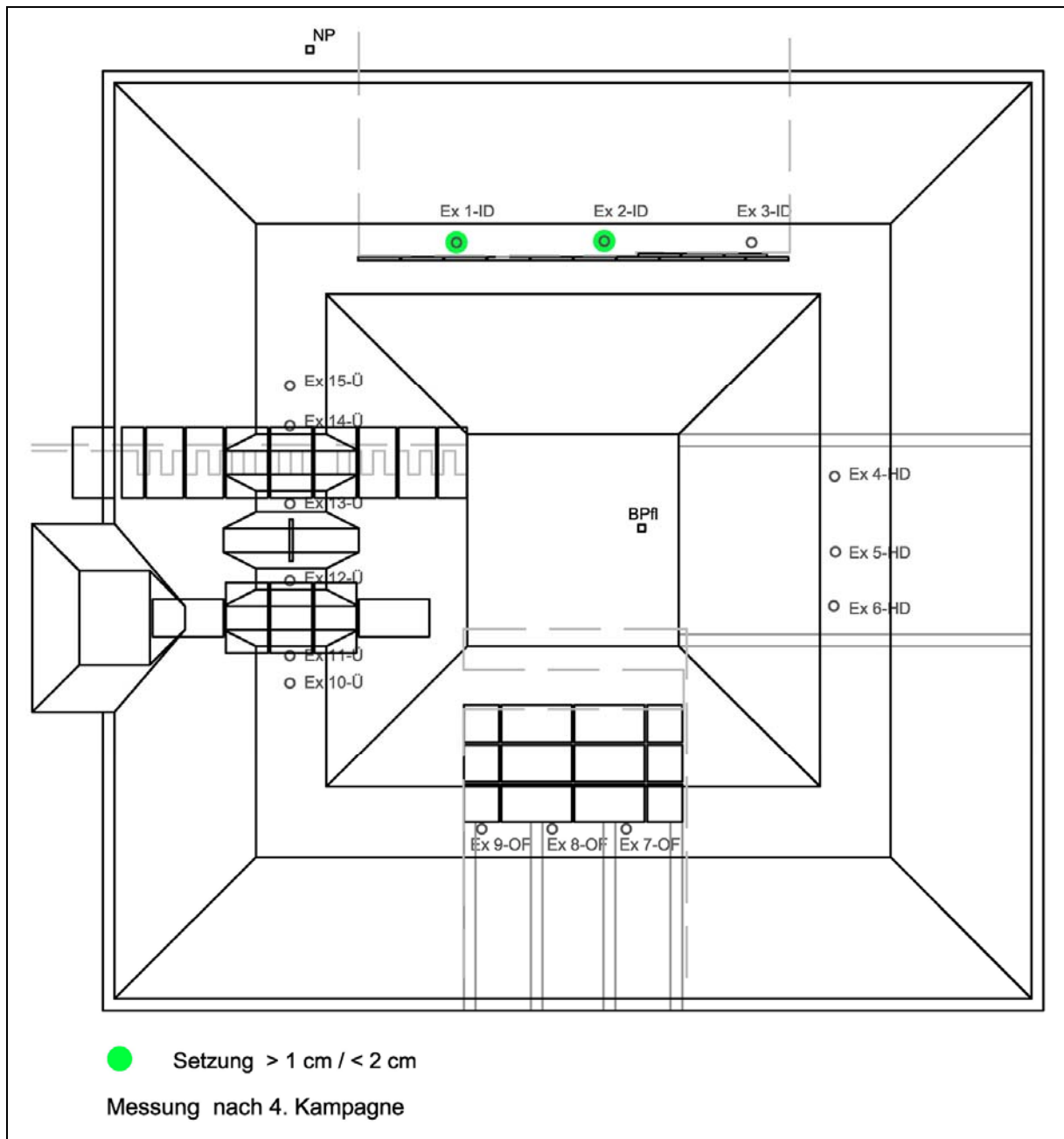


Abb. 207 : Verlauf der Setzungen der Extensometer

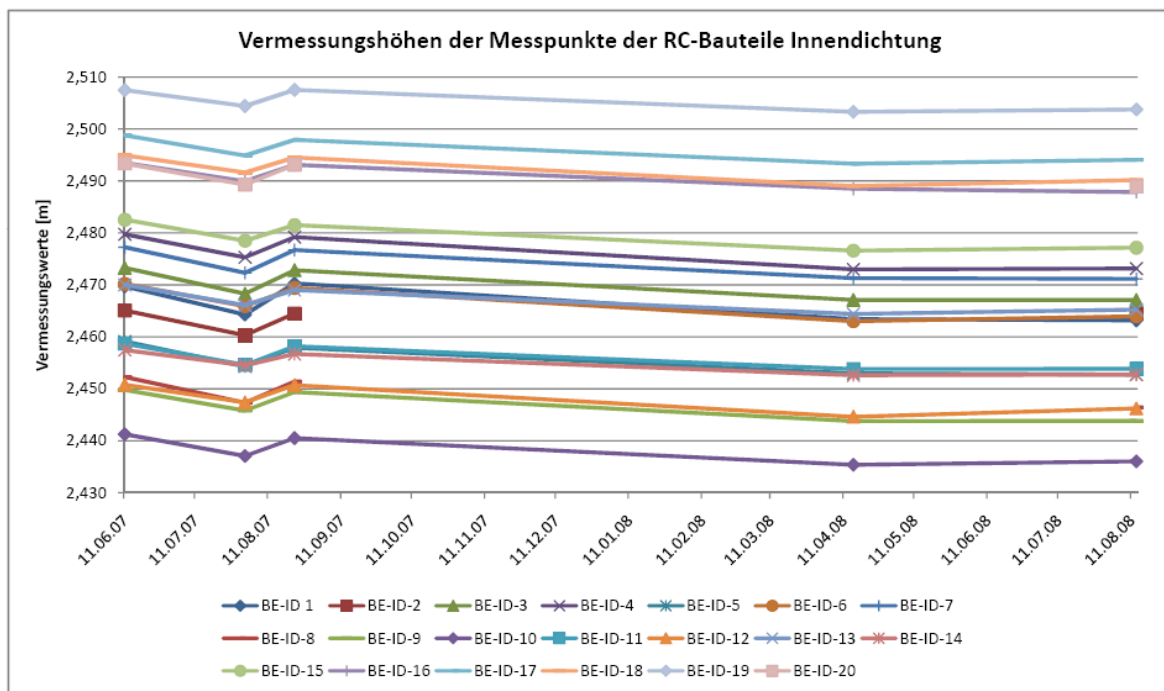


**Abb. 208** : Übersicht zu den Setzungen der Stangenextensometer

Die Ermittlungen der Bauteilbewegung über die befestigten Messpunkte zeigen bei der Innendichtung ein Absenken der Höhenmarken über den gesamten Untersuchungszeitraum um durchschnittlich 0,5 cm, wobei der Maximalwert bei 0,7 cm liegt. Durch diese Setzungen können durchaus Risse in unflexiblen Fugendichtungen, z.B. im Betonmörtel auftreten. Daher müssen hier die Messpunkte im Einzelnen betrachtet werden.

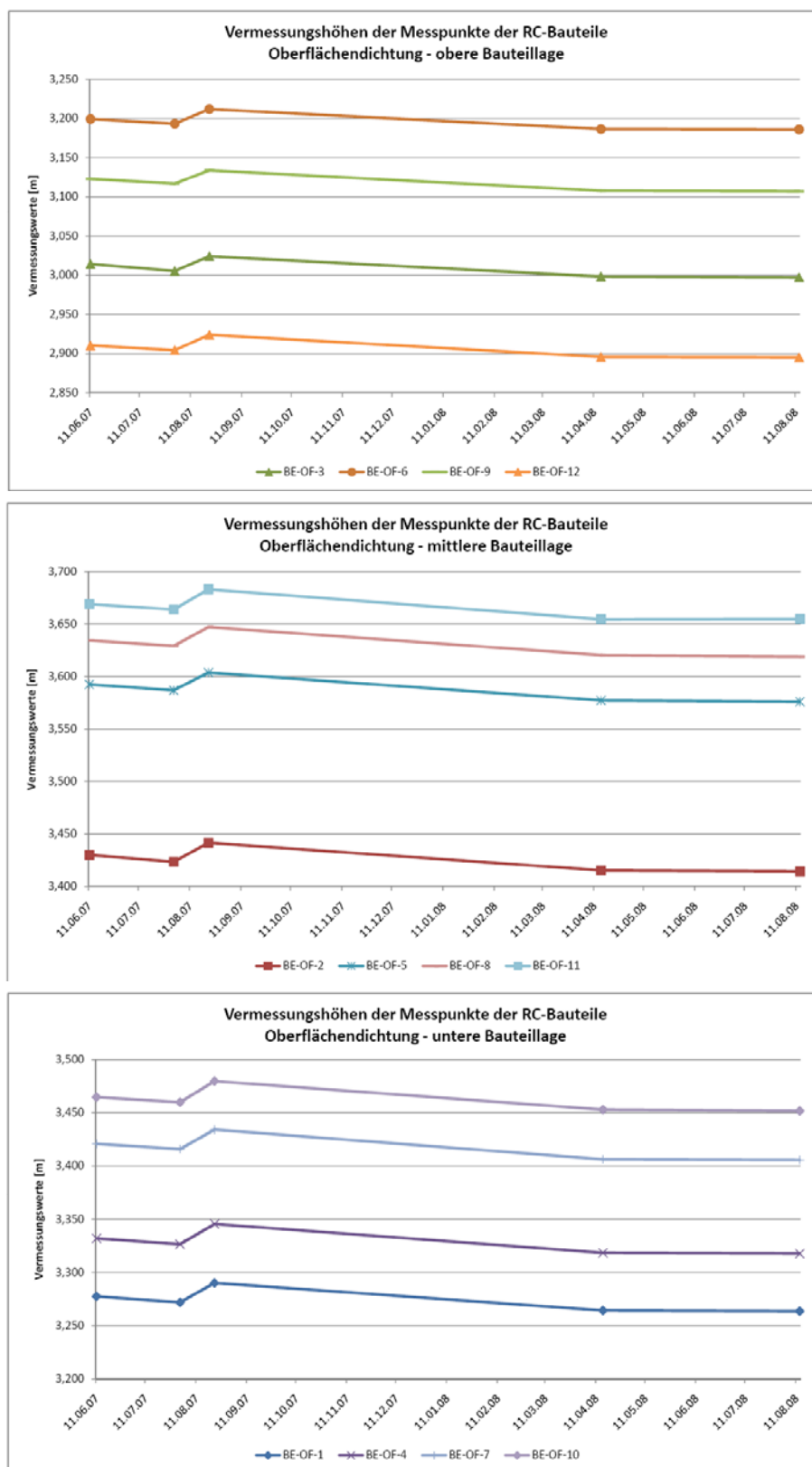
Die Messpunkte für die Mörtelfugendichtung betrifft die Messpunkte BE-ID-8 bis BE-ID-13. Hier wurde eine gleichmäßige Absenkung der Messpunkte um 0,5 und 0,6 cm gemessen, wobei die Messpunkte beiderseits der Fuge jeweils die gleichen Differenzen aufwiesen. D.h. durch die gleichmäßige Setzung in diesem Untersuchungsabschnitt können keine Risse entstanden sein. Ein leichter Höhenversatz (max. 0,1 cm) im Fugenbereich ist im Untersuchungsabschnitt mit der doppelwandigen Ausführung festzustellen. Die Setzungswerte liegen hier zwischen 0,4 und 0,6 cm. Durch den Einsatz von Brun-

nenschau in diesem Bereich sollten auch hier keine Risse in der Fugenabdichtung aufgetreten sein, da dieser relativ flexibel auf Bauteilbewegungen reagiert. Im Bereich der Fugenabdichtung mit Orbit.Flex liegen die Bauteilsetzungen ebenfalls um 0,6 bis 0,7 cm, wobei ein Wert (BE-ID-2) mit nur 0,1 cm deutlich ausreißt. Ein Bauteilverstoss in dieser von 0,6 cm könnte zu einem Reißen der Fugenabdichtung führen. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass es sich hierbei um einen Messfehler handelt. Zumal diese Messstelle sehr stark von einer Versandung der Messtonne über seitlich einströmendes Regenwasser betroffen war.



**Abb. 209** : Verlauf der Setzungen der RC-Bauteile der Innendichtung

Die Auswertung der Setzungsmessergebnisse der RC-Bauteile der Oberflächendichtung ergab eine durchschnittliche Setzung der Bauteile um 1,5 cm. Dabei lagen die Minimalwerte bei 1,3 der Maximalwert bei 1,7 cm. Dieses einheitliche Absinken der gesamten Oberflächendichtung deutet auf eine Eigenlast bezogene Setzung der RC-Bauteile hin. Diese wurden auf die Erdstoffschicht des Deichgrundkörpers verlegt, welcher unter dem Bauteildruck um ca. 1,5 cm nachgab. Da die Setzungsbewegung (wie in den Abb. 210 ersichtlich) in allen Punkten gleichmäßig und auslaufend ist, sind hier keine Schäden an den Fugendichtungen infolge dieser Absenkung zu erwarten. Gleichwohl korreliert die Setzung der Bauteile mit der Gesamtsetzung des Bauwerks, welche ebenfalls im Mittel um ca. 1 cm liegt und hier durch die Bauteillast auf den Erdkörper leicht verstärkt wird.



**Abb. 210** : Verlauf der Setzungen der RC-Bauteile der Innendichtung

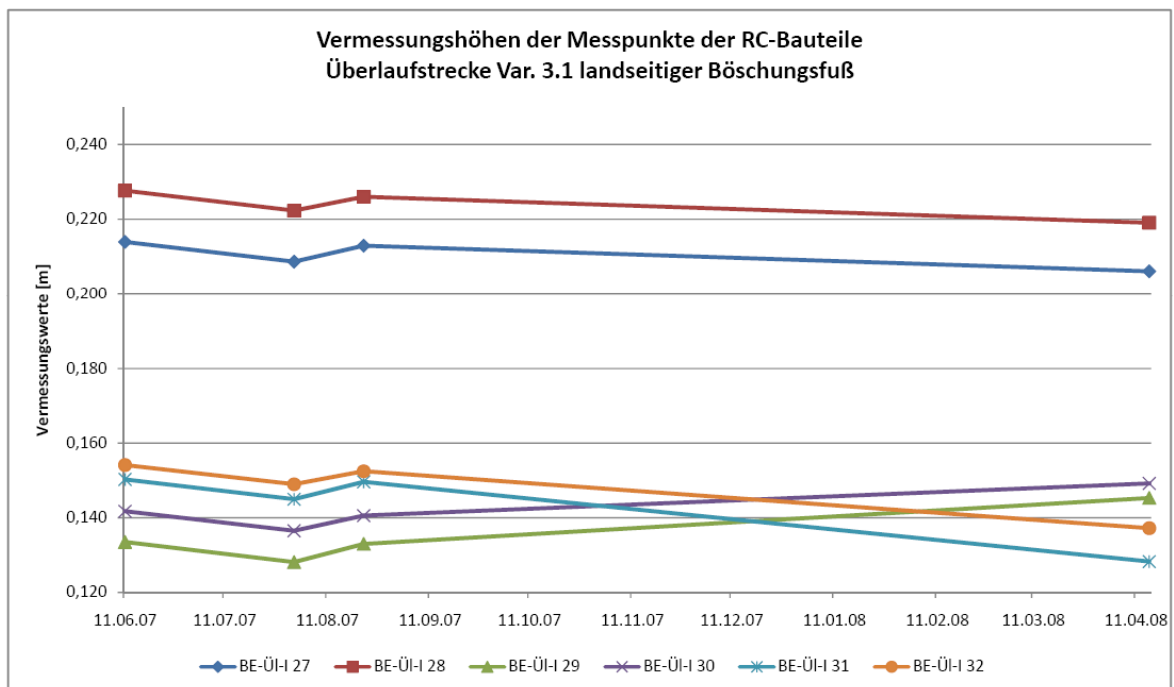
Die Stangenextensometer in diesem Bereich zeigten ebenfalls eine gleichmäßige Setzung im Deichinneren um 0,6 cm. Die Oberflächenmesspunkte senkten sich um 0,6 – 0,7 cm ab.

Ähnlich dem Setzungsverhalten der Oberflächendichtung weist die Überlaufstrecke der Var. 3.1 eine durchschnittliche Absenkung der RC-Bauteile um 1,7 cm auf. Dabei liegen die Werte der horizontal

verlegten Elemente auf der Deichkrone zwischen 0,6 und 0,9 cm. Die Höhendifferenzen an den Böschungsbauteilen reichen hingegen von -0,6 cm bis - 3,5 cm.

Der hohe Maximalwert tritt am untersten RC-Bauteil der wasserseitigen Böschung auf. Diese im Vergleich zu allen anderen ermittelten Werten große Absenkung kann auf die zusätzliche Belastung des Bauteils mit Sediment aus der Böschung wie auch aus dem ausfallenden Eisenschlamm des Wassers zurückgeführt werden. Insgesamt verhalten sich alle Messpunkte der Böschungsplatten relativ konform. Das heißt, die Bauteile setzen sich als Scheibe auf Grund des Druckes ihres Eigengewichtes auf den Erdkörper. Risse der Mörtelschicht zwischen den Bauteilfugen konnten nur im Randbereich der Deichkrone festgestellt werden, da sich hier die Platten der Krone und der Böschung unterschiedlich tief absenkten.

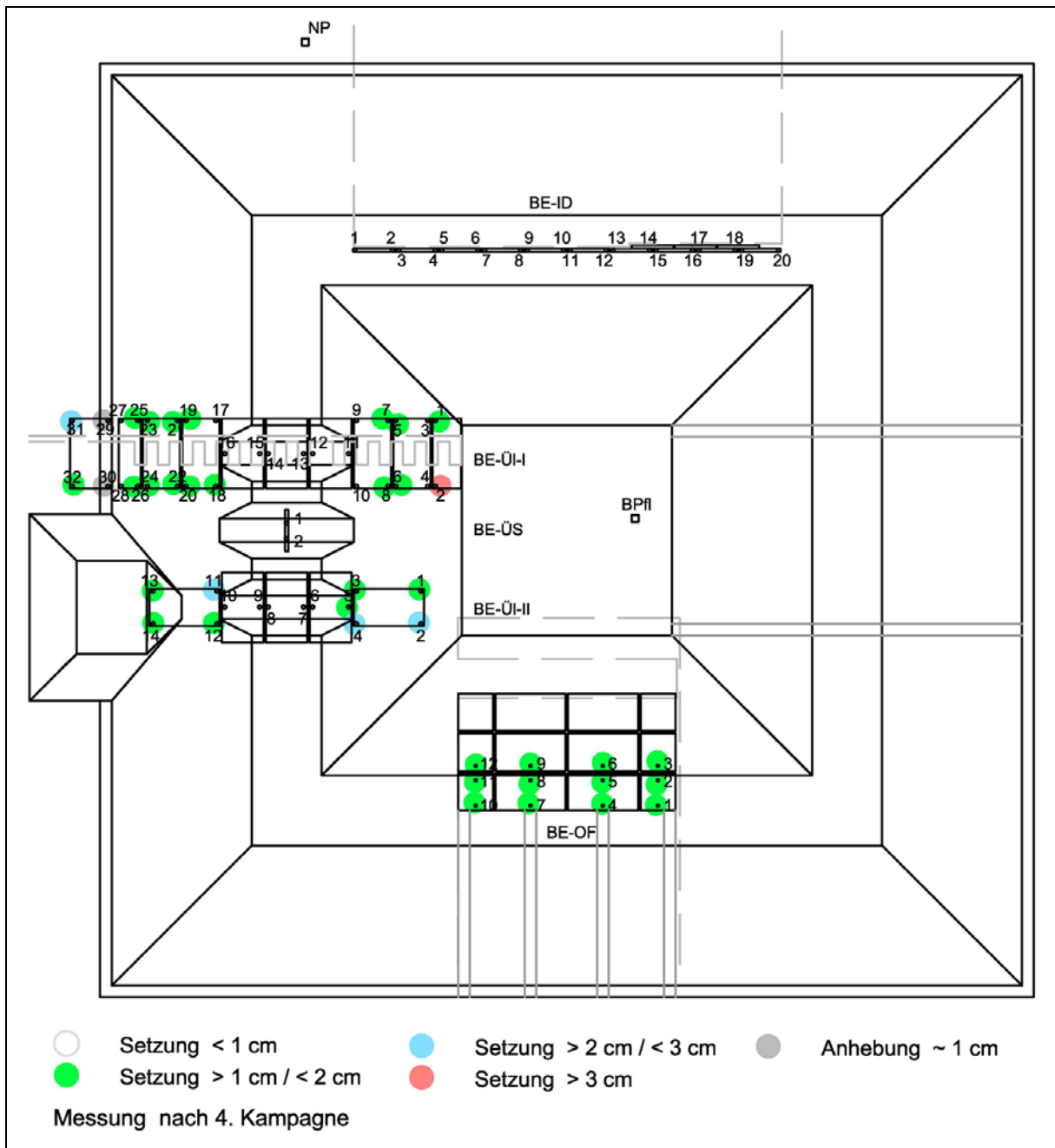
Das am landseitigen Böschungsfuß platzierte RC-Bauteil zur Befestigung des Tosbereiches wurde wahrscheinlich durch die Setzungsbewegung der Böschungsbauteile im unmittelbaren Kontaktbereich nach oben gedrückt und somit leicht gekippt, was die negativen Differenzwerte auf der außenliegenden Seite des Elementes erklärt.



**Abb. 211** : Verlauf der Setzungen der RC-Bauteile der Überlaufstrecke Var. 3.1 am landseitigen Böschungsfuß

Die Messpunkte der Überlaufstrecke Var. 3.2 zeigen eindeutige Setzungsbewegungen der Böschungsbauteile. Diese waren zunächst ausschließlich durch eingeschlagene Pflöcke an der unteren Bauteilkante gesichert. Diese Bauteile rutschten bereits vor dem ersten Einstau ab und wurden daher zusätzlich mit Stahlwinkeln an den Bauteilen auf der Deichkrone befestigt. Aus diesem Abrutschen resultieren die Vermessungsergebnisse. Nur durch das Anbringen der zusätzlichen Sicherung konnten diese Elemente bei der ermittelten Absenkung um 1,0 cm bis 2,1 cm gehalten werden. Die Kronenbauteile wiesen eine Setzung von 0,4 bis 1,0 cm auf. Dies entspricht dem Setzungsverhalten der Kronenbauteile der Überlaufstrecke Var. 3.1..

Das Bauteil der Überströmstrecke Var. 3.3 setzte über den Untersuchungszeitraum um 0,6 cm. Dies korreliert mit den Ergebnissen der Setzungsmessungen an den RC-Bauteilen der Innendichtung.



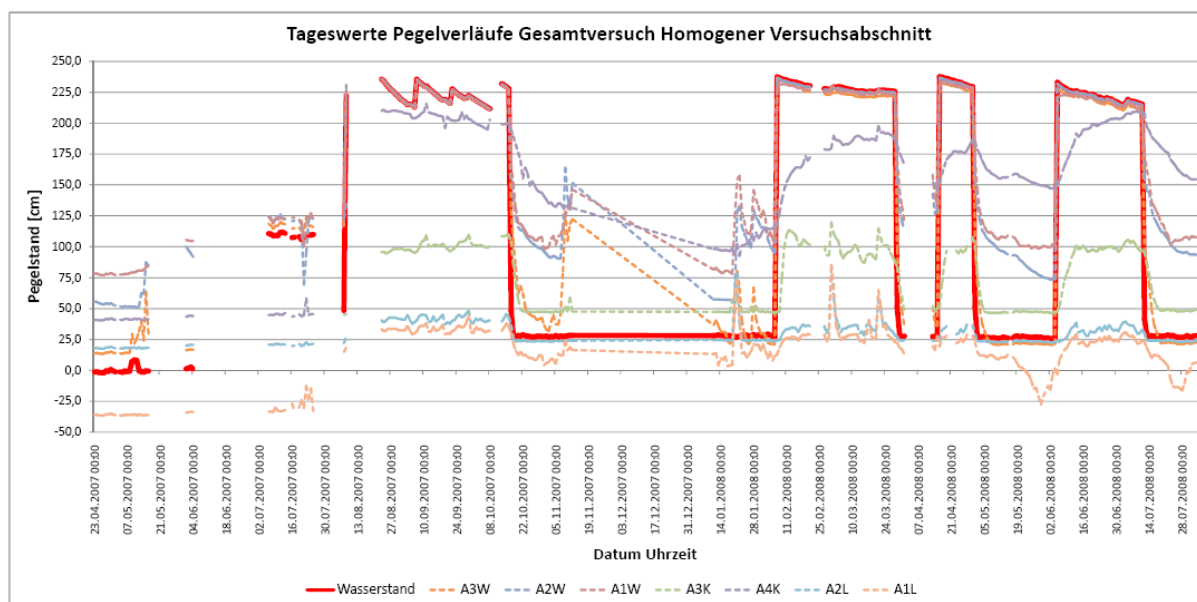
**Abb. 212** : Übersicht zu den Setzungen der RC-Bauteile

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Versuchsdeichkörper im untersuchten Zeitraum keine übermäßigen Setzungserscheinungen gezeigt hat. Die verschiedenen Untersuchungsabschnitte der Oberflächen- und Innendichtung wie auch der Überströmstrecken stehen sicher auch bei wiederholten Belastungen (4 Messkampagnen) durch den Einstau bis zu 70 Tagen auf 2,3 m Wasserstand. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Setzungsmessungen am homogenen Deich sind keinerlei Auffälligkeiten erkennbar.

## 8.5.2 Ergebnisse zur Durchsickerung

Die Untersuchungen zur Durchsickerung der verschiedenen Abschnitte des Versuchsdeichkörpers beruhen zum einen auf den Ergebnissen der Datenerhebung durch das Pegelnetz sowie den Aufnahmen der faseroptischen Temperaturmessung zur Leckageüberwachung als auch auf Durchflussmessungen über die Abflussrinnen am landseitigen Böschungsfuß. Diese Messsysteme wurden bereits im Abschnitt 8.3.2 vorgestellt.

Über die Durchflussmessung an den Sickerrinnen sowie die kontinuierliche sensorgestützte wie stichpunktartige manuelle Pegelmessung können Aussagen zu den Durchflussmengen, den Höhen der erreichten Sickerwasserstände im Deichkörper als auch zur Entwicklung der Sickerwasserlinie getroffen werden. Betrachtet werden sollen dabei die Daten der 0. bis 4. Messkampagne. Die Daten für die Pegelstände wurden alle 10 Minuten ermittelt. Für die Auswertung wurde die Datenmenge auf einen Datensatz pro Tag (Tageswert) reduziert. Einen Gesamtüberblick zum Verlauf der Pegelstände geben die folgenden Abb. 213 bis 215.

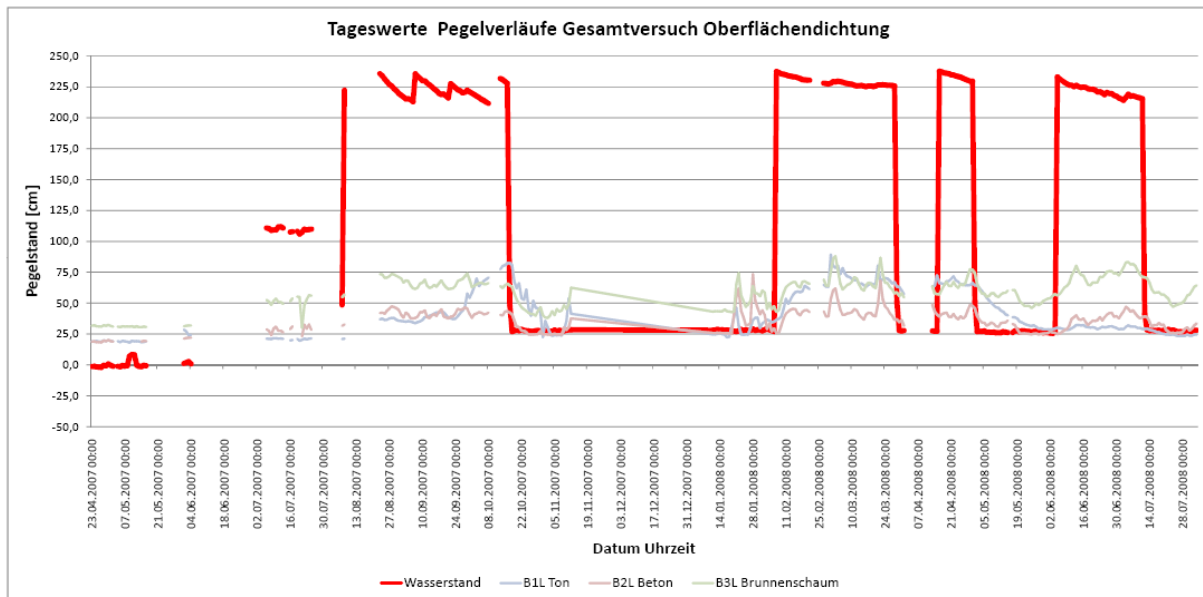


**Abb. 213** : Pegelverlauf des homogenen Deichabschnitts (Var. 0) über den gesamten Untersuchungszeitraum

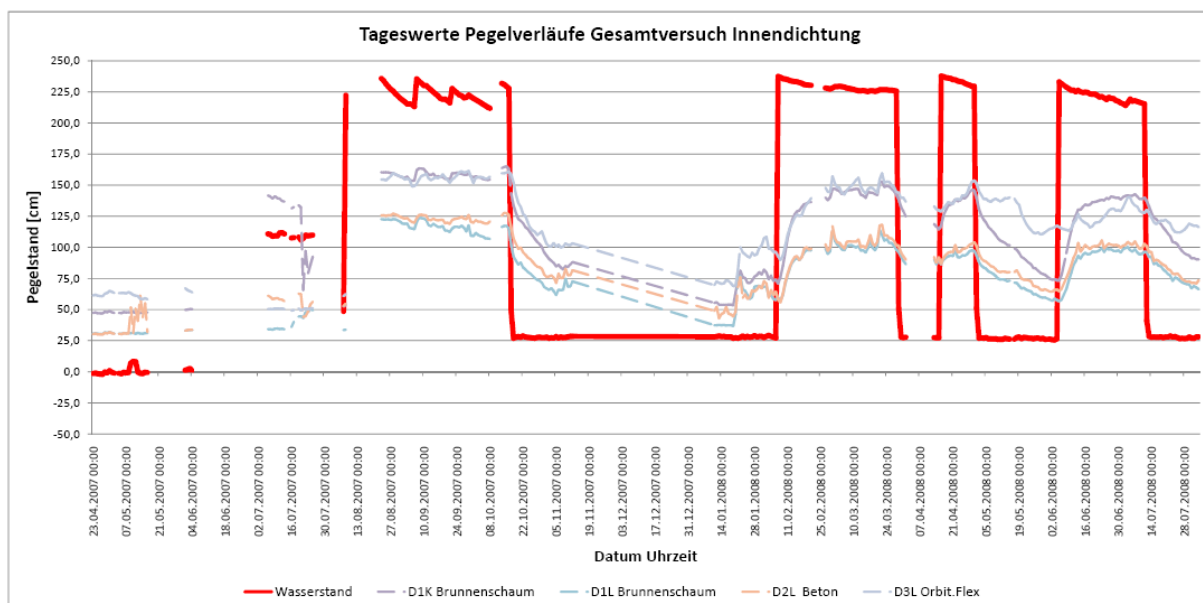
Die Pegelstände des homogenen Deiches folgen wie erwartet den Wasserständen des Speicherbeckens. Wurde das Speicherbecken gefüllt steigen zeitversetzt auch die Wasserstände in den Pegeln. Mit größerer Entfernung der Pegel zum wasserseitigen Böschungsfuß sinken die Pegelstände, die Sickerwasserlinie weist zur landseitigen Böschung also nach unten.

Ein ähnliches Bild bieten allerdings auch die Pegelverläufe der Oberflächen- und Innendichtung. Auch hier folgen die Pegelstände hinter den Dichtungen deutlich den wechselnden Wasserständen im Speicherbecken. Dies deutet auf Undichtigkeiten der eingesetzten Dichtungen oder der Tonschotts zwischen den Untersuchungsabschnitten hin. Die unterschiedlichen Pegelstände in den einzelnen Untersuchungsabschnitten zeigen, dass sich diese Abschnitte nicht gegenseitig beeinflussen. Dies bedeutet, dass die Tonschotts wirksam sind und dicht halten. Somit liegt die Ursache für die Korrelation der Pegelstände hinter den Dichtungen mit dem Wasserstand im Speicherbecken in der geringen oder nicht vorhandenen hydraulischen Wirksamkeit der Dichtungen.





**Abb. 214** : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Oberflächendichtung (Var. 1) über den gesamten Untersuchungszeitraum



**Abb. 215** : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Innendichtung (Var. 2) über den gesamten Untersuchungszeitraum

Festzustellen ist zudem, dass die Pegelstände hinter der Oberflächendichtung deutlich niedriger ausfallen als die hinter der Innendichtung. Um die Ursachen der schwankenden Pegelstände zu erkennen, sollen im Folgenden die einzelnen Untersuchungsabschnitte und Messkampagne getrennt beleuchtet werden.

Bis zum Volleinstau der 1. Messkampagne erfolgten durch den Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau ausschließlich Durchflussmessungen am homogenen Deichabschnitt, um die Situation im Vergleichsdeichkörper genauer zu erfassen. Die Modellierung der Wasserstände und Durchflüsse anhand der Daten aus Pegel- und Durchflussmessungen mit dem Programm Modflow ergaben

bei einem Wasserstand von ca. 1m und dem Volleinstau auf 2,3 m für diesen Untersuchungsabschnitt folgende Bilder.

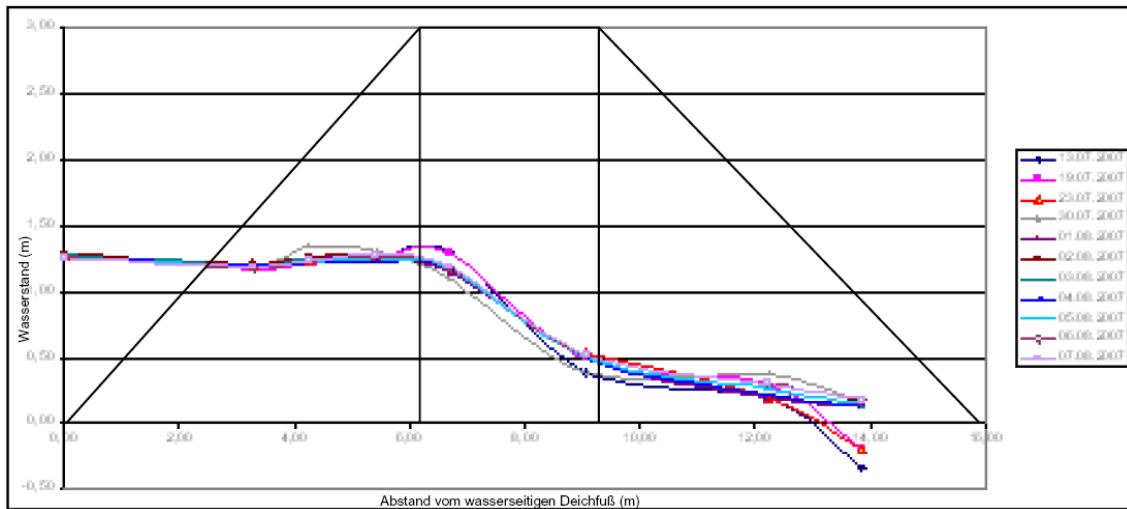


Abb. 216 : Pegelstände im homogenen Deichabschnitt (manuelle Messungen), Wasserstand 1,3 m<sup>147</sup>

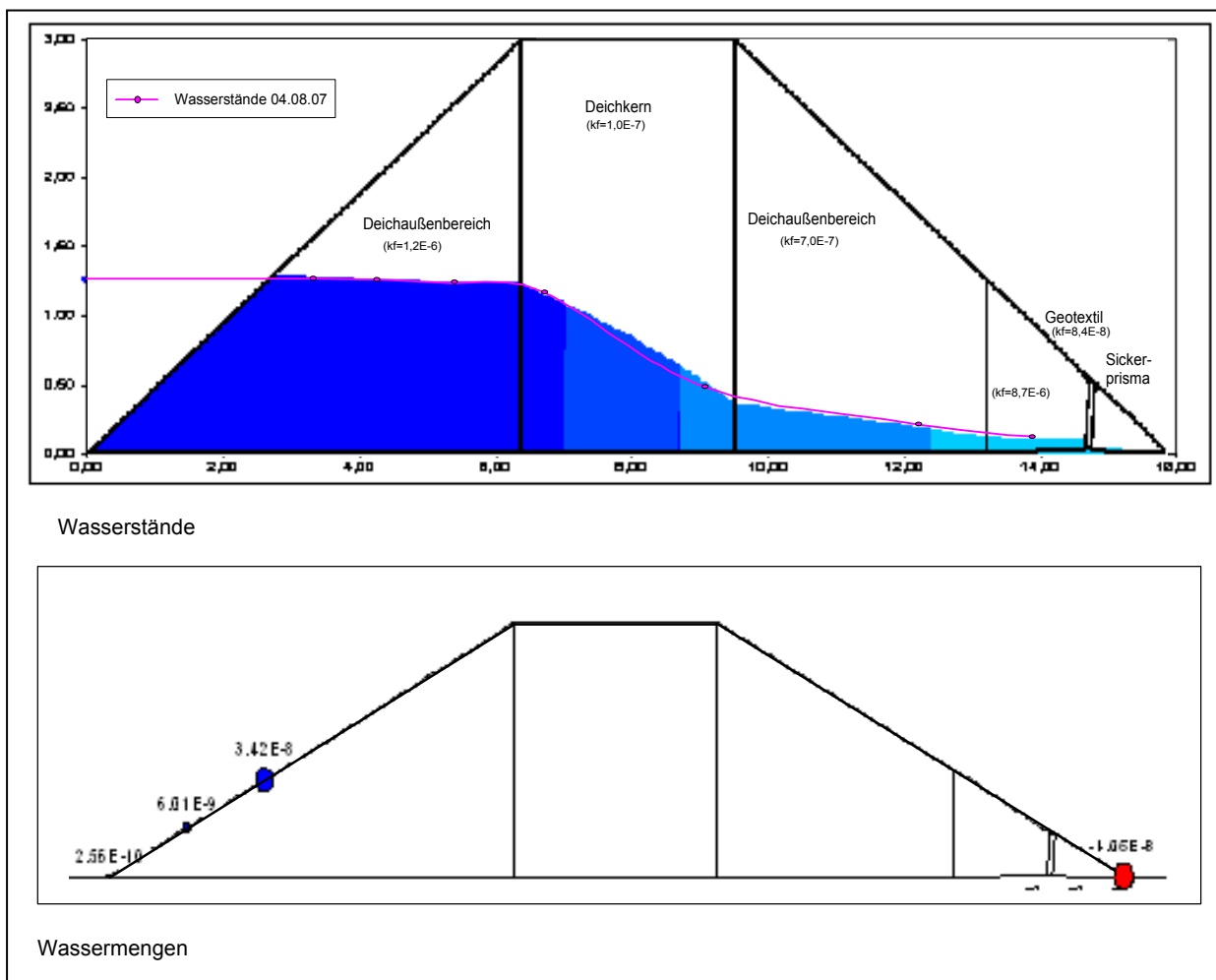


Abb. 217 : Modellierung der Wasserstände und Durchflussmengen bei einem Wasserstand von 1,3 m<sup>148</sup>

<sup>147</sup> Regel, R.: Teilbericht Pegelmesswerte Deichbau; BTU Cottbus, Okt. 2007.  
<sup>148</sup> ebenda.

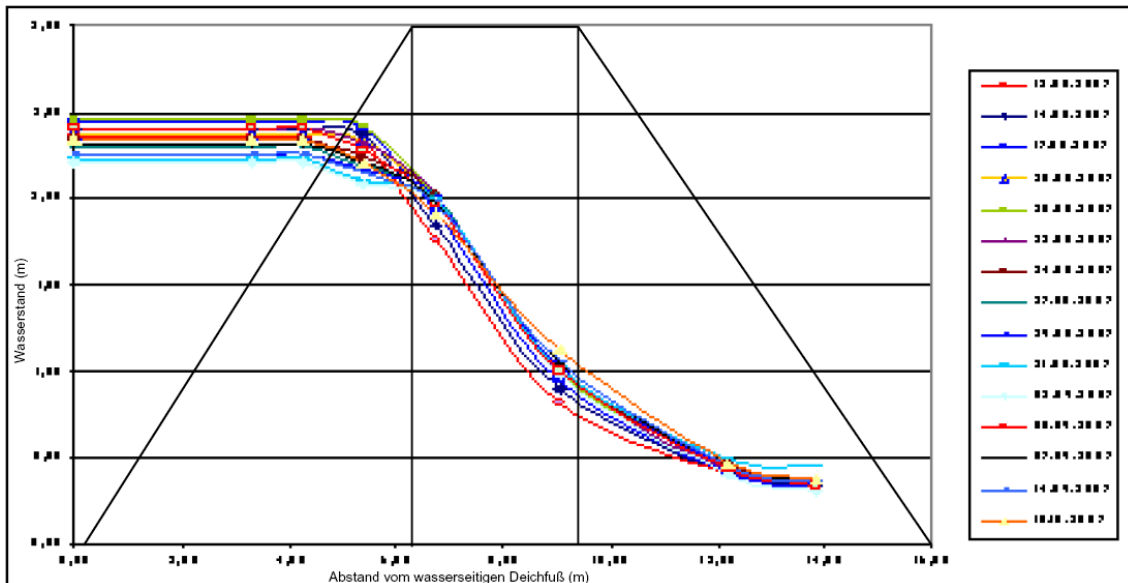


Abb. 218 : Pegelstände im homogenen Deichabschnitt (manuelle Messungen), Wasserstand 2,3 m<sup>149</sup>

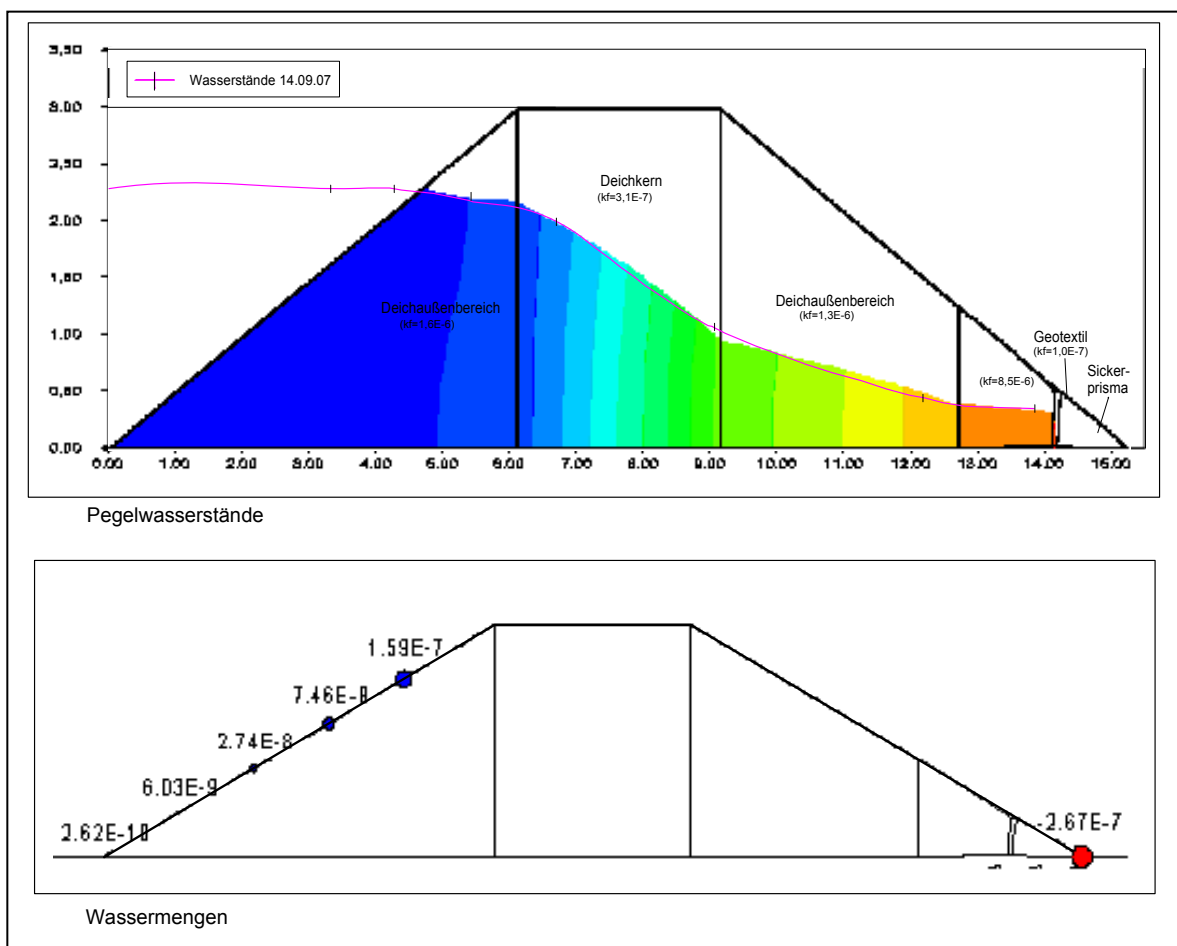
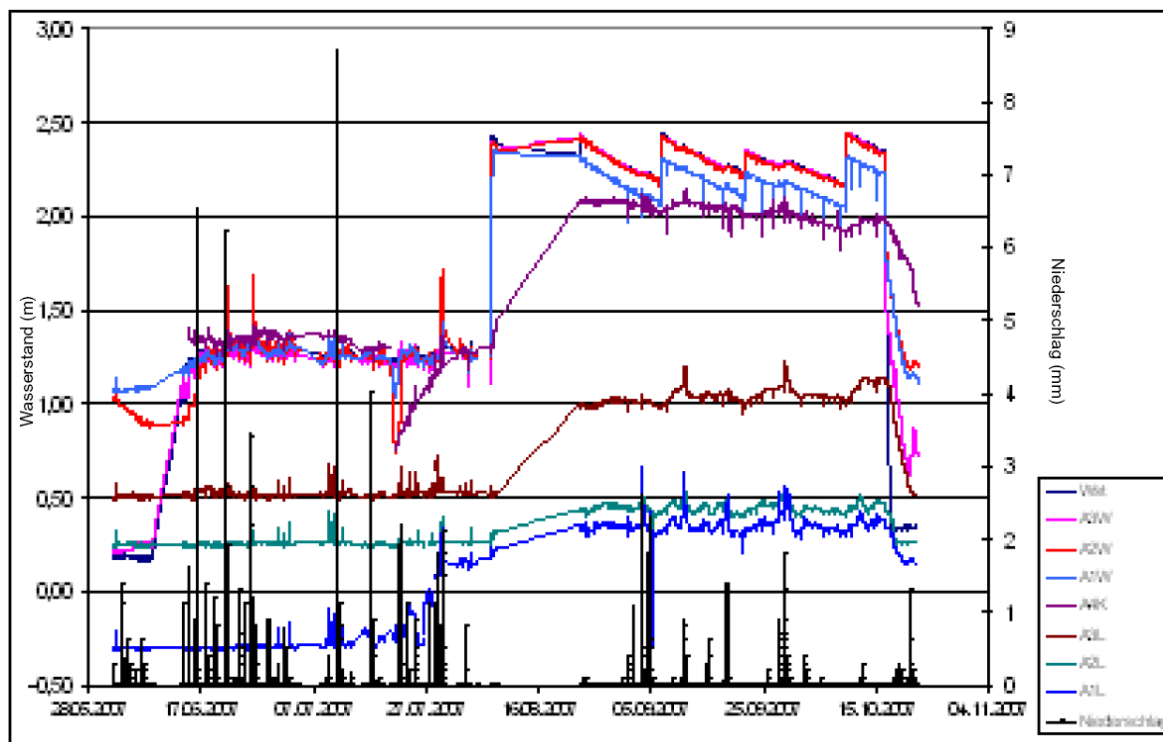


Abb. 219 : Modellierung der Wasserstände und Durchflussmengen bei einem Wasserstand von 2,3 m<sup>150</sup>

<sup>149</sup> Regel, R.: Teilbericht Pegelmesswerte Deichbau; BTU Cottbus, Okt. 2007.

<sup>150</sup> ebenda.

Die modellhafte Simulation der Pegelwasserstände der Abb. 217 und 219 lässt eine Zonierung des homogenen Deichabschnitts erkennen. So zeigen sich im Bereich der Deichkrone und der landseitigen Böschung geringere berechnete Durchlässigkeitswerte. Dies kann seine Ursachen in der Bau-phase haben. Im Bereich des homogenen Deichabschnitts befand sich die Auffahrt zum Einbringen des Erdstoffes, welche nach Fertigstellung des Deichkörpers wieder zurückgebaut wurde. Durch das häufige Befahren dieser Rampe können hier deutlich höhere Verdichtungen auftreten als im wasserseitigen Böschungsbereich.



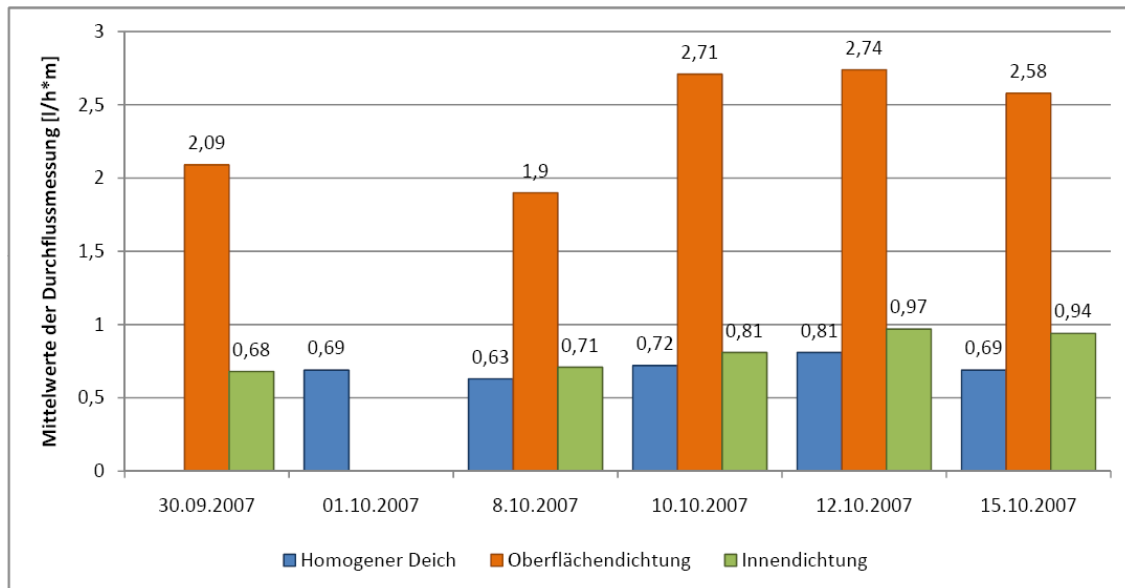
**Abb. 220** : Pegelverlauf (Zeitreihe) des homogenen Deiches für die 0. und 1. Messkampagne mit Niederschlagsmessung<sup>151</sup>

Die Zeitreihe der Wasserstände des Pegels A1L (untere blaue Linie in Abb. 220), welcher nahe dem landseitigen Böschungsfuß positioniert ist, zeigt eine weitere Eigenheit. So steigt der Pegelstand ab Mitte Juli 2007 und somit schon vor dem Volleinstau am 07.08.2007 an. Dies könnte durchaus auf einer Abdichtung des Geotextils durch Sedimentablagerungen zurückzuführen sein. Eine Abdichtung des Geotextils mit Sediment aus dem Deichinneren kann somit auch Ursache für das sehr langsame und zum Teil nicht vollständige Absinken der landseitigen Pegel sein.

Nach dem ersten kompletten Befüllen wurden Messungen zum Durchfluss der einzelnen Untersuchungsabschnitte durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung werden die ermittelten Tagesdurchschnittswerte verglichen, welche am selben oder an aufeinanderfolgenden Tagen an allen Untersuchungsabschnitten ermittelt wurden. Die Mittelwertberechnung für die Untersuchungsabschnitte mit Dichtung erfolgte aus jeweils zwei bis vier Messreihen pro Tag. Eine Messung umfasste dabei die Wassermenge, welche in 8 bis 16 Minuten durch den Deichkörper gesickert ist. Die Daten am homo-

<sup>151</sup> Regel, R.: Teilbericht Pegelmesswerte Deichbau; BTU Cottbus, Okt. 2007.

genen Deichabschnitt wurden über längere Messzeiträume von 60 Minuten in einer bis zwei Messungen pro Tag erhoben.



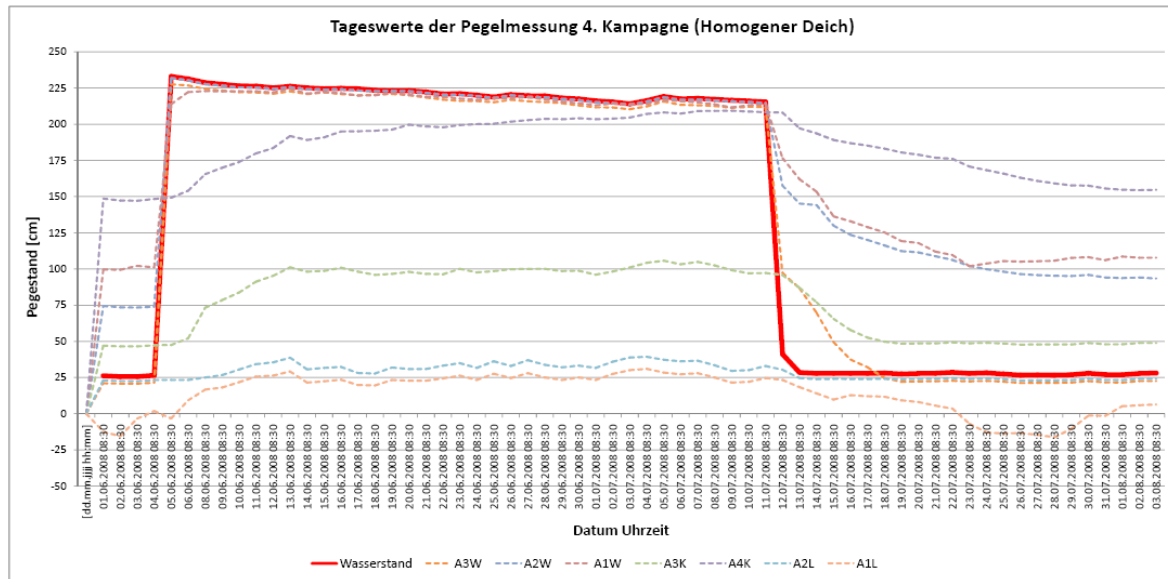
**Abb. 221** : Mittelwertvergleich der Durchflussmessungen der 1. Messkampagne

Trotz der eingebauten Dichtungsschichten weisen die Untersuchungsabschnitte mit Innen – und Oberflächendichtung höhere Durchflusswerte auf als der homogene Untersuchungsabschnitt. Dies lässt auf eine hydraulisch unwirksame Dichtung und auf eine höhere Durchlässigkeit des Erdkörpers also auf eine schlechtere Verdichtung des Erdkörpers in diesen Abschnitten schließen. Das heißt, Innen- und Oberflächendichtung sind nicht dicht und verhindern durch ihren Einbau eine optimale Verdichtung des Erdkörpers, welcher dadurch besser durchströmt werden kann und somit höhere Durchflusswerte aufweist.

Im Folgenden sollen beispielhaft die Ergebnisse der sensorgestützten Pegelstandsmessungen der 4. Messkampagne betrachtet werden. Zunächst erfolgt dies anhand der Pegelverläufe über die Dauer dieser Messkampagne von 37 Tagen. Die Versuchsdauer liegt somit im mittleren Bereich der Dauer der Einstauphasen (mittlere Einstaudauer = 43 Tage). Zuvor stand der Versuchskörper 18 Tage leer. Somit war noch nicht alles Sickerwasser aus dem Erdkörper abgeflossen. Der Wasserstand im Speicherbecken vor Versuchsbeginn lag bei 0,27 m. Zur Darstellung der Pegelwasserstände der Ausgangssituation wurden in den nachfolgenden Verlaufsdiagrammen die Daten ab 3 Tagen vor Versuchsbeginn mit einbezogen. Zudem werden die jeweiligen Situationen der einzelnen Untersuchungsabschnitte vor Kampagnenbeginn in den Diagrammen der Sickerlinien dargestellt.

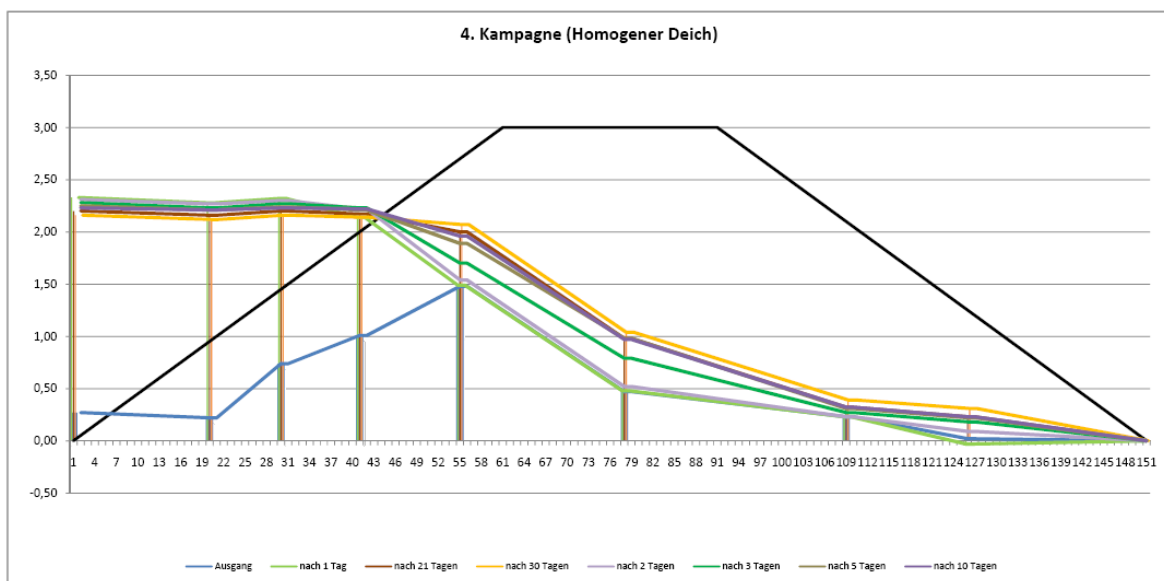
### 8.5.2.1 Sickerwasserentwicklung im homogenen Untersuchungsabschnitt

Zunächst erfolgt eine Betrachtung des homogenen Untersuchungsabschnitts, welche die Grundlage für die Analyse der weiteren Untersuchungsabschnitte mit Oberflächen- und Innendichtung liefert.



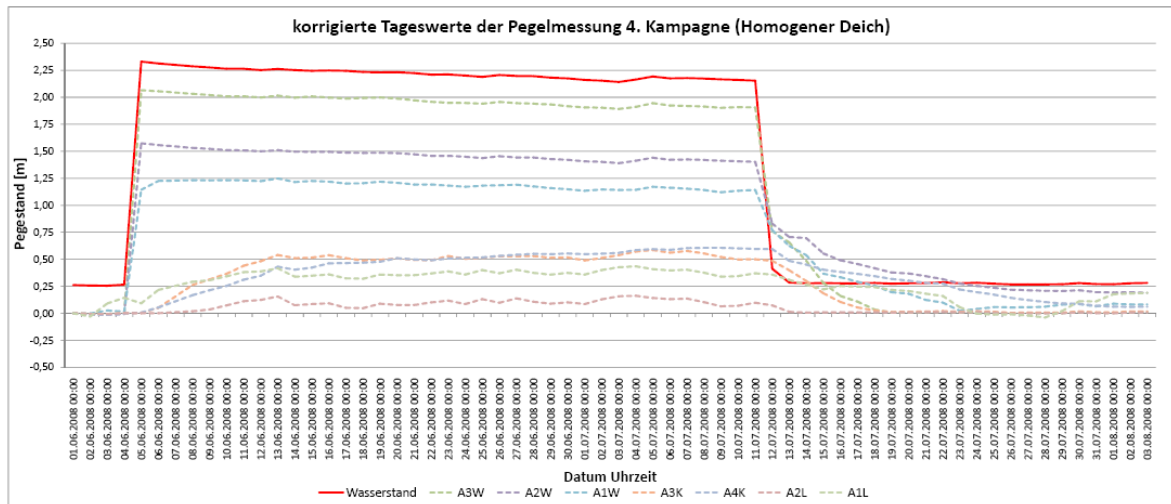
**Abb. 222** : Pegelverlauf des homogenen Deichabschnitts (Var. 0) über die 4. Messkampagne

Deutlich zeigt sich in der Ausgangssituation der Pegel, dass vor allem der wasserseitige Böschungsbereich mit den Pegeln A3W bis A1W und A3K, A4K im Kronenbereich das Sickerwasser aus der vorhergehenden Messkampagne noch nicht abgelaufen ist. Alle Pegel zeigen wie erwartet einen Anstieg mit Beginn des Volleinstaus ihrem Abstand zum wasserseitigen Böschungsfuß entsprechend. Die Pegel der wasserseitigen Böschung folgen dem Wasseranstieg fast direkt. Nach ca. 10 Tagen verändern sich die Pegelstände nur noch in geringen Bereichen. Die Sickerlinie hat sich eingestellt. Das Abfließen des Sickerwassers aus dem Deichkörper nach Beendigung des Volleinstaus benötigt zum Teil über 20 Tage, da mit abnehmender Sickerwasserhöhe der hydraulische Druck des Sickerwassers und somit die Sickergeschwindigkeit abnimmt. Dazu deuten die lange verbleibenden hohen Pegelstände der wasserseitigen Pegel A2L, A3L sowie des Pegels A3K auf eine Abdichtung der Pegelrohre hin, wodurch das eingesickerte Wasser nur sehr langsam wieder abfließt

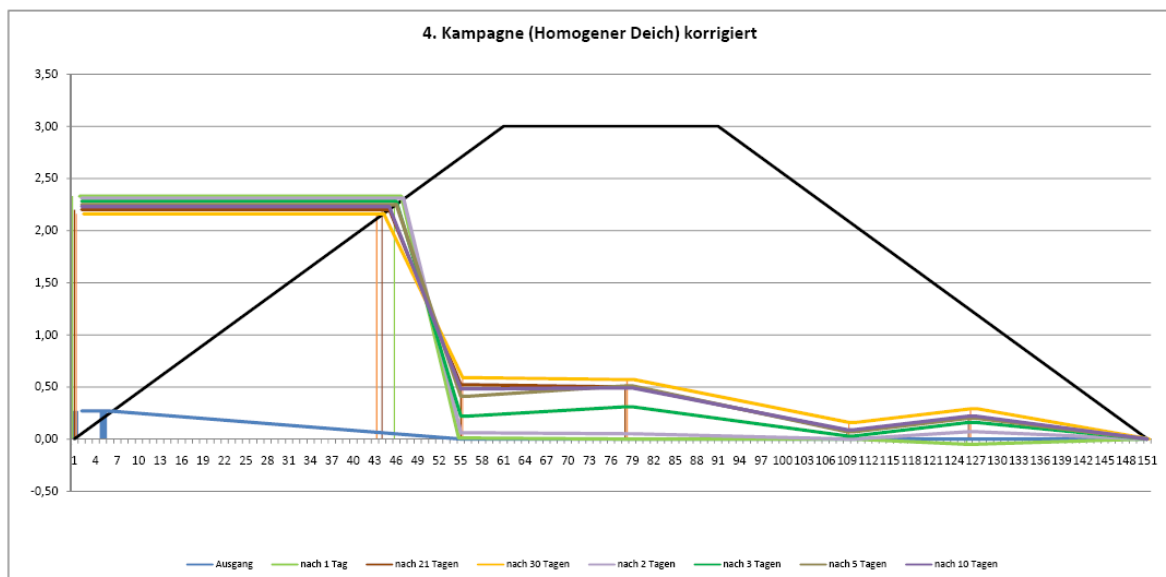


**Abb. 223** : Entwicklung der Sickerlinie des homogenen Deichabschnitts (Var. 0) über die 4. Messkampagne

Die folgende Abbildung stellt ausschließlich die Änderung der Pegelstände im homogenen Deichabschnitt dar. Das heißt, die gemessenen Pegelstände wurden um die ermittelten Ausgangswerte vor Beginn der Messkampagne „bereinigt“. Dargestellt werden nur die Pegelstandsänderungen infolge des Sickerwasseranstiegs.



**Abb. 224** : Änderung des Pegelverlaufs im homogenen Deichabschnitt (Var. 0) über die 4. Messkampagne

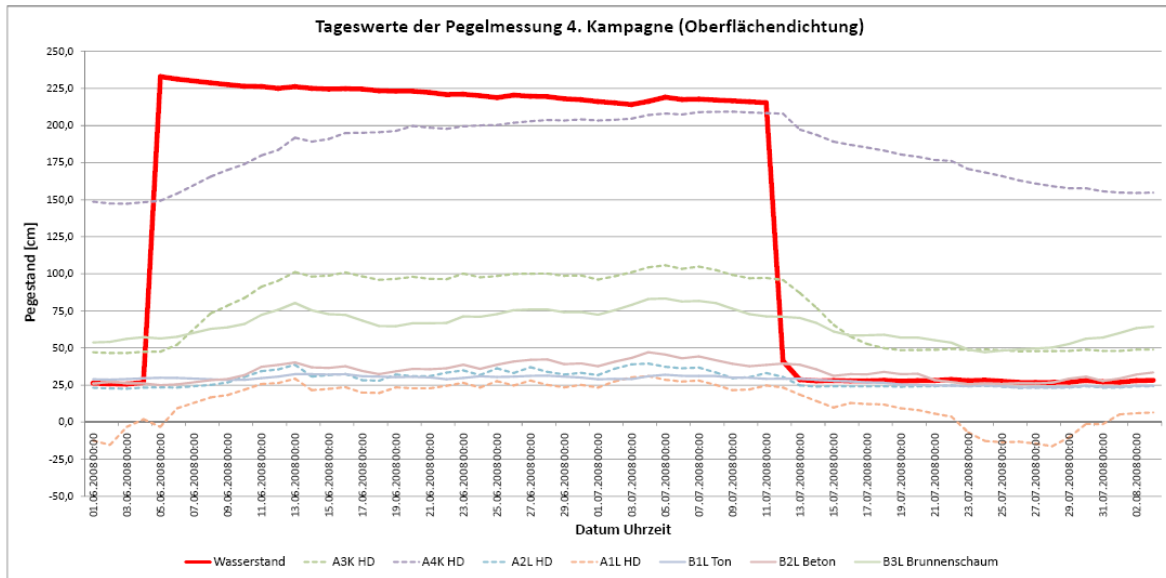


**Abb. 225** : Änderung der Pegelstände im homogenen Deichabschnitt (Var. 0) über die 4. Messkampagne

Die Änderung der Pegelstände mit Berücksichtigung der jeweiligen Ausgangswerte zeigt, dass die landseitigen Pegel wie erwartet deutlich langsamer auf die Wasserstandsänderung reagieren. Allerdings lässt die deutlich größere Pegelstandsänderung des Pegels A1L (rechts außen, landseitig) gegenüber den weiter innen stehenden Pegel A2L auf eine Abdichtung des Geotextils schließen, da sich hier das Sickerwasser aufstaut.

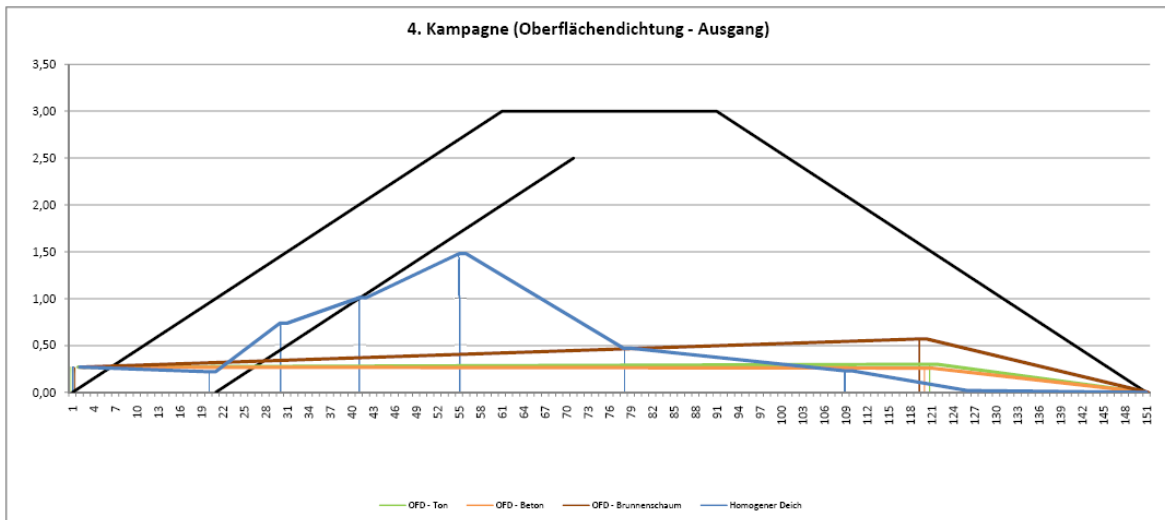
### 8.5.2.2 Sickerwasserentwicklung im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung

Im folgenden Abschnitt werden die Pegelverläufe der verschiedenen Untersuchungsabschnitte der Oberflächendichtung denen des homogenen Abschnitts gegenübergestellt. Dabei wurden aus dem homogenen Bereich nur die Pegel der Deichkrone und der landseitigen Böschung betrachtet, welche im Bereich hinter der Dichtung liegen, also vergleichbar sind.



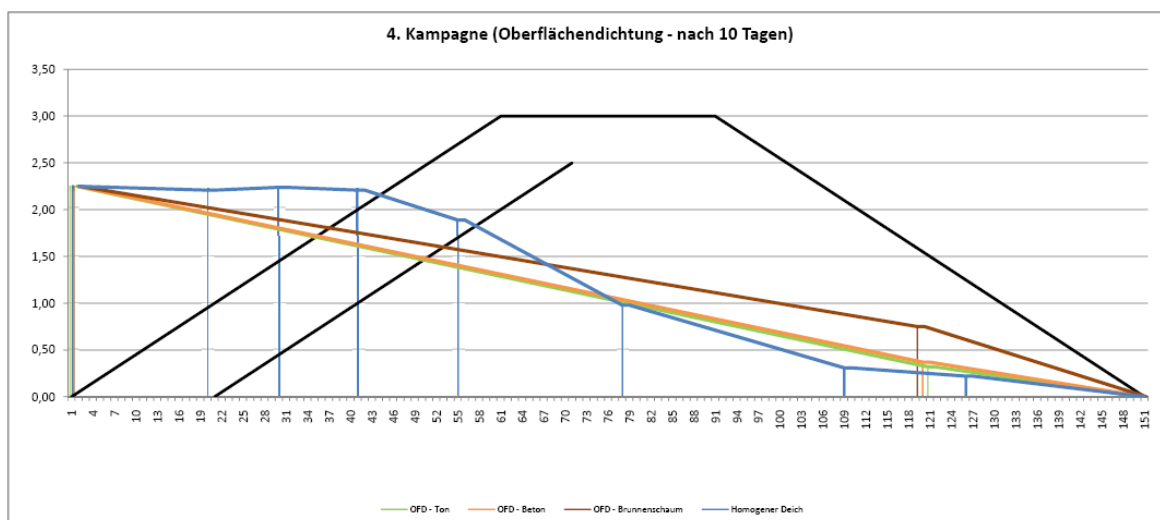
**Abb. 226** : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Oberflächendichtung (Var. 1) über die 4. Messkampagne

Festzustellen ist, dass alle Pegel auf die Veränderung des Wasserstandes im Speicherbecken reagieren. Die Dichtung also nicht zu 100 % funktioniert. Allerdings fallen die Änderungen der Oberflächendichtung mit Ton und Beton deutlich geringer aus als die mit Brunnenschaum. Die Tondichtung weist das beste Ergebnis aus. Die Veränderungen im Pegelstand sind kaum wahrnehmbar und auch niedriger als die Differenzen der Pegel A1L und A2L im vergleichbaren Abstand zum wasserseitigen Böschungsfuß des homogenen Abschnitts.

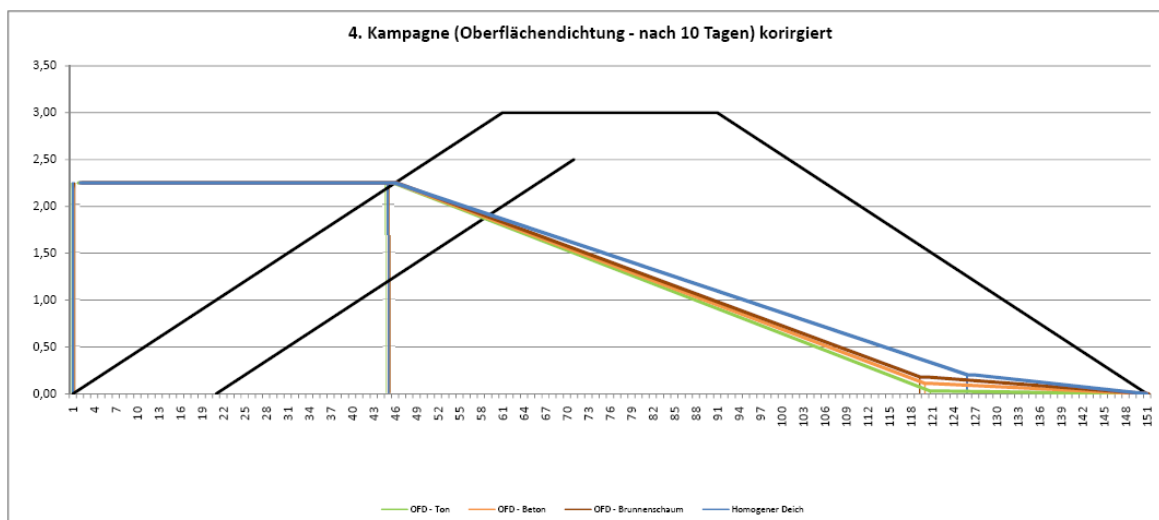


**Abb. 227** : Vergleich der Ausgangspegel der Oberflächendichtung - 4. Messkampagne





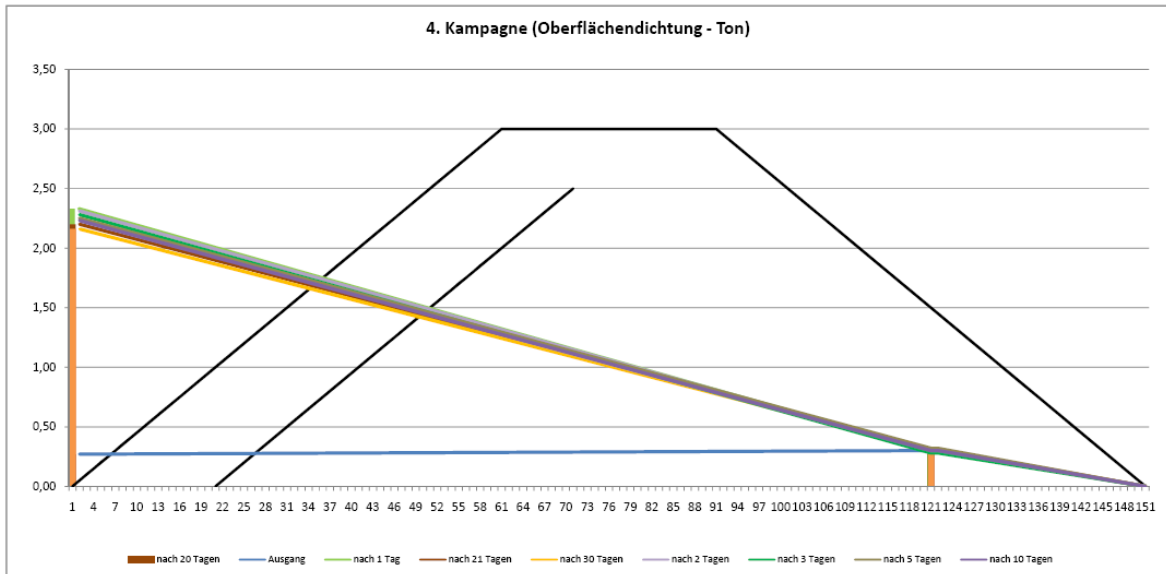
**Abb. 228** : Vergleich der Pegelstände der Oberflächendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne  
Die Ausgangswerte der Oberflächendichtung wie auch die Pegelstände 10 Tage nach dem Volleinstau zeigen höhere Sickerwasserstände als im homogenen Deichkörper auf. Betrachtet man aber ausschließlich die Änderung der Pegelstände unter Berücksichtigung (Subtraktion) der Ausgangswerte und nur des Pegels A1L, welcher ungefähr im gleichen Abstand zum wasserseitigen Böschungsfuß positioniert ist, ergibt sich folgendes Bild.



**Abb. 229** : Vergleich der Pegelstandsänderungen der Oberflächendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne

Die Änderung der Pegelstände hinter der Oberflächendichtung liegt niedriger als die im homogenen Bereich. Allerdings wird dieses Bild durch die zurückgesetzte Positionierung des Pegels A1L im homogenen Abschnitt verfälscht. Zumindest fallen die Pegelstandsänderungen im Bereich der Oberflächendichtung nicht höher als im homogenen Abschnitt aus.

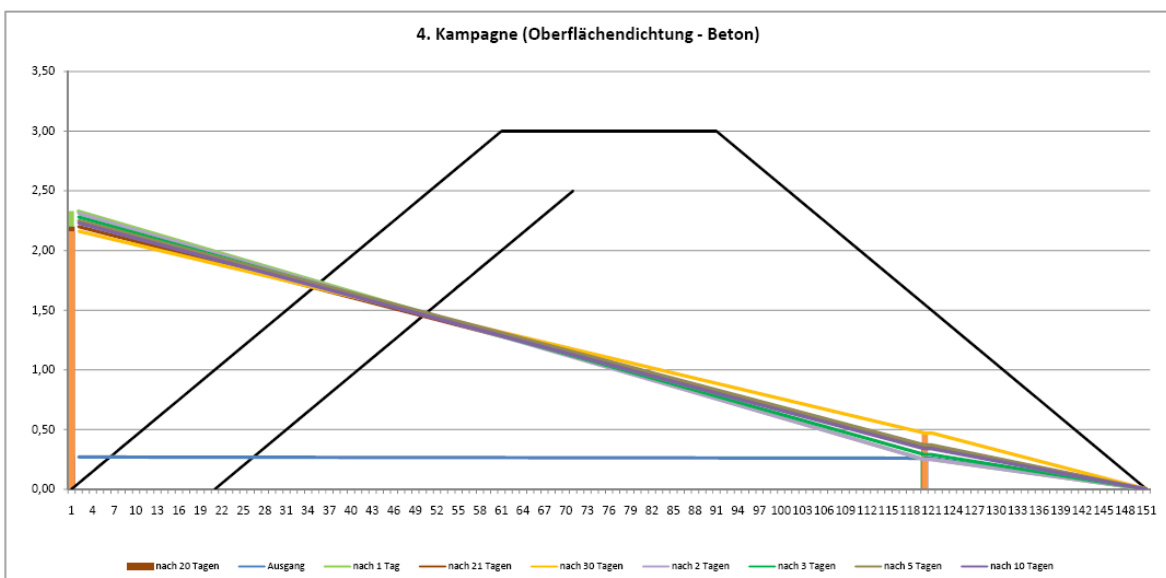
Um die Reaktion des Sickerwasserstandes der einzelnen Untersuchungsabschnitte auf die Wasserstandserhöhung im Speicherbecken zu untersuchen, sollen nachfolgend die Zeitverläufe der Pegelstandsentwicklungen gezeigt werden.



**Abb. 230** : Entwicklung der Pegelstände der Oberflächendichtung mit Ton - 4. Messkampagne

Der Pegel hinter der Oberflächendichtung mit einer Fugendichtung aus gestampften Ton zeigt in dieser 4. Messkampagne fast keine Reaktion. Die Pegelstandsänderung ist minimal. Die Dichtung funktioniert. Der Untersuchungsabschnitt mit dem Fugenverschluss aus Betonmörtel hingegen zeigt einen Anstieg des Pegelstandes hinter der Dichtung. Gleiches gilt für die Fugendichtung aus Brunnenschaum. Hier sind die eingesetzten Dichtungsmaterialien nur bedingt wirksam.

Eine Beeinflussung durch eine seitliche Umströmung der Oberflächendichtung durch Undichtigkeiten in den Tonschotts kann ausgeschlossen werden, da die Pegelstände in den einzelnen Untersuchungsabschnitten unterschiedlich ausfallen.



**Abb. 231** : Entwicklung der Pegelstände der Oberflächendichtung mit Beton - 4. Messkampagne

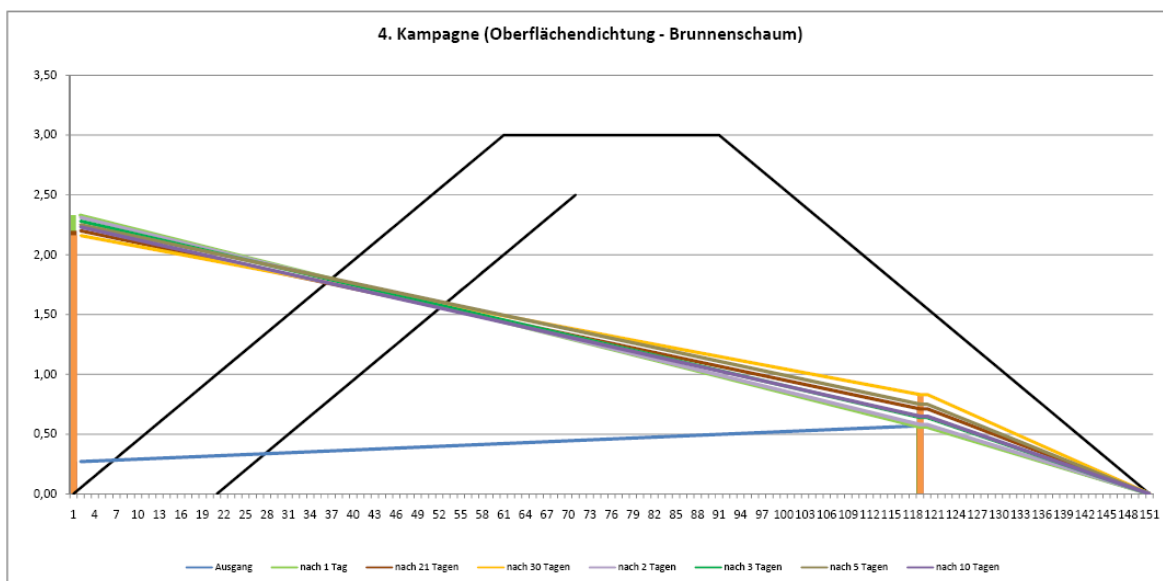


Abb. 232 : Entwicklung der Pegelstände der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum - 4. Messkampagne

### 8.5.2.3 Sickerwasserentwicklung im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung

Der Verlauf der Pegelstände im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung ist nachfolgend abgebildet. Gegenüberstellend wurden auch hier die Werte der vergleichbar positionierten Pegel des homogenen Abschnitts hinzugefügt.

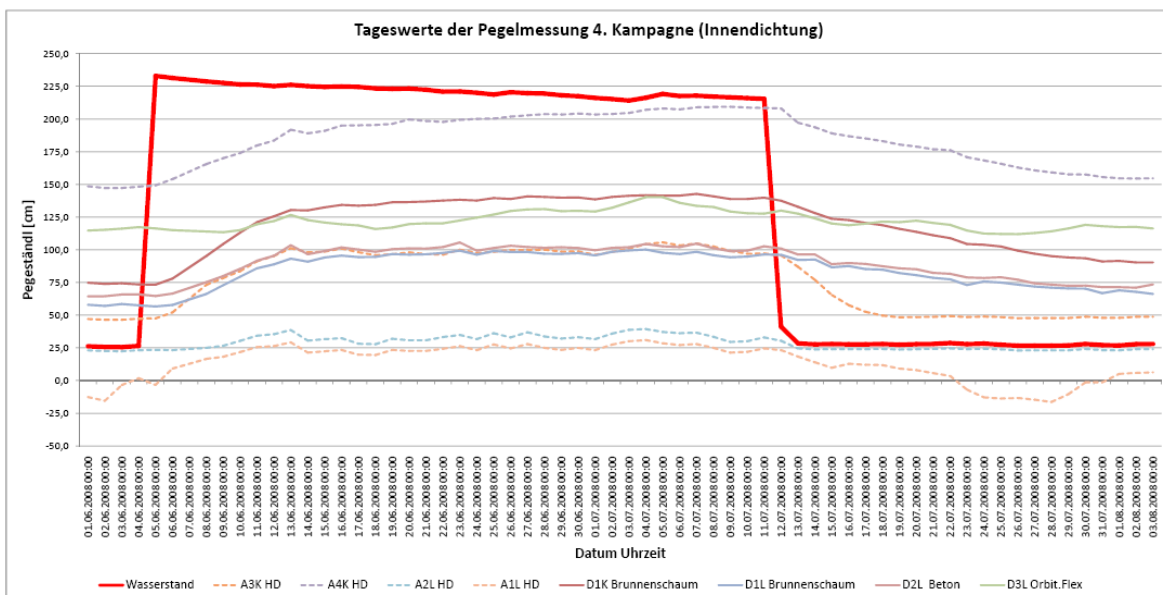


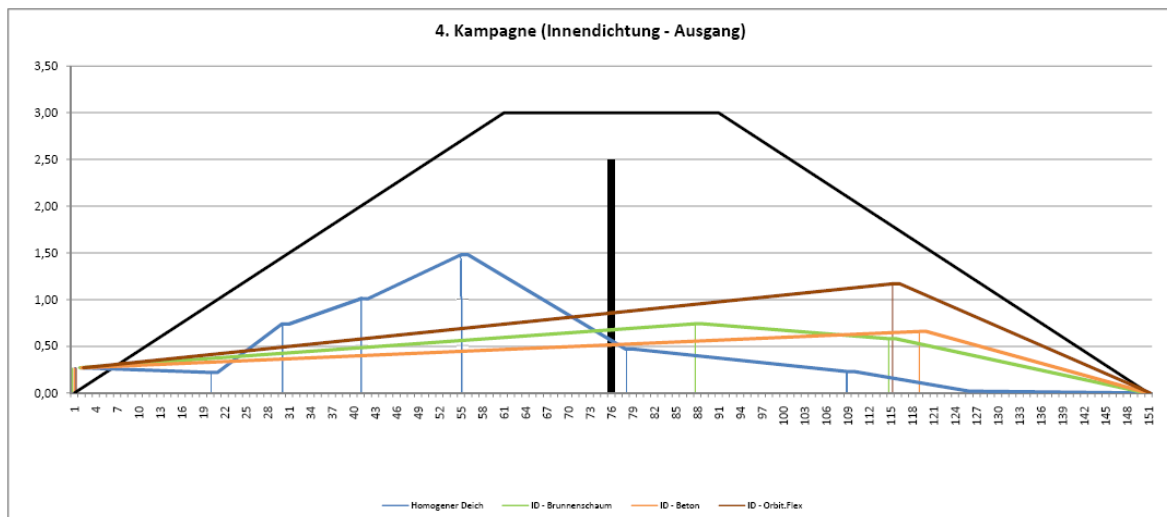
Abb. 233 : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Innendichtung (Var. 2) über die 4. Messkampagne

Der Pegelverlauf der Untersuchungsabschnitte mit einer Fugenabdichtung aus Betonmörtel und mit doppeltgestellten Bauteilen plus Brunnenschaum folgen deutlich den Pegelständen im homogenen Deichabschnitt und somit dem Wasserstand im Speicherbecken. Der Pegelstand hinter der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen liegt zwar schon in seinen Ausgangswerten vor dem Einstau sehr hoch ändert sich aber erst im späteren Verlauf der Messkampagne und dies sehr diffus. Dies deutet auf funktionierende Innendichtung hin. Der spätere Anstieg des Pegelstandes hinter der Dichtung kann

durch Beeinflussung aus dem benachbarten Untersuchungsabschnitt erzeugt sein. Dafür spricht die zeitliche Verzögerung der Änderungen im Pegelstand. Gleichfalls spricht die parallele Entwicklung der Untersuchungsabschnitte mit Brunnenschaum und Betonmörtel bei gleichen Pegelständen auf eine gegenseitige Beeinflussung der Untersuchungsabschnitte. Das heißt, im Bereich der Innendichtung sind die Tonschotts nicht dicht. Die Undichtigkeiten können im Bereich des Anschlusses der Schotts an die Innendichtung liegen.

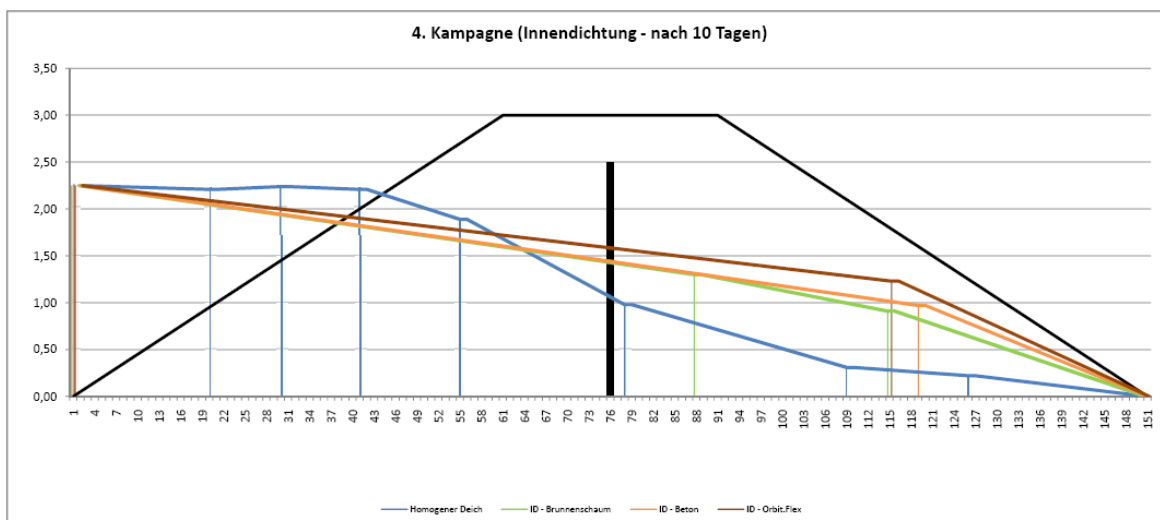
Gleichsam weisen die parallelen Entwicklungen der Pegelverläufe in den Untersuchungsabschnitten mit Betonmörtel und doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum auf eine gleiche Ursache der Undichtigkeit hin. Diese kann im Bereich der Auflager der Betonbauteile liegen. Wie im Abschn. 8.2.2 bereits beschrieben wurde das Streifenfundament zunächst mit einer Aufkantung hergestellt. Der daraus resultierende Spalt auf der Wasserseite des Fundaments wurde bei diesen beiden Varianten nicht gesondert verschlossen. Das Sickerwasser kann so auf dieser Seite zumindest bis unter das RC-Bauteil vordringen. Das Einbringen des Betons auf der Landseite der Innendichtung beim Fertigstellen des Fundaments reichte als Abdichtung nicht aus. Die Ergebnisse der Pegelverlaufsuntersuchungen legen somit eine Unterspülung der RC-Bauteile im Auflagerbereich nahe.

Bei der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen wurden hingegen im Fundamentanschluss der RC-Bauteile wasserseitig Winkelprofile verklebt. Hier steigt der Pegelstand erst später; aufgrund der Beeinflussung durch den benachbarten Untersuchungsabschnitt. Diese RC-Bauteile werden nicht unterspült. Die Dichtung funktioniert.



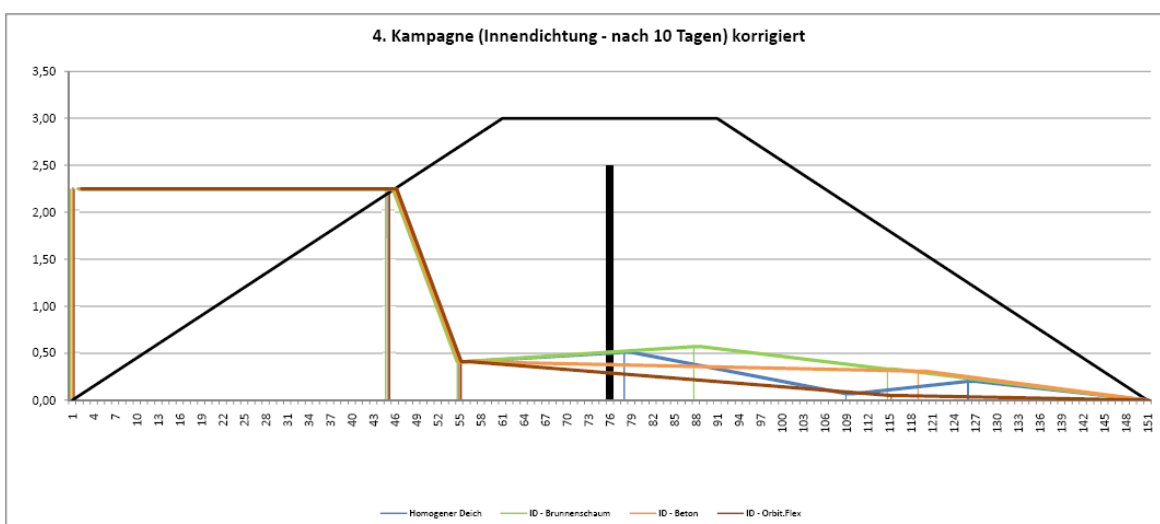
**Abb. 234** : Vergleich der Ausgangspegel der Innendichtung - 4. Messkampagne

Auch die Ausgangswerte der Pegelstände hinter der Innendichtung deuten auf eine Abdichtung der Pegelrohre hin, wodurch das eingesickerte Wasser nur sehr langsam wieder entweichen kann. Trotzdem reagieren die Pegel wie Abb. 235 zeigt auf einen Anstieg des Wasserstandes im Speicherbecken. Nach 10 Tage Volleinstau auf 2,3 m Wasserstand zeigt sich in den Untersuchungsabschnitten mit Innendichtung folgendes Bild:



**Abb. 235** : Vergleich der Pegelstände der Innendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne

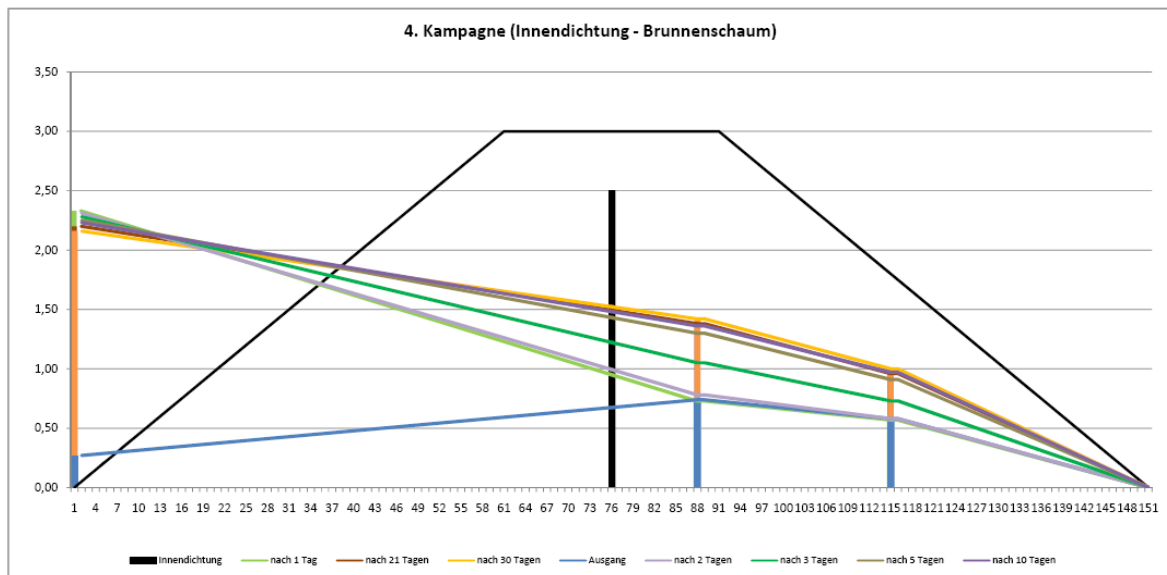
Die Pegelstände hinter der Innendichtung haben sich eindeutig gehoben. Deutlicher wird dies bei der Betrachtung der Pegelstandsänderungen gegenüber den Ausgangswerten.



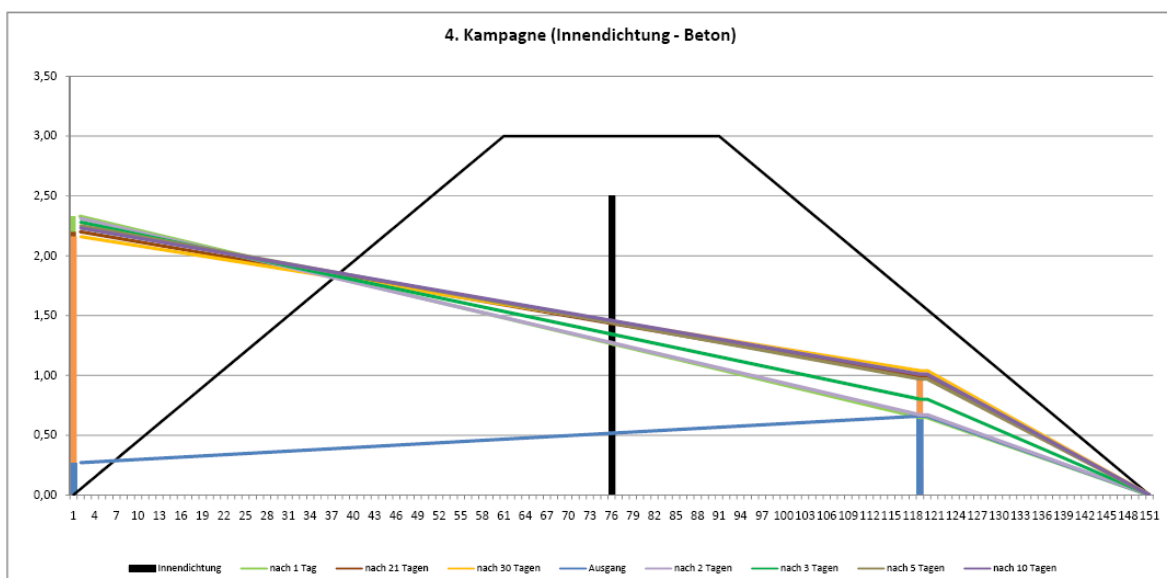
**Abb. 236** : Vergleich der Pegelstandsänderungen der Oberflächendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne

Hier lässt sich klar erkennen, dass die Pegelstände der Innendichtung mit Betonmörtel und mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum noch oben klettern. Der Pegel hinter der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen bleibt jedoch fast gleich dem Ausgangswert und sogar unter den Werten des homogenen Abschnitts. Erst langsam setzt hier eine Anhebung des Sickerwasserstandes durch die Beeinflussung aus dem benachbarten Untersuchungsabschnitt mit ein.

Besser stellt sich dies noch in der Darstellung der Entwicklung der Pegelstandsänderungen der einzelnen Untersuchungsabschnitte dar. Neben den Pegelständen der Untersuchungsabschnitte mit Innendichtung wurden wasserseitig (vor der Dichtung) die Pegelstandsänderungen des homogenen Abschnitts übernommen. Da bis hierhin ausschließlich ein vergleichbarer Erdkörper aus gleichem Erdstoff bei angenommener gleicher Verdichtung vorliegt. Dies sollte die resultierenden Linien der Pegelstandsänderungen realitätsnaher gestalten.



**Abb. 237** : Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit doppelgestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum - 4. Messkampagne

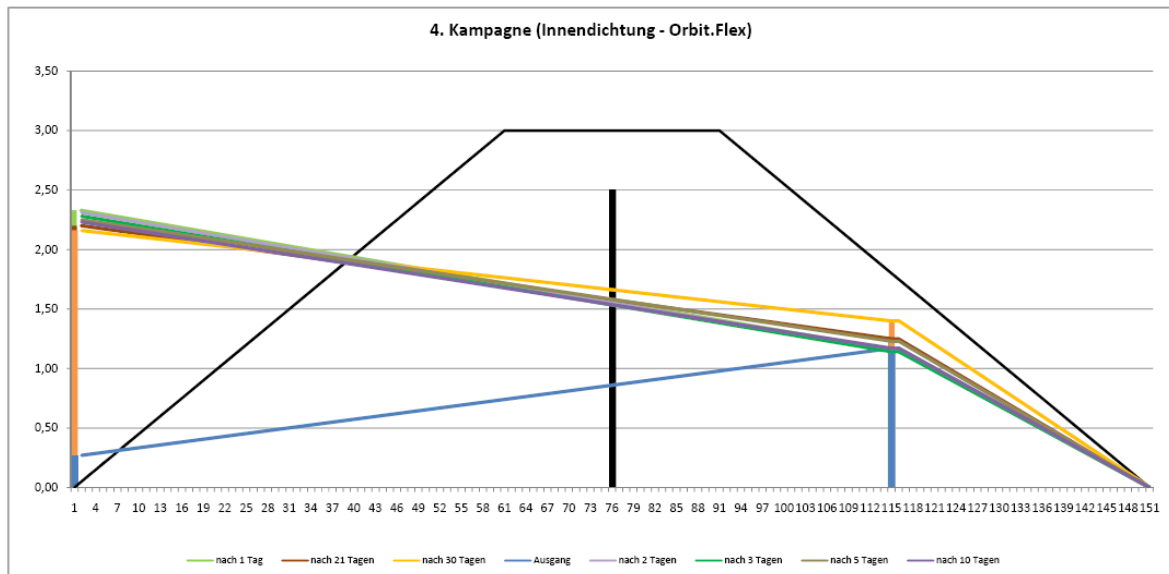


**Abb. 238** : Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit Betonmörtel - 4. Messkampagne

Die Pegel hinter der Innendichtung mit Betonmörtel und doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum steigen nach 2 Tagen rasch an und erreichen bereits nach 5 Tagen fast ihren endgültigen Stand. Beide Veränderungen erfolgen zeitgleich, was darauf schließen lässt, dass beide Dichtungen im gleichen Maße unwirksam sind. Die Einstellung des fast identischen Endpegelstandes deutet auf eine gegenseitige Beeinflussung hin. Die Analysen der Pegelverläufe werden in diesen Darstellungen noch offensichtlicher.

Die Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen zeigt einen markanten Anstieg des Pegels erst nach 5 bis 10 Tagen, wobei hier der Pegelstand stark schwankt. Erst nach 30 Tagen hat sich der Höchststand im Pegelrohr eingestellt. Bei Undichtigkeiten der Innendichtung in diesem Bereich wäre der Wasserstand ähnlich der Entwicklung in den beiden anderen Untersuchungsabschnitten mit Innendichtung nach zwischen dem 3. und 5. Tage kontinuierlich gewachsen.

Auch wäre ähnlich den vorherigen Betrachtungen die Änderung des Pegelstandes größer. Dieser Untersuchungsabschnitt wird durch Undichtigkeiten in den Tonschotts durch den Nachbarabschnitt der Innendichtung mit Betonmörtel beeinflusst. Die Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen ist dicht.



**Abb. 239** : Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen - 4. Messkampagne

### 8.5.3 Untersuchung der aufgetretenen Vernässungszonen

In allen Untersuchungsabschnitten traten auf der landseitigen Böschung oberhalb des Filterprismas Vernässungszonen auf. Diese lassen auf eine horizontale Schichtung des Deichkörpers schließen. Die durchfeuchtete Schicht ist schlechter verdichtet und somit durchlässiger als die darunter liegende. Somit kann bei Volleinstau vermutlich ein Teil des Sickerwassers aus dem höher anstehenden wassernahen Bereich in dieser Schicht bis zur landseitigen Böschung gelangen. Hier verdunstet das Wasser oder fließt langsam über die landseitige Böschung ab. Die auf diesem Weg versickerte Wassermenge dürfte im Verhältnis zur Gesamtsickerwassermenge nur gering gewesen sein.

Eine weitere Erklärung der Vernässungszonen wäre, dass Niederschlagswasser in diese durchlässigere Schicht gesickert und oberhalb des dichten Bereichs landseitig austritt. Dieser Vermutung stehen aber die durchgeführten Infiltrationsmessungen vom 16./17.10.2007 gegenüber, welche auch bei mehrstündigen Versuchen, keine messbaren Versickerungswerte an der Deichkörperoberfläche aufwiesen (Messungen über ½, 2, 4, 15 Stunden). Ein Einfluss der Niederschläge auf die Vernässungszonen kann somit ausgeschlossen werden.

Eine Entwicklung der Vernässung nach dem ersten Volleinstau (1. Messkampagne) stellen die folgenden Abbildungen dar.

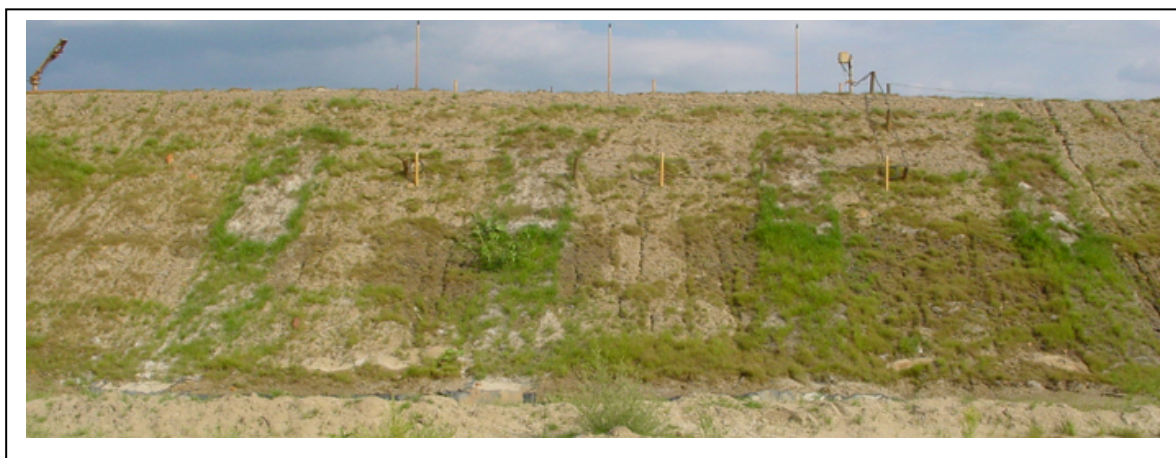


**Abb. 240** : Beginnende Vernässung des homogenen Abschnitts nach 8 Tagen Volleinstau



**Abb. 241** : Fortschreitende Vernässung des homogenen Abschnitts nach 10 Tagen Volleinstau

Die Vernässungszonen im homogenen Deichabschnitt zeigen sich vor allem im Bereich der Tonschotts, aber auch in deren Umgebung. Es kann also auch sein, dass der Ton Sickerwasser aufsaugt und über Kapillarkräfte und die oberflächlich wirkende Verdunstung bzw. des Abflusses dieses an die Dechoberfläche transportiert wird. Im Bereich geringerer Durchlässigkeiten kann dieses Sickerwasser auch wieder an die umgebenden Bodenschichten abgegeben werden, was die Vernässung in der Umgebung der Schotts erklären würde.



**Abb. 242** : Beginnende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Oberflächendichtung nach 8 Tagen Volleinstau





**Abb. 243** : Fortschreitende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Oberflächendichtung nach 23 Tagen Volleinstau

Gleiches zeigt sich auch an den Tonschotts der Oberflächendichtung, wobei hier die Vernässungszonen schneller sichtbar wurden und relativ stabil blieben. Eine zeitliche Entwicklung dieser Vernässungszonen ist daher hier kaum erkennbar.

Ein visueller Bezug der Vernässungszonen im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung zu den Tonschotts ist nicht gegeben. Hier zeigt sich das austretende Sickerwasser deutlich in einem horizontalen Bereich, welcher der 2. und/oder 3. Einbaulage entspricht. Die Vernässung ist zu den darüber und darunter liegenden Schichten deutlich abgegrenzt.



**Abb. 244** : Keine Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Innendichtung nach 8 Tagen Volleinstau



**Abb. 245** : Beginnende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Innendichtung nach 10 Tagen Volleinstau



**Abb. 246** : Fortschreitende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Innendichtung nach 23 Tagen Volleinstau

Zudem zeigt sich, dass die Ausbreitung der Vernässungszonen im homogenen Bereich Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung deutlich schneller von statten geht als im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung. Die landseitige Böschung der Innendichtung zeigte am 8. Tag nach dem Volleinstau der 1. Messkampagne noch keine Oberflächenfeuchte.

Zur Untersuchung der Ausbreitung dieser Vernässungen im Deichinneren wurden während der 5. Messkampagne (nach 37 Tagen Volleinstau) Suchschachtungen innerhalb der Vernässungszonen vorgenommen.



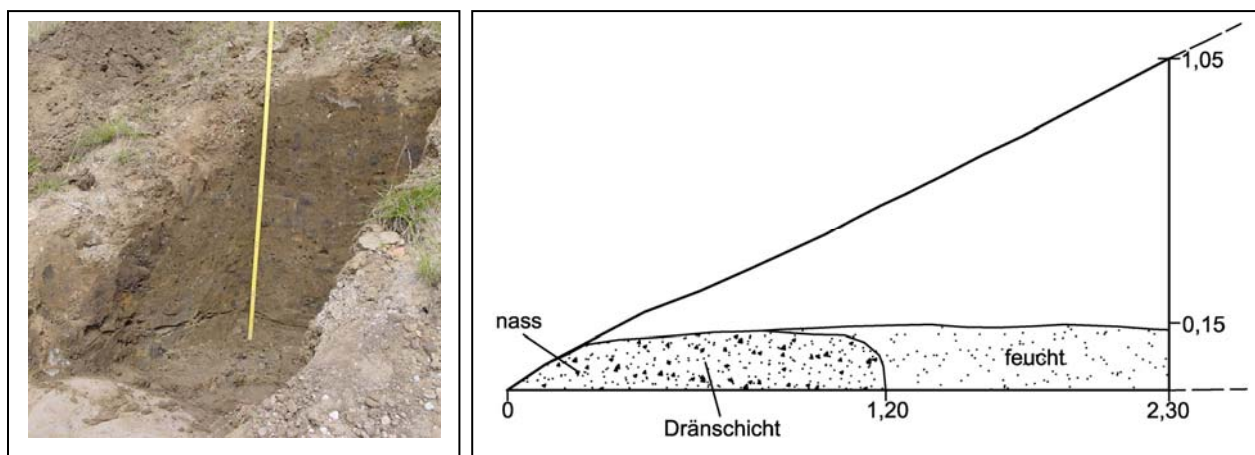
**Abb. 247** : Suchschachtungen im homogenen Bereich und im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung



**Abb. 248** : Suchschachtungen im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung

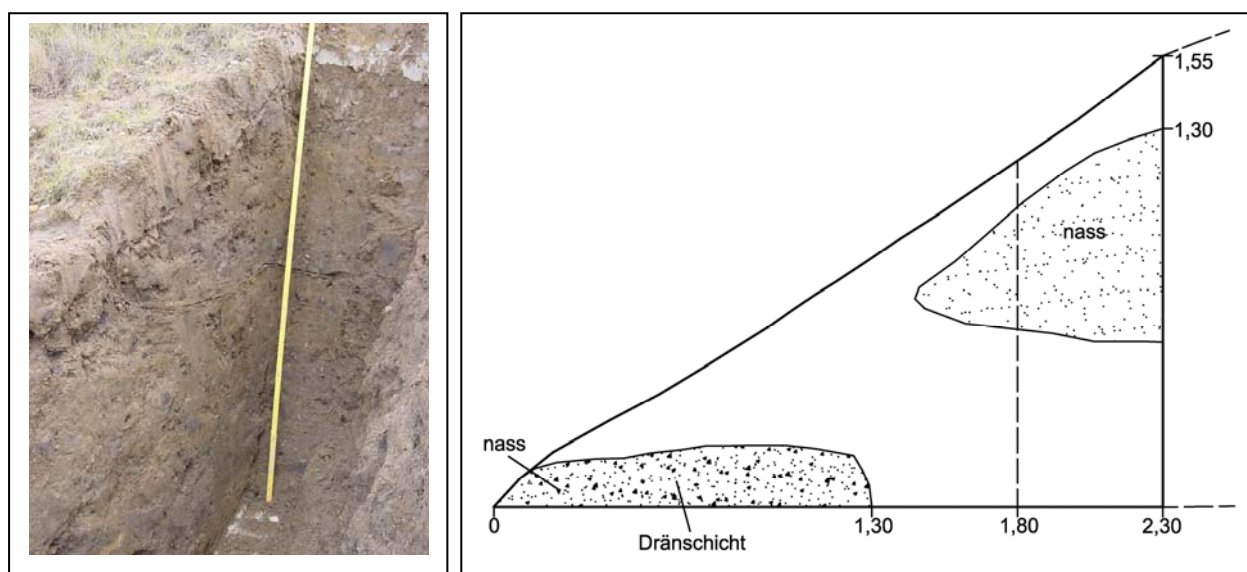
Die Suchschachtungen erfolgten im mittigen Bereich des homogenen Untersuchungsabschnitts, im Bereich der Oberflächendichtung mit Tonverfugung und im Bereich der Innendichtung mit Betonmörtel als Fugenabdichtung. Die Schachtung erfolgte auf Höhe der Tonbasis bis auf eine Böschungshöhe

von 1,0 bis 1,5 m. Nach Fertigstellung der Schachtung wurden die Wände mit einer Maurerkelle begradigt und die nassen Bereiche markiert. Die Untersuchung auf nasse Stellen erfolgte visuell und durch Fühlen mit der Hand.



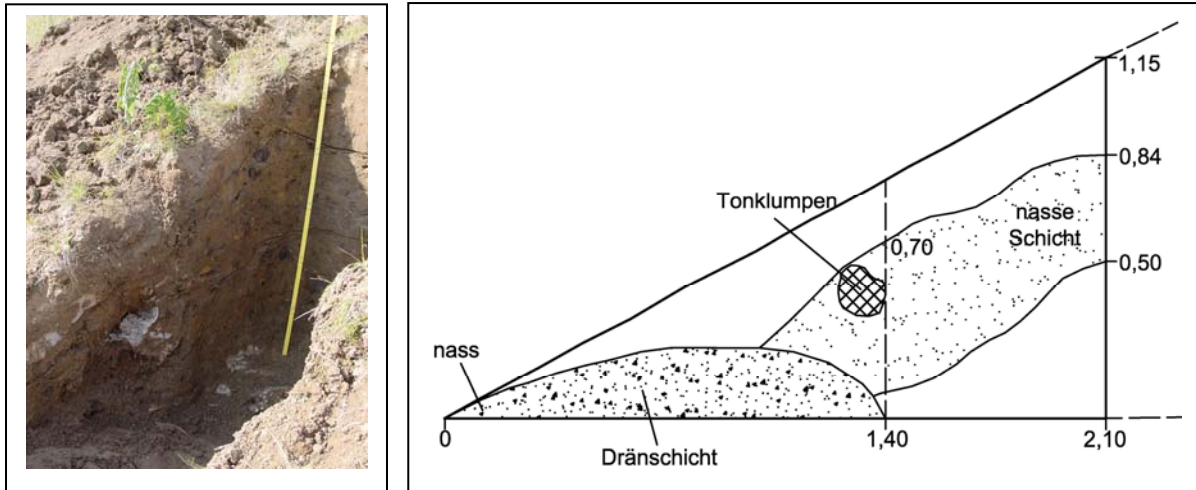
**Abb. 249** : Ergebnis der Suchschachtungen im homogenen Untersuchungsabschnitt

Im homogenen Bereich verliert sich die oberflächige Vernässungszone bei der Schachtung. Ein tieferes Eindringen der Feuchte in den Deichkörper ist nicht zu erkennen. Zu sehen ist hier nur der normal durchsickerte Bereich des Deichquerschnitts über der Tonbasisabdichtung. Der Sickerwasserhorizont liegt im aufgeschichteten Bereich relativ stabil in einer Höhe von ca. 10 cm über der Basisabdichtung und mündet in die Dränschicht (Filterprisma).



**Abb. 250** : Ergebnis der Suchschachtungen im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung

Die Suchschachtung im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung zeigt eine deutliche Vernässungszone ca. 0,8 – 1,3 m oberhalb der Deichbasis. Diese endet somit ca. 0,2 m unterhalb der Böschungsoberfläche. Eine Verbindung zu dieser ist nicht zu erkennen. Offensichtlich ist diese durch die Verdunstung bei vorherigen milden Witterungsverhältnissen unterbrochen. Der Bereich unterhalb dieser Vernässungszone weist normale Erdfeuchte auf. Auch hier besteht keine Verbindung der nassen Schicht mit der Deichbasis. Der Bereich über der Deichbasis ist nicht wie im homogenen Untersuchungsabschnitt durchsickert.



**Abb. 251** : Ergebnis der Suchschachtungen im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung

Auch das Ergebnis der Schachtung im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung zeigt eine deutliche Vernässungszone in 0,5 – 0,9 m über der Deichbasis. Hier besteht ebenfalls keine erkennbare Verbindung dieser nassen Zone zur Deichbasis oder zur Böschungsoberfläche. Allerdings zieht sich die Vernässungszone im Deichfußbereich deutlich zur Dränschicht des Filterprismas. Die Deichbasis zeigt desgleichen keine durchsickerte Schicht wie im homogenen Deichabschnitt.

### 8.5.4 Ergebnisse der ortsaufgelösten faseroptischen Temperaturmessung

Die ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmessung diente in erster Linie der Erfassung von Leckagen in den Fugenbereichen der Oberflächen- und Innendichtung. Das Temperatursensorkabel für die Messung wurde dafür hinter den Fugen der Dichtungen installiert und lieferte über den gesamten Untersuchungszeitraum in 10-minütigen Abständen Temperaturangaben der einzelnen Datenpunkte. Bei einem Sickerwasserzutritt sollte die Temperaturkurve der betroffenen Datenpunkte abhängig der Temperaturdifferenz zwischen Boden und Sickerwasser nach oben oder unten abweichen.

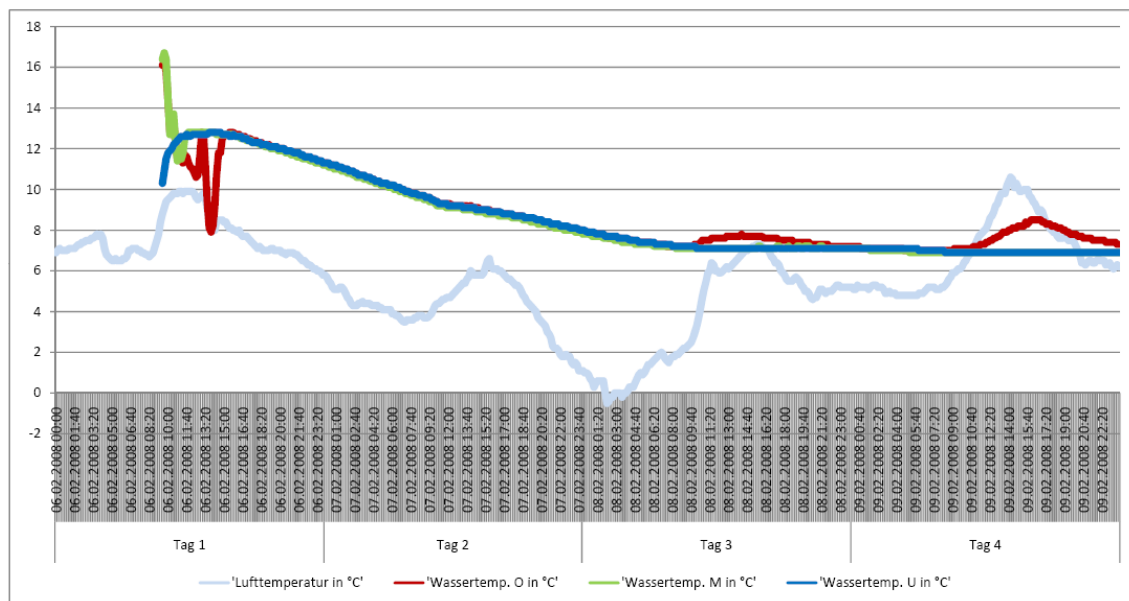
Dafür war parallel zur Bodentemperaturmessung über das Sensorkabel auch eine permanente Erfassung der Wassertemperatur im Speicherbecken erforderlich. Diese wurde über drei Messpunkte (oben, Mitte, unten) im Bereich der Wasserstandsmessung im Speicherbecken gewährleistet. Auch hier erfolgten die Messungen in 10-Minuten-Abständen.

Als problematisch stellten sich hierbei die relativ hohen Wassertemperaturen von zum Teil deutlich über 20°C durch den Einsatz von Brunnenwasser aus Tiefbrunnen heraus. Das Wasser wird hier aus großen Tiefen gefördert und ist somit relativ warm. Dies verringert jedoch vor allem in den Sommermonaten das notwendige Temperaturgefälle, um auch erkennbare Abweichungen in den Temperaturkurven der Datenpunkte des Sensorkabels zu erzielen.

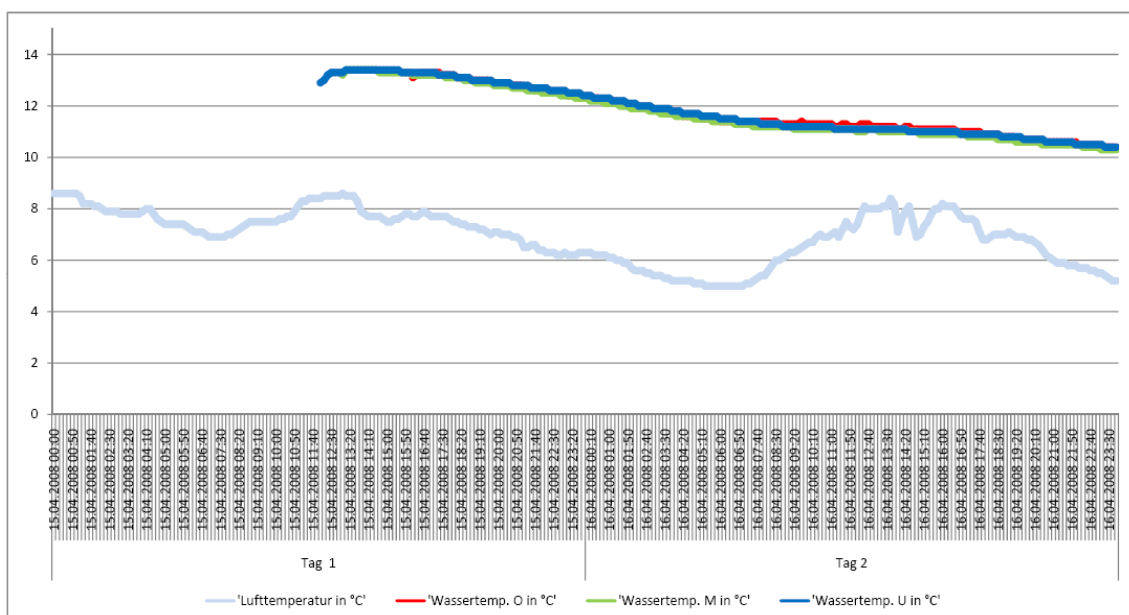
Zudem stellte sich die zur Datenaufzeichnung erforderliche Rechentechnik als sehr temperaturanfällig heraus. Insbesondere an warmen Sonnenscheintagen im Frühjahr und Sommer stiegen die Temperaturen im Messcontainer schnell über 30°C an. Selbst der Einsatz von zwei zeitgleich laufenden Klimageräten im Container brachte keinen positiven Effekt. Bei diesen Temperaturen stieg das Messsystem leider komplett aus und offenbarte nur noch unsinnige Daten im zweistelligen Minusbereich. Die Auf-

zeichnung fehlerfreier Messergebnisse erfolgte zum Teil nur in den Abend-, Nacht- und frühen Morgenstunden. Somit liegen für die 0., 1., 4. und 5. Kampagne nur lückenhafte Messreihen vor, wodurch eine Auswertung deutlich erschwert wurde.

Die 2. und 3. Messkampagne wurde im Februar bzw. April 2008 durchgeführt. Für diese Messkampagnen liegen vollständige Datensätze vor, welche eine Analyse zu Leckagen in den Fugen der eingesetzten Dichtungssysteme ermöglichen. Auch wies das warme Brunnenwasser im Speicherbecken die erforderlichen Temperaturdifferenzen zum kälteren Boden auf. Die Wassertemperatur in der anfänglichen Einstauphase lag jeweils um 13°C und verringerte sich den ersten 2 Tagen auf durchschnittlich 10°C und weitergehend auf 7°C.



**Abb. 252** : Temperaturdaten der Luft und des Wassers der 2. Messkampagne bis zum 4. Tag nach Einstau



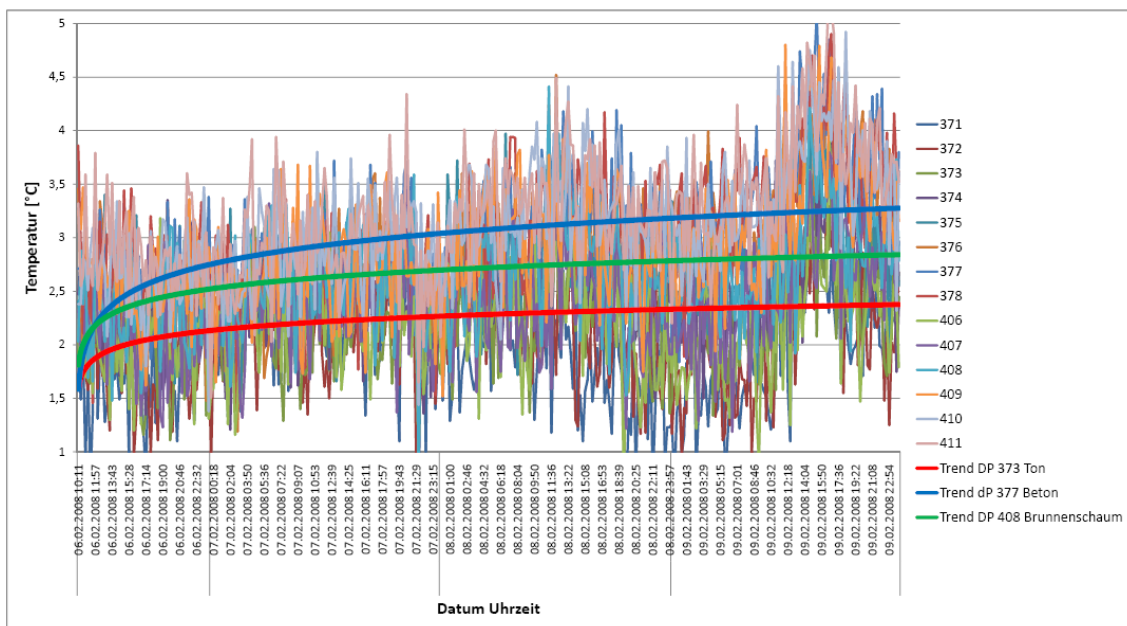
**Abb. 253** : Temperaturdaten der Luft und des Wassers der 3. Messkampagne bis zum 2. Tag nach Einstau

Die Bodentemperaturen im Deichkörper lagen abhängig von der Position im Deichquerschnitt bei 2°C bis 8°C. Durch das Absinken der Wassertemperatur war nach 2 bis 4 Tagen die erforderliche Temperaturdifferenz aufgebraucht. Daher erfolgt die anschließende Betrachtung der Ergebnisse der temperatursensorischen Leakageüberwachung für die 2. Messkampagne über 4 Tage und die der 3. Messkampagne über 2 Tage.

### 8.5.4.1 Leakageermittlung im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung

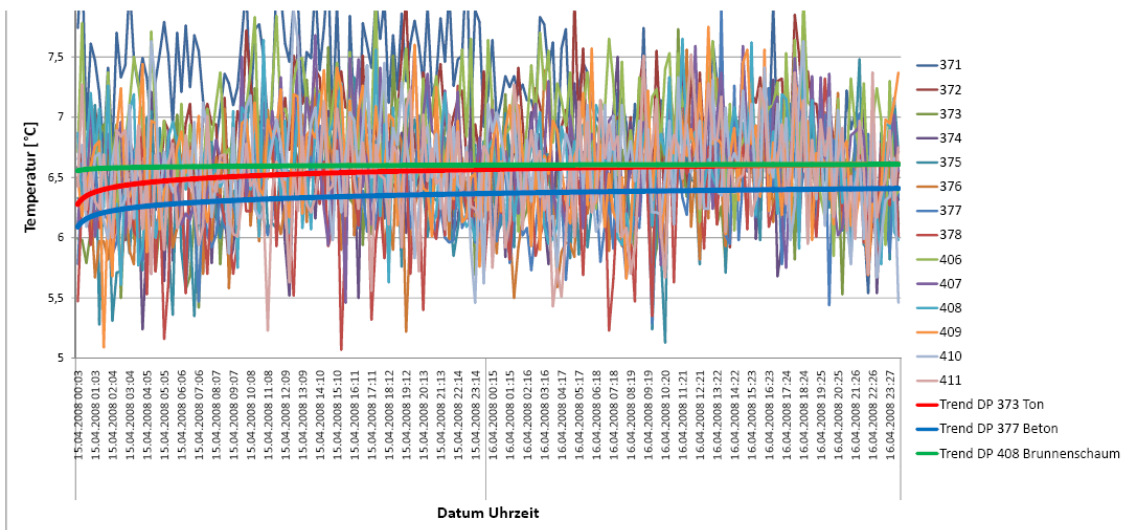
Die Oberflächendichtung ist im Bereich des Deichfußes in die darunterliegende Tonschicht eingebunden. In diesem Bereich konnte das Temperatursensorkabel nicht hinter der Dichtung eingebracht werden. Es liegt somit an der Basis der Oberflächendichtung vor dieser. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Leakageermittlung in diesem Bereich.

Von der Basis der Oberflächendichtung wurden die Temperaturverläufe der Datenpunkte für die 2. und 3. Messkampagne je Untersuchungsabschnitt in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt (Abb. 254 und 255). Je Untersuchungsabschnitt wurde ein Datenpunkt gewählt und dessen Trend in den fett hervorgehobenen Linien aufgezeigt. Dabei stellt die rote Trendlinie den Datenpunkt DP 373 im Untersuchungsbereich mit der Fugendichtung aus Ton dar. Der Trend des Temperaturverlaufs von Datenpunkt DP 377 vor der Fugendichtung aus Betonmörtel ist mit einer blauen Linien aufgeführt und der Trend des Datenpunktes DP 408 vor der Fugendichtung aus Brunnenschaum in der grünen Linie.



**Abb. 254** : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Oberflächendichtung (2. Messkampagne)

In allen drei Untersuchungsabschnitten steigen die Temperaturverläufe tendenziell an. Dieses lässt auf einen Sickerwasserzutritt schließen. Die Datenpunkte liegen vor der Dichtung. Ein Sickerwasserzutritt an diesen Stellen ist erwartet worden. Dieses Ergebnis zeigt aber die Funktionsfähigkeit der faseroptischen Temperaturmesstechnik. Die Ermittlungen der 3. Messkampagne führen zu gleichen Ergebnissen:

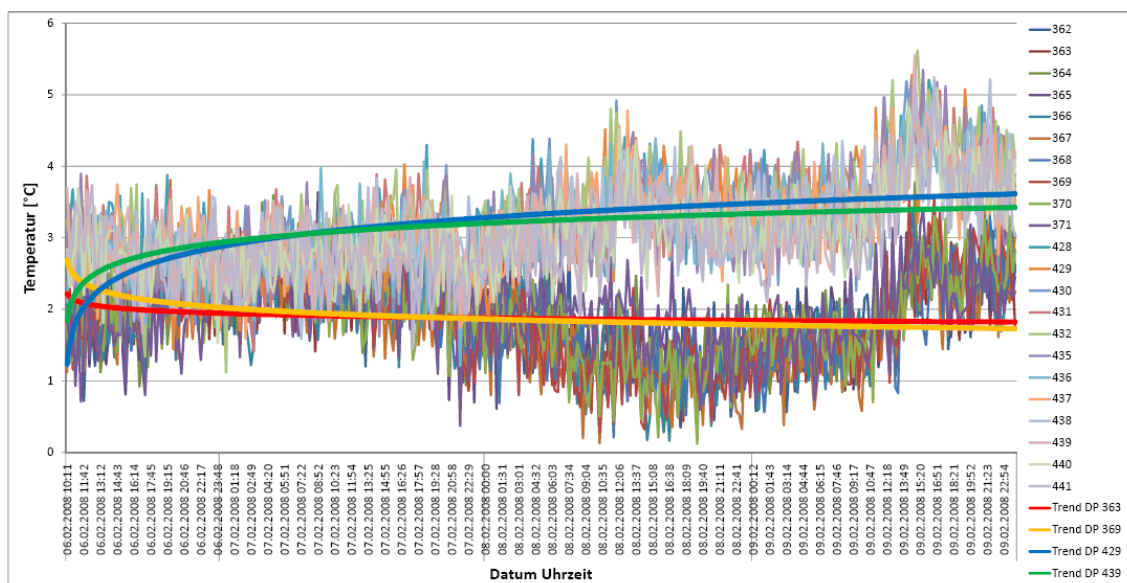


**Abb. 255** : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Oberflächendichtung (3. Messkampagne)

Die Betrachtung der Temperaturverläufe hinter den Fugen der Oberflächendichtung erfolgte über die gesamte Länge der Vertikalfuge als auch der beiden Horizontalfugen oben und unten. Um den Trend der ermittelten Temperaturverläufe besser zu verdeutlichen wurden dieser anhand jeweils einen Datenpunktes aus dem unteren und oberen Bereich der Vertikalfuge (fette orange bzw. rote Linie) und der Horizontalfugen (fette blaue und grüne Linie) dargestellt.

- **Oberflächendichtung mit Ton**

Die Untersuchungen der 2. Messkampagne am Untersuchungsabschnitt der Oberflächendichtung mit einem Fugenverschluss aus gestampften Ton zeigten dabei folgendes Bild:



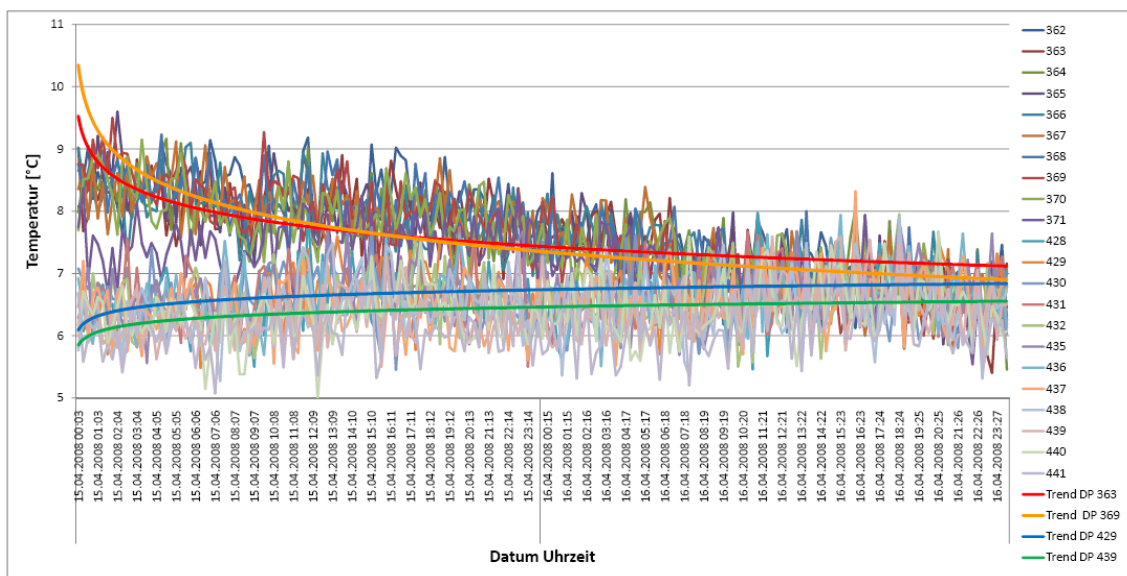
**Abb. 256** : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Ton (2. Messkampagne)

Hinter der Vertikalfuge verringert sich die Temperatur zunächst und folgt somit tendenziell den vorherrschenden Lufttemperaturen. Deutlich zeigen sich hingegen die Temperatursteigerungen im Be-

reich hinter den Horizontalfugen. Diese sind auf den Zutritt wärmeren Sickerwassers zurückzuführen. Das heißt, die Horizontalfugen im Bereich der Oberflächendichtung mit Ton sind beide nicht wirksam.

Im Verlaufe des Tages 4 nach dem Einstau gleichen sich die Temperaturverläufe der vertikalen und horizontalen Fugen wieder an. Die Temperaturunterschiede zwischen dem Erdstoff des Deichkörpers und des Sickerwassers gleichen sich aus.

Die unterschiedlichen Temperaturentwicklungen hinter der Vertikal- und den Horizontalfugen zeigen sich in der 3. Messkampagne noch deutlicher. Die Lufttemperaturen sinken ab. Damit fallen auch die Temperaturen hinter der Vertikalfuge. Der Trend hinter den Horizontalfugen weist aber leicht nach oben. Dies deutet auf einen Sickerwasserzutritt hin. Die Horizontalfugen sind nicht dicht.

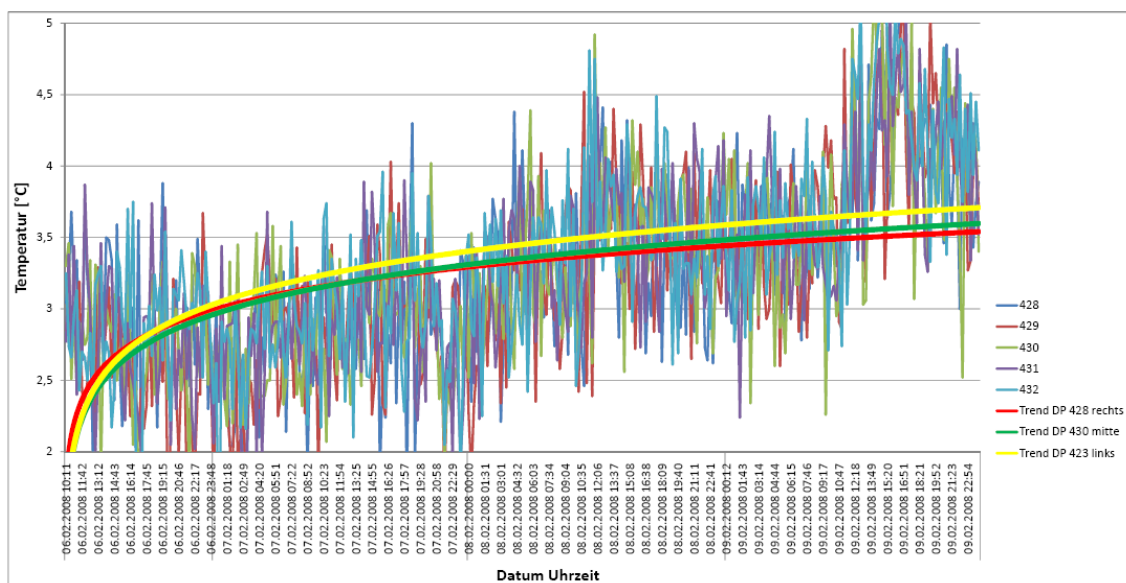


**Abb. 257** : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Ton (3. Messkampagne)

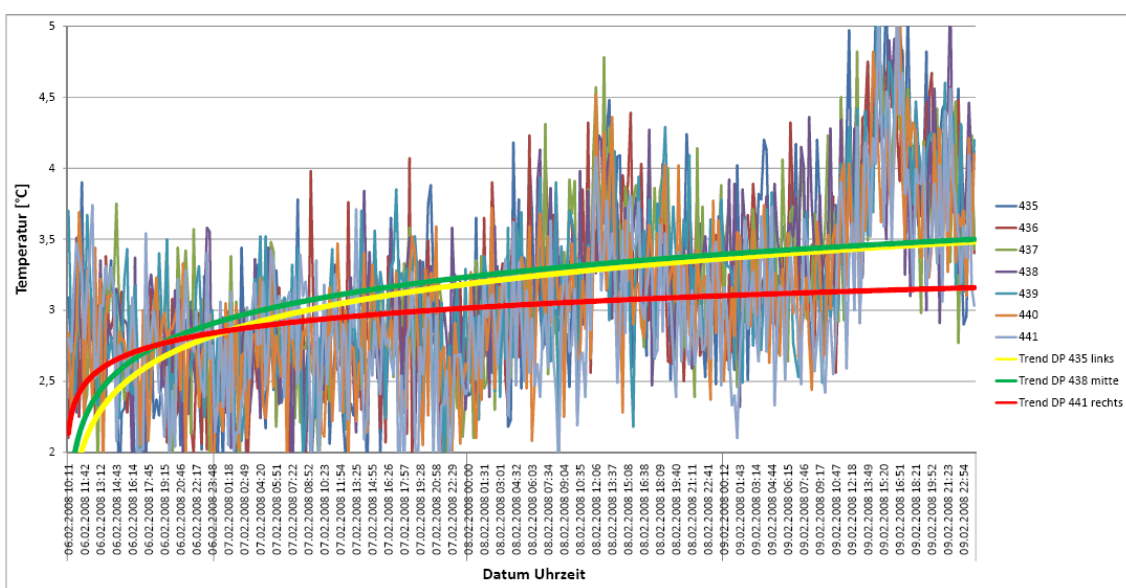
Die Undichtigkeiten der horizontalen Tonfugen können ihre Ursache in der Verdichtung der eingebrachten Tonmasse haben. Im Bereich der Vertikalfuge war ein sauberes Verdichten mit einem Handstampfer möglich. Die Einzelschläge konnten gezielt von oben nach unten geführt werden. Im Bereich der Horizontalfugen vor allem im Anschluss an die obere Bauteilkante mussten die Schläge schräg geführt werden, um den Ton bis an die Kante zu pressen. Die Verdichtungsarbeit war somit deutlich unsauberer und das Sickerwasser konnte über diese Schwachstelle hinter die Oberflächendichtung sickern.

Andererseits kann auch Sickerwasser über die Horizontalfuge im Bereich des Anschlusses zwischen den RC-Bauteile und Tonschott aus dem benachbarten Untersuchungsabschnitt übergetreten sein, so dieser Undichtigkeiten aufweist (s. nachfolgender Unterpunkt). In diesem Fall müssten die Temperaturverläufe hinter den Horizontalfugen zum benachbarten Abschnitt einen ansteigenden Trend aufweisen die Datenpunkte auf der gegenüberliegenden Seite jedoch dem abfallenden Trend der Vertikalfuge folgen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die ermittelten Trends auf. Die Bereiche nahe dem Nachbarabschnitt mit Betonmörtel sind mit einer fetten roten Trendlinie dargestellt, der mittlere Bereich mit einer grünen und der gegenüberliegende mit einer gelben.





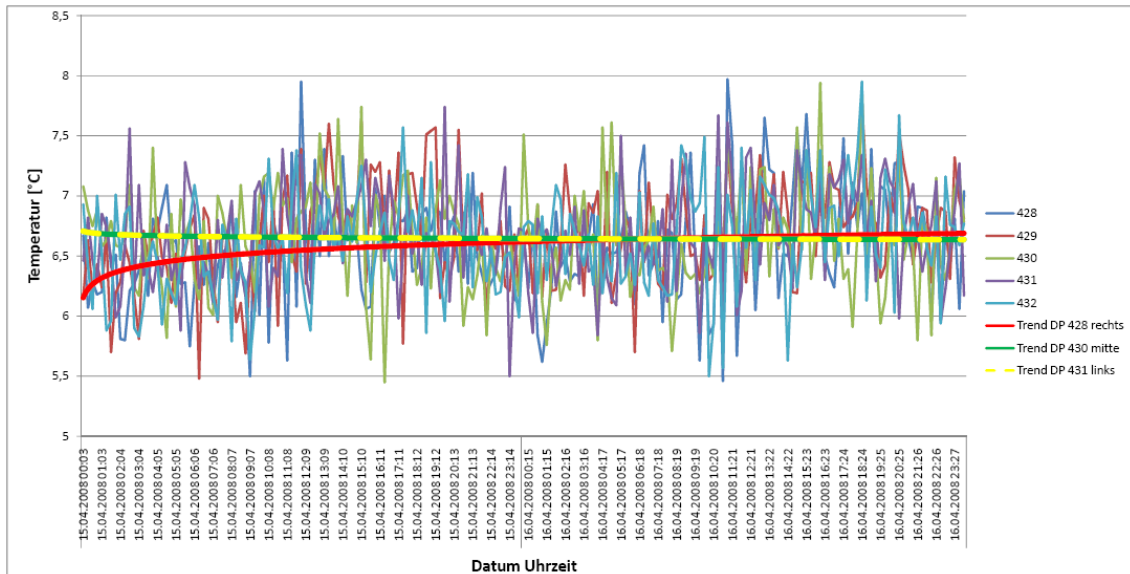
**Abb. 258** : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (2. Messkampagne)



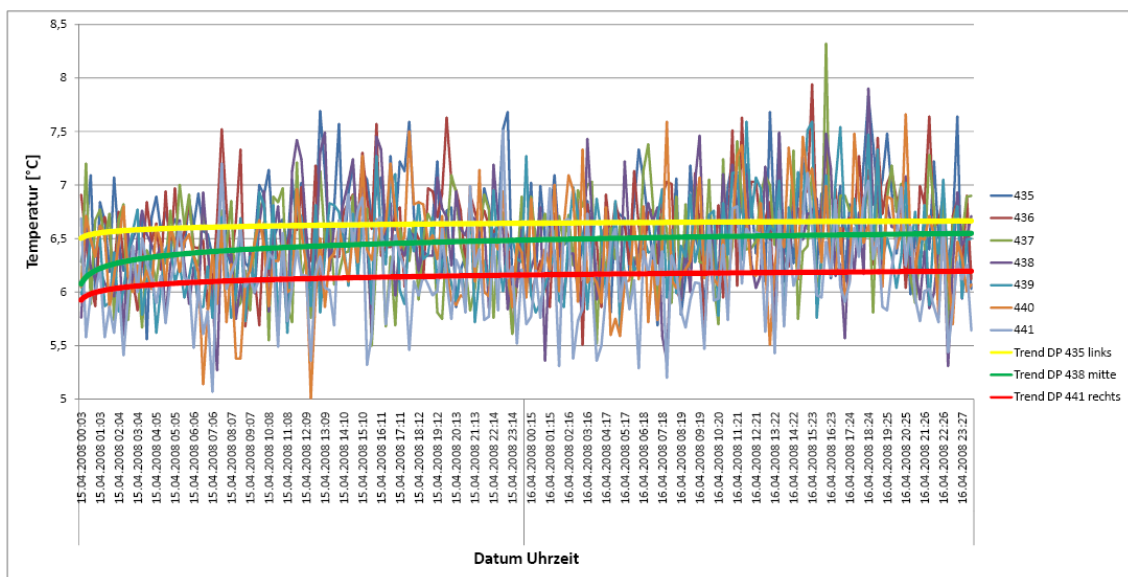
**Abb. 259** : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (2. Messkampagne)

Alle in der 2. Messkampagne untersuchten Datenpunkte der Horizontalfugen der Oberflächendichtung mit Ton weisen einen deutlichen Temperaturanstieg auf. Dieser ist unabhängig der Seite und somit auch nicht durch den benachbarten Untersuchungsabschnitt beeinflusst.

Ein ähnliches Bild zeigt ein Vergleich der Ergebnisse der oberen Horizontalfuge der 3. Messkampagne. Die untere Horizontalfuge weist hingegen im mittleren und gegenüberliegenden Bereich einen fast konstanten Trend auf. Allerdings sind in der 3. Messkampagne die Temperaturunterschiede zwischen Sickerwasser und Boden deutlich geringer als in der 2. Kampagne und der Trend der Temperaturentwicklung in der Vertikalfuge weist viel deutlicher nach unten. Somit kann auch hier eine Beeinflussung durch den benachbarten Untersuchungsabschnitt ausgeschlossen werden.



**Abb. 260** : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (3. Messkampagne)

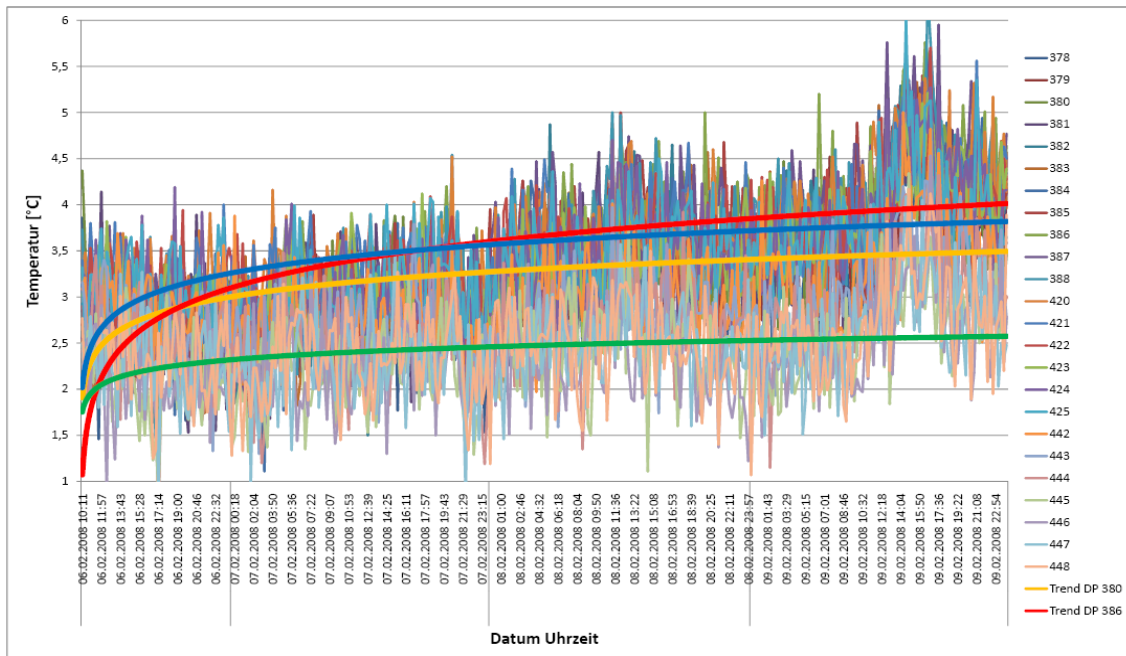


**Abb. 261** : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (3. Messkampagne)

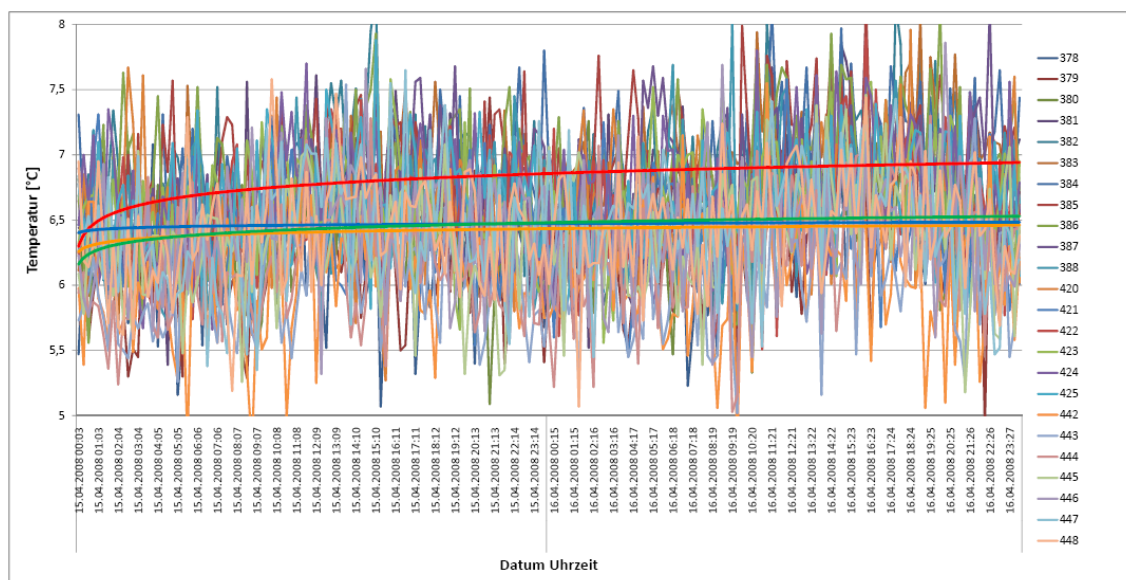
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Vertikalfugen der Oberflächendichtung mit Ton dicht sind. Für die Horizontalfugen muss eine bessere Möglichkeit der Verdichtungsarbeit gefunden werden, um hier auch den Anschlussbereich der waagerechten Tonfuge zum darüber liegenden Bauteil schadstellenfrei abzudichten.

- **Oberflächendichtung mit Betonmörtel**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Temperaturverläufen und der Trends ausgewählter Datenpunkte hinter den Fugen der Oberflächendichtung mit einem XYPEX-Betonmörtel zeigen in der 2. und 3. Messkampagne folgendes Bild:



**Abb. 262** : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne)



**Abb. 263** : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne)

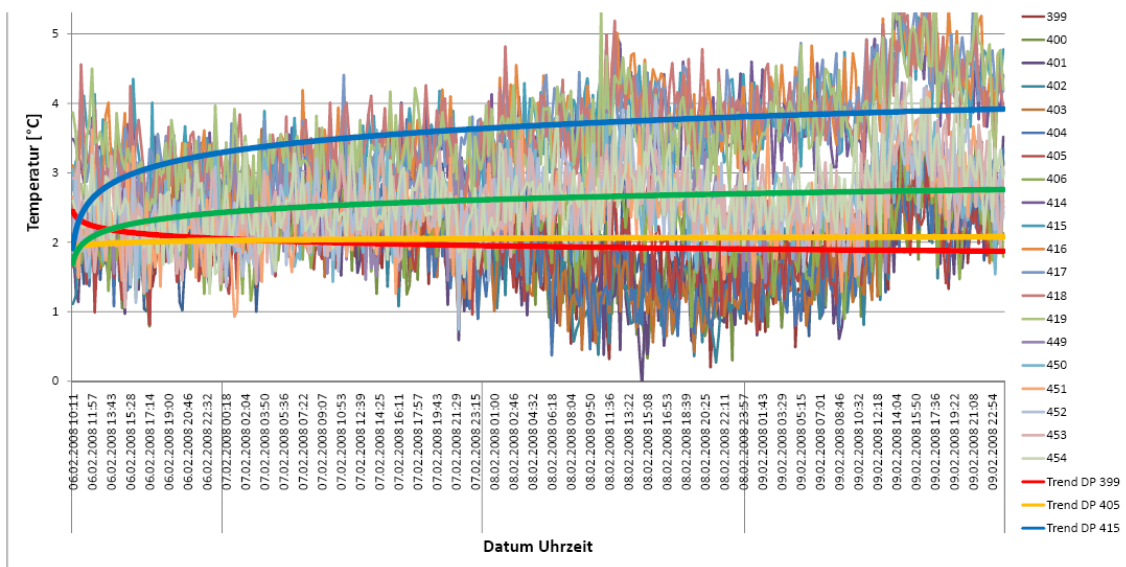
Hinter jeder Fuge steigen die Temperaturen tendenziell an. Dies deutet auf einen Sickerwasserzutritt durch alle Bereich der vertikalen als auch horizontalen Fugen hin. Der Fugenverschluss mit Betonmörtel ist nicht wirksam.

Problematisch ist hier der Anschlussbereich des frischen Betonmörtels an das RC-Betonbauteil. In diesem Bereich muss eine Verzahnung des alten mit dem neuen Beton erfolgen. Dies ist trotz Vor-

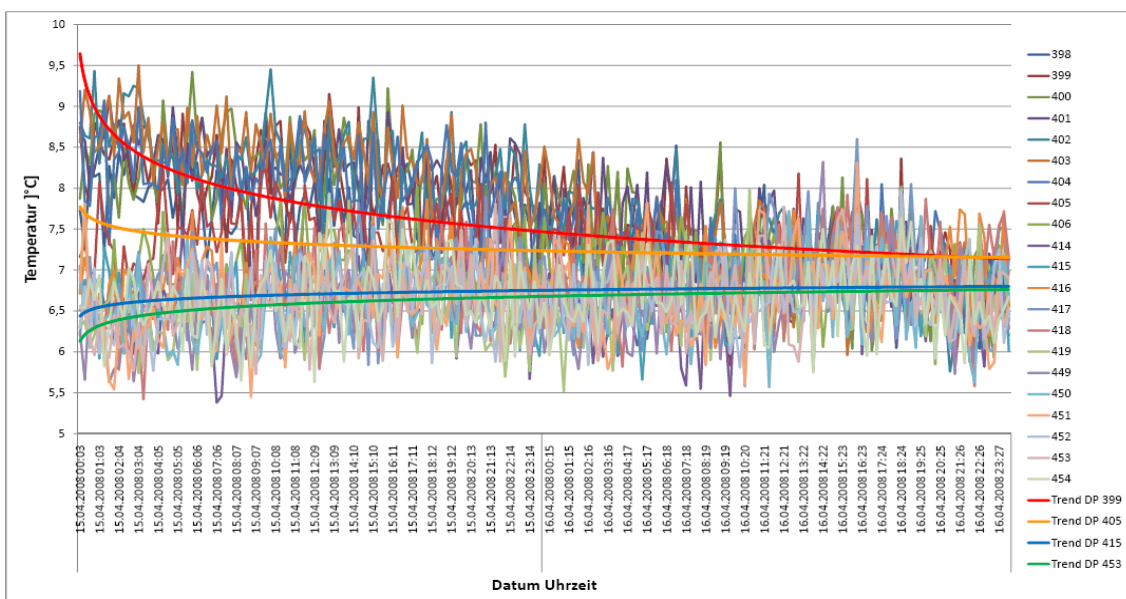
nässen der RC-Bauteiloberflächen und dem Einsatz von XYPEX zum nachträglichen Rissverschluss durch Auskristallisation bei Wasserzutritt nicht gelungen. Bei einem Einsatz von Betonmörtel als Fugendichtungsmaterial muss also trotzdem der Anschlussbereich zwischen Mörtel und RC-Bauteil beispielsweise mit einem zusätzlichen Quellband versehen werden.

- **Oberflächendichtung mit Brunnenschaum**

In den nachfolgenden Diagrammen der Abb. 264 und 265 werden die Temperaturverläufe der Datenpunkte sowie die Trends ausgewählter Datenpunkte der Vertikal- und Horizontalfugen innerhalb des Untersuchungsabschnitts der Oberflächendichtung mit einer Fugenabdichtung aus Brunnenschaum der Messkampagnen 2 und 3 dargestellt.

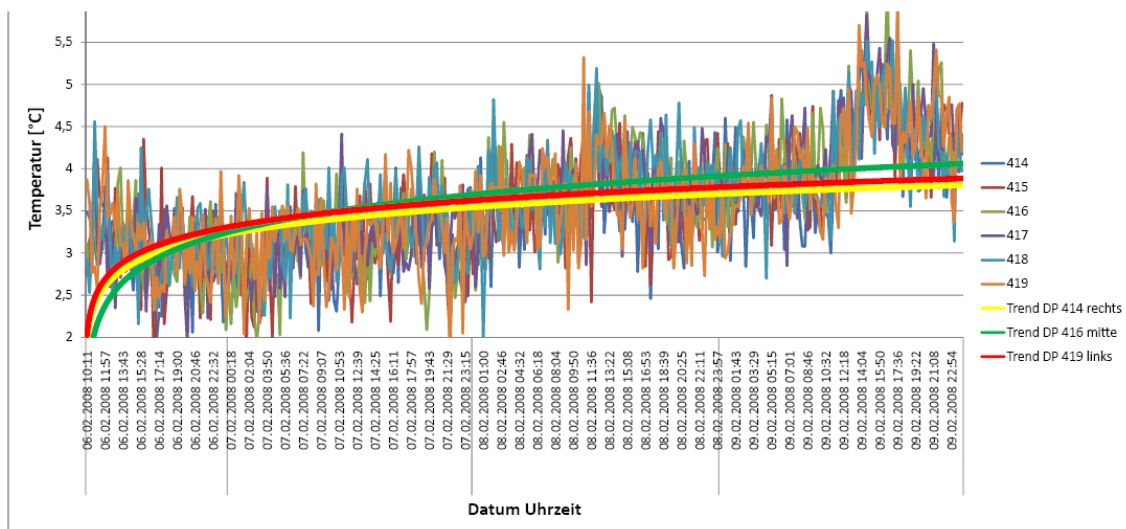


**Abb. 264** : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (2. Messkampagne)

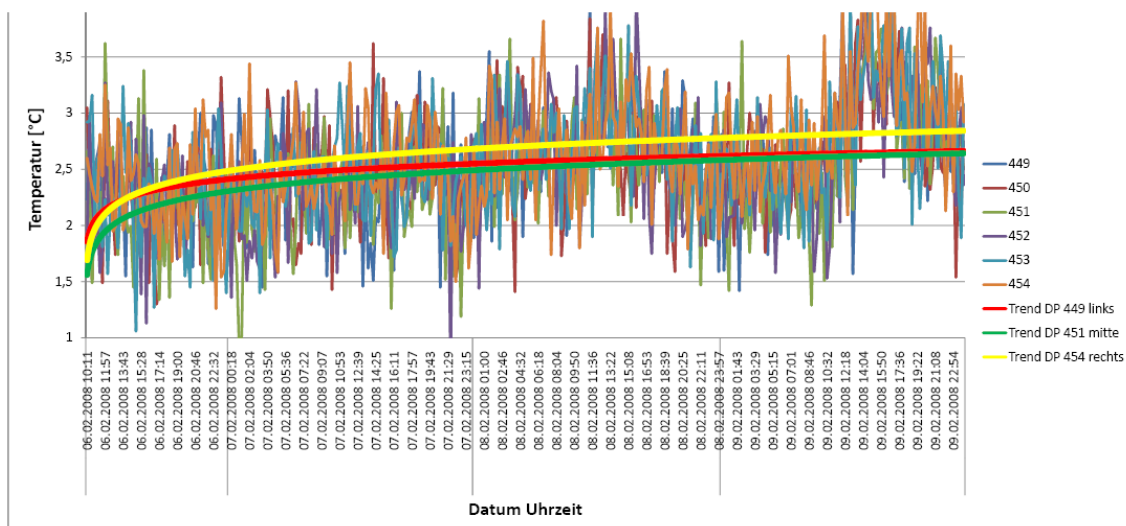


**Abb. 265** : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (3. Messkampagne)

Wie schon bei der Oberflächendichtung mit Tonverfugen zeigen auch die Fugen mit Brunnenschaumabdichtung einen tendenziellen Temperaturanstieg im Bereich der Horizontalfugen. Die Vertikalfuge hingegen zeigt einen stagnierenden oder absinkenden Trend. Diese ist somit nicht vom Zutritt wärmeren Sickerwassers beeinflusst. Wie auch schon bei der Oberflächendichtung mit Ton muss zunächst ein möglicher Einfluss aus dem Untersuchungsbereich mit Betonmörtel ausgeschlossen werden, welcher aus einem Sickerwasserübertritt über die Horizontalfugen im Anschluss der Tonschotts auftreten kann. Dafür werden beide Seiten der Horizontalfugen miteinander verglichen. Die Trendlinie des Datenpunktes am betreffenden Tonschott ist rot dargestellt, die des auf der gegenüberliegenden Seite befindlichen gelb und die Trendlinie des mittleren Datenpunktes grün. Für die Messkampagne 2 ergeben sich daraus folgende Ergebnisse:



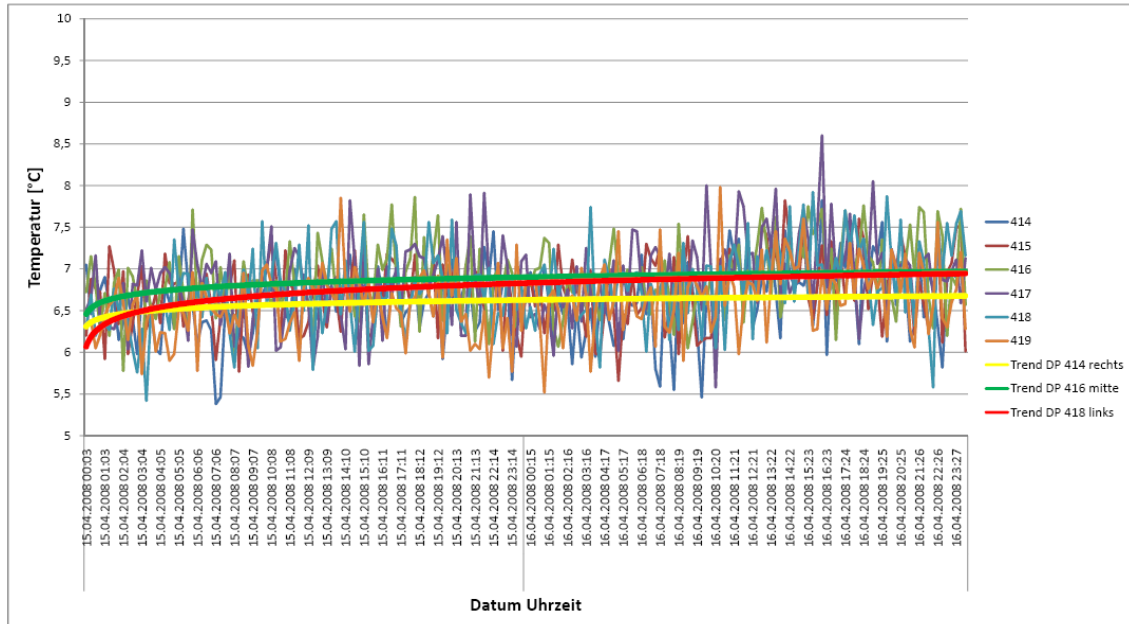
**Abb. 266** : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (2. Messkampagne)



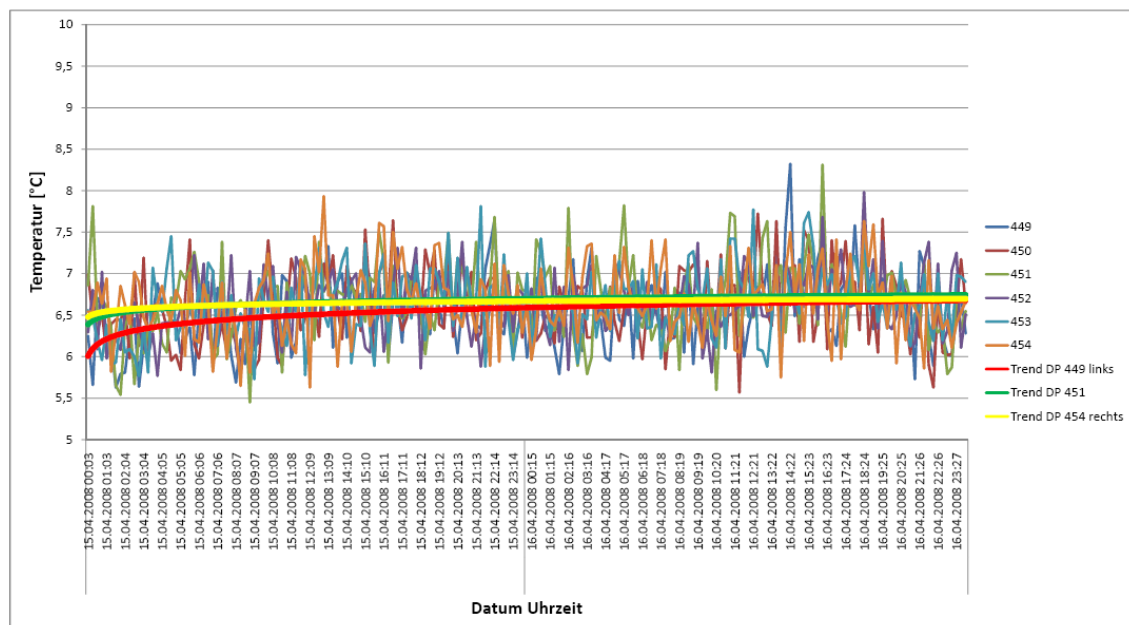
**Abb. 267** : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (2. Messkampagne)

Der ansteigende Trend der Temperaturentwicklung hinter der Horizontalfuge ist über die gesamte Fugenlänge der oberen als auch unteren Fuge gegeben. Somit tritt Sickerwasser über die ganze Ab-

schnittsbreite durch die waagerechten Fugen. Ein Sickerwasserübertritt aus dem benachbarten Untersuchungsabschnitt kann somit ausgeschlossen werden. Die Tonschotts sind dicht, die Horizontalfugen mit Brunnenschaumdichtung nicht. Dies wird durch die Untersuchungsergebnisse der Messkampagne 3 bestätigt.



**Abb. 268** : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (3. Messkampagne)



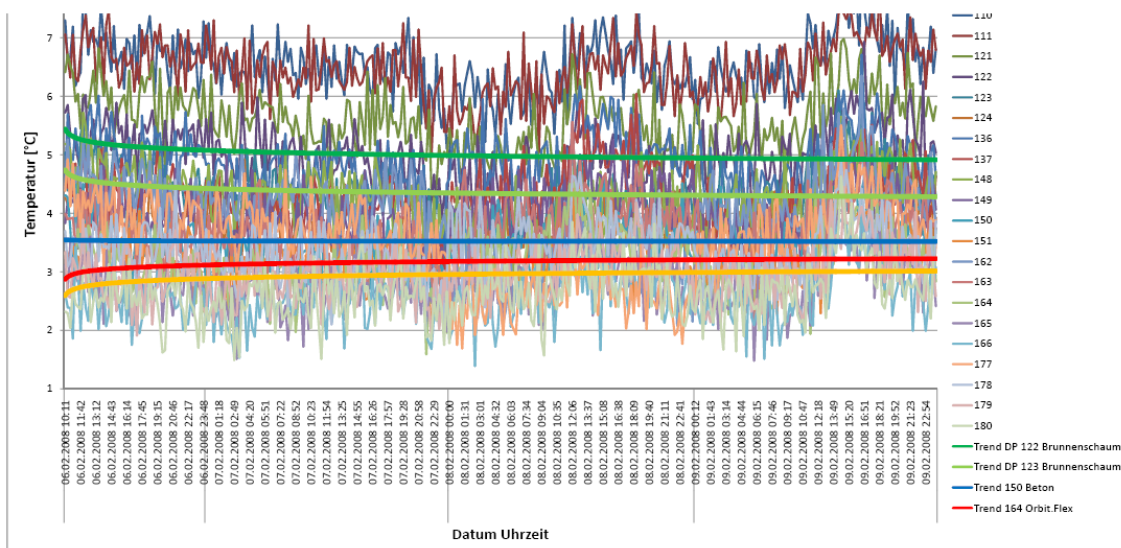
**Abb. 269** : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (3. Messkampagne)

Die Ursachen für die unterschiedliche Wirksamkeit der vertikalen und horizontalen Fugendichtungen mit Brunnenschaum sind noch nicht eindeutig belegt. Eine große Rolle spielt hierbei die sehr große

Fugenbreite, welche das Ausschäumen der Fugen erschwerte. Somit konnte die Ausdehnung des Schaums nicht alle Hohlräume zwischen den übereinander angeordneten Platten ausfüllen.

### 8.5.4.2 Leckageermittlung im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung

Zunächst soll für die Untersuchungsabschnitte mit Innendichtung die Möglichkeit einer Untersickerung der RC-Bauteile im Bereich des Auflagers im Streifenfundament untersucht werden. Die Ausführung des Streifenfundamentes mit der Herstellung einer einseitigen Anschlagkante auf der Wasserseite der Dichtung und der nachträglichen Ausbetonierung der Landseite des Streifenfundamentes als auch die Ergebnisse der Pegelstandsauswertung legen die Vermutung nahe, dass Sickerwasser entlang der RC-Bauteiloberfläche innerhalb des Fundamentes hinter die Dichtung gelangt sein könnte. Daher sollen zunächst die Temperaturverläufe der Datenpunkte an der Dichtungsbasis untersucht werden. Dafür wurden aus den jeweiligen Untersuchungsabschnitten die Datenpunkte ausgewählt, welche nicht unmittelbar im Bereich einer vertikalen Fuge liegen, um einen Einfluss von ggf. undichten Vertikalfugen weitestgehend auszuschließen. Die Ergebnisse der Betrachtung der Trends dieser Datenpunkte der 2. und 3. Messkampagne sind nachfolgend visualisiert.

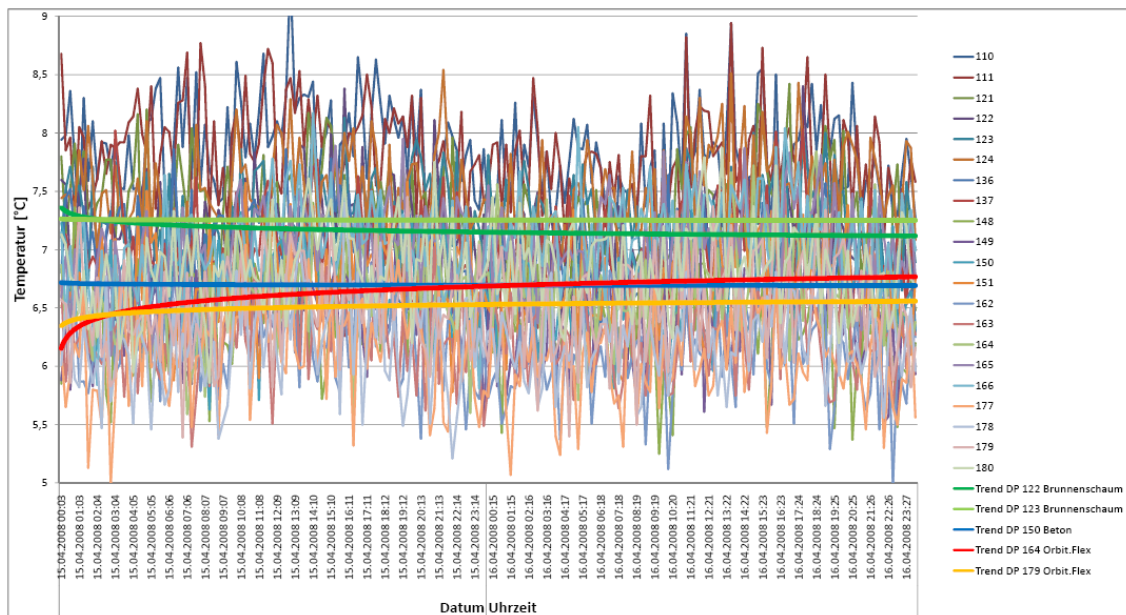


**Abb. 270** : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Innendichtung (2. Messkampagne)

Die Temperaturverläufe an der Basis der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum und der Fugendichtung mit Betonmörtel zeigen einen leicht negativen Trend. Das bedeutet, dass hier kein wärmeres Wasser aus dem Speicherbecken durch die Dichtungsbasis eingesickert ist.

Im Bereich der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen zeigt sich ein leicht ansteigender Trend der Temperaturentwicklung an der landseitigen Dichtungsbasis, obwohl in diesem Bereich gerade hinsichtlich der oben beschriebenen Situation Winkelprofile an der wasserseitigen Dichtungsbasis angebracht worden. Trotzdem wurde der landseitige Bereich der Dichtungsbasis geringfügig erwärmt. Dies kann nur durch einen Sickerwasserzutritt des wärmeren Speicherbeckenwassers erklärt werden. Da auch die Lufttemperaturen in diesem Zeitraum leicht abfielen.

Die Ergebnisse der Basisuntersuchung der Innendichtung in der 3. Messkampagne zeigt das gleiche Ergebnis



**Abb. 271** : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Innendichtung (3. Messkampagne)

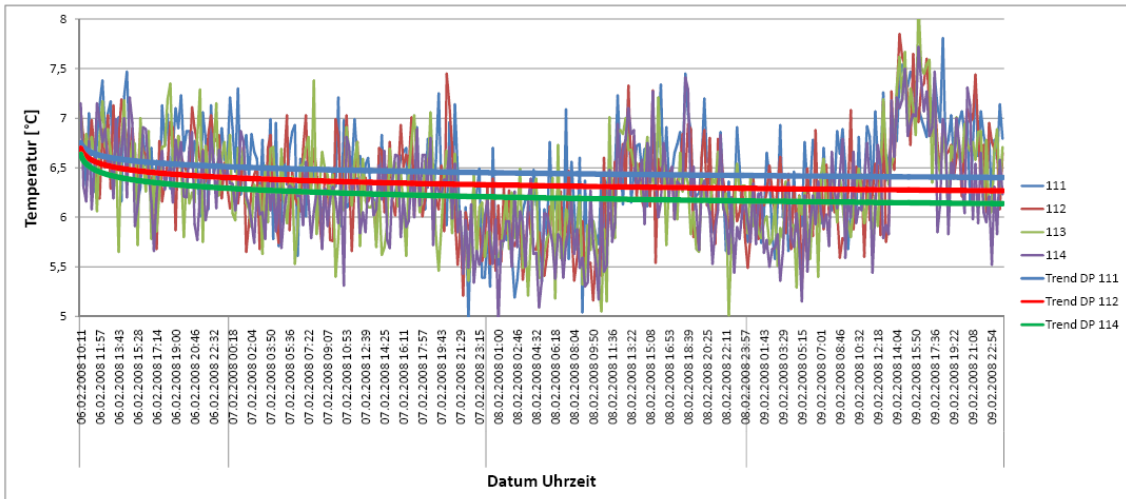
Eine weitere Erklärung für den Temperaturanstieg an der Dichtungsbasis des Untersuchungsabschnittes mit Orbit.Flex-Profilen wäre der Zustrom von Regenwasser, welches sich in den eingelassenen Messbehältern zur Setzungsmessung (umgebaute Regentonnen) über den Vertikalfugen der Innendichtung gesammelt hatte. Die Versickerung aus diesen Behältern ist aber als äußerst gering einzustufen. Zudem wird das Wasser bei den vorherrschenden Lufttemperaturen unterhalb des Temperaturbereichs des Bodens nur durch evtl. Sonneneinstrahlung erwärmt. Dieser Effekt ist aber insbesondere im Februar (2. Messkampagne) durch die geringe Sonnenscheindauer und –intensität als gering einzustufen. Zudem kann dieser Effekt durch die Ergebnisse der Untersuchungen der Vertikalfugen der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen ausgeschlossen werden (s. nachfolgender Anstrich – Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen).

Zur Untersuchung von Leckagen in den Vertikalfugen der Innendichtung wurde das Temperatursenkabel auf der wasserabgewandten Dichtungsseite entlang dieser Fugen befestigt. Die Temperaturverläufe der Datenpunkte im Fugenbereich werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Zudem werden die Trends der jeweils oberen, mittleren und unteren Datenpunkte einer Fuge mittels fett hervorgehobenen grünen, roten und blauen Linien herausgestellt.

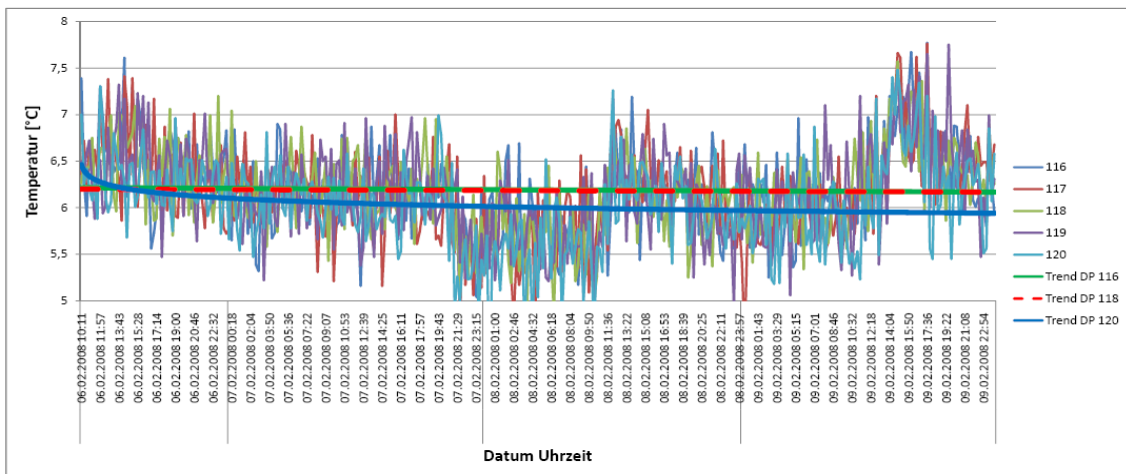
- **Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum**

Im Bereich dieses Untersuchungsabschnitts wurden hinter die Fugen der ersten Reihe jeweils eine weitere Recyclingplatte angeordnet und die Fugen zwischen der ersten und zweiten Reihe mit Brunnenschaum abgedichtet. Somit ergaben sich auf der wasserabgewandten Dichtungsseite vier zu untersuchende Fugenabschnitte. Die Ergebnisse der Leckageuntersuchung der 2. Messkampagne dieser vier Fugenabschnitte sind in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

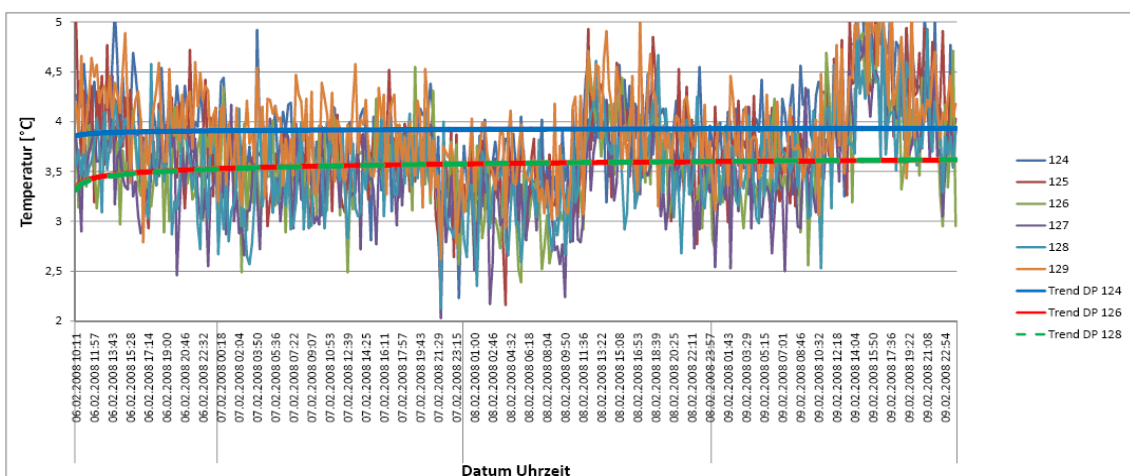




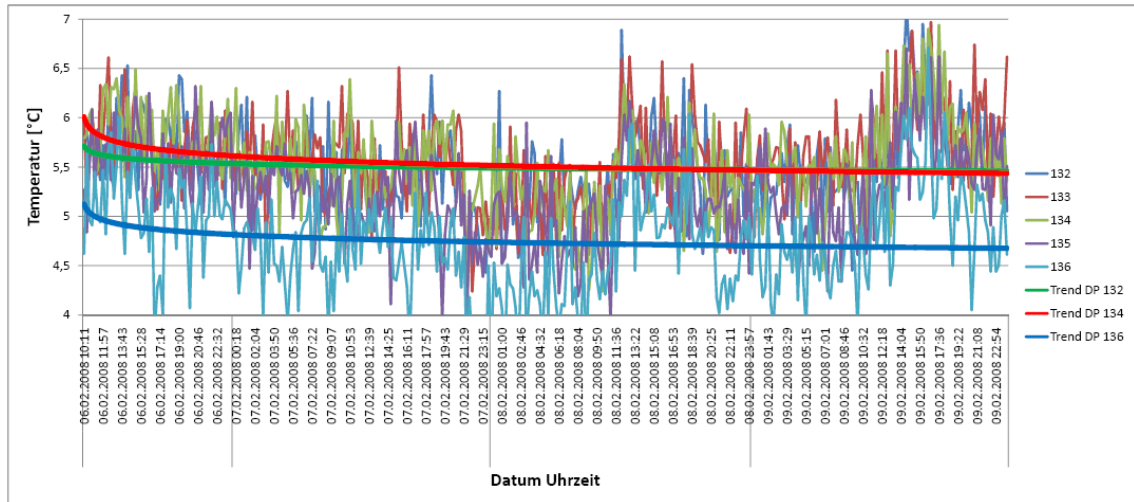
**Abb. 272** : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne)



**Abb. 273** : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne)



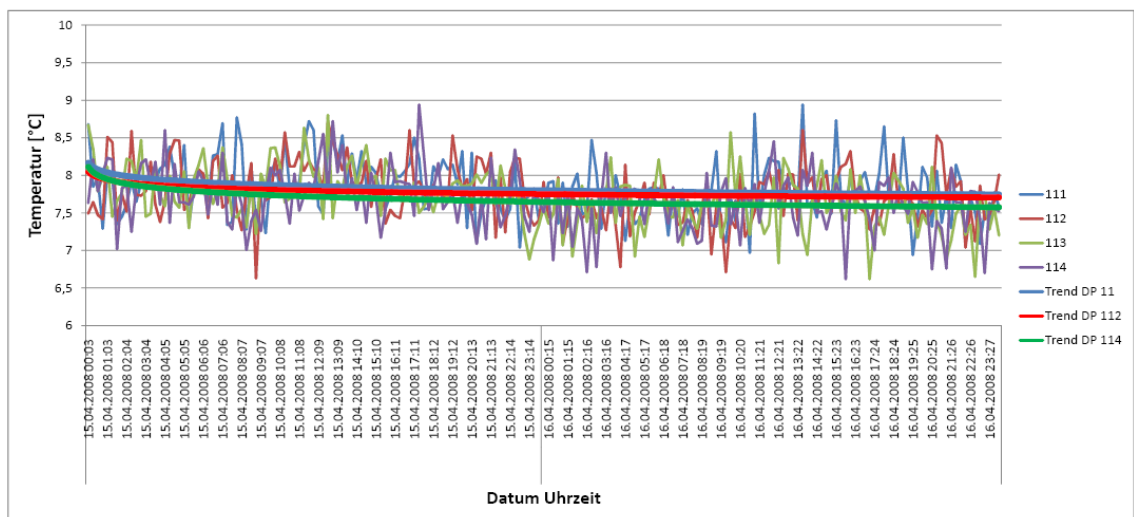
**Abb. 274** : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne)



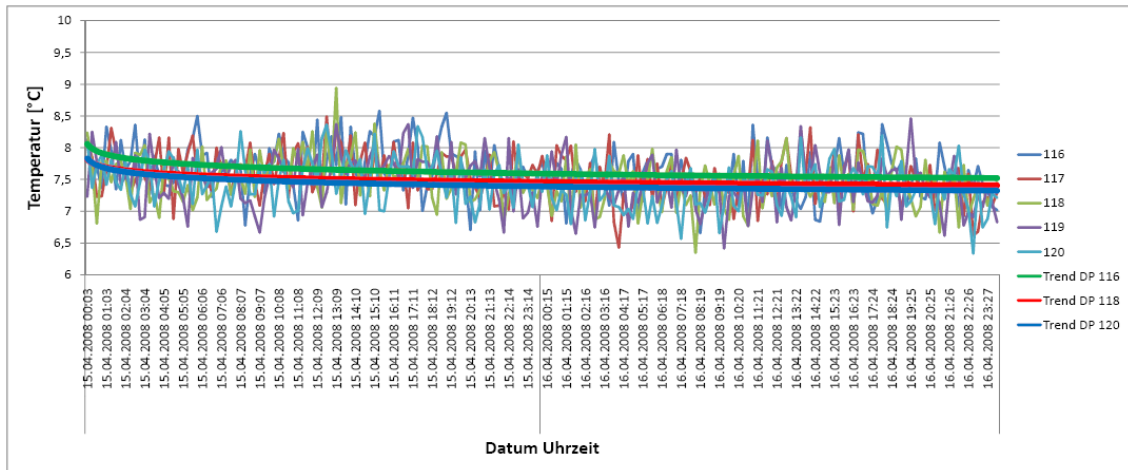
**Abb. 275** : Temperaturverläufe und Trends der 4. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne)

Die landseitig betrachtete linke und rechte Fuge (1. und 4. Fuge) der 2. RC-Bauteilreihe des Untersuchungsabschnitts weisen einen deutlich negativen Trend auf, welcher den Zutritt wärmeren Sickerwassers aus dem Speicherbecken ausschließen lässt. Die Temperaturverläufe der 2. und 3. Fuge zeigen jedoch vor allem im oberen und mittleren Bereich (grüne und rote Linie) einen kontinuierlichen bzw. sogar leicht ansteigenden Trend. Dies deutet auf einen Sickerwasserzutritt hin, welcher im oberen Bereich des mittleren Untersuchungsabschnitts auftritt.

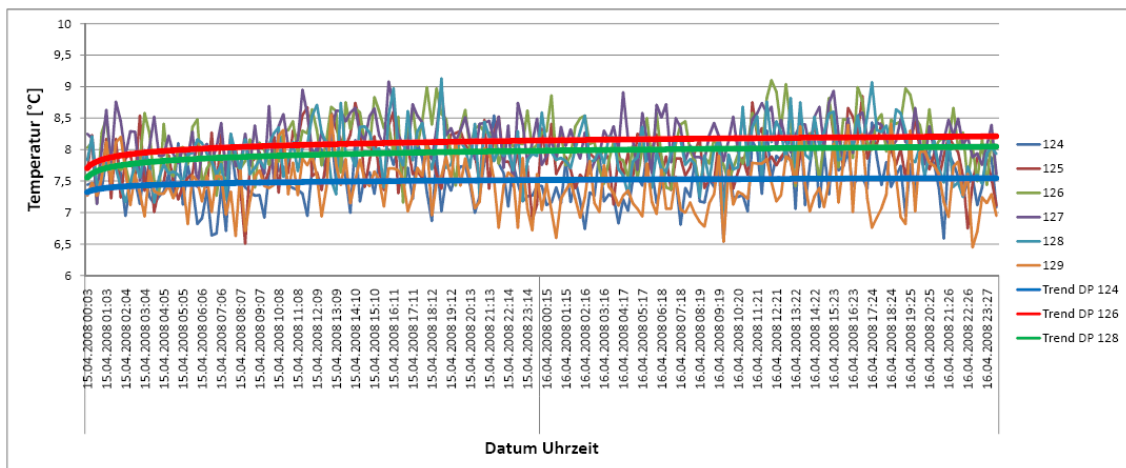
Im Grunde werden die Ergebnisse durch die der 3. Kampagne bestätigt, wobei die Temperaturentwicklung in der 2. Fuge der 2. RC-Bauteilreihe einen deutlicheren negativen Trend aufweist als der gleichbleibende Trend in Kampagne 2. Die Resultate dieses Untersuchungsabschnitts in der 3. Messkampagne sind nachfolgend visualisiert.



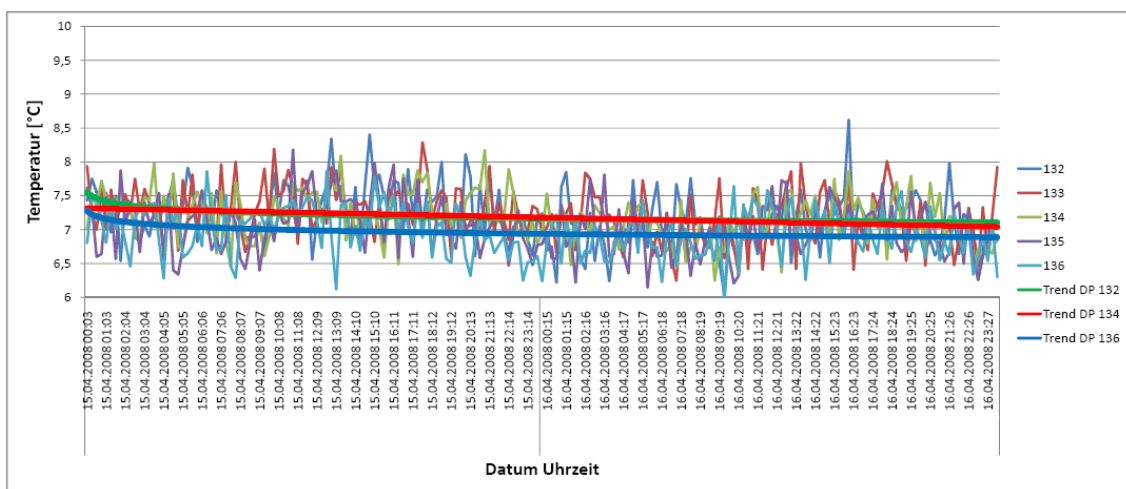
**Abb. 276** : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne)



**Abb. 277** : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne)



**Abb. 278** : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne)



**Abb. 279** : Temperaturverläufe und Trends der 4. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne)

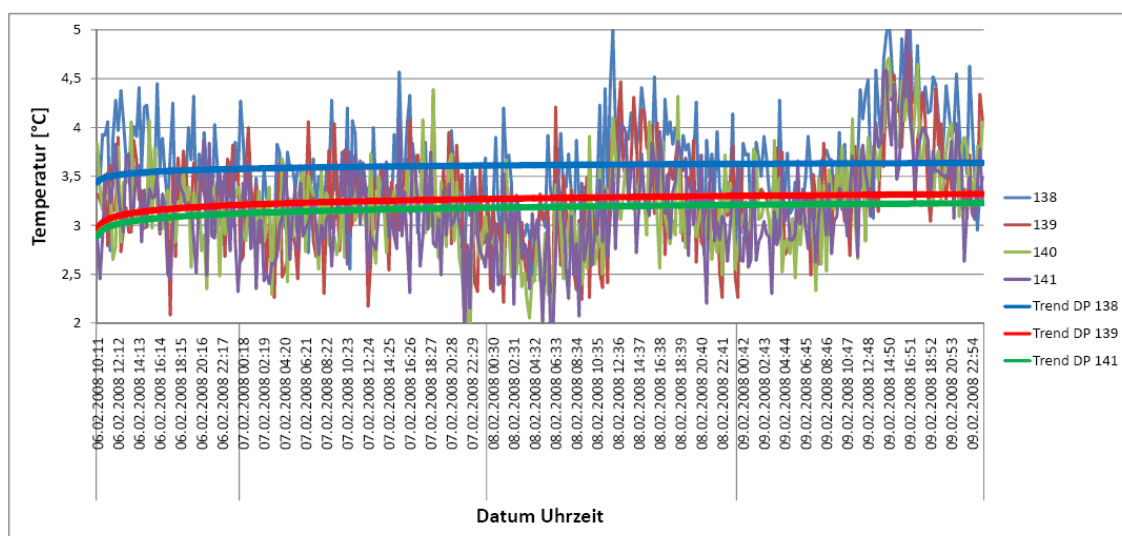
Auch in der 3. Kampagne zeigt die 3. landseitige Fuge der 2. Bauteilreihe einen positiven Temperaturtrend (s. Abb. 278). Das Auftreten warmen Sickerwassers aus dem Speicherbecken und somit vorhandene Undichtigkeiten in diesem Fugenbereich werden damit bestätigt.

Die Undichtigkeiten im mittleren Bereich dieses Untersuchungsabschnitts können auf die Ausführung der Fugen und somit die Verarbeitung des Brunnenschaums zurückgeführt werden. Zum Verschluss der außenliegenden Fugen konnte der Brunnenschaum direkt zwischen die Oberflächen der 1. und 2. RC-Bauteilreihe gesprüht werden. Der zu verschließende Spalt zwischen beiden Bauteilreihen ist sehr schmal und konnte durch den eingesprühten Schaum hohlraumfrei ausgefüllt werden. Die beiden mittleren Fugen der 2. RC-Bauteilreihe konnten nur im Bereich der Stirnseiten der RC-Bauteile mit Brunnenschaum versehen werden. Die RC-Bauteile sind hier so eng aneinander positioniert, dass ein Einbringen des Brunnenschaums zwischen den Oberflächen der Bauteilreihen nicht möglich war. Der Abstand zwischen den nebeneinander gestellten Elementen der 2. Reihe ist aber so breit, dass die Volumenausdehnung des Brunnenschaums offensichtlich nicht zum vollkommenen Verschluss der Fuge ausreichte. Für die Ausführung dieser Variante müssen die RC-Bauteile einer Reihen mindestens in einem 30 cm breiten Abstand voneinander angeordnet werden, um den Schaum in den Spalt zwischen beiden Bauteilreihen einbringen zu können.

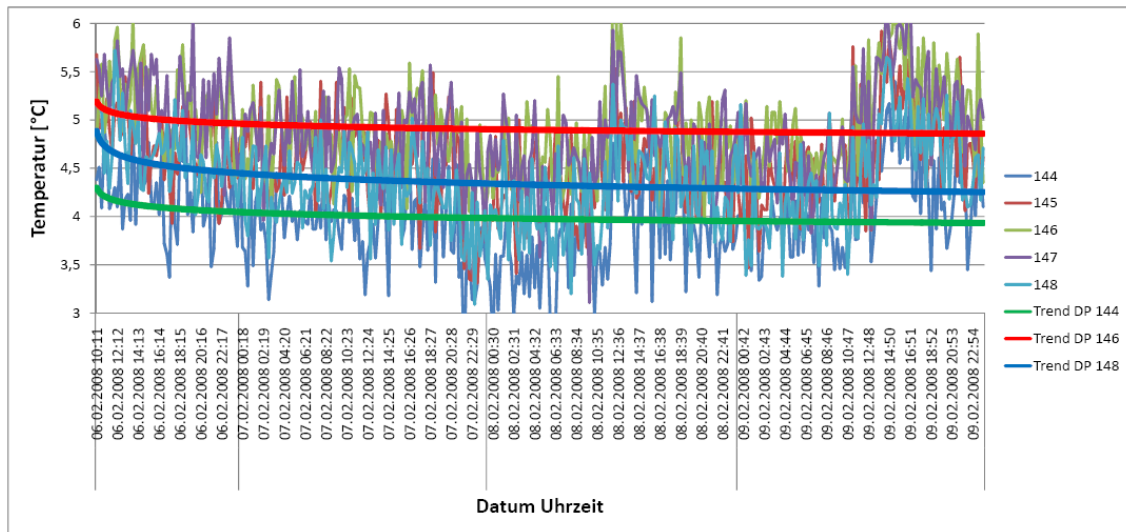
- **Innendichtung mit Betonmörtel**

Die Untersuchungen zur Leckageermittlung im Untersuchungsabschnitt der Innendichtung mit einer Fugenabdichtung aus mit XYPEX-versetzten Betonmörtel zeigten in der 2. Messkampagne leicht ansteigende Temperaturtrends in der 1. und 3. Fuge. In der 1. Fuge (landseitig betrachtet: links) dieses Untersuchungsabschnitts zeigen sich die ansteigenden Temperaturverläufe über die gesamte Fugenhöhe. Die 3. Fuge (rechts) zeigt diese nur im unteren und mittleren Fugenabschnitt. Diese Fugen sind somit nicht sickerwasserdicht.

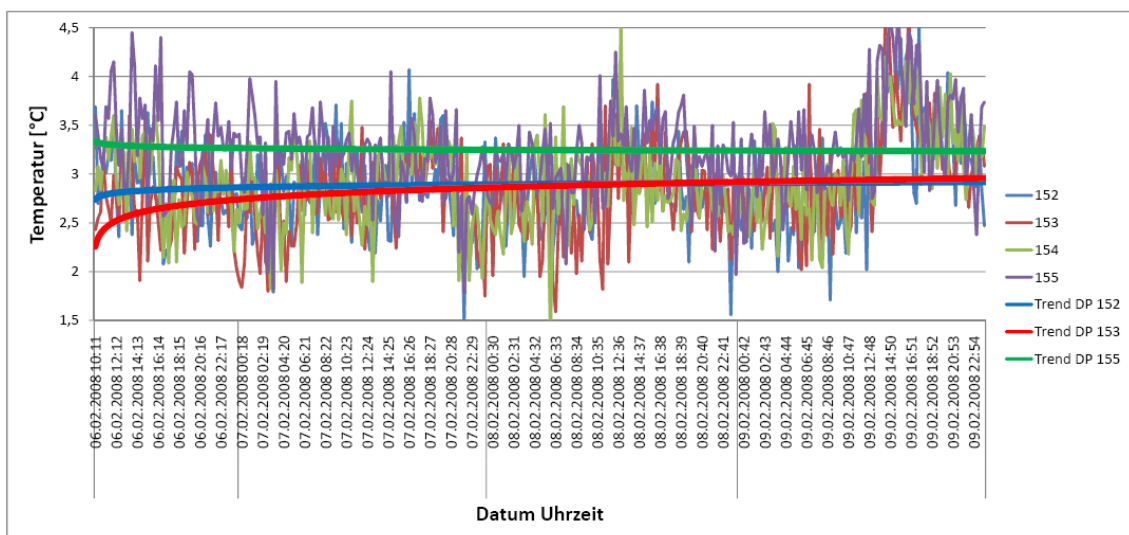
Die Ergebnisse der faseroptischen Temperaturmessung zur sind nachfolgend dargestellt:



**Abb. 280** : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne)



**Abb. 281** : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne)



**Abb. 282** : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne)

Die Ergebnisse der Leckageuntersuchungen der 3. Messkampagne in diesem Untersuchungsabschnitt können durch die erzielten Ergebnisse bestätigen.

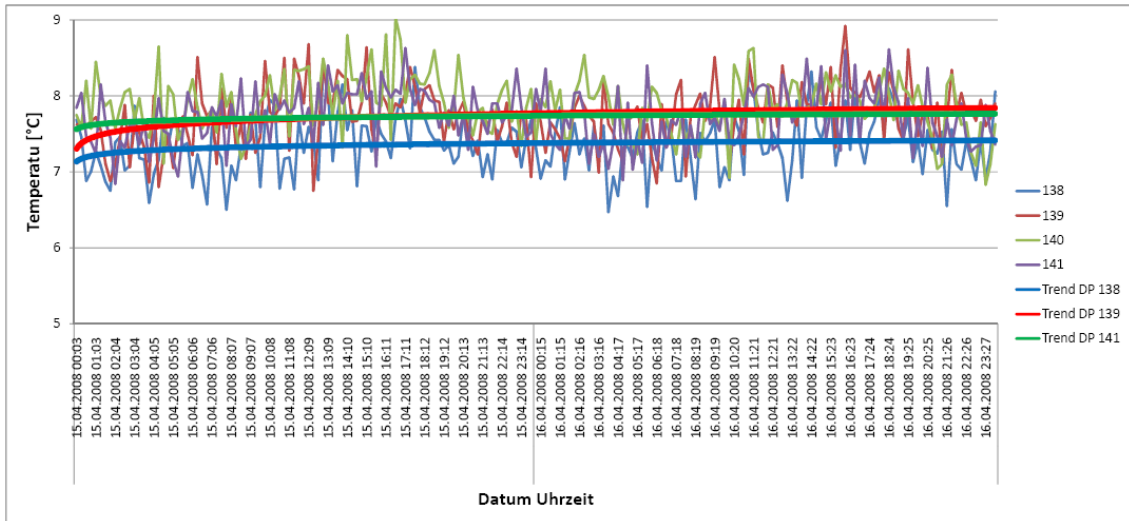


Abb. 283 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne)

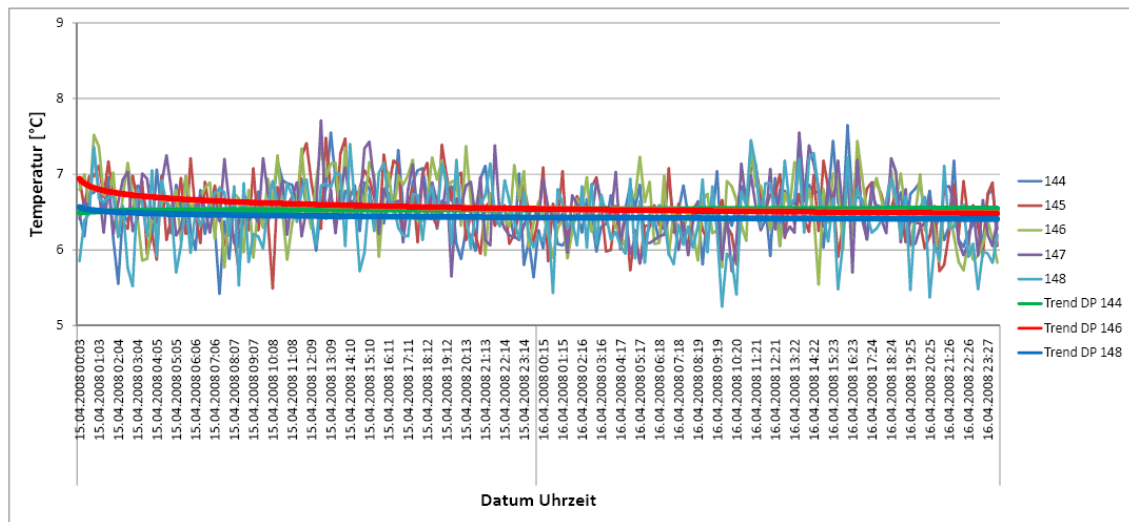


Abb. 284 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne)

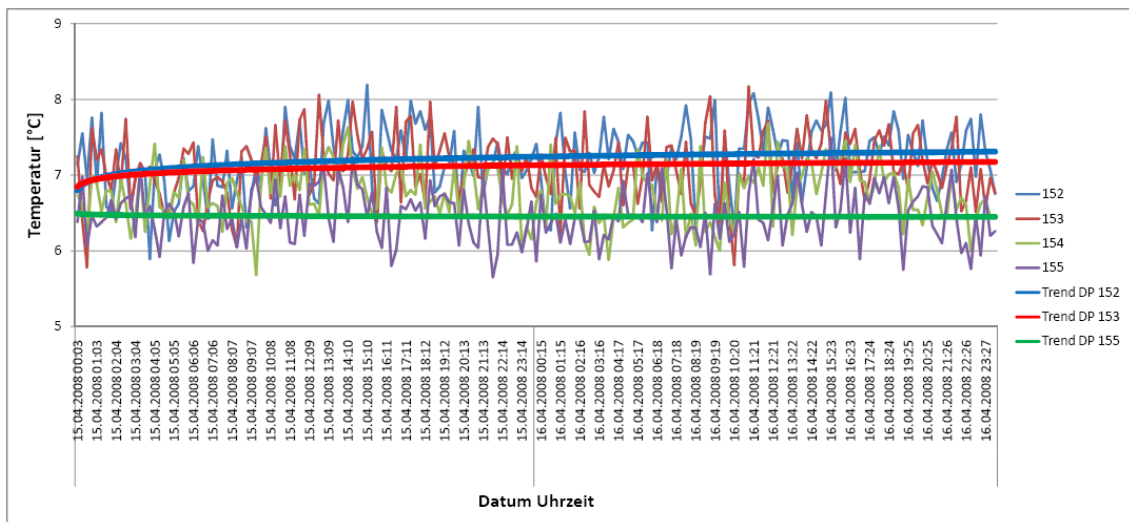


Abb. 285 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne)

Die Undichtigkeiten des Fugenverschlusses mit Betonmörtel können wie schon bei der Oberflächen-dichtung auf eine mangelnde Verbindung des Mörtels mit dem Beton des RC-Bauteils zurückgeführt werden. Zudem konnte der eingebrachte Mörtel aufgrund der geringen Platzverhältnisse in der Fuge nicht zusätzlich verdichtet werden. Der Mörtel wurde ausschließlich mittels Maurerkelle von oben in die Fuge eingebracht. Somit können sich durchaus Hohlstellen im Mörtelkern gebildet haben, welche die Wirksamkeit der Fugendichtung verhindern. Visuell erkennbar waren solche Fehlstellen allerdings nicht. Der Oberflächenbereich der Mörtelfuge erschien glatt und vollkommen abgeschlossen. Trotzdem können sich solche Hohlstellen dicht unterhalb des sichtbaren Bereichs eingestellt haben.

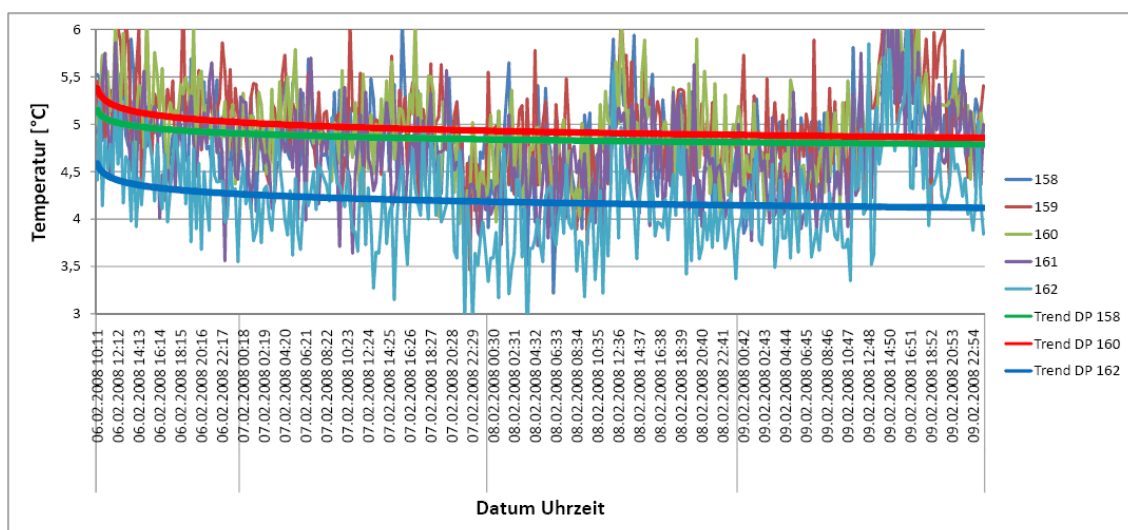
Eine weitere Erklärung für die Undichtigkeiten kann im Aufbau des Erdkörpers gefunden werden. Durch die erforderliche Verdichtungsarbeit mit einer Vibrationswalze können Erschütterungen im Nahbereich der Innendichtung zu Rissen in der Fuge und vor allem im Anschluss des Mörtelkerns zum RC-Bauteil geführt haben.

Um diesen Anschlussbereich der Mörtelfuge abzudichten ist wie bei der Oberflächendichtung der Einsatz bspw. von Quellbändern erforderlich.

- **Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen**

Die ermittelten Trends aus den Temperaturverläufen des Untersuchungsabschnitts der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen zeigen einen deutlichen Temperaturanstieg im unteren und mittleren Bereich der 2. Fuge. Dieser Temperaturanstieg beruht nicht auf versickerndem warmem Regenwasser aus dem Messbehälter für die Setzungsmessungen, da in diesem Fall auch der obere Datenpunkt einen Temperaturanstieg aufgezeigt hätte. Somit ist die tendenzielle Erwärmung des betroffenen Fugenbereiches nur auf den Sickerwasserzutritt aus dem Speicherbecken zu erklären. Dies bedeutet die mittlere Fugendichtung ist trotz der Verwendung von Orbit.Flex-Profilen nicht voll wirksam.

In nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der 2. Messkampagne aufgeführt.



**Abb. 286** : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (2. Messkampagne)

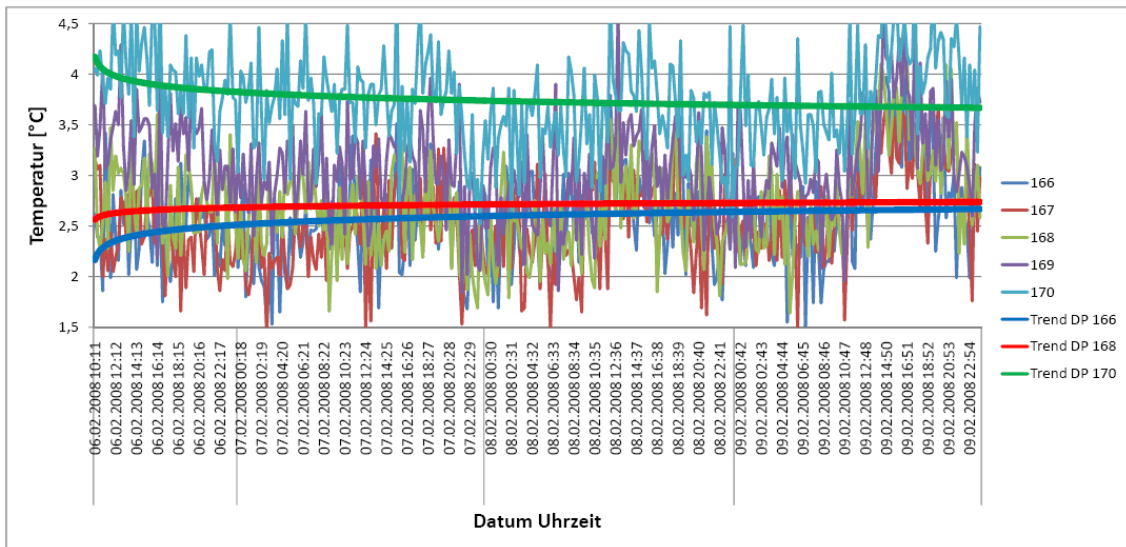


Abb. 287 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (2. Messkampagne)

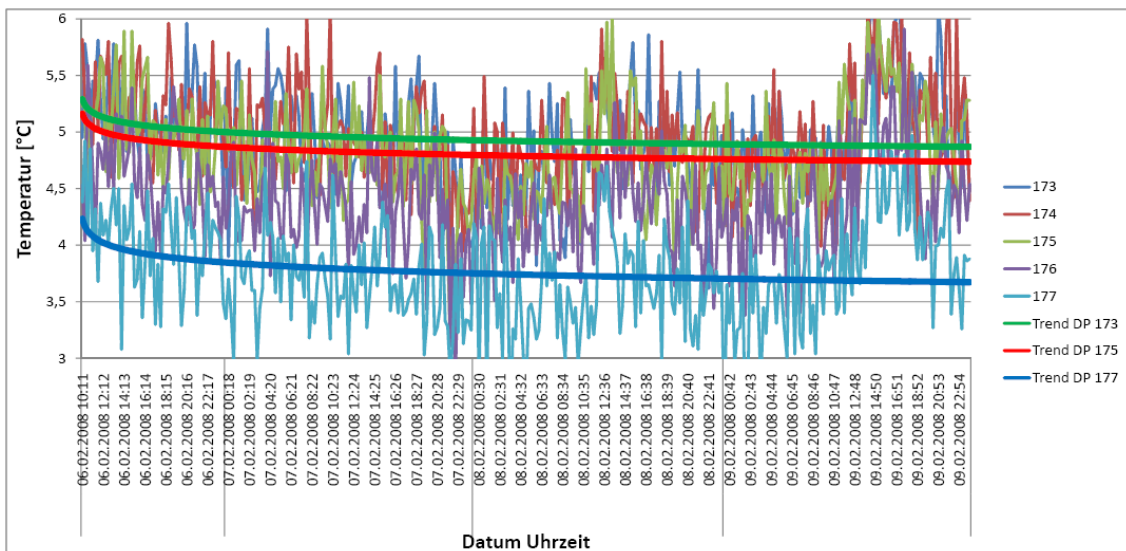


Abb. 288 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (2. Messkampagne)

Die Ergebnisse der 3. Messkampagne entsprechen denen der zuvor durchgeführten Einstauphase und sind nachfolgend visualisiert.



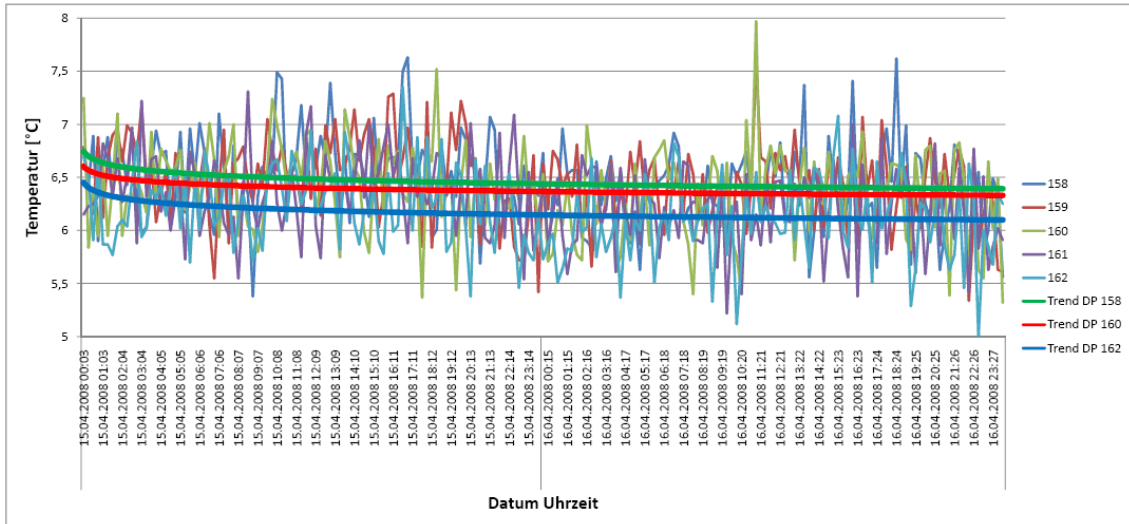


Abb. 289 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (3. Messkampagne)

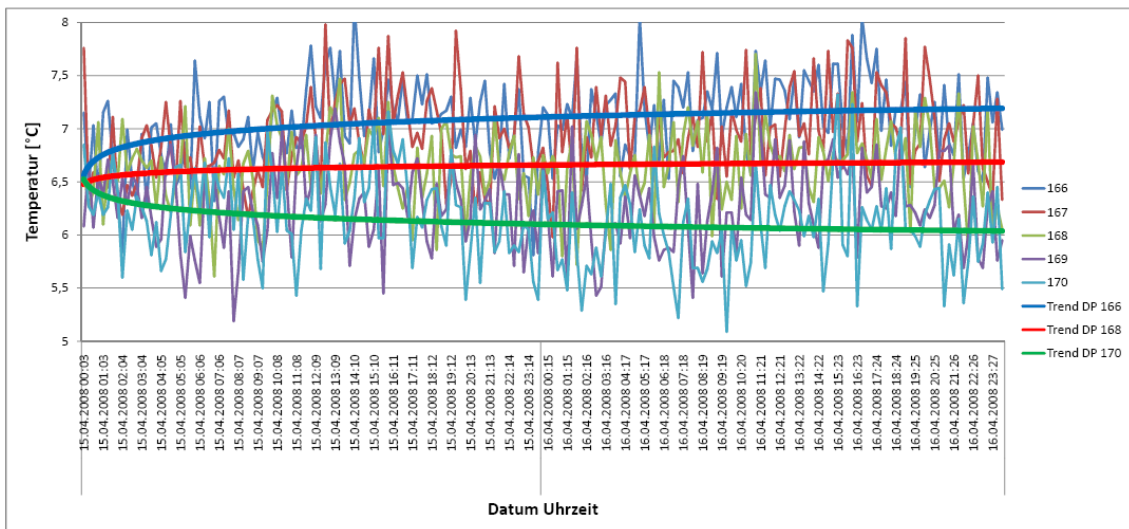


Abb. 290 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (3. Messkampagne)

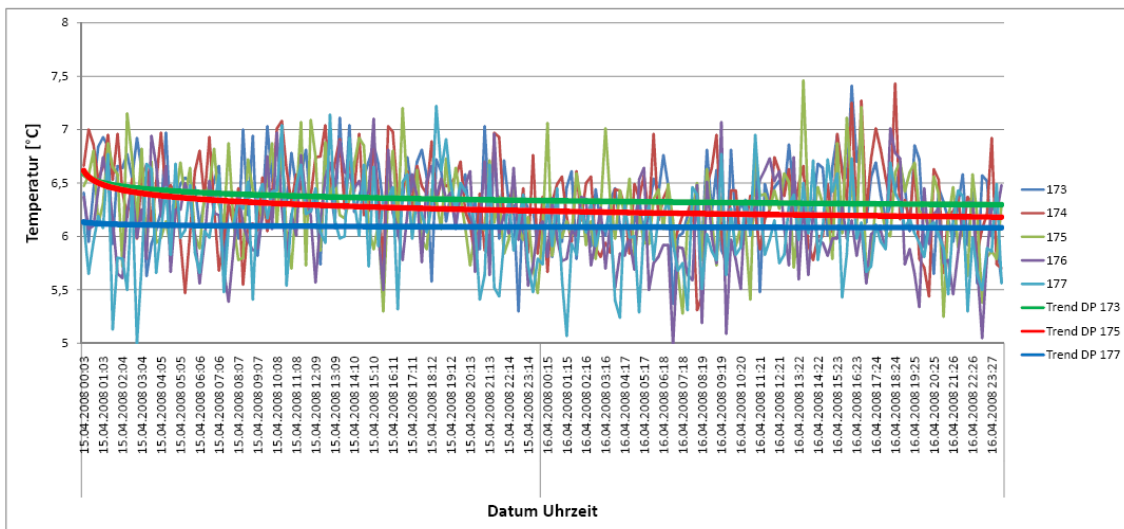


Abb. 291 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (3. Messkampagne)

Die Undichtigkeit der mittleren Fuge des Untersuchungsabschnitts der Innendichtung mit OrbitFlex-Profilen kann nur auf eine Beschädigung der Fugendichtung im Zuge des Aufbaus des Erdkörpers zurückgeführt werden.

### 8.5.5 Ergebnisse der Überströmungsversuche

Zum Abschluss der Untersuchungen am Versuchsdeichkörper wurden am 23./24.10.2008 und am 05.11.2008 Überströmungen der einzelnen Überlaufstrecken vorgenommen. Die Überlaufstrecken wiesen eine Kronenhöhe von 2,3 m auf. Der trapezförmige Querschnitt mit einer Basisbreite von ca. 1,0 m hatte eine seitliche Böschungsneigung von ungefähr 1:1. Die Länge der Überlaufstrecken betrug ca. 5,8 m. Die landseitige Böschung hat eine Neigung von 1:2.



**Abb. 292** : Überlaufstrecken wasserseitig vor den Überströmversuchen



**Abb. 293** : Überlaufstrecken landseitig

Über die Errichtung von Sandsackwällen in der Mitte der Überlaufstrecken wurde in der ersten Versuchsphase (Ende Okt. 2008) ein Überstau von 20 cm vorgenommen. Das entspricht einer Einstauhöhe im Speicherbecken von 2,5 m. Im 2. Versuchsabschnitt (Anfang Nov. 2008) erfolgte ein Überstau von 40 cm mit einer Gesamteinstauhöhe von 2,7 m im Speicherbecken.



**Abb. 294** : Kronenbereiche der Überlaufstrecken der Var. 3.1, Var. 3.3 und Var. 3.2 (v.l.n.r.)



**Abb. 295** : Sandsackwall für den Überstau von 20 cm der 1. Versuchsreihe



**Abb. 296** : Sandsackwall für den Überstau von 40 cm der 2. Versuchsreihe

Die Sandsackwälle wurden dann im jeweilig untersuchten Versuchsabschnitt entfernt, so dass die überstauten Wassermassen über die jeweilige Überlaufstrecke abfließen konnten. Bei einer Überstauhöhe von 20 cm wurden ca. 70 m<sup>3</sup> Wasser aus dem Speicherbecken abgelassen. Bei der Überstauhöhe von 40 cm waren dies ca. 150 m<sup>3</sup> Wasser.

Die Überströmversuche zeigten folgende Ergebnisse:

- **Überströmung der Var. 3.1 mit 20 cm Überstau**

Die erste Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 der wurde am 23.10.2008 durchgeführt. Die genaue Überstauhöhe betrug 20 cm. Nach etwa 50 Minuten war diese auf 3 cm abgesunken. In dieser Zeit waren ca. 60 m<sup>3</sup> Wasser über die Versuchstrecke geströmt.



**Abb. 297** : Beseitigung des Sandsackwalls für den Überströmversuch an der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 20 cm Überstau



**Abb. 298** : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 20 cm Überstau



**Abb. 299** : Überlaufrinne im Kronenbereich und landseitige Böschung nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 20 cm Überstau

Die Überlaufrinne im Kronenbereich der Überlaufstrecke wie auch die RC-Bauteile der landseitigen Böschung und der waagrecht liegenden Platte im Tosbereich am landseitigen Böschungsfuß zeigten nach Durchführung des Versuchs keine Veränderung.

- **Überströmung der Var. 3.1 mit 40 cm Überstau**

Die zweite Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 erfolgte am 05.11.2008 mit einer Überstauhöhe von 43 cm. Diese sank innerhalb von 33 Minuten auf bis 5 cm ab. Im Zuge dieses Versuchs überströmten ca. 150 m<sup>3</sup> Wasser die Überlaufstrecke.



**Abb. 300** : Beseitigung des Sandsackwalls für den Überströmversuch an der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau



**Abb. 301** : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau



**Abb. 302** : Überlaufrinne im Kronenbereich nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau



**Abb. 303** : Zerstörter Tosbereich am landseitigen Böschungsfuß nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau

Die Überlaufrinne auf der Krone wie auch die landseitige Böschung der Versuchsstrecke Var. 3.1 wies nach der Versuchsdurchführung mit einer Überstauhöhe von 40 cm keinerlei Beschädigungen auf. Hingegen war der Anschluss der waagrecht liegenden RC-Betonplatte an die landseitige Böschung zerstört. Die im Tosbereich angeordnete Betonfuge wurde komplett aus ihrer Position gehoben und schlussendlich unter das waagrecht liegende Element geschoben. Somit wurde die Kraft des herabströmenden Wassers auf die nun freigelegte Kante des RC-Bauteils gelenkt. Weswegen die knapp 2 t schwere Platte um ca. 10 Zentimeter verschoben wurde.

Den Schwachpunkt dieser Variante bildet somit die Ausführung der Sicherung des Tosbereiches am landseitigen Böschungsfuß. Das überströmende Wasser zeigt zunächst an der landseitigen Kronenkante einen Fließwechsel von einem strömenden Abfluss zum Schießen, das heißt u.a. sinkt die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit nimmt deutlich zu. Solch ein Fließwechsel ist hydrotechnisch problemlos<sup>152</sup>. Der schießende Abfluss wird am Böschungsfuß wieder abgebremst und zeigt einen umgekehrten Fließwechsel zu einem strömenden Abfluss. Dieser ist mit einer sprunghaften Änderung der Wassertiefe, einem sog. Wechselsprung, verbunden. Hier entwickelt das herabströmende Wasser seine größte Kraft und trifft auf die Schwachstelle des Systems – die Fuge.

Aufgrund der nicht kraftschlüssigen Ausbildung des Anschlusses von Fuge und RC-Betonbauteil wurde die Betonfuge genau an den Kanten aus dem Verbund gelöst und unter das waagrecht angeordnete RC-Bauteil gedrückt.

<sup>152</sup> Preißler, G.; Bollrich, G.: Technische Hydromechanik Band 1, Berlin, 1985, S. 314f..

Eine Lösungsmöglichkeit wäre hier das waagerechte RC-Betonbauteil zum Teil unter dem untersten Böschungselement anzuordnen. Das herabströmende Wasser trifft dann auf die Bauteiloberseite. Die wirkenden Kräfte können über die gesamte Bauteilfläche aufgefangen werden. Das Wasser kann so keine schiebende Kräfte entwickeln und das System bleibt stabil. Die Fugen in diesem Bereich müssen kraftschlüssig ausgeführt werden. Desweiteren kann auf das Ende dieser waagerechten Platte ein weiteres RC-Betonbauteil aufgelegt werden. Dessen Kante bildet die Endschwelle für das so entstehende vertiefte Tosbecken und bildet im weiteren Verlauf des abfließenden Wassers eine zusätzliche Kalksicherung. Werden die RC-Bauteile in diesem Bereich nicht längs sondern quer zur Deichachse verlegt kann die Länge des Tosbeckens ohne Quertfugen deutlich vergrößert werden, so dass der Wechsellprung des anströmenden Wassers nicht über das Tosbecken herausschlägt. In Abhängigkeit der Anforderungen und der Ausführung der Überströmstrecken (zu erwartende Überstauhöhe, Kronenhöhe u.a.) müssen hierfür jedoch projektspezifisch Berechnungen für den Einzelfall erfolgen.

- **Überströmung der Var. 3.2 mit 20 cm Überstau**

Am 24.10.2008 wurde eine Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.2 mit einer Überstauhöhe von 22 cm vorgenommen. Nach ca. 50 Minuten war der Überstau auf ca. 5 cm abgebaut.



**Abb. 304** : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.2 mit 20 cm Überstau



**Abb. 305** : Landseitige Böschung und RC-Bauteilfugen im Kronenbereich nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.2 mit 20 cm Überstau

Die Gesteinsschüttung der Berme nahm einen Großteil der wirkenden Strömungskräfte des Wassers an der landseitigen Böschung auf. Die bereits vorhandenen Risse in den Bauteilfugen zwischen den

Randelementen der Krone und den Böschungsbauteilen sind durch die Strömungswirkung des Wassers trotz bereits vorhandener Sicherung erweitert worden. Ohne diese wäre das auf der landseitigen Böschung angeordnete RC-Bauteil abgerutscht. Eine solche Ausführung einer Überlaufstrecke ist demnach nicht funktionstüchtig.

- **Überströmung der Var. 3.3 mit 20 cm Überstau**

Ebenfalls am 24.20.2009 wurde die Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.3 durchgeführt. Die Überstauhöhe betrug 23 cm. Nach 78 Minuten war dieser Überstau bis auf 4 cm abgelaufen. Im landseitigen Böschungsbereich zeigten sich nach Beendigung des Überströmversuches deutliche Erosionsspuren. Auch diese Variante ist für den praktischen Einsatz als ungeeignet einzustufen.



**Abb. 306** : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.3 mit 20 cm Überstau



**Abb. 307** : Landseitige Böschung nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.3 mit 20 cm Überstau



## 8.6 Fazit – Untersuchungen am Versuchsdeichkörper

Der im Jahr 2007 in Betrieb genommene Versuchsdeichkörper umfasste Versuchsabschnitte zur Untersuchung der entwickelten Varianten der Oberflächen- und Innendichtung mit einer Kronenhöhe und –breite von jeweils 3 m sowie der Überlaufstrecken mit einer Kronenhöhe von 2,3 m. Die Böschungneigung wurde 1:2 ausgeführt. Die Höhe der installierten senkrechten Dichtungsschichten betrug 2,5 m. Als Vergleichsabschnitt diente ein Untersuchungsabschnitt in homogener Ausführung.

Der Versuchsdeichkörper weist eine quadratische Grundform auf, welcher einem Speicherbecken gleichkommt. Um eine unkontrollierte Versickerung des Wassers in den Untergrund zu unterbinden, lagert der gesamte Baukörper auf einer 0,5 m starken Tonbasisdichtung. Die Abgrenzung der einzelnen Untersuchungsabschnitte wurde mittels Tonschotts realisiert. Zur Sicherung der Standsicherheit wurde umlaufend eine Dränage als Filterprisma am landseitigen Böschungsfuß angelegt.

Für die Erstellung des Deichgrundkörpers wurde – auch mangels Alternativen – ein sehr dichter Erdstoff verwendet, welcher die Durchsickerung als auch deren Untersuchung erschwerte. Dieser Erdstoff wird als Rekultivierungsschicht für den Tagbauabschluss genutzt. Daher wurde auf das Einbringen einer zusätzlichen Mutterbodenschicht als Vegetationsträger auf die Deichkörperoberfläche verzichtet. Dieser Erdstoff stellte sich im Endeffekt als zu dicht heraus. Das Regenwasser konnte kaum bis gar nicht in das Erdreich eindringen, floss zu meist oberflächlich ab. Die starke Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten, große Windanfälligkeit des über Kilometer freiliegenden Geländes als auch hohe Temperaturschwankungen im Tages- und Jahresverlauf stellten zu dem zum Teil extreme Wetterbedingungen dar. Auf dieser Basis entwickelte sich im Versuchszeitraum trotz intensiver Bemühungen durch zusätzliche Beregnung, Bodenauflockerung und Nachsaat nur eine spärliche Grasnarbe. Auftretende Starkregenereignisse konnten somit feine Sedimentanteile aus der Oberfläche auswaschen und kleinere Erosionsrinnen schaffen. Diese wurden weitestgehend zeitnah geschlossen. Die somit entstandenen Extremsituationen am Versuchsdeichkörper treten im Normalfall höchst selten auf und wurden als zusätzliche Härtefallbelastung bei der Überprüfung der entwickelten Deichbauvarianten bewertet. Für eine Umsetzung der entwickelten Varianten in der Praxis ist die Ausbildung einer Grasnarbe durch den Einbau einer geeigneten Oberbodenschicht aber unabdingbar.

Hinsichtlich der Setzungserscheinungen an der Deichkörperoberfläche und im Deichinneren konnten keine maßgeblichen Absenkungen des Deichkörpers während des gesamten Untersuchungszeitraums festgestellt werden. Leichte Absenkungen  $< 1$  cm im Bereich der Oberflächen- und Innendichtung wie auch der Überlaufstrecken sind auf eine Gesamtsetzung des Bauwerks zurückzuführen und korrelieren mit den Ergebnissen der Setzungsmessungen im homogenen Vergleichsabschnitt. Diese Setzungen liegen deutlich unter 1 % der Gesamthöhe des Bauwerks. Der Versuchsdeichkörper zeigte sich somit in allen Untersuchungsbereichen über den gesamten Untersuchungszeitraum als stand sicher.

Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Setzungsmessung der verbauten RC-Bauteile der Oberflächen- und Innendichtung wie auch der Überlaufstrecke Var. 3.1 und 3.3 ermittelt. Eine Beschädigung der

verbauten Fugendichtungen durch unterschiedliche Setzungen benachbarter RC-Bauteile kann ausgeschlossen werden.

Die RC-Bauteile im Böschungsbereich der Überlaufstrecke Var. 3.2 zeigten hingegen deutliche Rutschungen und mussten bereits im Beginn der Versuchsphase zusätzlich gesichert werden. Somit schließt sich eine Umsetzung dieser Variante mit der Verlegung von RC-Bauteilen ausschließlich im Kronenbereich aus. Ausgeschlossen werden muss ebenfalls die Umsetzung der Überlaufstrecke der Variante 3.3 mit Innendichtung. Diese zeigte deutliche Ausspülungen des landseitigen Böschungsbereiches nach der Durchführung eines Überströmversuches mit einer Überstauhöhe von 20 cm.

Als grundsätzlich funktionsfähig erwies sich aber die vollflächige Böschungssicherung der Überlaufstrecke der Variante 3.1 mit RC-Bauteilen unter Verwendung einer Fugendichtung aus Betonmörtel. Den Schwachpunkt dieser Variante bildet allerdings die Ausführung der Sicherung des Tosbereiches am landseitigen Böschungfuß. Dieser muss entsprechend der erwarteten Überstauhöhe und somit der anströmenden Wassermassen berechnet und ausgeführt werden.

Die Auswertung der Durchsickerung der einzelnen Untersuchungsabschnitte anhand der Auswertung der Pegelstände und vor allem der Ergebnisse der faseroptischen Temperaturmessung (GESO) erwies sich aufgrund der großen Datenflut als sehr schwierig. Gerade das GESO-System zeigte sich für den Einsatz im Versuchsdeichkörper ungeeignet. Nur in den Messkampagnen im Winter und Frühjahr konnten hier ausreichend relevante Daten erfasst werden. Zum einen stieg die verwendete Rechereinheit des Messsystems im Messcontainer bei Temperaturen über 30°C komplett aus. Zum anderen – was entscheidend ist – sind die Temperaturunterschiede zwischen dem Sickerwasser und dem Boden so gering, dass kein deutlicher Temperaturunterschied bei Sickerwasserzutritt zu verzeichnen war. Der Sickerwasserzutritt konnte ausschließlich über die tendenzielle Betrachtung der Temperaturentwicklung der einzelnen Datenpunkte über 2 bzw. 4 Tage erkannt werden und das auch nur, weil die Luft- und Bodentemperaturen eine absinkende Tendenz aufwiesen und das Sickerwasser aus dem Speicherbecken wärmer war. So konnte Datenpunkten mit einer ansteigenden Temperaturtendenz ein Sickerwasserzutritt zugeordnet werden. Diese tendenziellen Entwicklungen waren zum Teil sehr gering. Die Aussagekraft dieser Angaben ist somit relativ vage. Eine genaue Zeitzuordnung des Sickerwasserzutritts am Datenpunkt war nicht möglich.

In Auswertung der Pegel- und Temperaturmessungen können für die einzelnen Untersuchungsabschnitte folgende Aussagen getroffen werden.

- **Oberflächendichtung mit Ton**

Die Pegelverläufe zeigen eine Korrelation mit den Veränderungen des Wasserstandes im Speicherbecken. Die Pegelstandsänderungen sind aber sehr gering und deutlich unter denen des homogenen Abschnittes. Die Dichtung ist zwar nicht vollkommen wirksam, zeigt aber eine deutliche Verminderung des Sickerwasserzustroms. Undichtigkeiten sind vor allem in den horizontalen Fugenbereichen erkennbar. Dies ist auf die Einbautechnologie des gestampften Tons zurückzuführen.

Alternativ wird empfohlen, anstelle des gestampften natürlichen Tons Bentonit in die Fugen einzubringen, welches durch seine bessere Quelleigenschaften auch diesen Fugenbereich noch besser abdichtet. Die Fugen können zudem enger ausgeführt werden (im Versuch 10 cm), um den Materialverbrauch zu minimieren.

- **Oberflächendichtung mit Betonmörtel**

Die Pegelstandsänderungen hinter der Oberflächendichtung mit Beton zeigen ebenfalls Abhängigkeiten vom Wasserstand im Speicherbecken. Die ermittelten Differenzen liegen zwar über denen der Ausführung mit Ton aber noch unter denen im homogenen Vergleichsabschnitt. Auch hier zeigt die eingebaute Dichtungsschicht zwar keine vollkommene Undurchlässigkeit, aber schon eine deutliche Abminderung der Auswirkungen des simulierten Hochwasserereignisses auf den Sickerwasserstand hinter der Dichtschicht. Dabei zeigen vertikale wie horizontale Fugen Sickerwasserdurchtritte auf. Diese sind auf eine unzureichende Anbindung des Betonmörtels an die Betonoberfläche des RC-Bauteils zurückzuführen. Auch hier spielt die Einbautechnologie eine entscheidende Rolle. Der eingebrachte Mörtel war in seiner Konsistenz relativ plastisch bis steif und konnte so bereits als Frischbeton diese enge Verbindung zum RC-Bauteil nicht eingehen.

Alternativ sollte eine deutlich weichere bis fließfähige Mörtelkonsistenz eingesetzt werden, welche aufgrund eines relativ hohen Feinkornanteils (Einsatz von Flugasche) auch die nötige Haftung am Altbeton aufweist. Die Fugenbreite ist dabei so zu wählen, dass der Betonmörtel über eine Schlauchpumpe eingebracht werden kann.

- **Oberflächendichtung mit Brunnenschaum**

Die Oberflächendichtung mit Brunnenschaum weist sehr deutliche Pegelstandsänderungen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Speicherbecken auf. Hierbei konnte der Sickerwasserzutritt im Bereich der Horizontalfugen als Ursache festgestellt werden. Aufgrund der großen Fugenbreite reichte hier die Volumenzunahme des eingebrachten Schaums nicht aus, die Fugen vollständig abzudichten.

Alternativ sollten bei dieser Ausführungsvariante die Fugenbreiten minimal gehalten werden, dann ist auch eine Anwendung von Brunnenschaum als Dichtungsmittel erfolgreich.

- **Innendichtung mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum**

Die Undichtigkeiten dieser Ausführung der Innendichtung werden durch die Korrelation der schwankenden Pegelstände mit dem Wasserstand im Speicherbecken als auch durch die Temperaturmessung der mittleren Fugen belegt. Die Durchlässigkeit in diesen Fugenbereichen ist auf das komplizierte Einbringen des Brunnenschaums zwischen den Bauteilen der vorderen und hinteren Reihe zurückzuführen. Die Bauteilabstände waren zu gering, um hier den Schaum wirklich hohlraumfrei einsprühen zu können. Zudem kann Sickerwasser durch Unterströmung der RC-Bauteile im Fundament hinter die Dichtung gelangt sein. Ursache hierfür ist die Ausbildung einer Aufkantung des Streifenfundaments im Bauzwischenzustand. Eine Beeinflussung des Untersuchungsabschnitts durch den Sickerwasserübertritt aus dem Nachbarabschnitt mit Betonmörtel ist nicht auszuschließen. Möglich ist dies im Anschlussbereich der abgrenzenden Tonschotts an der Innendichtung.

Alternativ sollte die Einspannung der der Betonbauteile so erfolgen, dass nach dem Stellen und Sichern der RC-Bauteile beidseitig ausbetoniert wird. So kann ein evtl. Unterströmen der Bauteile unterbunden werden. Desweiteren wird empfohlen die Elemente der 1. und 2. Reihe versetzt zu stellen, damit sich Bauteilabstände innerhalb einer Reihe von mindestens 30 cm ergeben (s. Abb. 167). So kann der Brunnenschaum hohlraumfrei in den Spalt zwischen vorderen und hinteren Bauteil eingebracht werden.

- **Innendichtung mit Betonmörtel**

Wie auch der benachbarte Untersuchungsabschnitt mit doppelt gestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum reagiert dieser Abschnitt mit Betonmörtel deutlich auf Wasserstandsänderungen im Speicherbecken. Dabei sind die Pegelstände beider Abschnitte in etwa gleich, was eine gegenseitige Beeinflussung durch den Sickerwasserübertritt wahrscheinlich macht. Undichtigkeiten konnten zudem in den außenliegenden Fugen nachgewiesen werden. Wie auch bei der Oberflächendichtung mit Betonmörtel kann eine unzureichende Verbindung zwischen Betonmörtel und Altbeton des RC-Bauteils die Ursache dieser Undichtigkeiten sein. Eine Unterströmung im Fundamentbereich konnte zwar über das GESO-System nicht direkt festgestellt werden; ist aber nicht auszuschließen.

Alternativ soll auch hier auf die bereits beschriebene Herstellung des Fundaments verwiesen werden. Auch empfiehlt es sich bei der Herstellung der Fugendichtungen auf eine weichere fließfähige (oder besser: selbstverdichtende) Konsistenz des Frischbetons zurückzugreifen, um so eine hohlraumfreies Einbringen bzw. eine optimale Verdichtungsarbeit zu ermöglichen.

- **Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen**

Die Ausführung der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen kann durchaus als dicht bewertet werden. Die Pegelstände reagieren erst deutlich zeitverzögert und sehr diffus auf die Wasserstandsänderungen im Speicherbecken. Das hier auftretende Sickerwasser kann somit nur aus einem Sickerwasserübertritt aus dem Nachbarabschnitt resultieren. Allerdings zeigen die ansteigenden Tendenzen der Temperaturentwicklung an der mittleren Fuge einen Sickerwasserzutritt an. Dieser beeinflusst aber offensichtlich nicht den Pegelverlauf. Die Sickerwassermenge ist also sehr gering oder resultiert nicht aus einer undichten Fuge, sondern hat einen anderen Ursprung. Eine Klärung dieses Problems konnte bisher nicht erfolgen.

## 9 Resümee und Ausblick

Nach dem im Projekt erzielten Erkenntnisstand spricht alles dafür, RC-Betonelemente zur Stabilisierung von Deichen einzusetzen. Die im Großversuch eingesetzten Deckenplatten aus dem industriellen Wohnungsbau (Plattenbauten) haben sich bestens bewährt. Die Verwendung von Innenwandelementen verspricht ähnliche Ergebnisse und kann das Spektrum einsetzbarer Elementesortimente und somit die Wiederverwendungsquote weiter erhöhen. Diese Betonbauteile können unaufgearbeitet im Deichinneren eingesetzt werden. Nennenswert ist, dass der Einsatz der Betonelemente im Deichbau in allen drei entwickelten Einsatzvarianten zu einer wesentlichen höheren Dauerhaftigkeit der Bauwerke führt. Dies ist das Resultat aus der Verhinderung bzw. Verminderung der Durchsickerung des Deiches aufgrund der Dichtungsschichten aus Betonelementen. Wühltiere wie Maulwurf, Wanderratte, Kaninchen, Bisam und Biber haben zudem keine Chance, den Deichkörper direkt zu schädigen. Der Bau von Gängen endet spätestens an der Betonwand. Insofern dient die Betondichtwand als konstruktives Sicherungsmittel gegen Wühltierbefall. Die Standsicherheit der entwickelten Deichbauvarianten und Überlaufstrecken ist gewährleistet.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der wesentlich geringeren Flächeninanspruchnahme der entwickelten Deichbauvarianten um bis fast 30 %. Dies ist v.a. aus Sicht des Grundeigentums relevant. In der Regel grenzen Deiche wasser- wie luftseitig am Grundeigentum Dritter.

Aufgrund des geringeren Volumens des Erdkörpers durch den Einsatz der Betonelemente werden beim Deichbau zudem rd. 28 % Bodenmaterialmengen eingespart. Bei den entwickelten Überlaufstrecken ergeben sich noch größere Einsparungseffekte: der Flächenverbrauch wird zu mehr als 76 % im Vergleich zur Böschungsneigung 1:10 reduziert, die Bodenmaterialmengen verringern sich um knapp 40 %. Dies führt sowohl zu einem Kostenvorteil als auch zu einem ökologischen Vorteil infolge des geringeren Transportvolumens, der verringerten LKW-Fahrten, des verminderten Verbrauchs an natürlichen Rohstoffen etc.

Die entwickelten Deichbauvarianten bieten demnach eine Erfolg versprechende, neue technische und technologische Lösung.

Besonders Erfolg versprechend ist der Einsatz der RC-Bauteile als Oberflächendichtung. Diese Variante eignet sich sowohl für den Neubau von Deichen als auch für Ertüchtigungsmaßnahmen. Hier überzeugen die technischen, ökonomischen und ökologischen Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Deichbauvarianten. Als Fugendichtstoff empfiehlt sich vor allem der Einsatz von natürlichem verdichtetem Ton (alternativ Bentonitpackungen) oder das Ausbetonieren der Fugen. Diese Materialien sind auch bei relativ großen Fugenabständen einsetzbar, wenn für das Verlegen der Bauteile Hebebänder eingesetzt werden. Bei sehr enger Bauteillagerung kann auch Brunnenschaum eingesetzt werden. Dies ist nur möglich, wenn die vorhandenen Tragösen der Deckenplatten nachnutzbar sind oder neue Anschlagpunkte an der Bauteiloberseite bspw. über Dübel geschaffen werden. So können auch die Bauteile der Oberflächendichtung dicht an dicht verlegt werden.

Die Innendichtung aus RC-Betonbauteilen hat sich aus technischer und ökonomischer Hinsicht als geeignet erwiesen. Dabei sind die im Großversuch getesteten Fugendichtungssysteme und –stoffe, doppelt gestellte RC-Bauteile plus Brunnenschaum, Betonmörtel, Orbit.Flex-Profile, unter der Berücksichtigung einiger weniger Modifikationen durchaus einsetzbar. Diese Systemanpassungen sollten jedoch zumindest noch einmal im Labormaßstab bzw. im Großversuch überprüft werden. Im Kontext der ökologischen Parameter wird jedoch der Neubau eines Deiches mit Innendichtung aus RC-Bauteilen nicht empfohlen, da insbesondere für die Herstellung des Streifenfundamentes die energetischen Aufwendungen und daraus resultierenden Emissionen klima- und umweltschädlicher Stoffe sehr hoch sind. Sinnvoller erscheinen Deichertüchtigungen mittels RC-Betonbauteilen, insofern dabei die Herstellung des Fundaments entfällt. Die Variante Innendichtung mit RC-Betonbauteile für die Ertüchtigung sollte in Fortsetzung des Projektes näher geprüft werden, da gerade hier sehr aufwendige und kostenintensive Verfahren zur Installation von Spundwänden und ähnlichen Systemen Stand der Technik sind. Der Einsatz von RC-Bauteilen kann hier deutlich zu Kostenersparnis und Ressourcenschonung wie auch Umweltentlastung beitragen. Das Potenzial dieser Einsatzvariante ist hier bei Weitem noch nicht ausgeschöpft und bedarf einer fortgesetzten Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Im Vergleich der entwickelten Überlaufstrecke der Variante 3.1 mit einer kompletten Böschungssicherung aus RC-Bauteilen mit herkömmlichen Ausführungsvarianten sind fast alle Erwartungen erfüllt worden. So ist durch den Einsatz der Betonelemente ein verbesserter Erosionsschutz der Deichoberfläche bei der Überströmung des Deiches gegeben. Überdacht werden muss hier jedoch die Sicherung des landseitigen Böschungsfußes mit der Ausbildung eines Tosbereiches. Auch hier besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf sowie die praktische Überprüfung der entwickelten Problemlösung im Labormaßstab als auch im Großversuch. Aufgrund der nicht gegebenen Frostbeständigkeit der RC-Betonbauteile wird der Auftrag von einem oberflächigem Schutzsystem empfohlen.

Für die Fortführung der Entwicklungsarbeit zur Deichertüchtigung mittels Innendichtung, der Ausbildung des Tosbereiches der Überlaufstrecke sowie der Modifikationen der Fugendichtungssysteme bietet sich eine weitere Nutzung des bereits vorhandenen Versuchsdeichkörpers im Tagebau Welzow-Süd an.

In der Fortführung des Gedankens der Wieder- und Weiterverwendung von RC-Betonbauteilen auf Basis der in diesem Projekt erzielten Ergebnisse zeigen sich zudem weitere Einsatzmöglichkeiten der gebrauchten Betonelemente:

- bei Rekultivierungsmaßnahmen der Tagebaurestflächen,
- zur notwendigen Verlegung, Umgestaltung und Wiederherstellung von natürlichen Wasserläufen und Kanälen sowie
- der oberirdischen Wasserhaltung des Grubenwassers,
- als kostengünstige Herstellung von Wasserreservoirien z. B. für Löschwasser oder als Absetzbecken für die Grubenwasserreinigung und –aufbereitung,
- in Schutzwällen und Dämmen bspw. für den Straßen- und Wegebau,

- in Lärmschutzdämmen,
- zur Sicherung und Abdichtung und somit rutschsicheren Herstellung von Böschungssystemen durch die Unterbringung der Durchfeuchtung in steilen Böschungslagen,
- zur Herstellung von Uferbefestigungen von Gräben, Kanälen und Fließsen sowie der Errichtung von Wasserbauwerken zur Entwässerung großer Wohn- und Gewerbeflächen u. a. m.

Das Potenzial der „Platte“ ist also bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. Aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit, ihrer bautechnischen Eigenschaften und schlussendlich ihrer standardisierten Geometrie und Statik lassen sich die aus dem Rückbau industrieller Wohnbausubstanz gewonnenen Elemente nicht nur im Deichbau flexibel einsetzen. Mit diesem Produktrecycling werden Werte erhalten, Ressourcen geschont, die Umwelt entlastet und letztlich auch Kosten gespart; und das alles in nicht unerheblichen Maßen. Sollte das nicht das Ziel sein?





## Abkürzungsverzeichnis

Ab	Abbruch	Gew.-%	Gewichtsprozent
Abb.	Abbildung	ggf.	gegebenenfalls
Abs.	Absatz	GTD	Geosynthetische Tondichtungsbahn
Abschn.	Abschnitt	H	Höhe
ADK	Autodrehkran	HD	Homogener Deich
AK	Arbeitskraft	Hrsg.	Herausgeber
allg.	allgemein	HWS	Hochwasserschutz
Auf.	Aufbereitung	i.d.R.	in der Regel
Ausl.	Auslastung	i.M.	im Mittel
AW	Außenwand	ID	Innendichtung
B	Breite	IK	Investitionskosten
BE	Betonelement	inkl.	inklusive
BE	Baustelleneinrichtung	IW	Innenwand
BHW	Bemessungshochwasser	JK	Jahreskosten
BK	Baukosten	K	Kosten
bspw.	beispielsweise	k.A.	keine Angaben
bzgl.	bezüglich	KEA	Kumulierter Energie-Aufwand
BZS	Bauzustandsstufe	KFAKP	Kapitalwiedergewinnungsfaktor
bzw.	beziehungsweise	KG	Kellergeschoss
ca.	circa	L	Länge
CSM	cutter-soil-mixing	LF	Lastfall
D	Dicke	lfdm.	laufender Meter
d.h.	dass heißt	li.	links
De	Demontage	LK	laufende Kosten
DFAKR	Diskontierungsfaktor	LKW	Lastkraftwagen
DG	Dachgeschoss	LS	Lehrstuhl
Di	Dichtung	lt.	laut
DP	Deckenplatte	Ma.-%	Masseprozent
DP	Datenpunkt	max.	maximal
Dr	Dränkörper	mi.	mittig
DVW	Deichverteidigungsweg	min.	minimal
E	Energieaufwand	min	Minute
einschl.	einschließlich	Mio.	Millionen
entspr.	entsprechend / entspricht	MIP	mixed-in-place
et.al.	et alterae (und andere)	Mrd.	Milliarden
etc.	et cetera	MW	Mittelwasser
FG	Fachgruppe	n.e.	nicht erfüllt/ermittelt
FKZ	Fahrzeugkran	Nr.	Nummer
FMI	Fräs-Misch-Injektion	o.a.	oben angeführt

o.ä.	oder ähnliche	TDK	Turmdrehkran
o.g.	oben genannt	Trapo	Transport
OFD	Oberflächendichtung	U	Untergrund
OK	Oberkante	UK	Unterkante
p.a.	per anno (pro Jahr)	ÜL	Überlaufstrecke
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	v.a.	vor allem
PKBW	Projektkostenbarwert	Var.	Variante
RC	Recycling	vgl.	vergleiche
RC-BE	Recyclingbetonelement	Vol.-%	Volumenprozent
rd.	rund	W	Untergrundabdichtung
re.	rechts	WBS	Wohnbauserie
s.	siehe	WE	Wohneinheit
SMW	soil-mixing-wall	z.B.	zum Beispiel
St	Stützkörper	z.T.	zum Teil
Tab.	Tabelle		

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 :	Entwicklung des Leerstandes in Ost- im Vergleich zu Westdeutschland .....	10
Abb. 2 :	Einsatz der Stadtumbau Mittel (Bundesfinanzhilfen) von 2002-2007 in den unterschiedlichen Programmbereichen.....	11
Abb. 3 :	Wohnungsleerstand in den Stadtumbaukommunen nach Stadt- und Gemeindetyp .....	12
Abb. 4 :	Wohnungsleerstand in den Stadtumbaukommunen 2005 nach Gebietstypen .....	13
Abb. 5 :	Bewertung der Wohnungsnachfrage in den Stadtumbaukommunen (bis 2017) .....	13
Abb. 6 :	Hochwasserabflüsse am Pegel Würzburg, Main.....	18
Abb. 7 :	Deichbruch während des Hochwassers an Elbe und Mulde 2002 (li.);Schäden durch ausgelaufenes Heizöl (re.).....	19
Abb. 8 :	Kommunen im Stadtumbau-Ost-Programm (li.); Einzugsgebiet der Elbe (Ausschnitt; re.)	21
Abb. 9 :	Flussdeicharten .....	24
Abb. 10 :	Begriffe bei Deichen an Fließgewässern.....	24
Abb. 11 :	Begriffe bei Deichen an Fließgewässern.....	27
Abb. 12 :	Homogener Deich.....	29
Abb. 13 :	2-Zonen-Deich .....	29
Abb. 14 :	3-Zonen-Deich .....	30
Abb. 15 :	Regelprofil für Sanierungen der Elbdeiche in Sachsen-Anhalt .....	30
Abb. 16 :	Regelprofil Rheindeich in Nordrhein-Westfalen .....	30
Abb. 17 :	Möglichkeiten von Entwässerungseinrichtungen bei Flussdeichen .....	31
Abb. 18 :	Einteilung von Dichtungssystemen nach Querschnittslage .....	32
Abb. 19 :	Wasserseitige Oberflächendichtung.....	32
Abb. 20 :	Vollkommene Innendichtung .....	32
Abb. 21 :	Unvollkommene Oberflächendichtung .....	33
Abb. 22 :	Ausführungsvergleich - Deich und Überlaufstrecke .....	35
Abb. 23 :	Deichquerschnitt mit mineralischer Oberflächendichtung .....	38
Abb. 24 :	Oberflächendichtung aus geosynthetischer Tondichtungsbahn .....	39
Abb. 25 :	Einbinden einer geosynthetischen Tondichtungsbahn (TDB) in den Untergrund .....	39
Abb. 26 :	Einbau einer Spundwand (kleines Bild: „Schloss“) .....	40
Abb. 27 :	MIP-Gerät (li.); Grabenfräse (FMI-Verfahren) (re.).....	41
Abb. 28 :	Altdeichertüchtigung mittels Oberflächendichtung .....	44
Abb. 29 :	Altdeichertüchtigung mittels Innendichtung.....	45
Abb. 30 :	Nachträglich eingebaute vollkommene Innendichtung.....	45
Abb. 31 :	Mineralische Oberflächendichtung mit Dichtungssporn und daran angeschlossener unvollkommener Untergrundabdichtung (Tauchwand) .....	46
Abb. 32 :	Aufhöhung eines Deiches (um $\Delta H$ ) durch Einbau einer landseitigen Stützwand ohne Verbreiterung des Deichlagers.....	47
Abb. 33 :	Aufhöhung eines Deiches (um $\Delta H$ ) mit Verbreiterung des Deichlagers, Abflachen der Böschungen und Einbau einer landseitigen Berme .....	47
Abb. 34 :	Aufhöhung eines Deiches (um $\Delta H$ ) mit Integration einer Oberflächendichtung .....	47

---

Abb. 35 : Aufhöhung eines Deiches durch wasserseitige Spundwand und darauf aufgesetzter Mauer .....	48
Abb. 36 : Deckenplatte 20015 aus WBS 70/11 (li.); Innenwand 50500 aus WBS 70/11 (re.).....	52
Abb. 37 : Vergleich der projektierten mit den ermittelten Betondruckfestigkeiten von Deckenplatten und Innenwänden (WBS 70: Betonalter zwischen 14 und 23 Jahren, P2: Betonalter zwischen 21 und 27 Jahren).....	56
Abb. 38 : Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen an einem Wohnhaus .	57
Abb. 39 : Ermittelte Karbonatisierungstiefe an 14 Spannbetondecken und 9 Innenwänden der Typenserie P2 .....	64
Abb. 40 : Ermittelte Karbonatisierungstiefe an 26 Spannbetondecken und 13 Innenwänden der WBS 70.....	64
Abb. 41 : Korrelation von Permeabilität zu Dichte und Porosität.....	66
Abb. 42 : Prüfkörper und Versuchsanordnung der Untersuchungen zum Säurewiderstand.....	69
Abb. 43 : Ermittelte Trockenmasse der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Kurzzeitprüfung).....	71
Abb. 44 : Ermittelte durchschnittliche Trockenmasseänderung der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Kurzzeitprüfung) .....	71
Abb. 45 : Ermittelte Trockenmasse der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Langzeitprüfung) .....	72
Abb. 46 : Ermittelte durchschnittliche Trockenmasseänderung der Prüfkörper zum Säurewiderstand (Langzeitprüfung) .....	72
Abb. 47 : Geschnittene Prüfkörper (li.), Auskristallisationen am Prüfkörper (re.).....	73
Abb. 48 : Grenzwerte für Sulfat und Chlorid nach unterschiedlichen Regelungen, sowie Messwerte eigener Proben .....	78
Abb. 49 : Grenzwerte für Chrom gesamt, Vanadium und Zink nach unterschiedlichen Regelungen, sowie Messwerte eigener Proben .....	78
Abb. 50 : Konstruktive Ausbildung – Betonelemente als Oberflächendichtung im Deichbau (Variante 1).....	82
Abb. 51 : Darstellung des Bauablaufes für die Herstellung einer Oberflächendichtung in Arbeitsschritten .....	83
Abb. 52 : Lagerung von Betonelementen .....	83
Abb. 53 : Einsatz einer Traverse zum Anschlag der Betonbauteile .....	84
Abb. 54 : Konstruktive Ausbildung - Betonelemente als Innendichtung im Deichbau (Variante 2)....	85
Abb. 55 : Darstellung des Bauablaufes für die Herstellung einer Innendichtung in Arbeitsschritten .	86
Abb. 56 : Konstruktive Ausbildung - Betonelemente Überlaufstrecken im Deichbau (Variante 3.1 und 3.2).....	88
Abb. 57 : Prinzipskizzen der Oberflächen- und Innendichtung.....	89
Abb. 58 : Ausgebaute Innenwandbauteile und Deckenplatten eines WBS 70 – Wohnblocks .....	90
Abb. 59 : Schematische Darstellung möglicher Fugenausführungen.....	91
Abb. 60 : Sickerlinie für ein Bemessungshochwasserstand (BHW) – LF 2 .....	97
Abb. 61 : Sickerlinie bei fallendem Wasserspiegel.....	98
Abb. 62 : Berechnete Sickerlinie des homogenen Deichs - LF 2 (BHW) .....	100
Abb. 63 : Berechnete Sickerlinie des homogenen Deichs - LF 3 (sinkender Wasserspiegel) .....	100

---

Abb. 64 : Berechnete Sickerlinie des homogenen Deichs ohne Filter – LF 2 .....	101
Abb. 65 : Standsicherheitsberechnung homogener Deich, LF 2, wasserseitige Böschung .....	101
Abb. 66 : Standsicherheitsberechnung homogener Deich, LF 2, landseitige Böschung.....	102
Abb. 67 : Standsicherheitsberechnung homogener Deich, LF 3, wasserseitige Böschung .....	102
Abb. 68 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Oberflächendichtung - LF 2 (BHW) .....	103
Abb. 69 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Oberflächendichtung - LF 3 (sinkender Wasserspiegel).....	103
Abb. 70 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Oberflächendichtung, LF 2, wasserseitige Böschung.....	104
Abb. 71 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Oberflächendichtung, LF 3, wasserseitige Böschung.....	104
Abb. 72 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Innendichtung - LF 2 (BHW).....	105
Abb. 73 : Berechnete Sickerlinie des Deichs mit Innendichtung - LF 3 (sinkender Wasserspiegel)	105
Abb. 74 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Innendichtung, LF 2, wasserseitige Böschung...	106
Abb. 75 : Standsicherheitsberechnung Deich mit Innendichtung, LF 3, wasserseitige Böschung...	106
Abb. 76 : Berechnete Sickerlinie der Überlaufstrecke - LF 2 (BHW).....	107
Abb. 77 : Standsicherheitsberechnung Überlaufstrecke, LF 3, Volleinstau.....	107
Abb. 78 : Variante 1: Oberflächendichtung aus Betonfertigteilen.....	115
Abb. 79 : Variante 2: Innendichtung aus Betonfertigteilen.....	115
Abb. 80 : Variante 3: Überlaufstrecke aus Betonfertigteilen.....	116
Abb. 81 : Variante I/II: Homogener Deich mit Böschungsneigung 1:3.....	116
Abb. 82 : Variante IIIa: Homogene Überlaufstrecke mit land- und wasserseitiger Böschungsneigung 1:10 (Darstellung geschnitten).....	117
Abb. 83 : Variante IIIb: Homogene Überlaufstrecke mit einer landseitigen Böschungsneigung von 1:10 und einer wasserseitigen Böschungsneigung von 1:3 (Darstellung geschnitten).....	117
Abb. 84 : Variante 0: Homogener Deich mit Böschungsneigung 1:2 .....	117
Abb. 85 : Orbit-Flex.B - Lichtgraues PVC-Profil (18cm breit) mit flexiblem Mittelteil.....	122
Abb. 86 : Grabenwand mit DERNOTON® -Fertigmischung als Kerndichtung für Erdstaudämme ..	124
Abb. 87 : Baukosten und Ersparnispotenzial für Deich mit Oberflächen- bzw. Innendichtung mit RC- Bauteilen.....	131
Abb. 88 : Baukosten und Ersparnispotenzial für die Überlaufstrecke mit RC-Bauteilen gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig 1:3).....	131
Abb. 89 : Baukosten und Ersparnispotenzial für die Überlaufstrecke mit RC-Bauteilen gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (1:10).....	131
Abb. 90 : Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR.....	133
Abb. 91 : DiskontierungsFAKtor für eine gleichförmige jährliche Zahlungsreihe DFAKR.....	133
Abb. 92 : Gegenüberstellung der Baukosten verschiedener Deichbauvarianten mit Angabe des Einsparpotenzials .....	140
Abb. 93 : Gegenüberstellung der Baukosten von Überlaufstrecken in verschiedenen Ausführungsvarianten mit Angabe des Einsparpotenzials.....	141

---

Abb. 94 : Vergleich der Energieaufwendungen für den Transport und die stoffliche Aufbereitung der rückgebauten Bauteile.....	148
Abb. 95 : Vergleich der Energieaufwendungen für den Deich mit Oberflächendichtung aus RC-Bauteilen und der homogenen Ausführung.....	154
Abb. 96 : Energetischer Break-even-point der Transportentfernung für die RC-Bauteile der Oberflächendichtung .....	155
Abb. 97 : Anteile der Teilprozesse am Energieaufwand für die Herstellung der Oberflächendichtung .....	155
Abb. 98 : Vergleich der Energieaufwendungen für den Deich mit Innendichtung aus RC-Bauteilen und der homogenen Ausführung.....	156
Abb. 99 : Energetischer Break-even-point der Transportentfernung für die RC-Bauteile der Innendichtung .....	156
Abb. 100 : Anteile der Teilprozesse am Energieaufwand für die Herstellung der Innendichtung.....	157
Abb. 101 : Vergleich der Energieaufwendungen für Überlaufstrecken aus RC-Bauteilen und homogenen Ausführungsvarianten .....	158
Abb. 102 : Energetischer Break-even-point der Transportentfernung für die RC-Bauteile der Überlaufstrecke .....	158
Abb. 103 : Anteile der Teilprozesse am Energieaufwand für die Herstellung der Oberflächendichtung .....	158
Abb. 104 : Hochrechnung des Energieaufwandes je laufenden Meter (lfdm.) der geprüften Varianten des Fallbeispiels .....	159
Abb. 105 : Hochrechnung des Energieeinsparpotenzials der geprüften Varianten des Fallbeispiels	159
Abb. 106 : Modell des Versuchsdeichkörpers .....	162
Abb. 107 : Standort des Versuchsdeichkörpers am Rand des Tagebau Welzow-Süd (Vattenfall Europe AG).....	163
Abb. 108 : Lageskizze des Versuchsdeichkörpers einschl. der Baustelleneinrichtung (grau).....	163
Abb. 109 : Schnittdarstellung der Variante 0: Homogener Deich .....	166
Abb. 110 : Schnittdarstellung der Variante 1 – Oberflächendichtung .....	167
Abb. 111 : Ausführung der Oberflächendichtung und Fugenabdichtungen .....	167
Abb. 112 : Schnittdarstellung der Variante 2 – Innendichtung (einwandig) .....	168
Abb. 113 : Schnittdarstellung der Variante 2 – Innendichtung (doppelwandig) .....	168
Abb. 114 : Bewehrungsplan des Streifenfundaments .....	169
Abb. 115 : Draufsicht Ausführung der Fugenabdichtungen - Innendichtung .....	169
Abb. 116 : Herstellung der Innendichtung .....	170
Abb. 117 : Schnittdarstellung der Variante 3.1 – Überlaufstrecke komplett aus RC-Betonbauteilen	170
Abb. 118 : Schnittdarstellung der Variante 3.2 – Überlaufstrecke mit Auflastfilter .....	171
Abb. 119 : Schnittdarstellung der Variante 3.3 – Überströmstrecke mit Innendichtung .....	171
Abb. 120 : Herstellung der Tonbasisabdichtung .....	172
Abb. 121 : Rohrleitungsenden zur Befüllung und Entleerung .....	172
Abb. 122 : Streifenfundament der Innendichtung – Var. 2 .....	173
Abb. 123 : Anlieferung der RC-Betonbauteile .....	173

---

Abb. 124 : Halbieren der RC-Betonbauteile .....	174
Abb. 125 : Anschlag der RC-Betonbauteile.....	174
Abb. 126 : Gestellte und gesicherte RC-Bauteile der Innendichtung.....	174
Abb. 127 : Gestelltes und gesichertes RC-Bauteil der Überströmstrecke und fertig ausbetonierter Teil der Innendichtung .....	175
Abb. 128 : Herstellen der Fugendichtung aus Betonmörtel im mittleren Untersuchungsabschnitt der Innendichtung .....	175
Abb. 129 : Herstellen der Fugendichtung der RC-Bauteilfugen mit Orbit.Flex-Profilen (Innendichtung) .....	176
Abb. 130 : Herstellung der doppelwandigen Innendichtung mit Dichtungsband.....	177
Abb. 131 : Fertigstellen des Streifenfundamentes (Innendichtung) .....	177
Abb. 132 : Herstellen der Fugendichtung mit doppeltgestellten RC-Bauteilen und Brunnenschaum (Innendichtung).....	178
Abb. 133 : Entnahmestelle des Erdstoffs für den Versuchsdeichgrundkörper.....	178
Abb. 134 : Einbau des Erdstoffs in den Versuchsdeichgrundkörper.....	179
Abb. 135 : Entnahme der Erdstoffproben mittels Ausstechzylinder für die Dichtebestimmung.....	180
Abb. 136 : Arbeitsschritte zum lagenweisen Einbauen der Tonschotts unter der Oberflächendichtung .....	181
Abb. 137 : Weiterer Einbau des Deichgrundkörpers über den zum Teil fertiggestellten Tonschotts.	182
Abb. 138 : Verlegen der RC-Bauteile der Oberflächendichtung .....	182
Abb. 139 : Fugenabdichtung mit gestampften Ton (Oberflächendichtung) .....	183
Abb. 140 : Fugenabdichtung mit Betonmörtel (Oberflächendichtung).....	183
Abb. 141 : Fugenabdichtung mit Brunnenschaum (Oberflächendichtung) .....	184
Abb. 142 : Fertiggestellte Fugenabdichtung der Oberflächendichtung.....	184
Abb. 143 : Abdeckung der Oberflächendichtung mit Erdstoff und fortgesetzter Aufbau des Deichkörpers .....	184
Abb. 144 : Bereitstellung der RC-Bauteile am Lagerplatz.....	185
Abb. 145 : Verlegen der RC-Bauteile für die Überlaufstrecken Var. 3.1 und 3.2.....	185
Abb. 146 : Schließen der Fugen der Überlaufstrecken mit Betonmörtel.....	186
Abb. 147 : Fertigstellung der Überlaufstrecken .....	186
Abb. 148 : Sicherung der RC-Bauteile auf den Böschungen der Überlaufstrecke Var. 3.2.....	187
Abb. 149 : Freilegen des landseitigen Böschungsfußes und Einbringen der Folienbahn und des Geotextils für die Drainageschicht (Filterprisma) .....	187
Abb. 150 : Verlegen des Geotextils für die Drainageschicht (Filterprisma) .....	188
Abb. 151 : Einbau der Filterkiesschicht und Umschlagen des Geotextils.....	188
Abb. 152 : Abdecken des Filterfußes mit Erdstoff.....	188
Abb. 153 : Erstaussaat des Rasens zur Deichbegrünung .....	189
Abb. 154 : Manuelle Bewässerung mit dem Gartenschlauch (li.) Bewässerungsanlage (re.).....	189
Abb. 155 : Erosionserscheinungen an den Böschungen des Versuchsdeichkörpers .....	189
Abb. 156 : Nachsaat und Beseitigung von Erosionsrinnen auf der Deichoberfläche .....	189
Abb. 157 : Fertiggestellter Versuchsdeichkörper, landseitig .....	190

---

Abb. 158 : Homogener Deich (Vergleichsvariante, Var. 0), landseitig .....	190
Abb. 159 : Oberflächendichtung (Var. 1), landseitig .....	190
Abb. 160 : Innendichtung (Var. 2), landseitig .....	191
Abb. 161 : Überlauf-/Überströmstrecken (Var. 3.1 links, Var. 3.2 rechts und Var. 3.3 mittig), landseitig .....	191
Abb. 162 : Oberflächendichtung / Überlauf-/Überströmstrecken (li.) und Homogener Deich / Oberflächendichtung (re.), wasserseitig.....	191
Abb. 163 : Innendichtung (li.), wasserseitig und gefülltes Speicherbecken (re.), .....	191
Abb. 164 : Versetzte Anordnung der RC-Bauteile der Innendichtung bei einer Fugenabdichtung mit Brunnenschaum .....	193
Abb. 165 : Nachweis de Standsicherheit für den homogenen Untersuchungsabschnitt ohne Belastung .....	194
Abb. 166 : Nachweis de Standsicherheit für den homogenen Untersuchungsabschnitt mit Belastung .....	194
Abb. 167 : Nachweis de Standsicherheit für die Oberflächendichtung Var. 1, landseitig, mit Belastung .....	195
Abb. 168 : Nachweis de Standsicherheit für die Oberflächendichtung Var. 1, wasserseitig, mit Belastung, bei schnell ablaufender Welle .....	195
Abb. 169 : Setzungsmesspunkte der Deichoberfläche .....	196
Abb. 170 : Lage der Messpunkte zur Vermessung der Deichkörperoberfläche .....	197
Abb. 171 : Ausbildung der Stangenextensometer.....	198
Abb. 172 : Stangenextensometer für die Setzungsmessung im Erdkörper .....	198
Abb. 173 : Lage der Extensometer zur Setzungsmessung im Deichinneren.....	199
Abb. 174 : Setzungsmesspunkte der RC-Bauteile der Überlaufstrecken .....	200
Abb. 175 : Setzungsmesspunkte der RC-Bauteile der Innendichtung.....	200
Abb. 176 : Setzungsmesspunkte der RC-Bauteile der Oberflächendichtung .....	200
Abb. 177 : Lage der Messpunkte zur Vermessung der Bauteillage .....	201
Abb. 178 : Lage der Pegelmesspunkte .....	202
Abb. 179 : Pegelabstände im homogenen Deich.....	203
Abb. 180 : Einbau der Pegel und Pegelmesspunkte mit Anschlusskasten (re.).....	203
Abb. 181 : Drucksensor und deren Einbau in einen Pegel der Oberflächendichtung.....	203
Abb. 182 : Aufbau des Temperatursensorkabels .....	204
Abb. 183 : Verlegeskizze für GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Oberflächendichtung, Draufsicht Wasserseite .....	205
Abb. 184 : Verlegtes GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Oberflächendichtung .....	205
Abb. 185 : Verlegeskizze für GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Innendichtung, Ansicht Landseite .....	205
Abb. 186 : Verlegtes GESO-Temperatursensorkabel zur Leckageüberwachung der Innendichtung	206
Abb. 187 : Verlegeskizze für GESO-Temperatursensorkabel zur Ermittlung der Sickerwege unterhalb der Überlaufstrecke Var. 3.1.....	206



---

Abb. 188 : Verlegtes GESO-Temperatursensorkabel unterhalb der Überlaufstrecke Var. 3.1.....	206
Abb. 189 : Prinzipskizze der Temperaturmessung und Ortszuordnung der Datenpunkte.....	207
Abb. 190 : Sensorkabelführung zum Messcontainer; Steuer- und Rechneinheit (re.) .....	207
Abb. 191 : Abflusrinne und Sammler zur Durchflussmessung .....	208
Abb. 192 : Versandete Abflusrinne zur Durchflussmessung .....	208
Abb. 193 : Abdeckung der Abflusrinne zur Durchflussmessung .....	209
Abb. 194 : Niederschlags-, Wind- und Luftdruckmesser am Messcontainer .....	209
Abb. 195 : Infiltrationsmessgerät, Aufbau auf dem Versuchsdeichkörper (Ecke homogener Bereich/Oberflächendichtung).....	210
Abb. 196 : Wasserentnahme, Schlauch- und Rohrleitung zum Befüllen des Speicherbeckens.....	211
Abb. 197 : Ersteinstau auf 1 m Wasserstand (0. Messkampagne) vom 11.06.2007 .....	211
Abb. 198 : Volleinstau auf 2,3 m Wasserstand (1. Messkampagne) vom 07.08.2007 .....	211
Abb. 199 : Entleeren des Speicherbeckens .....	212
Abb. 200 : Eisenschlammablagerungen im Speicherbecken nach dem Entleeren .....	212
Abb. 201 : Setzungen der Oberflächenmesspunkte .....	213
Abb. 202 : Verlauf der Setzungen der Oberflächenmesspunkte.....	214
Abb. 203 : Setzung des Messpunktes E1 .....	214
Abb. 204 : Setzung des Messpunktes E-Ü-3 .....	215
Abb. 205 : Setzung des Messpunktes E-HD-8.....	215
Abb. 206 : Setzung des Messpunktes E-HD-4.....	216
Abb. 207 : Verlauf der Setzungen der Extensometer.....	216
Abb. 208 : Übersicht zu den Setzungen der Stangenextensometer .....	217
Abb. 209 : Verlauf der Setzungen der RC-Bauteile der Innendichtung .....	218
Abb. 210 : Verlauf der Setzungen der RC-Bauteile der Innendichtung .....	219
Abb. 211 : Verlauf der Setzungen der RC-Bauteile der Überlaufstrecke Var. 3.1 am landseitigen Böschungsfuß.....	220
Abb. 212 : Übersicht zu den Setzungen der RC-Bauteile .....	221
Abb. 213 : Pegelverlauf des homogenen Deichabschnitts (Var. 0) über den gesamten Untersuchungszeitraum.....	222
Abb. 214 : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Oberflächendichtung (Var. 1) über den gesamten Untersuchungszeitraum.....	223
Abb. 215 : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Innendichtung (Var. 2) über den gesamten Untersuchungszeitraum.....	223
Abb. 216 : Pegelstände im homogenen Deichabschnitt (manuelle Messungen), Wasserstand 1,3 m .....	224
Abb. 217 : Modellierung der Wasserstände und Durchflussmengen bei einem Wasserstand von 1,3 m .....	224
Abb. 218 : Pegelstände im homogenen Deichabschnitt (manuelle Messungen), Wasserstand 2,3 m .....	225
Abb. 219 : Modellierung der Wasserstände und Durchflussmengen bei einem Wasserstand von 2,3 m .....	225

---

Abb. 220 : Pegelverlauf (Zeitreihe) des homogenen Deiches für die 0. und 1. Messkampagne mit Niederschlagsmessung .....	226
Abb. 221 : Mittelwertvergleich der Durchflussmessungen der 1. Messkampagne .....	227
Abb. 222 : Pegelverlauf des homogenen Deichabschnitts (Var. 0) über die 4. Messkampagne.....	228
Abb. 223 : Entwicklung der Sickerlinie des homogenen Deichabschnitts (Var. 0) über die 4. Messkampagne .....	228
Abb. 224 : Änderung des Pegelverlaufs im homogenen Deichabschnitt (Var. 0) über die 4. Messkampagne .....	229
Abb. 225 : Änderung der Pegelstände im homogenen Deichabschnitt (Var. 0) über die 4. Messkampagne .....	229
Abb. 226 : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Oberflächendichtung (Var. 1) über die 4. Messkampagne .....	230
Abb. 227 : Vergleich der Ausgangspegel der Oberflächendichtung - 4. Messkampagne .....	230
Abb. 228 : Vergleich der Pegelstände der Oberflächendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne .....	231
Abb. 229 : Vergleich der Pegelstandsänderungen der Oberflächendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne .....	231
Abb. 230 : Entwicklung der Pegelstände der Oberflächendichtung mit Ton - 4. Messkampagne .....	232
Abb. 231 : Entwicklung der Pegelstände der Oberflächendichtung mit Beton - 4. Messkampagne..	232
Abb. 232 : Entwicklung der Pegelstände der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum - 4. Messkampagne .....	233
Abb. 233 : Pegelverlauf des Deichabschnitts mit Innendichtung (Var. 2) über die 4. Messkampagne .....	233
Abb. 234 : Vergleich der Ausgangspegel der Innendichtung - 4. Messkampagne .....	234
Abb. 235 : Vergleich der Pegelstände der Innendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne .....	235
Abb. 236 : Vergleich der Pegelstandsänderungen der Oberflächendichtung nach 10 Tagen Volleinstau - 4. Messkampagne .....	235
Abb. 237 : Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit doppeltgestellten RC-Bauteilen plus Brunnenschaum - 4. Messkampagne.....	236
Abb. 238 : Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit Betonmörtel - 4. Messkampagne ..	236
Abb. 239 : Entwicklung der Pegelstände der Innendichtung mit Orbit.Flex-Profilen - 4. Messkampagne .....	237
Abb. 240 : Beginnende Vernässung des homogenen Abschnitts nach 8 Tagen Volleinstau .....	238
Abb. 241 : Fortschreitende Vernässung des homogenen Abschnitts nach 10 Tagen Volleinstau ....	238
Abb. 242 : Beginnende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Oberflächendichtung nach 8 Tagen Volleinstau .....	238
Abb. 243 : Fortschreitende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Oberflächendichtung nach 23 Tagen Volleinstau .....	239
Abb. 244 : Keine Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Innendichtung nach 8 Tagen Volleinstau .....	239

---

Abb. 245 : Beginnende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Innendichtung nach 10 Tagen Volleinstau .....	239
Abb. 246 : Fortschreitende Vernässung des Untersuchungsabschnitts mit Innendichtung nach 23 Tagen Volleinstau .....	240
Abb. 247 : Suchschachtungen im homogenen Bereich und im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung .....	240
Abb. 248 : Suchschachtungen im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung .....	240
Abb. 249 : Ergebnis der Suchschachtungen im homogenen Untersuchungsabschnitt .....	241
Abb. 250 : Ergebnis der Suchschachtungen im Untersuchungsabschnitt mit Oberflächendichtung .....	241
Abb. 251 : Ergebnis der Suchschachtungen im Untersuchungsabschnitt mit Innendichtung .....	242
Abb. 252 : Temperaturdaten der Luft und des Wassers der 2. Messkampagne bis zum 4. Tag nach Einstau .....	243
Abb. 253 : Temperaturdaten der Luft und des Wassers der 3. Messkampagne bis zum 2. Tag nach Einstau .....	243
Abb. 254 : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Oberflächendichtung (2. Messkampagne) .....	244
Abb. 255 : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Oberflächendichtung (3. Messkampagne) .....	245
Abb. 256 : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Ton (2. Messkampagne) .....	245
Abb. 257 : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Ton (3. Messkampagne) .....	246
Abb. 258 : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (2. Messkampagne) .....	247
Abb. 259 : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (2. Messkampagne) .....	247
Abb. 260 : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (3. Messkampagne) .....	248
Abb. 261 : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Ton (3. Messkampagne) .....	248
Abb. 262 : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne) .....	249
Abb. 263 : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne) .....	249
Abb. 264 : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (2. Messkampagne) .....	250
Abb. 265 : Temperaturverläufe und Trends der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (3. Messkampagne) .....	250
Abb. 266 : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (2. Messkampagne) .....	251
Abb. 267 : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (2. Messkampagne) .....	251

---

Abb. 268 : Temperaturverläufe und Trends der unteren Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (3. Messkampagne) .....	252
Abb. 269 : Temperaturverläufe und Trends der oberen Horizontalfuge der Oberflächendichtung mit Brunnenschaum (3. Messkampagne) .....	252
Abb. 270 : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Innendichtung (2. Messkampagne) ...	253
Abb. 271 : Temperaturverläufe und Trends an der Basis der Innendichtung (3. Messkampagne) ...	254
Abb. 272 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne).....	255
Abb. 273 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne).....	255
Abb. 274 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne).....	255
Abb. 275 : Temperaturverläufe und Trends der 4. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (2. Messkampagne).....	256
Abb. 276 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne).....	256
Abb. 277 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne).....	257
Abb. 278 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne).....	257
Abb. 279 : Temperaturverläufe und Trends der 4. Fuge der Innendichtung mit doppelt gestellten RC- Bauteilen plus Brunnenschaum (3. Messkampagne).....	257
Abb. 280 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne) .....	258
Abb. 281 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne) .....	259
Abb. 282 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (2. Messkampagne) .....	259
Abb. 283 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne) .....	260
Abb. 284 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne) .....	260
Abb. 285 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Betonmörtel (3. Messkampagne) .....	260
Abb. 286 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (2. Messkampagne) .....	261
Abb. 287 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (2. Messkampagne) .....	262
Abb. 288 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (2. Messkampagne) .....	262

---

Abb. 289 : Temperaturverläufe und Trends der 1. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (3. Messkampagne) .....	263
Abb. 290 : Temperaturverläufe und Trends der 2. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (3. Messkampagne) .....	263
Abb. 291 : Temperaturverläufe und Trends der 3. Fuge der Innendichtung mit Orbit.Flex (3. Messkampagne) .....	263
Abb. 292 : Überlaufstrecken wasserseitig vor den Überströmversuchen .....	264
Abb. 293 : Überlaufstrecken landseitig .....	264
Abb. 294 : Kronenbereiche der Überlaufstrecken der Var. 3.1, Var. 3.3 und Var. 3.2 (v.l.n.r.) .....	265
Abb. 295 : Sandsackwall für den Überstau von 20 cm der 1. Versuchsreihe .....	265
Abb. 296 : Sandsackwall für den Überstau von 40 cm der 2. Versuchsreihe .....	265
Abb. 297 : Beseitigung des Sandsackwalls für den Überströmversuch an der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 20 cm Überstau .....	266
Abb. 298 : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 20 cm Überstau .....	266
Abb. 299 : Überlaufrinne im Kronenbereich und landseitige Böschung nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 20 cm Überstau .....	266
Abb. 300 : Beseitigung des Sandsackwalls für den Überströmversuch an der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau .....	267
Abb. 301 : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau .....	267
Abb. 302 : Überlaufrinne im Kronenbereich nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau .....	267
Abb. 303 : Zerstörter Tosbereich am landseitigen Böschungsfuß nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.1 mit 40 cm Überstau .....	268
Abb. 304 : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.2 mit 20 cm Überstau .....	269
Abb. 305 : Landseitige Böschung und RC-Bauteilfugen im Kronenbereich nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.2 mit 20 cm Überstau .....	269
Abb. 306 : Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.3 mit 20 cm Überstau .....	270
Abb. 307 : Landseitige Böschung nach Überströmung der Überlaufstrecke Var. 3.3 mit 20 cm Überstau .....	270



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Einordnung von Deichen an Fließgewässern nach Größe und Bedeutung.....	25
Tab. 2:	Objektkategorien und mögliche Zuordnung von Schadenspotentialen sowie Anhaltswerte für das Wiederkehrintervall.....	26
Tab. 3:	Eignung der Betonelementegruppen für den Einsatz im Deichbau .....	49
Tab. 4:	Geometrische Kennwerte der Innenwandelemente der Wohnungsbauserien WBS 70 und P2 .....	50
Tab. 5:	Geometrische Kennwerte der Deckenelemente der Wohnungsbauserien WBS 70 und P2 .....	50
Tab. 6:	Abmaße und Bauteilnummern für den Einsatz im Deichbau geeigneter Deckenplatten und Innenwandplatten des Serientyps P2 und der WBS 70 .....	51
Tab. 7:	Übersicht über die Betonfestigkeitsklassen nach TGL, DIN und DIN EN .....	53
Tab. 8:	Vergleich der projektierten mit den ermittelten Betondruckfestigkeitsklassen an Deckenplatten und Innenwänden vom Gebäudetyp P2 und WBS 70 .....	54
Tab. 9:	Anforderungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-1 an die Betonfestigkeitsklasse und an die Mindestbetondeckung – Bewertung der Altbetonelemente in Vorbereitung ihrer sekundären Einsetzbarkeit [Auszug aus DIN 1045-1: 2001-07; Tab. 3, 4] .....	58
Tab. 10:	Anforderungen aus DIN EN 206-1/DIN 1045-1 an die Betonfestigkeitsklasse eingesetzter Altbetonelemente im Deichbau .....	60
Tab. 11:	Anforderungen an die Mindestbetondeckung zum Schutz gegen Korrosion in Abhängigkeit von der Expositionsklasse [Auszug aus DIN 1045-1, Tab. 4] .....	61
Tab. 12:	Entscheidungstabelle zur Quantilbestimmung für den quantitativen Nachweis.....	62
Tab. 13:	Zusammenstellung der Auswertung der Messergebnisse zur festgestellten/vorhandenen Betondeckung in Abhängigkeit der Expositionsklasse.....	62
Tab. 14:	Gemessene Karbonatisierungstiefen .....	63
Tab. 15:	Ermittelte Ergebnisse zu Durchlässigkeit, Totalen Porosität, Wassereindring- und Karbonatisierungstiefe.....	65
Tab. 16:	Zuordnung der Probekörper und Prüfflüssigkeiten .....	68
Tab. 17:	Umrechnung des Säulenschnelleluates (2:1) in Schütteleluat (10:1) mittels Kappa-Werten zum „groben Vergleich“ für RC-Baustoff .....	77
Tab. 18:	Ermittelte Materialwerte einer Betonprobe aus einer Spannbetondeckenplatten WBS 70.	77
Tab. 19:	Fugenquerschnitte und –volumina bei der Innendichtung .....	92
Tab. 20:	Fugenquerschnitte und –volumina bei der Oberflächendichtung.....	92
Tab. 21:	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Standfestigkeitsberechnung.....	108
Tab. 22:	Deichneubau - Drei-Zonen-Deich im Vergleich zu einem Deich mit Oberflächen- oder Innendichtung aus Betonfertigteilen .....	110
Tab. 23:	Deichsanierung: Sanierung eines Drei-Zonen-Deiches im Vergleich zum Aufbringen einer Oberflächendichtung aus Betonfertigteilen .....	111
Tab. 24:	Deichneubau und -sanierung: Überströmbarer Deich aus Bodenmaterial im Vergleich zu einer Überlaufstrecke aus Betonfertigteilen .....	111

---

Tab. 25:	Geometrie, Masse und die benötigte Anzahl der Betonfertigteile .....	113
Tab. 26:	Anordnung der Betonfertigteile in der jeweiligen Ausführung .....	113
Tab. 27:	Fahrtenanzahl in Abhängigkeit von Element – und Deichvariante .....	114
Tab. 28:	Transportkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Transporte und Entfernung – Angebot T1 und T2 .....	114
Tab. 29:	Notwendige Bodenmengen / Maßnahmen pro laufenden Meter Deich – Deiche mit Betonfertigteilen.....	125
Tab. 30:	Notwendige Bodenmengen / Maßnahmen pro laufenden Meter Deich - Vergleichsdeiche .....	125
Tab. 31:	Zusammenstellung der Kosten für homogenen Deich, Deich mit Oberflächen- und Innendichtung .....	128
Tab. 32:	Zusammenstellung der Kosten für Überlaufstrecken .....	129
Tab. 33:	Zusammenstellung der Baukostensparnis für Deich mit Oberflächen- bzw. Innendichtung gegenüber homogenen Deich (1:3).....	129
Tab. 34:	Zusammenstellung der Baukostensparnis gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (landseitig 1:10 - wasserseitig 1:3).....	130
Tab. 35:	Zusammenstellung der Baukostensparnis gegenüber der homogenen Überlaufstrecke (1:10) .....	130
Tab. 36:	Zusammenstellung der Projektkostenbarwerte (PKBW) bzw. Jahreskosten (JK) - bezogen auf 100 m Deichlänge) .....	135
Tab. 37:	Untergrenzen – Schadenspotenzial und jährliche Schadenserwartung (bezogen auf 100 m Deichlänge).....	137
Tab. 38:	Gegenüberstellung der Baukosten verschiedener Deichbauausführungsvarianten .....	139
Tab. 39:	Gegenüberstellung der Baukosten zur Herstellung von Überlaufstrecken verschiedener Ausführungsvarianten.....	140
Tab. 40:	Variantenvergleich – Flächen- und Bodenverbrauch .....	143
Tab. 41:	Variantenvergleich – Produktivitätsfaktor .....	144
Tab. 42:	Elementanzahl und –masse eines 5-geschossigen Wohngebäudes P2 .....	145
Tab. 43:	Durchschnittlicher Energiebedarf für Teile einer Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle.....	146
Tab. 44:	Gesamtenergiebedarf für die stoffliche Aufbereitung.....	146
Tab. 45:	Gesamtenergiebedarf für den Transport der Bauteile aus dem Rückbau .....	147
Tab. 46:	Kraneinsatzzeit für die Herstellung der Dichtungsschicht für 1m Deichlänge.....	149
Tab. 47:	Kraneinsatzzeit für die Herstellung der Dichtungen für die ermittelten Deichlängen - Fallbeispiel.....	150
Tab. 48:	Energieaufwand für den Kraneinsatz zum Herstellen der Dichtungen - Fallbeispiel .....	150
Tab. 49:	Energieaufwand für den Betoneinsatz zum Herstellen der Dichtungen - Fallbeispiel .....	151
Tab. 50:	Energieaufwand für den Transport der benötigten Erdmassen für die Deichvarianten mit RC-Bauteileinsatz- Fallbeispiel .....	152
Tab. 51:	Energieaufwand für den Transport der benötigten Erdmassen für die Deichvarianten ohne RC-Bauteileinsatz- Fallbeispiel .....	152



---

Tab. 52:	Energieaufwand für den Maschineneinsatz zum Herstellen des Erdkörpers mit RC-Einsatz – Fallbeispiel.....	153
Tab. 53:	Gesamtenergiereduktion für den Boden- bzw. Erdstofftransport durch den RC- Bauteileinsatz .....	153
Tab. 54:	Energieaufwendungen für die Teilprozesse zur Errichtung der Deichbauvarianten mit RC- Bauteileinsatz .....	154
Tab. 55:	Energieaufwendungen für die Teilprozesse zur Errichtung der Deichbauvarianten ohne RC-Bauteileinsatz.....	154
Tab. 56:	Zusammenfassung der Voruntersuchungen zum Bodenmaterial des Deichgrundkörpers .....	165
Tab. 57:	Ergebnisse der Dichtebestimmung des verbauten Erdstoffs aus verschiedenen Lagen..	180
Tab. 58:	Ergebnisse der Dichtebestimmung des verbauten Erdstoffs an den Böschungsschrägen .....	181
Tab. 59:	Einbautiefen der Extensometer .....	197
Tab. 60:	Übersicht der durchgeführten Messkampagnen am Versuchsdeichkörper .....	210



---

## Literaturverzeichnis

Bielitz, Eckehardt: „Anforderungen an die Querschnittsgestaltung“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche - Bemessung, Dichtungssysteme und Unterhaltung“, 22./23. Mai 2007, Fulda.

Forschungs- und Materialprüfanstalt, FG Betontechnologie an der BTUC: Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes nach dem CF und dem CIF-Verfahren, Prüfbericht i. A. Fachgruppe Bauliches Recycling, November 2005

Fuhrig, Manfred; Liebmann, Heike; et.al.: 5 Jahre Stadtumbau Ost – eine Zwischenbilanz, 2. Statusbericht der Bundestransferstelle Stadtumbau Ost, im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Druckhaus Köthen, Berlin, 2007.

Fuhrig, Manfred; Liebmann, Heike; et.al.: Perspektiven für die Innenstadt im Stadtumbau, 3. Statusbericht der Bundestransferstelle Stadtumbau Ost, im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Druckhaus Köthen, Berlin, 2008.

Glaser, Rüdiger: Klimageschichte Mitteleuropas - 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus Verlag, Darmstadt, 2001

Graupner, Andrea; Großwig, Stephan, Daniele Inaudi: Faseroptische Messtechnik im Wasserbau – Erläuterung der Systemkomponenten, Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, April, 2002, Mittweida, Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule Mittweida (FH), Nr.1,2002.

Haselsteiner, Roland: Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, 2007,

Heyer, Dirk, Schmutterer, Christian: Einführung in das DWA-Thema „Dichtungssysteme in Deichen“, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche - Bemessung, Dichtungssysteme und Unterhaltung“, 22./23. Mai 2007, Fulda.

IBeWa Wilsnack & Partner, Freiberg: Bestimmung der Flüssigkeitspermeabilität von Betonelementen, Prüfbericht i. A. Fachgruppe Bauliches Recycling vom Dezember 2004.

IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, in: Klimaänderung 2007, Auswirkungen, Anpassungen, Verwundbarkeiten, deutsche IPCC Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.

Kania, Gregor: Statistische Auswertung der ermittelten Ergebnisse von Untersuchungen zur Betondruckfestigkeit, Karbonatisierungstiefe und Betondeckung an gebrauchten Betonfertigteilen, Studienarbeit, 2006.

Kania, Gregor: Wiederverwendung gebrauchter großformatiger Betonfertigelemente im Deichbau und bei der Deichsanierung, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2008.

- Ludewig, Siegfried: Montagebau, Grundlagen-Wissensspeicher, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1972.
- Lüdtke, Moritz: Kostenuntersuchungen zum Einsatz von Altbetonteilen anhand eines Referenzobjektes, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2007.
- Mettke Angelika, Czyganowski Jan: Kostenabschätzung für den Einsatz rückgebauter Betonelemente (BE) im Deichbau, BTU Cottbus, 2005.
- Mettke, Angelika (Hrsg.): Elementekatalog, Übersicht: Elementesortiment der Typenserie P2, BTU Cottbus, 2003.
- Mettke, Angelika (Hrsg.): Elementekatalog; Übersicht: Elementesortiment des Typs WBS 70 am Beispiel Gebäudetyp WBS 70/11, BTU Cottbus, 2007
- Mettke, Angelika et.al.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil 2: Zielstellung und Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Forschungsvorhabens, BTU Cottbus, 2008.
- Mettke, Angelika: Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Cottbus, Veröffentlichung in 2009.
- Mettke, Angelika: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilebaus, Reihe Umweltwissenschaften, Eberhard Blottner Verlag, 1995.
- Mettke, Angelika; et.al.: Wiederverwendung von Plattenbauteilen in Osteuropa, BTU Cottbus, 2008.
- Mettke, Angelika; Thomas, Cynthia: Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen, Reihe Materialien zur Abfallwirtschaft 1999, Landesamt für Umwelt und Geologie des Freistaates Sachsen (Hrsg.), Lößnitz Druck GmbH, 1999.
- Münchener Rück: Naturkatastrophen 2002. In: topics, Jahresrückblick Naturkatastrophen, Hrsg. Münchener Rückversicherungsgesellschaft München, 2003.
- Nonte, Willi, Seminar „Aktuelles aus dem Abfallrecht“ von SAM, MUFV und LUWG am 12.06.2008 im Schloss Waldhausen, in [http://kd119693.ws0.rz.it-works2.de/sam-rlp.de/fileadmin/pdf/tagung\\_-abfallrecht\\_2008/08\\_nonte.pdf](http://kd119693.ws0.rz.it-works2.de/sam-rlp.de/fileadmin/pdf/tagung_-abfallrecht_2008/08_nonte.pdf) aufgerufen am 26.01.2009.
- Panzer, Juliane, Wollgam, Helrun: Untersuchungsbericht – Untersuchungen zum Säurewiderstand der eingesetzten Bauteile im Deichbau“, FMPA, BTU Cottbus, 2008.
- Pohl, Reinhard: Hydrologische und hydraulische Bemessung von Deichen, Tagungsband DWA-Seminar „Flussdeiche - Bemessung, Dichtungssysteme und Unterhaltung“, 22./23. Mai 2007, Fulda.
- Preißler, Günther; Bollrich, Gerhard: Technische Hydromechanik Band 1, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1985,
- Regel, Ralf: Teilbericht Pegelmesswerte Deichbau; BTU Cottbus, Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau, Okt. 2007

Schmiedehausen, Rudolf: Statische Berechnung Streifenfundament für Innendichtung zum Forschungsprojekt „Pro Altbeton zum Hochwasserschutz, Ingenieurbüro für Tragwerksplanung, im Auftrag der FG Bauliches Recycling, Cottbus, 05.09.2006.

Schneider, Sandra: Rechtliche Instrumente des Hochwasserschutzes in Deutschland, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2005.

Strobl, Theodor; Zunic, Franz: Wasserbau - Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

Thomas, Cynthia; Birle, Andreas: Stoff- und Energieflüsse bei der Aufbereitung mineralischer Bau-reststoffe, Studienarbeit, BTU Cottbus; aktualisiert 2007.

Überströmbare Dämme und Dammscharten. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 90. Landes-anstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004,

Weikinn, Curt: Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitwende bis zum Jahr 1850, Hydrographie Teil 1, Zeitwende bis 1500, Akademie Verlag, Berlin, 1958.

Weinl, Thomas: Dichtungselemente als Mittel der Deichsanierung – Planung, Bemessung und Anwendungsgrenzen, Diplomarbeit, Lehrstuhl Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, 2004,

**Internetquellen:** Die direkten Pfade können der jeweiligen Fußnote entnommen werden.

<http://betonelemente.net>

<http://de.wikipedia.org>

<http://www.dernoton.de>

<http://www.gdw.de>

<http://www.mluv.brandenburg.de>

<http://www.orbitsystem.de>

<http://www.probas.umweltbundesamt.de>

<http://www.stua-lp.nrw.de>

<http://www.umwelt.niedersachsen.de>

<http://www.umweltdaten.de>

<http://www.wuerzburg.de>

<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de>



---

## Normen- und Richtlinienverzeichnis

DIN 1045-1:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion; Änderung durch DIN 1045-1/A1 (2007-05).

DIN 1045-2:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Änderung durch DIN 1045-2/A1 (2004-08), DIN 1045-2/A2 (2006-10).

DIN 1045-3:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung; Vorgesehener Ersatz durch DIN EN 13670 (2007-04); Änderung durch DIN 1045-3/A1 (2004-08), DIN 1045-3/A2 (2007-05).

DIN 1045-4:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen.

DIN 1048-2:1991-06 Teil 2: Prüfverfahren für Beton, Festbeton in Bauwerken und Bauteilen

DIN 15002:1980-04 Hebezeuge, Lastaufnahmeeinrichtungen.

DIN 15003:2000-05 Lastaufnahmeeinrichtungen, Lasten und Kräne, Verfahren, Anwendungsbereiche.

DIN 18121-1:1998-04 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung.

DIN 18121-2:2001-08 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Wassergehalt, Bestimmung durch Schnellverfahren.

DIN 18122-1:1997-07 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ und Ausrollgrenze.

DIN 18122-2:2000-09 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Schrumpfgrenze.

DIN 18123:1996-11 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korngrößenverteilung.

DIN 18124:1997-07 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korndichte, Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer.

DIN 18125-1:1997-08 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Dichte des Bodens, Laborversuche.

DIN 18125-2:1999-08 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldversuche.

DIN 18126:1996-11 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung.

DIN 18127:1997-11 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Proctorversuch .

DIN 18128:2002-12 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Glühverlustes.

DIN 18129:1996-11 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Kalkgehaltsbestimmung.

DIN 18130-1:1998-05 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Laborversuche.

DIN 18130-2:2003-10 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes: Feldversuche.

DIN 18132:1995-12 Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.

DIN 18134:2001-09 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Plattendruckversuch.

DIN 18135:1999-06 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Eindimensionaler Kompressionsversuch.

DIN 18136:2003-11 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Einaxialer Druckversuch.

DIN 18137-1:1990-08 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Scherfestigkeit, Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen.

DIN 18137-2:1990-12 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Scherfestigkeit, Triaxialversuch.

DIN 18137-3:2002-09 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Direkter Scherversuch.

DIN 18196:2006-06 Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

DIN 18299:2006-10 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art.

DIN 18300:2002-12 VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Erdarbeiten.

DIN 18459:2006-10 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Abbruch- und Rückbauarbeiten.

DIN 18915:2002-08 Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten.

DIN 18916:2002-08 Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Pflanzen und Pflanzarbeiten.

DIN 18917:2002-08 Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Rasen und Saatarbeiten.

DIN 18918:2002-08 Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen - Sicherungen durch Ansaaten, Bepflanzungen, Bauweisen mit lebenden und nicht lebenden Stoffen und Bauteilen, kombinierte Bauweisen.

DIN 18919:2002-08 Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Entwicklungs- und Unterhaltungspflege von Grünflächen.

DIN 18920:2002-08 Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen.



---

DIN 19657:1973-09 Sicherungen von Gewässern, Deichen und Küstendünen; Richtlinien.

DIN 19712:1997-11 Flussdeiche.

DIN 4020:1996-04 Beiblatt (September 2003): Geotechnische Untersuchung für bautechnische Zwecke; Anwendungshilfen, Erklärungen.

DIN 4020:1996-04 Geotechnische Untersuchung für bautechnische Zwecke.

DIN 4021:2003-10 Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben.

DIN 4022-1:1987-09 Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels.

DIN 4022-2:1981-03 Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen im Fels (Festgestein).

DIN 4022-3:1982-05 Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von gekernten Proben im Boden (Lockergestein).

DIN 4023:1984-03 Baugrund- und Wasserbohrungen, Zeichnerische Darstellung.

DIN 4093:1987-09 Baugrund; Einpressen in den Untergrund; Planung, Ausführung, Prüfung.

DIN 4095:1990-06 Baugrund; Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung, Bemessung und Ausführung.

DIN EN 12390-8: 2001-02 Prüfung von Festbeton, Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck und ZTV-W LB 215 - Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton, Anlage 1 Eignungsprüfungen Pkt. 3.2 Wassereindringwiderstand, Ausgabe 2004.

DIN EN 12504-1:2000-09 Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 1: Bohrkernproben; Herstellung, Untersuchung und Prüfung unter Druck.

DIN EN 12504-2:2001-12 Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung; Bestimmung der Rückprallzahl.

DIN EN 12715:2000-10 Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen

DIN EN ISO 9000:2005-12 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.

DIN EN ISO 9001:2007-10 Qualitätsmanagementsysteme, Anforderungen.

DIN EN ISO 9004:2000-12 Qualitätsmanagementsysteme, Leitfaden zur Leistungsverbesserung.

BAW MSD (2005): Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD). Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

BAW-Mitteilungsblatt 87 (2004): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, Mitteilungsblatt Nr. 87, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.

BWW (1997): Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlung: Bundesamt für Wasserwirtschaft/Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft/Bundesamt für Raumplanung, EDMZ Bern.

DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“, Fassung 07/2002, Hrsg. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Berlin.

DVWK 10 (1985): Ökonomische Bewertung von Hochwasserschutzwirkungen - Arbeitsmaterialien zum methodischen Vorgehen. DVWK Mitteilungen, Heft 10, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 107 (1981): Empfehlungen für bisamssicheren Ausbau von Gewässern, Deichen und Dämmen. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 107, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 202 (1991): Hochwasserrückhaltebecken. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 202, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 204 (1984): Ökologische Aspekte bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 204, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1984 (unveränderter Nachdruck 1991).

DVWK 209 (1989): Wahl des Bemessungshochwassers - Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 209, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 215 (1990): Dichtungselemente im Wasserbau. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 215, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 221 (1992): Anwendung von Geotextilien im Wasserbau. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 221, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 226 (1993): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei Flussdeichen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 226, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 247 (1997): Bisam, Biber, Nutria - Erkennungsmerkmale und Lebensweisen - Gestaltung und Sicherung gefährdeter Ufer, Deiche und Dämme. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 247, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK 26 (1976): Der Bisam und andere Wühltiere am Wasser. DVWK-Schriften, Heft 26, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DWA-Themen (2005): Dichtungssysteme in Deichen. DWA-Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef.

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

EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, Häfen und Wasserstraßen, (EAU 2004), Hafenbautechnische Gesellschaft und Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 10. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

EB-GEO (2005): Empfehlungen zur "Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungseinlagen aus Geokunststoffen", Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Verlag Ernst und Sohn, Berlin.

FGSV (1991): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB) - Teil B 11.5: Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat. FGSV-Nr. 591/B 11.5, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV (1994 a): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB) - Teil E 2: Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung. FGSV-Nr. 591/E 2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV (1994 b): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB) - Teil E 3: Prüfung der Verdichtung durch Probeverdichtung und Arbeitsanweisung. FGSV-Nr. 591/E 3, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV (2003): Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau, FGSV-Nr. 516, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV (2004): Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen, FGSV-Nr. 551, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

IWD (2000): Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen und Böschungen wasserbaulicher Anlagen. Wasserbaukolloquium 2000, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik, Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 18, Technische Universität Dresden, Dresden.

LAWA (1979): Leitlinien zur Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Stuttgart.

LAWA (1981): Grundzüge der Nutzen-Kosten-Untersuchungen. Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Bremen.

LAWA (2003): Instrumente und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Auftrag der Umweltministerkonferenz.

LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, München.

LfU Baden-Württemberg (2004): Überströmbare Dämme und Dammscharten. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 90. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

LfW Bayern (1979): Grundzüge der Gewässerpflege. Veröffentlichungen des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 10, München.

LfW Bayern (1990): Gehölze auf Deichen. Informationsbericht 5/89, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.

LTV Sachsen (2003): Erstellung von Hochwasser-Schutzkonzepten. Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen.

LWA Nordrhein-Westfalen (1980): Fließgewässer - Richtlinie für naturnahen Ausbau und Unterhaltung. Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

MÜNCHENER RÜCK: NATURKATASTROPHEN (2002): topics, Jahresrückblick Naturkatastrophen, Hrsg. Münchener Rückversicherungsgesellschaft München.

SUL (2002): Hochwasser-Aktionsplan Lippe, Staatliches Umweltamt Lippstadt, Aachen 2002.

TA Siedlungsabfall, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993 (BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993).

TL Geok E-StB (2005): Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaues (TL Geok E-StB 05), FGSV Nr. 549, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln.

UBA (2006): "Was sie übervorsorgenden Hochwasserschutz wissen sollten", Umweltbundesamt 2006, Dessau.

ZTVE-StB 94 (1997): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTVE-StB 94), FGSV-Nr. 599, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1994 / Fassung 1997, Köln.

ZTV-W 205 (1992): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Erdarbeiten (Leistungsbereich 205) Ausgabe 1992. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen.

