

Beiträge zum RuhrGeo-Tag 2023

Umbau des Emscher-Systems -
Geotechnische Erfahrungen

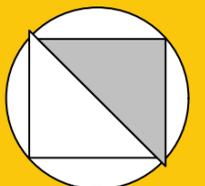
Bochum, 28. März 2023

Heft 76

Schriftenreihe des Lehrstuhls für
Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik

Herausgeber: Torsten Wichtmann

ISSN 2699-1020



Ruhr-Universität Bochum

Schriftenreihe Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik

Heft 76

Herausgeber:

Prof. Dr. -Ing. habil. Torsten Wichtmann

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik

44801 Bochum

Telefon: 0234/ 3226135

Telefax: 0234/ 3214236

Internet: www.bgu.ruhr-uni-bochum.de

ISSN 2699-1020

© 2023 der Herausgeber

Vorwort

Mein viel zu früh verstorbener Vorgänger, Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz (1962 – 2017), war einer der Initiatoren des jährlich stattfindenden RuhrGeo-Tags. Dieser hat sich seit 2010 zu einem anerkannten regionalen Forum für Geotechnik entwickelt. Erstmals seit meiner Übernahme des Lehrstuhls für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik der Ruhr-Universität Bochum im Jahr 2019 findet der RuhrGeo-Tag an der Ruhr-Universität Bochum statt und ich bin meinem Vorgänger dankbar, dass er ein solches Forum mit ins Leben gerufen hat.

2010 hat sich der erste RuhrGeo-Tag einem damals in der Planung stehenden Großprojekt, dem Umbau des Emscher-Systems, gewidmet. Unter dem Titel „Geotechnische Herausforderungen beim Umbau des Emscher-Systems“ wurde über die Planungsgrundlagen, die vorgesehenen Konstruktionsweisen und die Bemessung der Bauwerke sowie die Anforderungen an das Bodenmanagement berichtet. Heute ist das wesentliche Ziel, die Emscher von Abwässern zu befreien, erreicht und wir blicken im Rahmen des RuhrGeo-Tags 2023 unter dem Titel „Umbau des Emscher-Systems – Geotechnische Erfahrungen“ zurück auf die Erkenntnisse, die bei der Umsetzung der Planungen gesammelt wurden.

Einen Schwerpunkt dieses 12. RuhrGeo-Tags und des vorliegenden Tagungsbandes bildet der Bau des Abwasserkanals Emscher im Rohr- und Schildvortrieb sowie die Ausführung der 130 tiefen Schachtbauwerke. Ein weiterer Themenblock konzentriert sich auf die Schwierigkeiten, welche bei der Ausführung des Hochwasserschutzes und der Neuanlage von Deichen zu überwinden waren. Über die Planungs- und Bauzeit haben sich die rechtlichen Regelungen und Anforderungen insbesondere an das Bodenmanagement gewandelt, woraus sich neue Herausforderungen ergaben, die ebenfalls angesprochen werden. Der Ausblick auf den in Teilen noch ausstehenden ökologischen Umbau des Fließgewässers Emscher und seiner Nebenläufe bildet den Abschluss dieses Überblicks über ein für die Region überaus wichtiges und nachhaltiges Generationenprojekt, welches auch national und international sichtbar ist.

Mein Dank gilt den regionalen Wasserwirtschaftsverbänden Emschergenossenschaft und Lippeverband und dort dem Vorstandsmitglied für Wassermanagement und Technik, Dr. Frank Obenaus, sowie Herrn Björn Bauckhage. Herr Dr. Obenaus hat die Idee, diesen RuhrGeo-Tag dem Emscher-Umbau im Rückblick zu widmen, mit Begeisterung aufgegriffen und gemeinsam mit Herrn Bauckhage die Programmgestaltung unterstützt.

Weiterhin gilt mein Dank den Autoren und Vortragenden, die es auf sich genommen haben, neben den täglichen Aufgaben die Beiträge und Präsentationen zu erstellen und so die eigentliche Basis für die Veranstaltung zu schaffen.

Dankbar bin ich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den Kollegen der kooperierenden Lehrstühle, denn nur gemeinsam können wir attraktive Programme für das regionale Geotechnikforum RuhrGeo-Tag formen und so das Erfolgsmodell fortsetzen und weiterentwickeln.

Natürlich wäre eine solche Konferenz ohne das Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter unseres Lehrstuhls sowie der verschiedenen Stellen der Ruhr-Universität Bochum nicht möglich. Hier bedanke ich mich herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Diethard König für die Gestaltung des RuhrGeo-Tags 2023 und bei Frau Doris Traas, die die Organisation, wie bei vielen Veranstaltungen zuvor, zuverlässig leitete, sowie den Doktoranden Maximilian Schoen, Florian Christ und Timon Kayser für das Erstellen des Tagungsbandes und die technische Betreuung. Weiterhin gilt der Dank den zahlreichen studentischen Hilfskräften, die nicht nur am Tag selber zu dessen Gelingen beigetragen haben, sondern bereits im Vorfeld viele Detailarbeiten übernommen haben.

Torsten Wichtmann

Inhaltsverzeichnis

Emscher-Umbau – Erfolgreicher Abschluss eines Generationenprojekts	1
THEMENBLOCK I: Vortrieb und Spezialtiefbau.....	5
Abwasserkanal Emscher: Erfahrungen aus Planung und Bau von 50 km Rohrvortrieb – Maximale Vortriebslängen, Paralleleinsatz, Überschnitt und Schmierung, Online- Vortriebsüberwachung	7
Abwasserkanal Emscher BA40 - 20 km erfolgreicher Schildvortrieb im Herzen des Ruhrgebiets mit einer der kleinsten TVM der Welt.....	19
130 Schächte für den Emscherkanal – Spezialtiefbau seriell?	33
THEMENBLOCK II: Deiche.....	55
Emscher-Deiche – Ertüchtigung eines gewachsenen Hochwasserschutzes im urbanen Raum	57
Geotextile Dammbasisbewehrung im Deichbau – Was ist zu beachten?	69
Geotechnische Lösungen für die Herstellung eines Hochwasserschutzdeichs auf stark mächtigen Torfablagerungen	85
THEMENBLOCK III: Bodenmanagement und ökologischer Umbau	105
Bodenmanagement und Bodenschutz beim Emscherumbau	107
Das ökologische Konzept für den Umbau der Emscher: Leitbild, Entwicklungsziele, Maßnahmen, Umsetzung.....	129

Emscher-Umbau – Erfolgreicher Abschluss eines Generationenprojekts

Dr. Frank Obenaus, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Dr. Sven Lyko, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Zusammenfassung

Im Jahre 1992 wurde in einem regionalen Konsens der Umbau des Emscher-Systems beschlossen. Es wurde ein Generationenprojekt mit enormen ingenieurtechnischen Herausforderungen. Weder gab es eine Blaupause noch Referenzprojekte an denen sich die Beteiligten hätten orientieren können. Offene Schmutzwasserläufe wurden entflochten, das Abwasser in Kanälen gefasst und den neu errichteten Kläranlagen zugeleitet. Heute sind die Gewässer im Revier abwasserfrei. Sie werden nun sukzessive ökologisch verbessert und für alle erlebbar. Mit dem fristgerechten Erreichen der Abwasserfreiheit Ende 2021 endete die Ära der Flusskläranlagen und das Revier hat heute eines der modernsten Abwassersysteme Europas. Eine international anerkannte meisterhafte Pionierleistung, auf die alle Beteiligten zurecht stolz sein können.

1. Einleitung

„Für Planung und Bauausführung des [Emscher-Umbaus] sind die Besonderheiten des Baugrundes, bedingt durch 150 Jahre industrielle Nutzung, eine besondere Herausforderung.“ Mit diesen Worten umriss Dr. Emanuel Grün in seinem Beitrag zum RuhrGeo-Tag 2010 die Schwere der Aufgabe. Es galt, ein gesamtes Flusssystem in einem der am dichtesten besiedelten Ballungsräume Europas neu zu planen, zu bauen und sukzessive in Betrieb zu setzen. Aus dem alten wasserwirtschaftlichen Emscher-System mit offenen Schmutzwasserläufen und Flusskläranlagen wurde ein neues Abwassersystem mit unterirdischen Abwassersammlern, Großpumpwerken und Regionalkläranlagen. Der Blick auf die Zeitachse des Emscher-Umbau mit ausgewählten Meilensteinen lässt erahnen, welch ein Kraftakt hinter dem erfolgreichen Abschluss des Generationenprojekts steht (Abbildung 1).

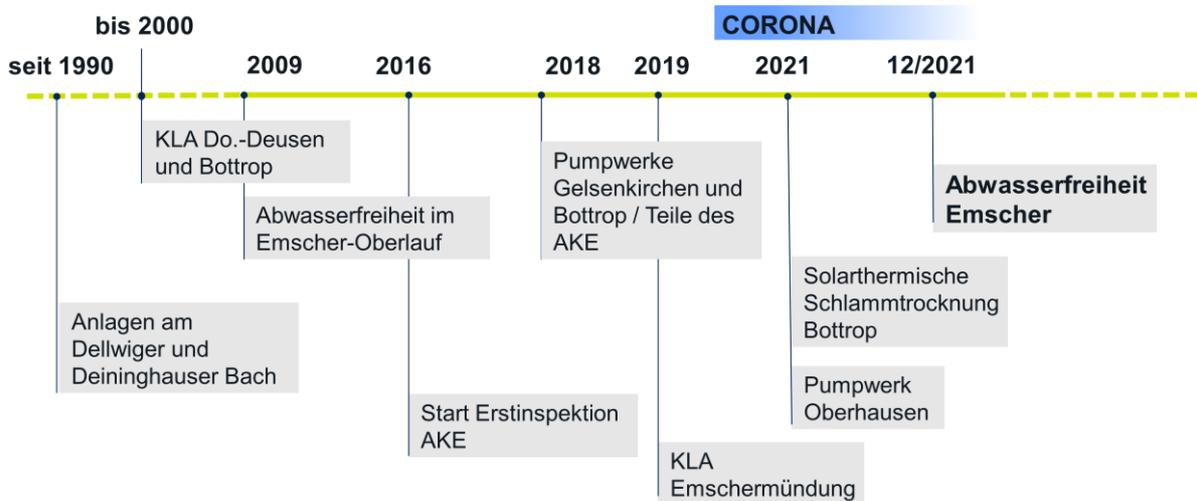


Abbildung 1: Zeitachse und ausgewählte Meilensteine der Umsetzung des Emscher-Umbaus

2. Bau der ingenieurtechnischen Hauptkomponenten

Kläranlagen, Pumpwerke und Abwasserkanäle bilden die wesentlichen Bausteine der neuen Abwasserinfrastruktur. Damit flossen die finanziellen Mittel des Emscher-Umbaus – etwa 5,8 Mrd. Euro – im Wesentlichen in technische Anlagen und in unterirdische Infrastruktur. Ein Fakt, der von Anfang an im projektbegleitenden Kommunikationsprozess Beachtung fand. Dadurch gelang es, einen großen Rückhalt für das Projekt in der Bevölkerung von Anfang an sicherzustellen.

2.1 Kläranlagen

Die bereits vorhandenen Kläranlagen in Duisburg, Dinslaken und Bottrop wurden komplett umgebaut. In Dortmund-Deusen wurde eine neue Kläranlage errichtet. Zusammen wird damit das Abwasser von etwa 2,3 Mio. Einwohnern und 1,4 Mio. Einwohnergleichwerten aus Industrie und Gewerbe gereinigt. Die bei der Abwasserreinigung jährlich anfallenden fast 200.000 Tonnen Klärschlamm werden komplett in der eigenen Monoverbrennungsanlage am Standort Bottrop verbrannt und energetisch genutzt. Durch die im Jahr 2021 in Betrieb genommene solarthermische Schlamm-trocknung in Bottrop ist die Entsorgungssicherheit im Emschergebiet langfristig gesichert.

2.2 Abwasserkanäle und Regenwasserbehandlungsanlagen

Das kommunale Abwasser wird heute nicht mehr in die Emscher und ihre Nebenläufe eingeleitet. Es wird an den vielen, alten Einleitstellen der Kommunen aufgenommen und in unterirdischen Abwasserkanälen gesammelt. Die Durchmesser dieser Kanäle reichen

von 0,80 bis zu 4,50 m, um neben Abwasser auch das klärpflichtige Regenwasser aufnehmen zu können. Sie verlaufen in bis zu 40 m Tiefe. Insgesamt wurden beim Emscher-Umbau 436 km langen Abwasserkanäle verlegt. Neben Kanälen besteht das Kanalsystem aus großen, meist unterirdischen Regenwasserbehandlungsanlagen. Im neuen Emschersystem wird bei Regen ein Teil des Wassers in insgesamt 630.000 m³ großen Regenwasserbehandlungsanlagen vorgereinigt. Das verästelte System der Nebenläufe wird über einen Hauptsammler verbunden: die neue Hauptschlagader des Reviers. Der etwa 50 km lange Abwasserkanal Emscher („AKE“) entlang des Emscher-Hauptlaufs ist eine international beachtete Meisterleistung. Mit seinen bis zu 40 Meter tiefen Schächten und Bauweisen im Rohrvortrieb und Tübbing-Verfahren erforderte sein Bau Spezialkompetenzen des Tunnelbaus- alles andere als gewöhnlich für die Wasserwirtschaft und die beteiligten Akteure bei der Umsetzung. Heute verbindet der AKE die drei großen Kläranlagen in Dortmund-Deusen, Bottrop und Dinslaken.

Neben innovativen Bauweisen erforderten auch die zahlreichen technischen Schwierigkeiten einer dicht besiedelten und mit vielfältiger Infrastruktur ausgestatteten Region kreative Lösungen von den Beteiligten. Gerade die geringe Flächenverfügbarkeit für z.B. notwendige Schachtbauwerke musste in der Trassenfindung für die Kanäle berücksichtigt werden. Dazu kommen Herausforderungen bei Altlasten und Bombenverdachtspunkten, Bahn-, Autobahn- und Gewässerquerungen, kreuzenden Strom- und Gasleitungen, U-Bahntrassen etc. All das galt es in intensiven Abstimmungen zwischen allen Beteiligten zu erörtern und letztlich zu lösen. Der Emscher-Umbau ist ein wahres Gemeinschaftswerk.

2.3 Pumpwerke

Ähnlich wie bei den Kläranlagen wurden auch bereits bestehende Pumpwerke angepasst. Drei neue Großpumpwerke wurden notwendig, um das Abwasser des AKE auf Höhe der Kläranlagen zu heben. Mit Förderhöhen zwischen 18 und 46 m für bis zu 15,3 m³ Schmutzwasser sind Europas größte Schmutzwasserpumpwerke entstanden. Die Pumpwerke in Gelsenkirchen und in Oberhausen wurden mit einer besonders ansprechenden Architektur ausgestattet. Da die Größe der eigentlich unterirdischen Pumpwerke von oben kaum zu erahnen ist, werden die „Kathedralen des neuen Emschersystems so für die Menschen von außen erlebbar.

2.4 Projektmanagement

Um die Umsetzung im Zeit- und Kostenrahmen zu ermöglichen, wurden etwa 350 Teilprojekte entwickelt. Diese wurden von über 60 Projektleitern über 30 Jahre parallel umgesetzt. Über ein Multiprojektmanagement wurden die Arbeiten zusammengefügt und gesteuert. Ein auf Kostenstand 1992 mit 9 Mrd. DM veranschlagtes Gesamtprojekt mit etwa 5,8 Mrd. Euro nach 30 Jahren abzuschließen ist sicher ein großer Erfolg. Umso

mehr, wenn man die etwa 75 % Kostensteigerungen und 5% Mehrwertsteuererhöhung während der Umsetzungsphase berücksichtigt (Stratemeier, 2022).

3. Ausblick

Der Emscher-Umbau ist deutschland- und europaweit das größte wasserwirtschaftliche Projekt der letzten Jahrzehnte. Er stellt aus wasserwirtschaftlicher Sicht die größte Einzelmaßnahme zur Entwicklung der Emscher und seiner Nebenläufe dar. Er ermöglicht den Wandel der einstigen „Köttelbecken“ in ökologisch lebendige Flüsse. Wesentliche Komponenten dieses Wandels werden in den nächsten Jahren immer stärker erlebbar werden. Die Emschergenossenschaft wird hierzu ihren Beitrag leisten und z.B. die Renaturierung von Gewässerabschnitten und ökologische Schwerpunkte im gesamten Emschergebiet konsequent umsetzen. Damit wird für die Bürgerinnen und Bürger die Grundlage geschaffen, um den Meideraum von einst in all seinen Facetten neu zu entdecken. So werden beliebte Fuß- und Radwegeverbindungen geschaffen, um z.B. über blaue Klassenzimmer mit den Gewässern in Kontakt zu kommen: Blaugrünes Leben im Revier.

Literatur

Stratemeier, N. (2022), 'Emscher-Delta: Ingenieurwissenschaftliche Leistungsdaten für die wasserwirtschaftliche Neugestaltung in einer urbanen Region' in 'Emscher 20 21 + - Die neue Emscher kommt – Sozial-ökologischer Umbau einer regionalen Stadtlandschaft', Paetzel, U., Nellen, D., Siedentop, S. (Hrsg.),251-257

THEMENBLOCK I

Vortrieb und Spezialtiefbau

Abwasserkanal Emscher: Erfahrungen aus Planung und Bau von 50 km Rohrvortrieb – Maximale Vortriebslängen, Paralleleinsatz, Überschnitt und Schmierung, Online-Vortriebsüberwachung

Björn Bauckhage, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Christian Korndörfer, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt a. Main

Zusammenfassung

Das größte Einzelprojekt im Rahmen des Emscher-Umbaus ist der Bauabschnitt 30 des Abwasserkanals Emscher von Dortmund bis Bottrop. Neben der Errichtung von 130 Baugruben mit Durchmessern bis 28 Meter, Aushubtiefen bis 40 Meter und dem Ausbau eines Großteils dieser Baugruben zu Betriebsschächten, liegt das Hauptgewerk in der Erstellung von 117 Haltungen mit einer Gesamtlänge von ca. 50 Kilometer Abwasserkanal im Rohrvortriebsverfahren. Bei Innendurchmessern des Hauptkanals von 1,6 – 2,8 Metern werden Vortriebsstrecken von bis zu 1.150 Meter Länge aufgefahren.

Zunächst werden die maßgeblichen Planungselemente zur Festlegung der maximal möglichen Vortriebslängen beschrieben.

Anschließend werden die Erfahrungen aus Bauausführung und Vortriebsüberwachung dargestellt. Bis zu 10 Vortriebsmaschinen waren in diesem Bauabschnitt parallel im Einsatz, so dass bis zu 2.100 Meter Kanal pro Monat sicher hergestellt werden konnten.

1. Projektbeschreibung

Der Bauabschnitt 30 des Abwasserkanals Emscher (AKE) beinhaltet 117 Haltungen mit einer Gesamtlänge von ca. 50 km, die im Rohrvortriebsverfahren zwischen Dortmund und Essen auf einer Strecke von 35 km entlang der Emscher erstellt wurden. Die Gesamtbauzeit beträgt 5 Jahre.

130 Baugruben mit Tiefen von 10 bis 40 m und Durchmessern von 5 bis 24 m wurden überwiegend als Schlitzwandbaugruben mit einer Gesamtfläche von 87.500 m² und 110.000 m³ Beton ausgeführt.

Die anstehende Geologie ist durch den so genannten Emschermergel geprägt. Unter Oberböden, sowie den durch die industrielle Nutzung beeinflussten Auffüllungen, stehen quartäre Sande und Schluffe an, die Mächtigkeiten von bis zu 10 m erreichen kön-

nen (in Abb. 1 oberhalb der beigen Linie dargestellt). Darunter folgt der an seiner Oberfläche zu einem bindigen Lockergestein stark verwitterte Emschermergel. Die Verwitterungszone des Emschermergels reicht vielfach mehrere Meter tief. Darunter nimmt der Verwitterungsgrad ab und die Festigkeit zu (in Abb. 1 unterhalb der grünen Linie dargestellt). Jedoch wechseln sich Horizonte unterschiedlicher Festigkeit auch tiefenunabhängig ab.

Allgemein ist ein Grundwasserstockwerk in den quartären Böden (Schluffe und Sande) und ein weiteres im Mergel vorhanden. Der Wasserstand des oberen Stockwerkes ist weitgehend jahreszeit- und niederschlagsabhängig, wobei sich das Niederschlagswasser auf der nur gering durchlässigen Verwitterungszone des Mergels aufstaut. Im Gegensatz zur Wasserführung in den Porenräumen der quartären Böden erfolgt die Wasserführung im tiefer anstehenden Mergel nahezu ausschließlich über offene Klüfte.

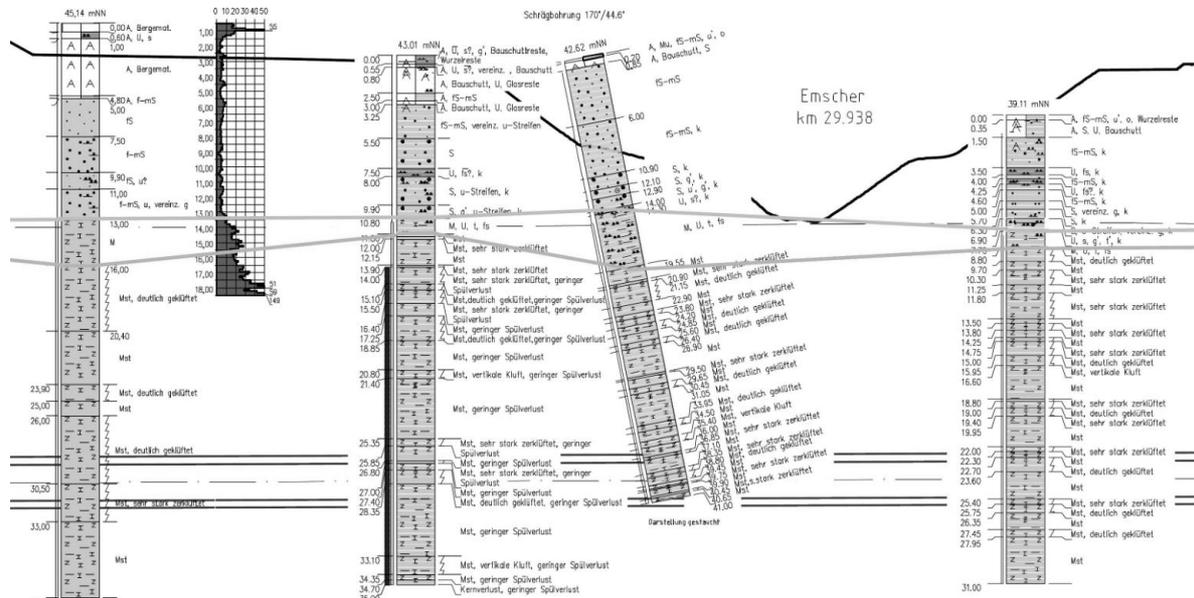


Abbildung 1: Geologischer Längsschnitt einer Haltung mit Unterfahrung der Emscher

2. Planung

Die in den Jahren 2003 bis 2005 aufgestellte Entwurfsplanung für den AKE sah maximale Haltungslängen zwischen zwei Betriebsschächten von 600 Meter vor. Dabei waren die Haltungslängen nicht von der Vortriebstechnik begrenzt, sondern durch den zukünftigen Betrieb des AKE, dessen Überwachung durch ein eigens für dieses Projekt entwickeltes, automatisches Inspektions- und Reinigungssystem erfolgen wird. Dieses System hatte in seiner ursprünglichen Auslegung einen maximal möglichen Arbeitsbereich von 600 Meter. In der Fortentwicklung des Systems zeichnete sich ab, dass auch Kanalhaltungen mit einer Länge von bis zu 1.200 Meter automatisch inspiziert und gereinigt werden können. Durch den Entfall von Betriebsschächten und der damit verbundenen

Verlängerung von Vortriebshaltungen bot sich die Chance, den Investitionsaufwand deutlich zu reduzieren.

Im Zuge der Ausführungsplanung wurde daher untersucht, ob es unter Berücksichtigung der verfügbaren Vortriebstechnik, der aufzubringenden Vortriebskräfte, des anstehenden Baugrunds und der Aspekte der Arbeitssicherheit möglich ist, Haltungen mit einer Länge von bis zu 1.200 Meter aufzufahren.

Die in den Richtlinien der DWA für Rohrvortriebe im Durchmesserbereich DN 1600 – DN 2800 empfohlenen, maximalen Vortriebslängen liegen bei etwa 800 Meter und werden durch die Umplanung deutlich überschritten. Recherchen ergaben, dass die Vortriebslängen bisher ausgeführter Projekte im Nennweitenbereich DN 1600 bis DN 2000 Vortriebslängen von ca. 1.000 Meter aufwiesen. Größere Durchmesser lagen bei Vortriebslängen von ca. 1.200 Meter.

Besonderes Augenmerk wurde auf die aufzubringenden Vortriebskräfte gerichtet, welche in Form von statischen Untersuchungen und Vortriebssimulationen überprüft wurden. Es zeigte sich, dass für die Vortriebsrohre nicht die Belastung aus dem Vortrieb sondern die Belastungen aus den Umgebungsbedingungen (Wasserdruck innen und/oder außen, Überlagerung, Verkehrslasten) maßgebend sind. Für die zu erwartenden Belastungen aus den Presskräften waren die Rohre überdimensioniert. Darüber hinaus wurde baugrundgutachterlich bestätigt, dass bei ausreichender Schmierung des Rohrstranges die Gefahr erhöhter Reibungskräfte beherrschbar ist. Ein wichtiger Aspekt war hierbei die Untersuchung, ob der Rohrstrang auch nach längeren Stillständen (keine Nacht-, Sonn- und Feiertagsarbeit genehmigt) wieder sicher angefahren werden kann. Die Simulationsberechnungen ergaben, etwa alle 100 Meter eine Zwischenpresstation in den Rohrstrang einzubauen. Durch Nutzung dieser Dehnerstationen sollte es jederzeit möglich sein, den Rohrstrang abschnittsweise wieder in Bewegung zu setzen. Außerdem zeigten die Berechnungen, dass im Regelbetrieb Strecken von deutlich über 100 Meter Länge vorgepresst werden können, ohne die Rohre zu überlasten. Als limitierender Faktor wurde die Auslegung des Widerlagers im Startschacht und die Ableitung der Presskräfte in die Verbauwand bewertet.

Aus baugrundtechnischer Sicht waren insbesondere die Konvergenzen beim Vortrieb zu hinterfragen. Während der Rohrvortriebsarbeiten entstehen Konvergenzen in Folge von Spannungsumlagerungen im Ausbruchquerschnitt. Überschreiten diese Konvergenzen das gewählte Ringspaltmaß, kann dies zu einer erheblichen Erhöhung der erforderlichen Vortriebskräfte führen. Um den Vortrieb sicher aufzufahren und steuerbar zu halten, muss das Maß des Ringspalttes ausreichend dimensioniert werden. Eine wesentliche Rolle für die erfolgreiche Durchführung des Rohrvortriebes spielt die Sicherstellung einer permanenten Schmierung des Rohrstrangs.

Die durchgeführten Konvergenzberechnungen ergaben, dass im Hauptbereich des AKE, in dem der Ausbruchquerschnitt unterhalb des Verwitterungshorizontes des Mergels

liegt, aus baugrundtechnischer Sicht Haltungenlängen von bis zu 1.200 Meter ausgeführt werden können.

In den Abschnitten, in denen der Ausbruchquerschnitt in den Übergangsbereichen der quartären Deckschichten zur Kreide oder im Verwitterungsbereich des Mergels liegt, wurden größere Konvergenzen errechnet, die jedoch aufgrund der insgesamt geringen Überdeckung von 10 – 15 Meter als beherrschbar eingestuft wurden. In diesem Bereich wurde der Kanal mit einem Nenndurchmesser DN 1600 projektiert und die maximale Vortriebslänge auf 1.000 Meter begrenzt.

Im Hinblick auf die Arbeitssicherheit ergaben sich aus der DAUB-Richtlinie für die geplanten Vortriebslängen keine wesentlichen Restriktionen. Im Zuge der Ausführungsvorbereitung wurden mit den zuständigen Feuerwehren und der vom Auftraggeber beauftragten Tunnelrettung ein Brandschutz- und Rettungskonzept für die langen Vortriebe aufgestellt.

3. Rohrvortriebsarbeiten

Während der dreijährigen Vortriebszeit waren in der Hauptphase bis zu 10 Tunnelbohrmaschinen (TBM) gleichzeitig im Einsatz. Hier waren 5 TBMs DN 1600 sowie jeweils eine TBM DN 1800, 2200, 2400 und 2800 eingesetzt. Fünf Haltungen DN 2400 mit einer Gesamtlänge von 3.300 Meter wurden mit einem offenen Haubenschild unter Druckluft aufgefahren.

Für die Rohrvortriebe mit den Nennweiten DN 1600 bis DN 2800 wurden rund 11.000 Rohre im eigens für die Baustelle errichteten Rohrwerk in Gelsenkirchen (siehe Abbildung 2) produziert.

Die hohe Anzahl an Parallelvortrieben stellte besonders hohe Anforderungen an die Rohrlogistik, Personalressourcen sowie Entsorgungslogistik. In diesem Zeitraum wurden monatlich ca. 530 Rohre ausgeliefert, 2.100 Meter Rohrvortrieb aufgefahren sowie ca. 57.000 m³ Ausbruchmaterial entsorgt.

Die Rohrvortriebe der Nennweiten DN 1600, DN 1800, DN 2200 sowie DN 2400 wurden mit Hydroschildmaschinen aufgefahren. (siehe Abbildungen 3+4)

Bei den Hydroschildvortrieben wird das in der Abbaukammer gelöste Material mit der Stützflüssigkeit gefördert und auf der Baustelleneinrichtungsfläche in einer Separieranlage von der Suspension getrennt. Aufgrund des hohen Feinkornanteils mussten der Separieranlage Kammerfilterpressen zur Entwässerung des anfallenden Schlammes nachgeschaltet werden.

Die Haltungen der Nennweite DN 2800 wurden mit einer EPB-Maschine aufgefahren. Das Ausbruchmaterial wird in der Abbaukammer zu einem Erdbrei aufbereitet und über eine Schnecke ausgetragen, in Loren gefüllt und mit einer Elektrolokomotive in den Schacht transportiert.

Zur Optimierung der Rohrlogistik im Schachtbereich wurden die eingesetzten Portalcrane mit Vakuumhebetraversen ausgestattet, welche den Rohrtransport ohne den Einsatz von Kugelkopfkranen oder Lastbändern erlaubten. Die Hubvorgänge konnten so beschleunigt und das Anschlagen der Rohre sicherer gestaltet werden (siehe Abbildung 5).

Die beim Vortrieb erzielten Tagesleistungen wurden stark von den angetroffenen geologischen Randbedingungen sowie Arbeitszeit und Schichtmodell beeinflusst. Im Regelfall wurden die Vortriebsarbeiten montags bis samstags im Zeitraum zwischen 6:00 und 22:00 Uhr durchgeführt; Unterfahrungen von Bahngleisen, Autobahnen oder Gewässern wie dem Rhein-Herne-Kanal erfolgten im Durchlaufbetrieb.

Je nach anstehendem Boden und Wasserzulauf aus den Klüften, wurden Tagesleistungen von wenigen Metern bis zu 35 Metern in 16 Stunden erreicht. Bei plastischem Baugrund und hohem Wasserandrang wurde abschnittsweise so viel Schlamm erzeugt, dass die entsprechend hoch aufgeladene Suspension bei jedem Rohrwechsel getauscht werden musste und sich die Vortriebsleistung entsprechend reduzierte.



Abbildung 2: Rohrwerk Gelsenkirchen



Abbildung 3: Startschacht Rohrvortrieb DN 1600



Abbildung 4: Haltung DN 2200

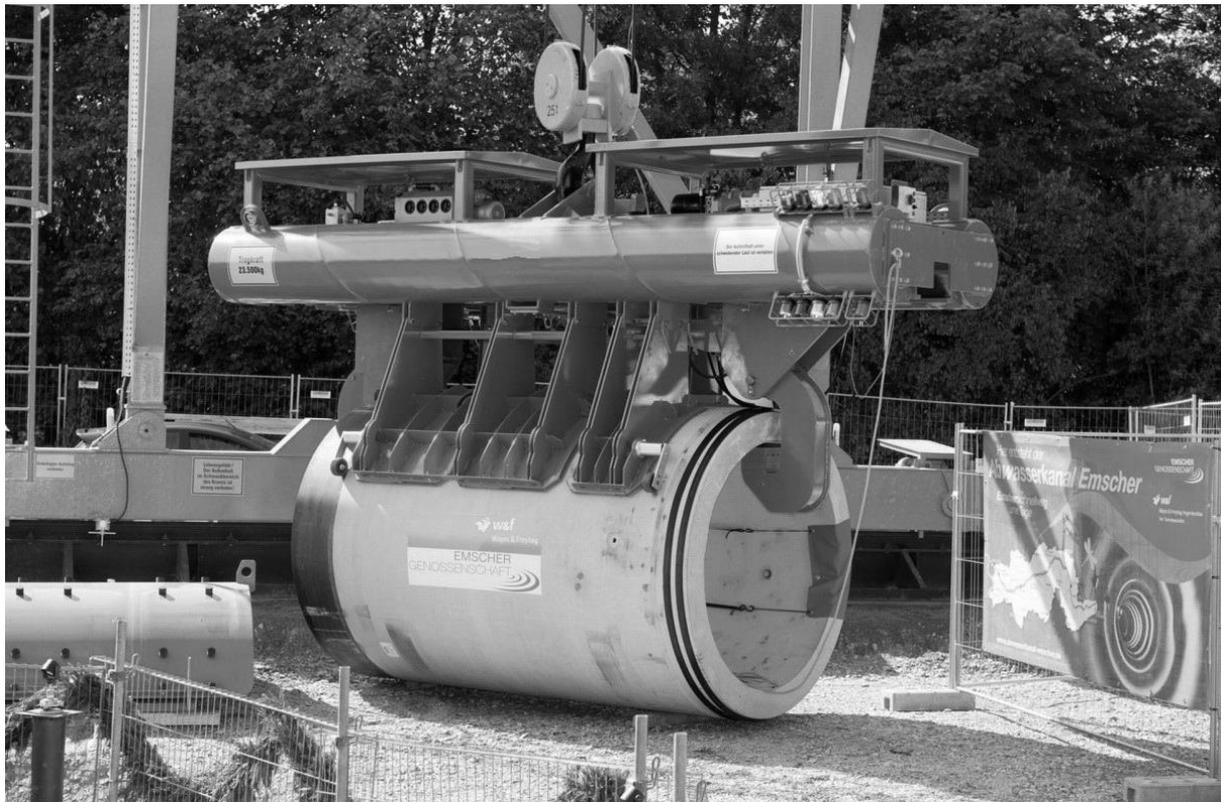


Abbildung 5: Vakuumhebetechnik an den Vortriebsschächten

4. Vortriebslängen

Die Vortriebslängen in den einzelnen Haltungen betragen im Bauabschnitt 30 zwischen <10 Meter und bis zu 1.150 Meter. In der Regel bewegten sie sich zwischen 500 und 700 Meter.

26 Haltungen wurden mit Vortriebslängen >700 Meter, davon 11 Haltungen mit Vortriebslängen >1.000 Meter hergestellt.

5 Haltungen wurden aufgrund der eingangs beschriebenen Planungsüberlegungen bereits mit Vortriebslängen >1.000 Meter ausgeschrieben. 12 weitere Haltungen mit Nenndurchmessern DN 1600, DN 1800 und DN 2200 wurden auf Vorschlag des Auftragnehmers aufgrund von Bonifikationsangeboten für entfallende Schächte sowie entfallende Baustelleneinrichtungen zu 6 langen Haltungen >1.000 Meter zusammengelegt. Die Einreichung von Bonifikationsangeboten war bauvertraglich vorgesehen; hierbei werden die erzielten Einsparungen in gleichen Teilen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer aufgeteilt. Das Instrument der Bonifikation hat sich auf diesem Projekt bewährt, da beide Vertragspartner motiviert waren, das in der Ausführungsphase vorhandene Optimierungspotenzial auszuschöpfen.

5. Anforderungen an die Vermessung

Die Vortriebsvermessung bei Rohrvortriebsbaustellen gehört zu den komplexesten Vermessungsaufgaben im Bauwesen, da zum einen das Tunnelvermessungsnetz im Regelfall über einen beengten Schacht bis in Tiefen von 30 Meter unter Geländeoberkante an das übergeordnete Vermessungsnetz angeschlossen werden muss und zum anderen die eigentliche Vortriebsvermessung im Rohr in einem sich bewegenden Vortriebsnetz erfolgt. Aus diesem Grund sind Kontrollvermessungen in festgelegten Intervallen notwendig, um den Vortrieb mit der geforderten Genauigkeit in den Zielschacht zu steuern. Über diese Kontrollvermessungen hinaus hat es sich bewährt eine Kreismessung ca. 150-200m vor der Zielankunft anzuordnen sowie bei Haltungen >600 Meter Länge auf halber Vortriebsstrecke eine zusätzliche Kreismessung durchzuführen.

Aufgrund der o.g. Maßnahmen lagen die erreichten seitlichen Lageabweichungen bei den meisten Haltungen bei <4cm, bei wenigen Haltungen lagen sie bei max. 12cm. Bei diesen Schächten konnte die große Sollabweichung durch Anpassung des Schachtausbaus ausgeglichen werden. Bei langen Haltungen steigt die Wahrscheinlichkeit einer größeren Abweichung von der Soll-Lage an. Diese Überlegung ist bei der Festlegung der Toleranzen für die Zielankunft in Abhängigkeit vom Schachtdurchmesser zu berücksichtigen.

6. Überschnitt

Die TBMs wurden durchmesserabhängig mit 35mm bis 55mm Überschnitt im Radius konstruiert, um die in dieser Größenordnung erwarteten Konvergenzen sicher beherrschen zu können.

Sofern diese Konvergenzen nicht oder nur teilweise eintreten, kann der Rohrstrang bei Grundwasserandrang aufschwimmen. Allein dieser Effekt kann somit zu einer ungewollten Höhenabweichung in der Endlage des Rohrstranges von 60 bis 75mm führen (siehe Abbildung 6). Zusätzlich beeinflussen weitere Faktoren die Abweichungen in der Höhenlage (Herstellungstoleranzen der Vortriebsrohre, Steuerbewegungen der TBM etc.), die sich zu einer möglichen Höhenabweichung von bis zu 100mm aufsummieren können. Abbildung 7 zeigt diesen Effekt am Beispiel einer Vortriebshaltung DN 2200. Hier wurden bei einem Überschnitt in der Firste von 43,5mm Lageänderungen des Rohrstranges zwischen Vortriebsvermessung und Schlussmessung von bis zu 60mm gemessen. Dieser Effekt muss bei der Entwurfsplanung ebenso Berücksichtigung finden wie bei der vertraglichen Definition der zulässigen Höhentoleranzen.

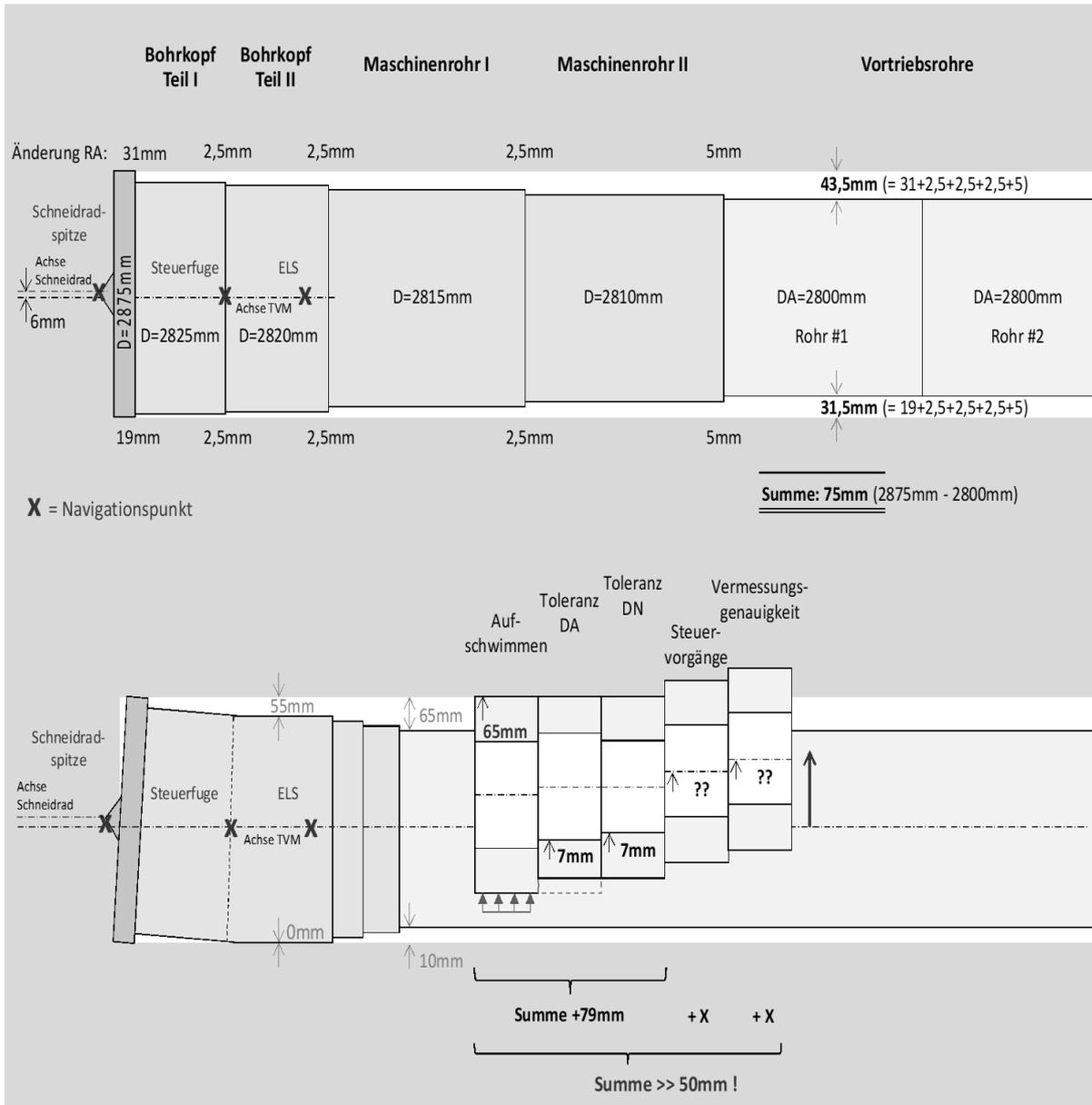


Abbildung 6: Überschnittentwicklung TBM DN 2200

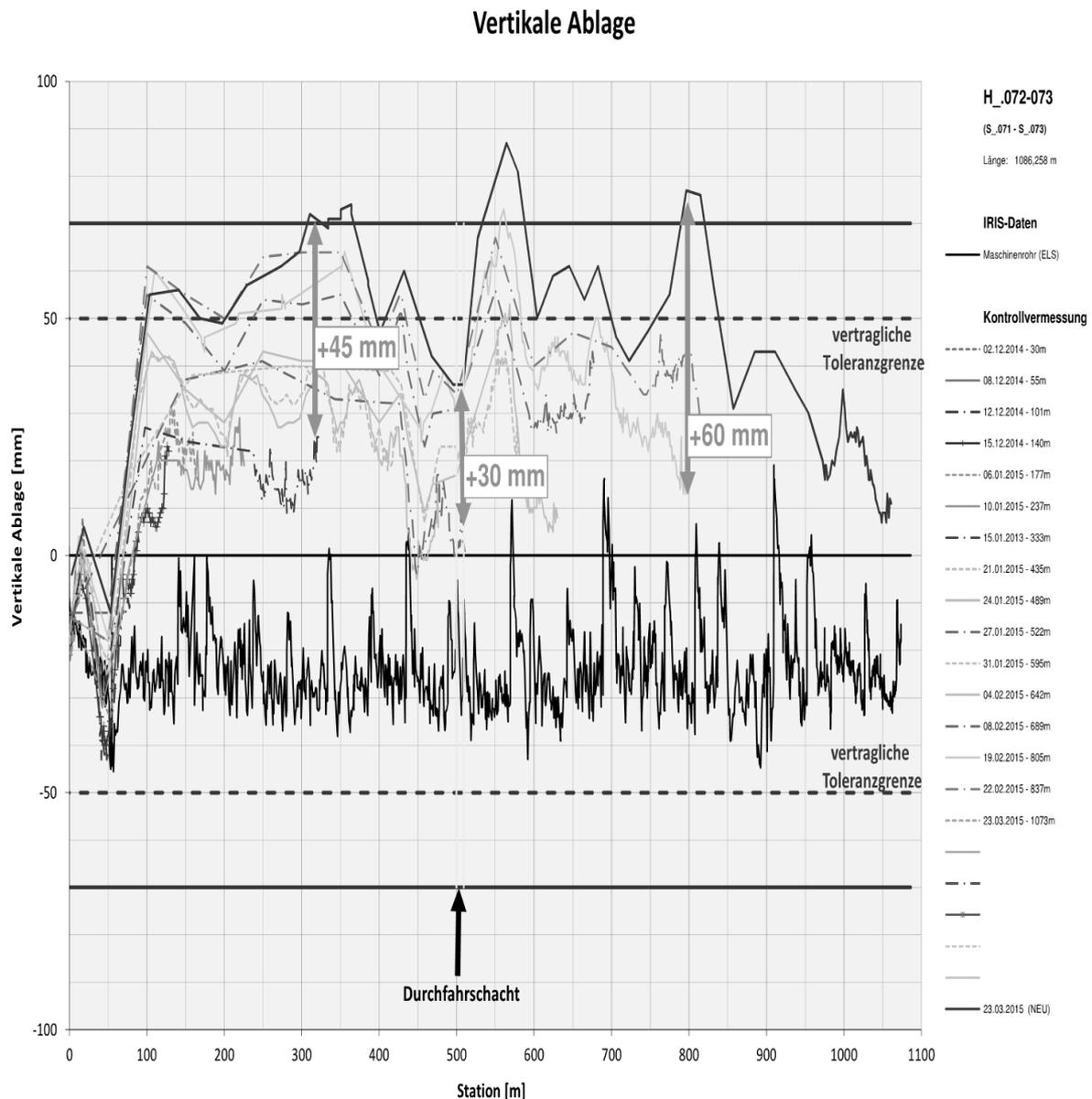


Abbildung 7: Höhenlage Rohrstrang DN 2200

7. Schmierung

Alle Vortriebsmaschinen wurden mit einem automatischen Bentonitschmiersystem ausgestattet. Die in jedem dritten bis vierten Rohr angeordneten Schmierquerschnitte werden volumenkontrolliert angesteuert. Hierdurch konnten die Vortriebskräfte durch Sicherstellung eines durchgehenden Bentonitschmierfilmes reduziert sowie die Nutzung der Dehnerstationen im Vortrieb (siehe Abbildung 8) auch bei langen Haltungen auf ein Minimum beschränkt werden.

Mit der im Projekt gewonnenen Erfahrung konnten die Abstände zwischen den Dehnerstationen von ursprünglich 100m auf bis zu 160m erhöht werden.



Abbildung 8: Dehnerstation DN 2200

8. Online-Vortriebsüberwachung

Das eingesetzte Informationssystem wurde auf allen TBMs einheitlich installiert und ermöglichte neben der üblichen Erfassung der Maschinenparameter, der Hauptpressenkräfte und der Daten des Bentonitschmiersystems eine Online- Überwachung der Vortriebsarbeiten jeder einzelnen TBM mit Analyse- und Auswertungssoftware. Veränderungen -auch im Vergleich der Tunnelbohrmaschinen untereinander- konnten mit diesem Instrument schnell erkannt und ausgewertet werden. So wurde sichergestellt, dass Erfahrungen einer Vortriebsbaustelle zeitnah mit den parallel laufenden Vortrieben ausgetauscht und Optimierungsmöglichkeiten schnell umgesetzt werden konnten.

Darüber hinaus wurden die Rohrvortriebsstrecken mit einem Mess- und Auswertesystem ausgestattet, welches die Vortriebskräfte und die Fugenspaltmaße über mehrere Messfugen an den Vortriebsrohren dokumentierte und auswertete. Zur Vermeidung einer Überbelastung der Vortriebsrohre wurde auf Basis dieser Messwerte die statische Berechnung der Vortriebsrohre unter Berücksichtigung des tatsächlich realisierten Vortriebes für alle Rohrfugen fortgeschrieben.

Die auf der Baustelle aufgezeichneten Daten wurden in Echtzeit visualisiert und im Internet den berechtigten Nutzern zur Verfügung gestellt. Die maximal zulässigen Vortriebskräfte zur Weiterfahrt wurden kontinuierlich ermittelt. Mit dem System konnte im Bedarfsfall eine kontrollierte Nutzung erhöhter Vortriebskräfte ermöglicht werden sowie die kontrollierte Weiterfahrt nach unplanmäßigen Steuerbewegungen messtechnisch begleitet werden.

9. Schlussfolgerung

Mit den aktuellen technischen Möglichkeiten kann nach Ansicht der Verfasser der empfohlene Anwendungsbereich des Rohrvortriebsverfahrens in den Nennweiten DN 1600 bis DN 2800 deutlich auf ca. 1.200 Meter erweitert werden.

Für die Definition der Lagegenauigkeit sind die Baugrundeigenschaften, die geotechnischen Randbedingungen sowie projektspezifische Vorgaben und das vorgesehene Bauverfahren zu berücksichtigen.

Bei der Ausführung der Rohrvortriebsarbeiten gewährleistet eine zeitnahe, vernetzte Überwachung und Auswertung der Vortriebsparameter, der Vortriebspresenkräfte sowie eine automatisierte Schmierung des Rohrstranges die erfolgreiche Herstellung langer Vortriebshaltungen.

Durch den Entfall von Baugruben können neben wirtschaftlichen Einsparungen auch die Auswirkungen auf Mensch und Natur deutlich reduziert werden.

Abwasserkanal Emscher BA40 - 20 km erfolgreicher Schildvortrieb im Herzen des Ruhrgebiets mit einer der kleinsten TVM der Welt

Irina Melzer, PORR GmbH & Co. KGaA, Düsseldorf

Markus Kühnel, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Zusammenfassung

Als einziges Teilstück der Gesamtmaßnahme wurde der Bauabschnitt 40 als doppelröhri-ger Schildvortrieb mit Tübbingausbau realisiert. Der 10 km lange Vortrieb wurde mit zwei Erddruckschilden aufgefah- ren und war in besonderem Maße durch den extrem kleinen Innendurchmesser des Tunnels von 2,60 m und den daraus resultierenden Platzverhältnissen bestimmt. Diese stellten sicherlich die untere Grenze für Tunnelvor-triebe in Tübbingbauweise dar und brachten große logistische und vor allem arbeitssi-cherheitstechnische Herausforderungen für Planung und Ausführung mit sich.

1. Das Projekt Bauabschnitt 40

1.1 Übersicht

Der Bauabschnitt 40 (BA 40) des Abwasserkanals Emscher (AKE) führt von der Stadt- grenze Bottrop-Oberhausen zum Pumpwerk Oberhausen, wo die gesamte Abwasser- menge des Abwasserkanals Emscher von max. 15,3 m³/s aus rund 40 m Tiefe bis zur Geländeoberkante gehoben wird. Auf einer Strecke von rd. 10 km verläuft der BA 40 in Ost-West-Richtung durch das Oberhausener und teilweise auch Bottroper Stadtgebiet. Aufgrund der hohen Abflussmenge wurde der Kanal als Doppelrohrsystem mit einer Nennweite von DN 2600 hergestellt. Im 865 km² großen Einzugsgebiet der Emscher mit rd. 2,2 Mio. Einwohnern erfolgt die Abwasserableitung überwiegend in Mischsystemen. Dem AKE vorgeschaltet sind daher Regenwasserbehandlungsanlagen. In den Abwasser- kanal Emscher wird ausschließlich die klärpflichtige 2Q_t-Menge eingeleitet. Im Normal- betrieb werden beide Rohre beschickt, für den Fall einer notwendigen Reparatur kann der Kanal im BA 40 abschnittsweise einseitig außer Betrieb genommen werden.

Der Bauauftrag für den BA 40 wurde im November 2013 an die ARGE Emscher BA 40 (PORR Bau GmbH & PORR Deutschland GmbH) erteilt. Neben den gesamten Vortriebs- arbeiten auf rd. 2 x 10 km Länge zzgl. einiger kleinerer Anschlusshaltungen waren 14

Schachtbaugruben herzustellen und davon 12 zu Betriebsschächten auszubauen. Im September 2014 wurde mit den Vortriebsarbeiten begonnen, die mit der Einfahrt in die Baugrube des Pumpwerkes Oberhausen im Juni 2017 erfolgreich beendet werden konnten. Mit einer Investitionssumme von 190 Millionen Euro macht der BA 40 etwa ein Fünftel der Gesamtinvestition für den Bau des Abwasserkanals Emscher aus.

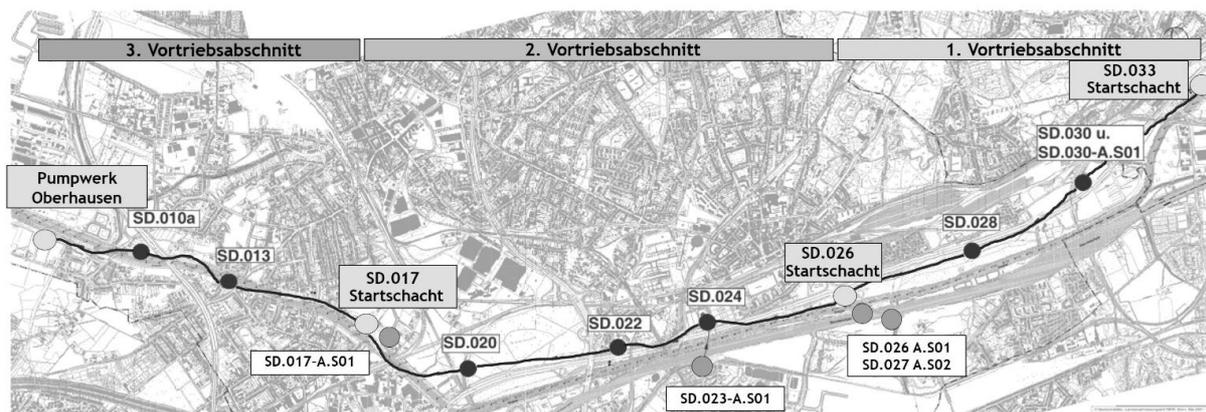


Abbildung 1: Trassierung Bauabschnitt 40

1.2 Baugrundverhältnisse

Nach Auswertung sämtlicher für den vorliegenden Abschnitt zur Verfügung stehenden Unterlagen, Baugrundaufschlüssen und Untersuchungsergebnissen ist der Baugrund im Auffahrbereich sehr unterschiedlich aufgebaut. Zu durchörtern waren tertiäre Sande und Sand-Schluff-Gemische, tertiäre Tonlagen sowie verschiedene Schichten der Kreide (Bottrop-Schichten, Osterfeld-Schichten und Emschermergel) mit und ohne eingelagerte Kalksandsteinbänke. Die Dicke der Kalksandsteinbänke liegt überwiegend im unteren Dezimeterbereich. Die Kalksandsteinbänke sind als Festgestein zu klassifizieren, während der Mergel überwiegend als Halbfestgestein einzustufen ist.

Die Vortriebsarbeiten des BA 40 verlaufen z. T. parallel, z. T. im schleifenden Schnitt unter der Emscher in Tiefen von etwa 25 bis 38 m unter GOK. Es werden überwiegend kretazische Mergel, in die teilweise Mergelsteinbänke bzw. Mergelsande eingeschaltet sind, durchfahren. Die Überdeckung durch die kretazischen Böden beträgt bis zu 20 m. Im westlichen Bereich, in der Haltung HD.013, wurden tertiäre Sande und Schluffe im Vortriebsbereich angetroffen. In diesen Abschnitten verläuft die Kreideoberfläche etwa in Höhe der Sohle des Ausbruchquerschnittes. Im Bereich der Haltung HD.013 wurde darüber hinaus der Concordia-Sprung als geologische Störzone durchfahren.

Es sind mindestens 3 Grundwasserstockwerke vorhanden, die ein relativ einheitliches Druckniveau aufweisen, wobei die gemessenen Grundwasserstände bis zu 30 m über der Kanalsohle liegen.

Die Grundwasserverhältnisse sind im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass in den oberflächennahen quartären Schichten (Sande, Kiessande, Kies) ein weitgehend durchgängig ausgebildeter Aquiferbereich vorliegt und auch in den tertiären Sanden ein einheitlicher Grundwasserstrom zirkuliert. In den übrigen Bereichen liegen vielfach Schichtwasserhorizonte vor, die jedoch hydraulisch mit dem Quartär und den tertiären Sanden in Verbindung stehen. Demzufolge ist auch bei den Kluftwässern im Mergel, in den stärker sandigen Zonen des Mergels und auch bei den Schichtenwässern im Tertiär von einer hydrostatischen Druckhöhe bis zur Grundwasseroberfläche auszugehen. Ist die Grundmatrix des Mergels stärker schluffig und tonig ausgebildet und das Trennflächengefüge (Schicht- und Kluftflächen) nur mäßig ausgebildet, können auch sog. Totwasserbereiche angefahren werden, die jedoch nicht vorhersehbar sind und daher auch bei der Planung und Durchführung der Vortriebsarbeiten nicht in Ansatz gebracht werden können (Erdbaulaboratorium Essen, 2007).

1.3 Randbedingungen der Vortriebsarbeiten

Während üblicherweise Kanäle in offener Bauweise oder im Rohrvortriebsverfahren hergestellt werden, wurde im BA 40 aufgrund der Tiefenlage und der Länge der aufzufahrenden Haltungen in Verbindung mit der örtlichen Geologie entschieden, den Vortrieb mit Tübbingausbau herzustellen. Zwar wurden schon Rohrvortriebe mit größeren Längen realisiert, aber bei der anstehenden Geologie – dem Emschermergel, der in Richtung der Niederrheinischen Tiefebene zunehmend größere Sandanteile aufweist und in größere Tiefenlagen absinkt – bestand in der Planungsphase die Besorgnis, dass in Verbindung mit dem hohen Erddruck, aufgrund der großen Tiefenlage des Kanals und einer über die Haltungslänge entstehenden Mantelreibung ein Rohrvortrieb stecken bleiben würde. Ferner war im westlichen Abschnitt des Projektgebietes eine Störungszone zu durchfahren, der sogenannte Concordia-Sprung. In der Störungszone war bei hohen anstehenden Grundwasserständen (Druckverhältnisse bis 3,5 bar) das Durchörteren von Lockergesteinen bestehend aus Kiesen und Sanden mit wechselnden Schluffanteilen zu beherrschen.

Zur Überwachung der Erstellung der Kanalröhren in Tübbingbauweise wurde ein Online-Überwachungs- und analysesystem eingesetzt. Das System bündelt die während der Vortriebsarbeiten anfallenden Daten der Vortriebsmaschinen, der Tübbingproduktion und der Vermessung in einer zentralen Datenbank. Die Oberflächensetzungen bei den Vortrieben wurden vortriebsbegleitend überwacht und in dem Online-System abgebildet sowie mit Alarmierungsfunktionen bei Grenzwertüberschreitungen an einen ausgewählten Personenkreis versehen (Nagel, F. & Edelhoff, D. & Suding, A. & Machentanz, C., 2015). Die prognostizierten Setzungen an der Geländeoberkante von 2 cm wurden eingehalten, was durch den unterbrechungsfreien Vortrieb als setzungsmindernde Maß-

nahme positiv unterstützt werden konnte. Die Querungen der Infrastruktur an der Geländeoberkante erfolgten somit auf den 2 x 10 km Trasse unproblematisch.

1.4 Änderung des Arbeitssicherheits- und Rettungskonzeptes

Die Planung sah eine Unterteilung der Vortriebsstrecken von jeweils rd. 10 km in drei Vortriebsabschnitte mit maximalen Haltungslängen von 4.200 m vor. D. h. während der Vortriebsarbeiten musste die gesamte Vortriebs-BE zweimal umgesetzt werden. Die Schlitzwände der Betriebsschächte, die sich ca. alle 1.000 bis 1.200 m auf den Vortriebsstrecken befinden, sollten gemäß der Planfeststellung durchfahren werden. Nach Beendigung des Vortriebes in einer Haltung und Umsetzung der Vortriebs-BE sollten die Baugruben dann ausgehoben und als Betriebsschächte mit Stahlbetonsohle und -wänden sowie Gerinnebeton mit Kanalklinkern ausgebaut werden.

Im Zuge der finalen Abstimmungen mit den örtlichen Feuerwehren und den Vertretern für Arbeitssicherheit der Bezirksregierung vor Vortriebsbeginn wurde diese Vorgehensweise aufgrund der sich daraus ergebenden Rettungsweglängen von max. 4.200 m nicht mehr akzeptiert und es wurde eine deutliche Verkürzung der Rettungsweglängen gefordert. Diese zusätzliche und neue Forderung stellte eine besondere Herausforderung für das Projektteam dar, da zu diesem Zeitpunkt die beiden Vortriebsmaschinen bereits in der Fertigung waren und ein Vortriebsstart in absehbarer Zeit bevorstand. Im Ergebnis umfangreicher und unter hohem Zeitdruck geführter Umplanungen wurde eine Lösung gefunden, die von Seiten der Feuerwehren und Arbeitsschützer akzeptiert wurde und von allen Beteiligten auch als baulich umsetzbar angesehen wurden.

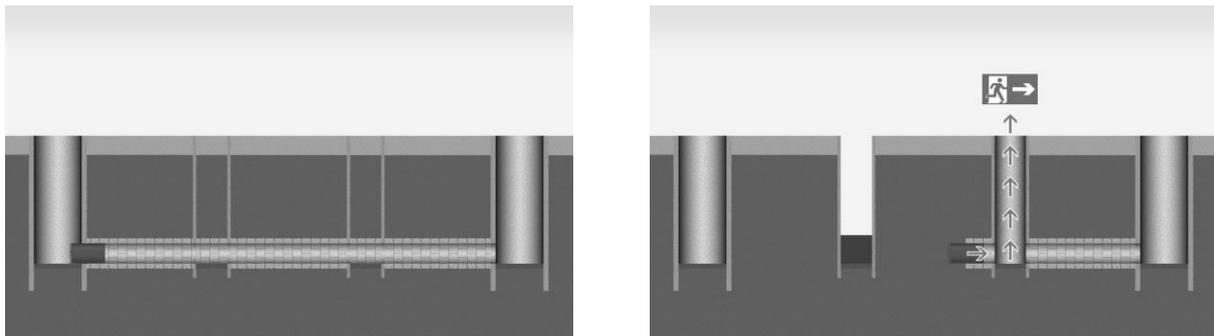


Abbildung 2: links - geplanter Bauablauf, rechts - geänderter Bauablauf

Die Lösung sah vor, dass die Baugruben der Betriebsschächte vor Ankunft der Vortriebe ausgehoben werden, die Stahlbetonsohle gemäß Planung hergestellt wird und die Baugruben wieder mit Aushub- und Flüssigboden bis zu einer Höhe von ca. 5 m über Tübingscheitel verfüllt werden. Anschließend konnten die Vortriebsmaschinen die Baugruben planmäßig durchfahren und wurden nach Durchfahrt der kompletten Vortriebsmaschine inklusive Nachläufer ca. 100 bis 200 m hinter den Baugruben in einer

Parkposition abgestellt. Die Wahl der jeweiligen Parkposition wurde dabei nach dem Grad der Bebauung an der Geländeoberfläche (Autobahn, Bahnlinie, Bebauung, sensible Fernleitungen etc.) und den geologischen Verhältnissen durch den Bauherrn vorgegeben. Danach wurden die Baugruben als sogenannte Rettungsschächte umgebaut, insgesamt sieben Mal bei den gesamten Vortriebsarbeiten. Hierfür wurden die Baugruben wieder ausgehoben und die Tübbingröhren geöffnet.

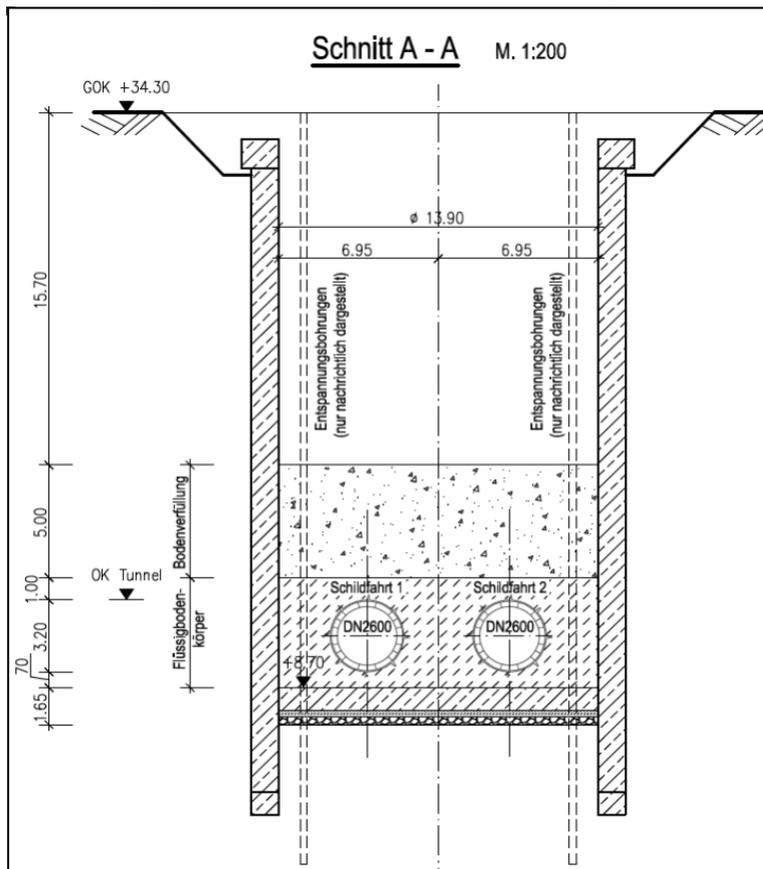


Abbildung 3: Konzeption Durchfahrsschächte

Als Zuwegung in den Schacht wurden ein Aufzug, in dem ein liegender Transport eines Verletzten möglich ist und als Redundanz ein Treppenturm mit 1,25 m Laufbreite und 2,00 m lichter Höhe eingebaut. Erst nach Fertigstellung dieser Umbauarbeiten und Freigabe durch die Feuerwehr konnte der Vortrieb wieder aufgenommen werden. Die Dauer dieser unplanmäßigen Stillstände betrug zwischen 18 und 30 Tagen. Trotz der anfänglichen Sorge der Projektbeteiligten stellte die Wiederanfahrt der Vortriebsmaschinen nach dem Stillstand keine Schwierigkeit dar und erfolgte durchweg reibungslos. Die Gesamtverzögerung aus der Herstellung der Rettungsschächte lag bei rund 6 Monaten.

Im Bauvertrag war gem. Planfeststellung Nachtarbeit ausgeschlossen, als Arbeitszeit stand ein Zeitraum werktags von 6 – 22 Uhr zur Verfügung. Nachdem durch die Forde-

zung zum Bau der Rettungsschächte der Bauablauf erheblich umgestellt werden musste, war es gemeinsames Ziel, die dadurch entstandenen Verzögerungen zumindest teilweise wieder aufzuholen. Hierzu wurden durch die Baufirma mit Unterstützung durch die Em-schergenossenschaft Nachtarbeitsanträge für die Vortriebsarbeiten gestellt. Die Vortriebsarbeiten erfolgten ab Anfang 2016 im Durchlaufbetrieb (7 Tage / 24 Std.) in einem klassischen Dreischichtbetrieb. Mit dieser Erweiterung der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit war die Möglichkeit gegeben, einen Teil der zeitlichen Verzögerungen wieder aufzuholen.

2. Ausführung

2.1 Tübbingdesign

Das Design war geprägt von der späteren Nutzung als Abwasserkanal. Das Ziel war es den Tübbing ohne Öffnungen auf der Innenseite herzustellen, um Ablagerungen in der Betriebsphase zu vermeiden. Die Verbindung der Einzelsteine untereinander erfolgte daher durch ein Dübelsystem in der Ringfuge. In der Längsfuge wurden zur Lageführung Längsstäbe, sogenannte Guiding Rods, eingesetzt. Um trotz fehlender Längsverschraubung ein Aufatmen der Dichtung zu vermeiden, wurde eine Steingeometrie mit schrägen Längsfugen gewählt. Diese Schrägstellung ermöglichte den Erhalt der Vorspannung in den Längsfugen über den Druck der Vortriebspresen.

Im Rahmen der Maschinenkonstruktion stellte sich heraus, dass das Ziel den Tübbing ohne jegliche Öffnungen auf der Innenseite herzustellen nicht zu realisieren war. Aufgrund der kleinen Fläche der Tübbingsteine und im Vergleich dazu hohem Gewicht der Steine konnte der Nachweis der Vakuumplatte des Erektors nicht erbracht werden. Dies hätte möglicherweise zur Folge gehabt, dass der Tübbing sich beim Einbau durch den Ringbaudruck auf der Vakuumplatte verschieben würde. Daher konnte kein Vakuumerektor eingesetzt und es musste auf einen mechanischen Erektor zurückgegriffen werden. In der Innenfläche der Tübbingsteine musste eine Kunststoffhülse für die mechanische Aufnahme einbetoniert werden. Für den Ringbau wurde dann ein Stahlbolzen eingeschraubt, der nach erfolgtem Ringbau wieder ausgeschraubt und wiederverwendet wurde. Die Öffnung wurde bei jedem Stein anschließend mit einer Verschlusskappe versehen.

Für die Regelbereiche wurden die Tübbinge aus hochsäurebeständigem Beton gefertigt. In bestimmten Abschnitten wurde im Bereich der Schächte zusätzlich eine Polymerbetonbeschichtung aufgebracht. Zur Minimierung der abwasserexponierten Oberfläche wurde die Dichtung an der Innenseite angeordnet.

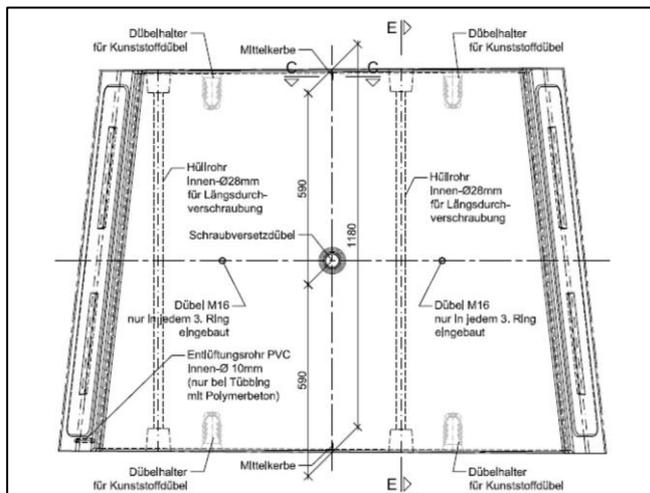


Abbildung 4: durchverspannter Tübbingstein

Zusätzlich wurden jeweils 10 Ringe vor und nach jedem Schacht durchverspannt. Dies sollte verhindern, dass nach dem Ausbruch der Tübbinge im Schacht die im nun geschwächten Bauwerk verbleibenden Ringe sich verschieben bzw. das zulässige Fugenspaltmaß der Längsfuge überschritten wird. Dazu wurden werkseitig zwei durchgehende Hüllrohre in den Tübbingquerschnitt einbetoniert, durch die 15 mm Dicke Ankerstäbe geführt wurden. Diese konnten wiederum mit dem Ankerstab des jeweils letzten Tübbings über eine dort bereits angebrachte Langmutter verbunden werden. So wurde eine Durchverspannung über mehrere Ringe erzielt.

2.2 Vortriebstechnik

2.2.1 Schildvortrieb

Die Tunnel wurden entgegen dem Amtsvorschlag im maschinellen Schildvortrieb mit aktiver Erddruckstützung (EPB) aufgefahren. Der Amtsvorschlag sah aufgrund der Concordia-Störung und dem dort zu erwartenden hohen Wasserandrang einen Schildvortrieb mit Flüssigkeitsstützung vor. Es konnte durch die ausführende Firma jedoch nachgewiesen werden, dass ein EPB-Vortrieb für den größten Teil der Strecke wesentlich effizienter ist und die Störzone auch mit einer Erddruckstützung sicher durchfahren werden kann.

Die gesamte Maschinenteknik war durch die besonders engen Platzverhältnisse geprägt. Daher erfolgte die Konstruktion in enger Zusammenarbeit mit dem TVM-Hersteller, wobei vor allem darauf geachtet wurde, dass trotz der Enge der Zugang sämtlicher für den Betrieb und die Wartung der Anlage notwendigen Punkte gewährleistet ist. Die zwei baugleichen Erddruckmaschinen wiesen eine Schildlänge von rd. 14 m auf. Das weitere technische Equipment der Maschinen war auf jeweils 10 Nachläufern un-

tergebracht. Insgesamt ergab sich, bei einem Gesamtgewicht von ca. 270 Tonnen, eine Maschinenlänge von rund 90 m. Zum Vergleich: Eine EPB-Maschine mit einem Durchmesser von 10 m hat eine Baulänge inkl. Nachläufern von 60 - 70 m.

Die Montage dieser langen Tunnelvortriebsmaschinen stellte eine besondere Herausforderung dar. Der Startschacht mit einem Durchmesser von ca. 22 m hätte lediglich eine schrittweise Anfahrt und Montage der TVM erlaubt. Da aus einem früheren Bauabschnitt die Geologie im Bereich des Startschachtes bekannt war, wurde ein optimiertes Anfahrkonzept vorgeschlagen, um so eine Komplettmontage der Vortriebsanlage zu ermöglichen. Es wurden zwei ca. 85 m lange Anfahrstollen in bergmännischer Bauweise errichtet, die später als Bahnhof für die Züge genutzt werden konnten. Nach Abschluss der Tübbingvortriebe wurden in die Anfahrstollen jeweils 24 Stahlbetonrohre DN 2600 / DA 3200 mit einer Länge von je 3 Metern aus dem Startschacht eingeschoben, um das Tunnelbauwerk zwischen Schacht und Anfahrtopf zu komplettieren. Der verbleibende Ringspalt wurde abschließend verdämmt.



Abbildung 5: Aufbau der Vortriebsmaschinen im Schacht

Der Bauabschnitt 40 wurde vollständig als Zweirohrkanal in paralleler Lage hergestellt. Dabei wurde die Strecke in Tiefenlagen von 25 bis 38 m durch die beiden Schildmaschinen zeitgleich von Osten nach Westen aufgefahren. Der horizontale Abstand zwischen den Maschinen betrug mit 3,10 m nur 1 x DA. In Längsrichtung sind die Maschinen zur Vermeidung wechselseitiger Beeinflussungen in einen Abstand von mindestens 50 m gefahren.

2.2.2 Ringspaltmörtel

Bei diesem Projekt wurde ein 2-Komponenten-Ringspaltmörtel eingesetzt. Die A-Komponente setzte sich aus Wasser, Zement, Steinmehl, Bentonit und Stabilisator zusammen. Als B-Komponente (Beschleuniger) wurde Wasserglas (Betol) verwendet. Der verhältnismäßig kleine Ringspalt erfordert eine geringe Verpressmenge von ca. $1,6 \text{ m}^3$ je Vortrieb. Um ein Entmischen und daraus resultierende Stopfer in der Mörteltransferleitung zu verhindern, musste eine hohe Fließgeschwindigkeit bei möglichst kleinem Querschnitt erzielt werden. Der übliche Druck in der Mörteltransferleistung betrug ca. 10 bar bei einem Durchfluss von etwa 3 m^3 pro Stunde, wobei mit zunehmender Haltungslänge bis zu 4100 m der Druck deutlich anstieg und das installierte System nahezu an seine Leistungsgrenze geriet.

2.2.3 Bewetterung

Die Bewetterung einer TVM erfolgt in der Regel über eine Primärlüftung von außen, wobei Lüfter die Frischluft durch eine Lutte im Tunnel bis zur TVM transportieren. Eine solche Lösung war in der planfestgestellten Ausführungsvariante mit großen Haltungslängen nicht umsetzbar. Um die vorschriftsmäßige Frischluftzufuhr zu gewährleisten, hätte die Lutte den Hauptteil des Tunnelquerschnittes eingenommen.

Folglich fiel beim TVM-Design die Entscheidung, die Luftzufuhr über Kompressoren und eine Druckluftleitung bis zur Maschine zu realisieren. Die erforderlichen Kompressoren verursachten allerdings schon nach kurzer Zeit bedeutende Mehrkosten gegenüber dem geplanten Budget. Zunächst wurden neue Kompressoren mit erhöhter Energieeffizienz installiert. Die Umsetzung der Bauablaufänderung mit kürzeren Haltungslängen ermöglichte schließlich doch eine Bewetterung über eine Primärlüftung. Es konnten spezielle Lüfter aus der Klimatechnik eingesetzt werden, die eine Frischluftzufuhr über eine verhältnismäßig kleine Lutte zur Maschine gewährleisteten. Diese konnten bei jedem Rettungsschachtumbau zum nächsten Schacht umgebaut werden. Außerdem war ein zusätzlicher Einbau von Sekundärlüftern im Nachlauf der Maschine zum Weitertransport der Frischluft auf der TVM notwendig.

2.2.4 Arbeitsbedingungen

Die Arbeitsbedingungen in dem 2,60 m großen Tunnel sind mitunter extrem. Angefangen bei dem Mannschaftswagen, über den Steuerstand, bis hin zu den Arbeiten am Bohrkopf waren alle Arbeitsbereiche durch die beengten Platzverhältnisse bestimmt. Auf der TVM gab es keinen Bereich an dem ein Mitarbeiter aufrecht stehen konnte. Eine Unterbringung eines Mannschaftscontainers, wie es auf anderen Vortriebsmaschinen üblich ist, war ebenfalls nicht möglich.



Abbildung 6: links – Mannschaftswagen; rechts – „Laufsteg“ auf der TVM

Durch das geänderte Rettungskonzept und weitere Maßnahmen konnten zwar die Arbeitssicherheit erhöht und damit die Wahrscheinlichkeit von Arbeitsunfällen minimiert sowie die Rettungswege verkürzt werden, jedoch gab es kaum Möglichkeiten die Arbeitsbedingungen zu verbessern.

2.3 Spezialtiefbau

Neben den beiden Tübbingtunneln, wurden 9 Hauptschächte und 5 Nebenschächte hergestellt. Da planerisch drei Vortriebsabschnitte für die Gesamtstrecke vorgesehen waren, weisen die Startschächte zur Aufnahme der Vortriebslogistik einen Durchmesser von 22 m auf, während die übrigen Hauptschächte mit einem Durchmesser von 12,5 m ausgeführt wurden. Die größte Schachttiefe beträgt dabei 40 m. Der Amtsvorschlag sah vor die Schächte als gestaffelte Bohrpfahlbaugruben auszuführen. Zur Ausführung kam allerdings der Sondervorschlag, die Baugruben mittels Schlitzwänden zu sichern. Dieser brachte technische, terminliche und in diesem Zusammenhang auch monetäre Vorteile. Die Schlitzwände können über die ganze Tiefe ausgehoben werden. Dadurch entfallen die Zweitangriffe, die bei einer gestaffelten Baugrube notwendig sind. Es müssen keine Geräte auf die Zwischenebene gehoben werden, um den unteren Teil des Baugrubenverbau herzustellen. Zudem sind die Aushubmassen deutlich geringer. Die wichtigsten Punkte sind zudem, dass bei der Herstellung des Innenausbaus in einer gestaffelten

Baugrube im oberen Bereich eine zweihäutige Schalung verwendet und der Mehraushub nach Herstellung des Bauwerkes verfüllt werden muss. Bei der Ausführung mit tiefen Schlitzwänden kann gegen die Schlitzwand betoniert werden und die Wiederverfüllung entfällt.

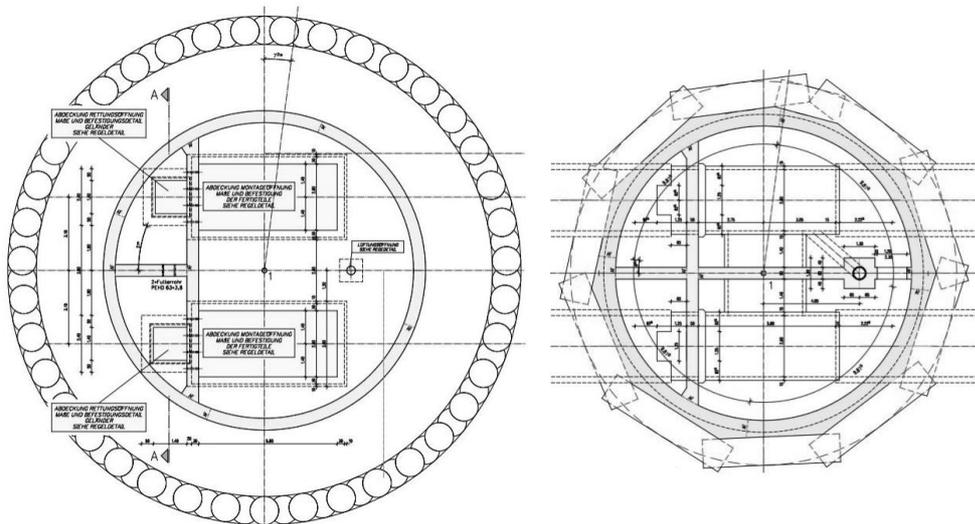


Abbildung 7: links – Draufsicht Bohrpfahlwand; rechts – Sondervorschlag Schlitzwand

3. Schlussfolgerung

Ein Tunnelinnendurchmesser von 2,60 m stellt sicherlich sowohl technisch und physikalisch, als auch hinsichtlich der Arbeitsbedingungen die untere Grenze für Schildvortriebe mit Tübbingausbau dar. Durch die Umstellung des Arbeitssicherheits- und Rettungskonzeptes und durch hohen betrieblichen Aufwand konnte die Arbeitssicherheit der Tunnelarbeiter im Hinblick auf die beengten Platzverhältnisse erhöht werden, dennoch waren die Arbeitsbedingungen auf der TVM extrem.

Die erweiterten Arbeitssicherheitsanforderungen führten allerdings auch zu Bauzeitverzögerungen und Kostensteigerungen. Um eine für alle Projektbeteiligten zufriedenstellende Lösung zu finden, wurden zahlreiche konstruktive Gespräche geführt, sowohl in kleinen Runden als auch großen Besprechungen. In Zusammenarbeit mit den lokalen Behörden und dem Bauherrn konnte ein optimierter Bauablauf entwickelt werden. So wurde beispielsweise der ursprünglich vorgesehene Zweischichtbetrieb durch einen Durchlaufbetrieb in drei Schichten ersetzt. Der Tunnelvortrieb wurde lediglich durch den Bau der Rettungsschächte unterbrochen. Alle notwendigen Genehmigungen wurden von Auftraggeber und Auftragnehmer gemeinschaftlich vorbereitet, entwickelt und er-

wirkt. Auf der Basis einer guten Kooperation konnten optimale Lösungen gefunden werden.

Die Arbeiten am BA40 zeigen, dass trotz unvorhersehbarer Ereignisse eine Durchführung von Großprojekten im Kosten- und Zeitrahmen möglich ist, wenn zwischen allen Projektbeteiligten eine vertrauensvolle und kooperative Zusammenarbeit besteht. Die im Vorfeld sehr sorgfältig durchgeführte Baugrunderkundung war hierfür ein wesentlicher Erfolgsfaktor, da dadurch unliebsame Überraschungen aus dem Baugrund nicht auftraten.

Literatur

Erdbaulaboratorium Essen (2007); 'Abwasserkanal Emscher, Baugrundbeurteilung und geotechnische Beratung zur Ausführungsplanung, Entwurfsabschnitt 10, Geotechnischer Bericht 1 zur Haltung HD.009 bis HD.01'

Kühnel, M. (2017); 'Abwasserkanal Emscher – Durchstich der beiden Tunnelbohrmaschinen im Baubchnitt 40', bbr 9/2017 *Spezial Rohrleitungs- und Kanalsanierung*, S. 28-33

Nagel, F. & Edelhoff, D. & Suding, A. & Machentanz, C. (2015), 'Abwasserkanal Emscher: Online-Überwachung der schildvorgetriebenen Bauabschnitte', Ernst & Sohn Special 2015, *Kanal- und Rohrleitungsbau*, 12-16

Stemplewski, J. (2015); 'Großprojekt Emscher-Umbau: Was haben 400 km unterirdische Abwasserkanäle mit dem Strukturwandel einer ganzen Region zu tun?', Ernst & Sohn Verlag, *Forschung + Praxis: STUVA-Tagung 2015*

Ketteler, R. & Göbl, A. (2015); 'Maschinenteknik, Baustellenlogistik, Bauausführung und Sicherheitstechnik beim parallelen Auffahren kleiner Tunnel (DN2600) im Schildvortrieb', Ernst & Sohn Verlag, *Forschung + Praxis: STUVA-Tagung 2015*

Stratemeier, N. & Schockemöhle, B. (2017); 'Interceptor along the Emscher – Successful implementation of a major project for the structural transformation in the Ruhr area using the smallest EPB TBM in the world.', *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface Challenges - Underground Solutions*

Rengshausen, R. & Schockemöhle, B. (2017); 'Abwasserkanal Emscher BA 40 – Erfolgreiches Großprojekt im Ruhrgebiet mit einer der kleinsten TVM der Welt', *Vortragsreihe Herausforderung Tunnelbau, Ruhr-Universität Bochum & Vortragsreihe Forum Geotechnik, RWTH Aachen*

ARGE Emscher BA40; Projektunterlagen

130 Schächte für den Emscherkanal – Spezaltiefbau seriell?

Kai Eglinger, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Bereich Mitte, Düsseldorf

Thomas Fiedler, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Bereich Mitte, Düsseldorf

Zusammenfassung

“Als Kind des Ruhrgebiets ist die Emscher für mich ein Stück Heimat. Sie spiegelt eindrucksvoll die Entwicklung dieser Region wider. Auf dem Höhepunkt der Industrialisierung wurde sie gebraucht, um Abwasser umliegender Industrieanlagen und Haushalte sicher abzuleiten. Das natürliche Ökosystem der Emscher hat durch die stark voranschreitende Industrialisierung und das dynamische Bevölkerungswachstum seit Beginn des 19. Jahrhunderts schweren Schaden genommen. Mit anderen Worten, aus einem idyllischen Fluss wurde ein offener Abwasserkanal. Das war der Preis dafür, dass das Ruhrgebiet zur industriellen Herzkammer Deutschlands und Europas werden konnte. Daraus haben wir gelernt. Auch die Auseinandersetzung mit den negativen Folgen der Emscher-Nutzung hat ihre Entwicklung zur »neuen Emscher« und damit den Umbau der Region zu einem attraktiven Standort mit innovativen und modernen Unternehmen ermöglicht“ (*Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2013*).

Hannelore Kraft (Ministerpräsidentin des Landes Nordrhein-Westfalen von 2010 bis 2017) beschreibt, welchen Einfluss der Umbau des Flusses auf den Strukturwandel der umliegenden Emscherregion hat.

In Zeiten von Umweltschutz und Nachhaltigkeit sind ökonomische und soziale Infrastrukturumbauten unerlässlich. Ökonomische Abwassersysteme bilden dabei eine unverzichtbare Basis. (*Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2013*).

Das Generationen- und Infrastrukturprojekt Emscher-Umbau ist eine der herausragenden baulichen Renaturierungsmaßnahmen der 2000er Jahre.

Das Herzstück des Emscher-Umbaus ist der Abwasserkanal Emscher (AKE).

Im Zuge der Vortriebsarbeiten des Bauabschnitts 30 des Emscherkanals wurden rund 50 km Rohrvortrieb in Tiefenlagen von bis 40 m unter Geländeoberkante aufgeföhren. Voraussetzung für das Aufföhren waren mehr als einhundert Ein- und Ausfahrshächte mit Durchmessern von bis zu 25 m. Mit der notwendigen Herstellung des Hauptkanals von Dortmund bis Essen wurde die Firma Wayss & Freytag Ingenieurbau AG von der Emschergenossenschaft beauftragt.

Die Schächte wurden in Schlitzwand- und Bohrpfohlbauweise erstellt. Die Verbauwände waren im Allgemeinen nicht rückverankert, sondern wurden durch ihre Ringtragwir-

kung gestützt. Auf Grund der damit verbundenen regelmäßigen polygonalen Schachtgrundrisse sowie der großen Aushubtiefe der Baugruben wurden an die Verbauwände besonders hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt. Daraus resultierten hohe Ansprüche sowohl an die Ausführung als auch an die Überwachung der Baumaßnahme. Hierüber und über verschiedene weitere Erfahrungen bei der Herstellung der Schächte wird im folgenden Beitrag berichtet.

1. Ökologische Umgestaltung des Flusses Emscher

1.1 Vorstellung der Gesamtbaumaßnahme

Die Emscher ist ein 85 Kilometer langer Nebenfluss des Rheins. Sie entspringt im Osten in der Stadt Dortmund und mündet im Westen bei Dinslaken in den Rhein.

Aufgrund des Bergbaus und den daraus resultierenden Bergsenkungen im Ruhrgebiet konnte das Abwasser der Region in der Vergangenheit nur oberirdisch abgeleitet werden.

Da der Bergbau im 21. Jahrhundert jedoch nicht weiter betrieben wird, soll das ökologische Gewässer der Emscher wiederhergestellt werden. Dafür war geplant, eine Kanalstrecke parallel zur Emscher zu bauen. Dieser Kanal dient dann als Hauptsammler und fasst das Abwasser der Region und leitet dieses zu den Kläranlagen entlang der Kanalstrecke.

1.2 Baumaßnahme Abwasserkanal Emscher BA 30

Im Zuge der ökologischen Umgestaltung der Emscher wurde der Abwasserkanal Emscher, Bauabschnitt (BA) 30, von der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG im Auftrag der Emschergenossenschaft hergestellt. Im Rahmen des Emscherumbaus war dies mit rund 420 Mio. Euro das größte Einzelprojekt mit dem höchsten Investitionsvolumen.

Die Baumaßnahme umfasst den ca. 45 km langen Gewässerabschnitt von der Kläranlage Dortmund-Deusen im Osten bis zur Kläranlage Bottrop im Westen. Die gesamte Kanaltrasse ist in Abbildung 1 im Längsschnitt dargestellt.

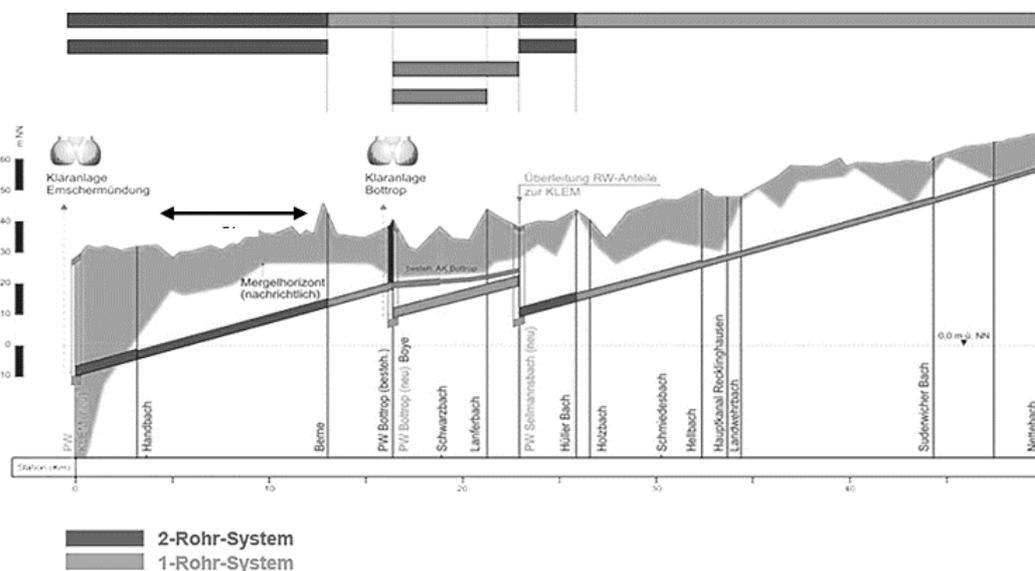


Abbildung 1: Längsschnitt des Abwasserkanals Emscher (Emschergenossenschaft, 2012)

Die einzelnen Kanalstrecken wurden nahezu ausschließlich im Rohrvortriebsverfahren hergestellt, nur in wenigen Ausnahmen wurde der Kanal offen verlegt. Das System liegt in einer Tiefe von ca. 8,00 m bis 40,00 m unter Geländeoberkante. Im Rahmen dieser Maßnahme entstehen nahezu 130 zylinderförmige Schachtbauwerke mit Durchmessern von 5,00 m bis 25,00 m, welche in Baugruben aus überschrittenen Bohrpfählen beziehungsweise Schlitzwänden erstellt wurden. Die maximalen Schlitzwandtiefen betragen 37 m.

Der Bauabschnitt 30 war von Osten nach Westen in drei einzelne Bauabschnitte untergliedert.

Die einzelnen Bauabschnitte setzten sich zusammen aus:

- BA 33: beinhaltet den Abwasserkanal Emscher (AKE) im Osten von Schacht 113 bis 081 und die Herstellung des Stauraumkanals Industriestraße,
- BA 32: umfasst den Gewässerabschnitt AKE zwischen den Schächten 79 und 57,
- BA 31: enthält den AKE im Westen mit den Schächten 54 bis 45 und den Abwasserkanal Bottrop.

In Tabelle 1 sind die zu errichteten Schachtbauwerke und Baugruben dargestellt. Insgesamt wurden im BA 30 ca. 85.000 m² Schlitz- und 14.500 m² Bohrpfahlwände hergestellt.

Tabelle 1: Übersicht der errichteten Schachtbauwerke

BA 33	BA 32	BA 31
AKE: <ul style="list-style-type: none"> • 29 Schächte • 10 Baugruben 	AKE: <ul style="list-style-type: none"> • 28 Schächte • 9 Baugruben 	AKE: <ul style="list-style-type: none"> • 8 Schächte
SKU: <ul style="list-style-type: none"> • 34 Schächte 		AK Bot: <ul style="list-style-type: none"> • 3 Schächte • 3 Baugruben
Anzahl Schächte AKE + SKU: 63 Schächte	Anzahl Schächte AKE: 28 Schächte	Anzahl Schächte AKE + AK Bot: 11 Schächte
Anzahl Baugruben AKE + SKU: 10 Baugruben	Anzahl Baugruben AKE: 9 Baugruben	Anzahl Baugruben AKE + AK Bot: 3 Baugruben
BA 30 gesamt: 102 Schächte und 22 Baugruben		

1.3 Planungsgrundlagen

Für den späteren Unterhalt und Betrieb des Abwasserkanals wurden Schachtbauwerke mit kreisförmigem Grundriss hergestellt. In der Regel wurden die Baugruben von einem Voraushubniveau hergestellt und die dafür notwendigen Baugrubenumschließungen waren als überschnittene Bohrpfahlwände bzw. als Schlitzwände ebenfalls mit kreisförmigen / polygonalen Grundrissen geplant.

Der Rohrvortrieb wurde vor dem Bau der Schächte aus diesen Baugruben heraus vorgerieben. In den Durchfahrtschächten wurde eine glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK) Bewehrung eingebaut.

Dadurch war gewährleistet, dass die Vortriebsmaschinen den Verbau durchfahren können, ohne dass dieser ein Bohrhindernis darstellt.

Während des Vortriebs ist lediglich die Schachtsohle hergestellt und mit der Baugrubenumschließung über Konsolen an die Bodenplatte des späteren Schachtbauwerkes

gekoppelt worden. Die Schachtsohle diente als Arbeitsebene und der Auftriebssicherung.

Im Rahmen der übergeordneten Planungsgrundsätze stellte die Emschergenossenschaft Anforderungen an die Herstellung der jeweiligen Verbauarten. Dies sind im Einzelnen Anforderungen an die Bohrschablone, das Abteufen der Bohrungen, die Bewehrung, das Betonieren, die Herstellung der Leitwand, den Aushub des Schlitzes, die Aushubwerkzeuge sowie die Schlitzwandstärken und die Fugenkonstruktion. [1].

Aufgrund des hoch anstehenden Grundwassers der Region, waren für alle zu errichtenden Schächte Bauwasserhaltungen vorgesehen. Dazu wurden in jedem Schacht innerhalb des Verbaus Bohrungen abgeteuft, durch die während der fortschreitenden Arbeiten das Grundwasser abgepumpt, gefördert und anschließend in die Emscher eingeleitet wurde.

1.4 Bauablauf

Die Schächte besitzen überwiegend dasselbe Konstruktionsprinzip. Der allgemeine Ablauf der Arbeiten lässt sich wie folgt gliedern:

- Zufahrt herstellen, Baufeldfreimachung und Baustelleneinrichtung
- Kampfmittelsondierung, Voraushub und Verbauarbeiten
- Wasserhaltung und Aushub Baugrube
- Erstellung einer wasserdichten Stahlbetonsohle und weitgehende Auftriebssicherung der Sohle über einen kraftschlüssigen Anschluss an eine umlaufende Konsole am Verbau
- Durchführung Rohrvortrieb
- Schachtherstellung mit Schachtausbau
- Geländeverfüllung
- Erstellung der Betriebsfläche Endzustand [2].

1.5 Geotechnik / Hydrologie

Zur Bewertung der Baugrundsituation wurden die gültigen geologischen und hydrologischen Karten ausgewertet. Die generelle Geologie ist geprägt durch die Lage am südlichen Rand der geologischen Großeinheit des Münsterländer Kreidebeckens. Weiter im Süden erhebt sich das Rheinische Schiefergebirge, an dessen nördlichem Randsaum das flözführende Steinkohlegebirge zutage tritt. Die Schichten des gefalteten Grundgebirges tauchen auch im Norden ab und werden von den jüngeren Schichten des kreidezeitlichen Deckgebirges und den quartären eiszeitlichen Ablagerungen diskordant überdeckt. Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Aufbau des Bodens am Schacht S_113.

BK 4369 S

(BK 1 - 15 S)

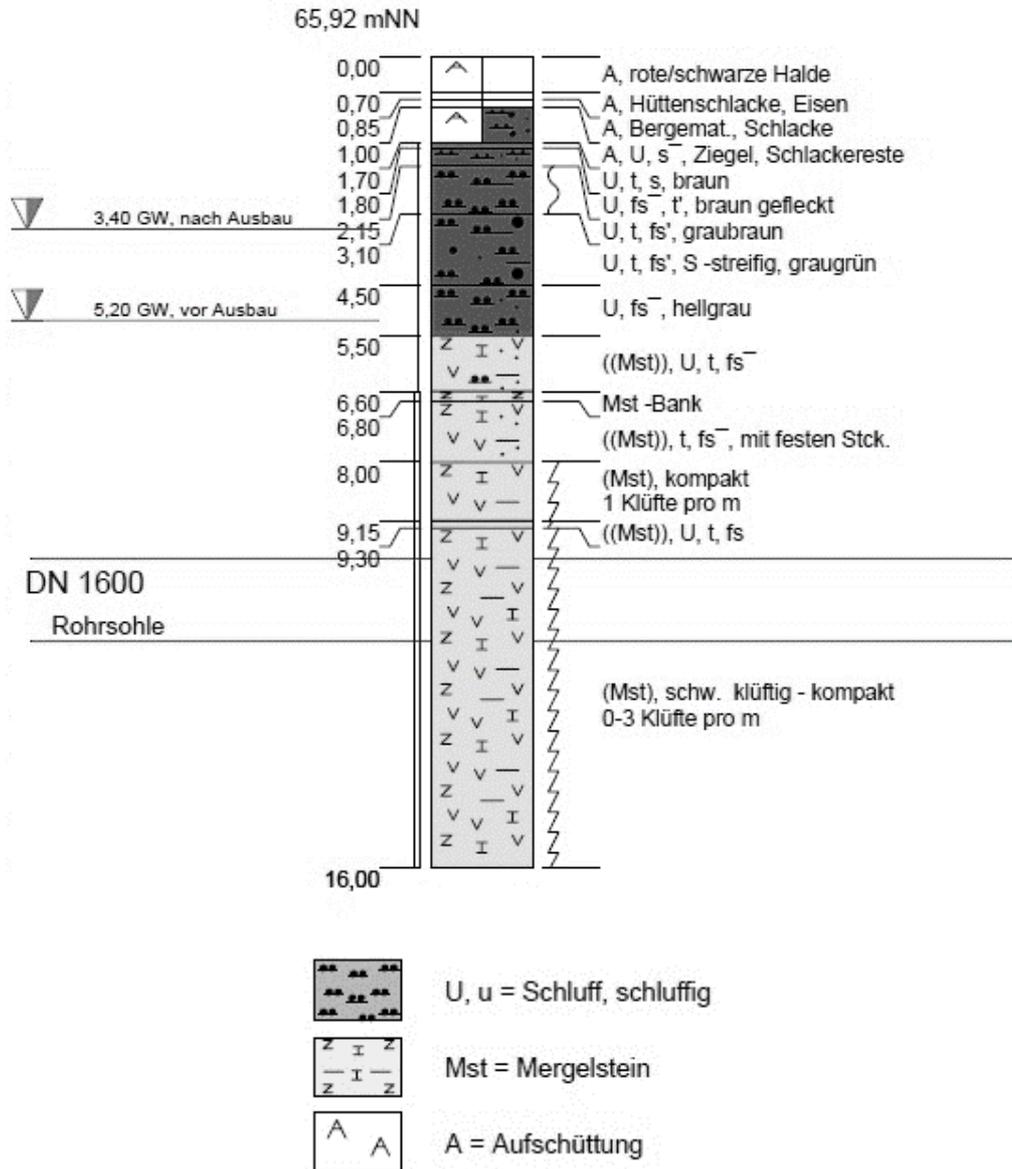


Abbildung 2: Bodenaufschluss Schacht S_113 (Emschergenossenschaft, 2012)

Das oberflächennahe Deckgebirge der Kreide wird überwiegend vom Emschermergel gebildet. Der Emschermergel als vorherrschende Ablagerung der Oberkreide besteht aus kalkhaltigen, tonigen, teilweise glaukonitischen Schluffen und kalkig-schluffigen Feinsanden, die zu Tonmergel und Ton- sowie Kalkmergelsteinen verfestigt sind. Außer

der flachen Lagerung der Schichten ist eine mehr oder weniger starke Klüftung festzustellen.

An seiner Oberfläche ist der Emschermergel überwiegend verwittert und entfestigt. Die Mergeloberfläche wird von eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Lockergesteinen des Quartärs in einer Mächtigkeit von maximal 20 m überdeckt. In den Quartärschichten befindet sich lokal Geschiebemergel, der aus Schluff und Ton besteht. Im Tal der Emscher und ihrer Zuläufe sind Mittel- bis Feinsande mit wechselndem Schluff- sowie Grobsand und Kiesanteilen als Niederterassenablagerungen vorhanden [1].

Unmittelbar unter der Geländeoberkante stehen größtenteils Auffüllungen an, die sowohl mit organischen Böden, wie auch mit Bauschutt, Schlacke, Bergematerial bis hin zu sedimentierten Klärschlämmen durchzogen sind und die quartäre Deckschicht überlagern.

Die hydrologische Situation wird durch die Emscher als Hauptvorfluter geprägt. Weiteren Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse hat der sich in der Nähe befindende Rhein-Herne-Kanal. Außerdem wirken sich die im Planungsraum aufgrund der Bergsenkungen notwendigen Sumpfungmaßnahmen auf die Grundwasserverhältnisse aus. Dabei wird durch Abpumpen des Grundwassers der Grundwasserspiegel abgesenkt. Das abgepumpte Wasser wird an anderen Stellen dem Untergrund wieder zugeführt (Tiefbauamt der Stadt Dormagen, 2001).

Allgemein ist ein Grundwasserstockwerk in den quartären Böden und ein weiteres im tieferen Mergel vorhanden. Der Wasserstand des oberen Stockwerkes ist weitgehend jahreszeit- und niederschlagsabhängig, wobei sich das Niederschlagswasser auf der nur gering durchlässigen Verwitterungszone des Mergels aufstaut. Im Gegensatz zu der Wasserführung in den Porenräumen der quartären Böden erfolgt die Wasserführung im tieferen Mergel nahezu ausschließlich über offene Klüfte. Die Verwitterungsschicht der Kreide hemmt die vertikale Komponente der Grundwasserströmung und fungiert in der Regel als Trennschicht zwischen dem quartären Grundwasserstockwerk und dem Kluftgrundwassersystem in der Kreide. Dort, wo diese Verwitterungsschicht abgetragen wurde, bestehen jedoch Verbindungen zwischen den Grundwasserstockwerken, über die ein Potentialausgleich stattfinden kann. Sowohl im quartären Grundwasserleiter wie auch im Kluftgrundwassersystem innerhalb des Mergels können gespannte Grundwasserverhältnisse bestehen [1].

2. Herausforderungen

2.1 Logistik / Baufelder

Die Schachtstandorte sind auf einer Länge von 45 Kilometern entlang der Emscher verteilt. Circa alle 500 m befand sich ein Schachtstandort mit 1 bis 4 Schächten.

In Folge dessen wurde bis zu 43% der Arbeitszeit für das Umsetzen der Spezialtiefbauausrüstung benötigt.

Baustellenerschließung und -einrichtung für die im BA 30 liegenden Schächte (siehe Abbildung 3) stellten dabei die Wayss & Freytag Ingenieurbau AG vor immer neue logistische Herausforderungen. Nicht alle Schachtstandorte lagen an bereits erschlossenen Verkehrsanlagen. Für die abseits gelegenen Baufelder mussten die Zuwegungen erst unter umweltverträglichen Gesichtspunkten geschaffen werden. Im Bauablauf hieß dies, dass zunächst das Baufeld hergerichtet werden musste, danach wurden die Baugruben, der Vortrieb und das Bauwerk errichtet bis schließlich die Oberfläche wiederhergestellt wurde.

Dieser Vorgang musste für 130 Baugruben in einer Gesamtbauzeit von rund fünf Jahren vielfach wiederholt werden. Auch in der engen Verzahnung mit den vor- und nachlaufenden Gewerken bestand eine maßgebliche Herausforderung in diesem Projekt.

Erschwerend waren zum Teil begrenzte Arbeitshöhen (z. B. durch Freileitungen) bzw. begrenzende geografische Bedingungen in Form kleiner und schmaler Bauflächen. Auf diese konnte mit einer kompakten Maschinenteknik reagiert werden.



Abbildung 3: Beispielhafte BE-Fläche

2.2 Organisation

Die Erstellung des Abwasserkanals Emscher BA 30 war zum Bauzeitpunkt eine der größten Infrastrukturbaustellen in Europa. Eine Großbaustelle, die aus einer Vielzahl

von Kleinbaustellen bestand. Somit wurde diese Großbaustelle wie eine eigene Niederlassung innerhalb des Gesamtunternehmens strukturiert. Die Kerngewerke Rohrvortrieb und Spezialtiefbau wurden weitestgehend durch eigenes Personal ausgeführt. Zusätzlicher Bedarf an Mitarbeitern wurde lokal eingestellt.

In einem zentralen Baubüro in Herne wurde die Projektleitung sowie der technische und kaufmännische Innendienst installiert. Eine wichtige und richtige Entscheidung war es, eine gewerkebezogene (Spezialtiefbau, Rohrvortrieb, Ingenieurbau) und keine bauabschnittbezogene Struktur innerhalb des BA 30 zu schaffen.

Somit konnten die Baustellen-Synergien optimal genutzt, der Bauablauf im Sinne einer wirtschaftlichen Produktion optimiert und für den Kunden ein bestmögliches Ergebnis erzielt werden.

Über interaktive Detail-Bauzeitenpläne mit 3-wöchiger Vorausschau wurden Kapazitäten und Einsätze der zentralen Dienste gesteuert, sodass beispielsweise die rund 40 Schlosser und Elektriker oder die eigene Vermessungsabteilung zielgerichtet und effektiv eingesetzt werden konnten (Korndörfer, 2016).

3. Angewandte Vermessungsarten / Messprogramme

Die Erstellung der Baugruben und des damit verbundenen Verbaus machte es erforderlich, entsprechende Messungen vor und während der Herstellung durchzuführen. Ziel des durchzuführenden Messprogramms war es, bereits im Herstellungsprozess Fehler und Abweichungen frühzeitig zu erkennen, um noch vor Fertigstellung des Verbaus einzugreifen. Im Wesentlichen sollte damit die Funktion des statischen Systems sichergestellt und Schäden während des Baugrubenaushubs vermieden werden [1]. In den zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) Vermessung Verbau wurden die von der Emschergenossenschaft vorgegebenen Planungs- und Vermessungsgrundsätze beschrieben.

Zu Beginn der Baumaßnahme wurde das vorhandene ursprüngliche Gelände aufgemessen. Die ermittelten Höhenlagen dienten als Vergleichswerte für die in der Planung berücksichtigte Geländeoberkante und als Grundlage für die spätere Leistungsabrechnung. Im Rahmen der Baugrubenherstellung und des folgenden Aushubs wurden die folgenden Messungen durchgeführt und entsprechend ausgewertet:

- Leitwand bzw. Bohrschablonen Vermessung
- Schlitzwandverlaufsmessung (Jean Lutz) und Kontrollmessungen der Bohrpfahlwände
- Elektrooptische Verformungsmessung der Schlitzwand im Rahmen des Aushubs
- Inklinometermessung
- Piezometer- / Wasserdruckmessung
- Hebungsmessung der Aushubsohle

Im Folgenden wird detailliert lediglich auf die beiden erstgenannten Messungen eingegangen.

3.1 Vermessung der Leitwand bzw. Bohrschablone

Um sowohl die Schlitz-, als auch die Bohrarbeiten genau durchführen zu können, wurde die Leitwand bzw. die Bohrschablone vor Beginn der Verbauherstellung geodätisch aufgenommen. Vermessen wurden dabei die Höhe, Länge, Richtung und Neigung (Winkel). Dadurch wurde gewährleistet, dass die Leitwand und die Bohrschablone ohne Lage- und Neigungsabweichungen hergestellt und somit eine exakte Führung des Greifers sowie des Bohrrohres bestand. Nur wenn der Greifer und das Bohrrohr exakt geführt sind, kann sichergestellt werden, dass eine Baugrube wasserdicht ist. Nur so ist auch eine exakte Fugenausbildung möglich.

Schnitt 1-1

(Leitwand) M 1:25

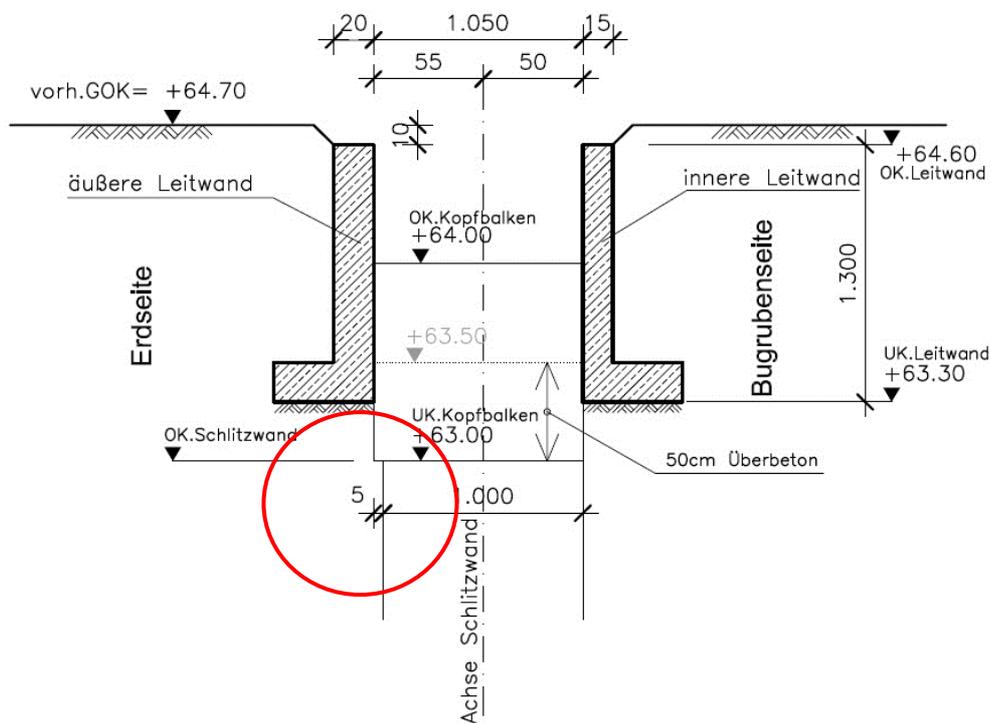


Abbildung 4: Toleranzmaß Leitwand S_113 (Emschergenossenschaft, 2012)

Bei der Herstellung der Leitwand und der Bohrschablone wurde ein Vorhaltemaß von + 5,00 cm berücksichtigt, siehe Abbildung 4. Das Vorhaltemaß bedeutet, dass sowohl die Breite eines Schlitzes als auch der Durchmesser eines Bohrpfahls mit + 5,00 cm beaufschlagt werden. Das Vorhaltemaß dient dem Schlitzwandgreifer und dem Bohrrohr als Toleranzbereich, in dem die Führung, also die Leitwand, nicht beschädigt wird. Das verwendete Messgerät hierbei war ein Theodolit.



Abbildung 5: Theodolit

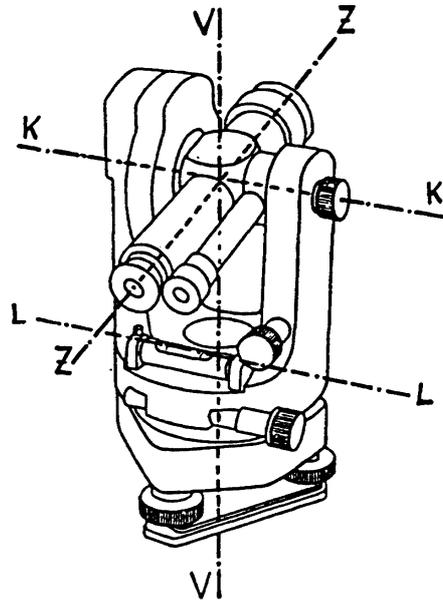


Abbildung 6: Achsenbeschriftung eines Theodoliten (Fritz-Henßler Berufskolleg der Stadt Dortmund, 2012)

Der Theodolit in Abbildung 5 ist ein vermessungstechnisches Instrument zur Messung der Horizontalrichtung und des Vertikalwinkels. Im Einzelnen besitzt er folgende Achsen gemäß der Abbildung 6, die für die Messung eines Punktes ausgerichtet werden müssen:

- Stehachse VV, vertikale Drehachse des Theodoliten
- Kippachse KK, horizontale Achse, um die sich das Fernrohr neigt
- Zielachse ZZ, verläuft durch die Mittelpunkte von Objektiv und Strichkreuzplatte
- Libellenachse LL, ist die Tangente an die Schlißkurve der Libelle im Mittelpunkt der Libellenteilung.



Abbildung 7: Prisma

Zunächst wurden bei der Kontrollmessung, nach Festlegung eines stationären Messpunktes, feste Messpunkte in der Umgebung eingemessen. Für jedes Prisma (Zielmesspunkt) wurden zwei weitere Festpunkte vermessen. Die Festpunkte sind mittels Reflexfolien, an sich nicht bewegenden Elementen, in der Umgebung befestigt. Im Anschluss wurde der Zielmesspunkt gemessen. Verfahrenstechnisch wurden die verschiedenen Achsen auf den jeweiligen Messpunkt ausgerichtet und eingestellt. Nach der ersten Messung wurde eine vollautomatische Messung in der zweiten Lage durchgeführt. Das heißt, dass sich der Theodolit einmal um 180° dreht, um den Punkt erneut einzumessen. Dabei sollten Gerätefehler minimiert werden. Die ermittelten Daten wurden auf die vorherige Messung bezogen, so dass sich Abweichungen für die Lage und Höhe der Prismen ermitteln ließen.

Um weitere Ungenauigkeiten ausschließen zu können, wurde das Wetter ebenfalls als Faktor berücksichtigt. Bei bedecktem Wetter und leichtem Wind wurden die Messgenauigkeiten optimiert, da die Refraktion – Brechung des Zielstrahls wegen unterschiedlicher Luftdichte - dann am geringsten ist [4].

Die mit dem vorher beschriebenen Messverfahren ermittelten Daten wurden in einem Soll- und Ist-Lageplan grafisch abgebildet, siehe Abbildung 8. Dieses Vorgehen wurde bei jedem Schlitzwand- und Bohrpfahlschacht durchgeführt. Die Auswertung der Daten in diesem Soll-Ist-Lageplan stellte eine Grundvoraussetzung für den Beginn der Schlitzwand- bzw. Bohrpfahlwandarbeiten dar.

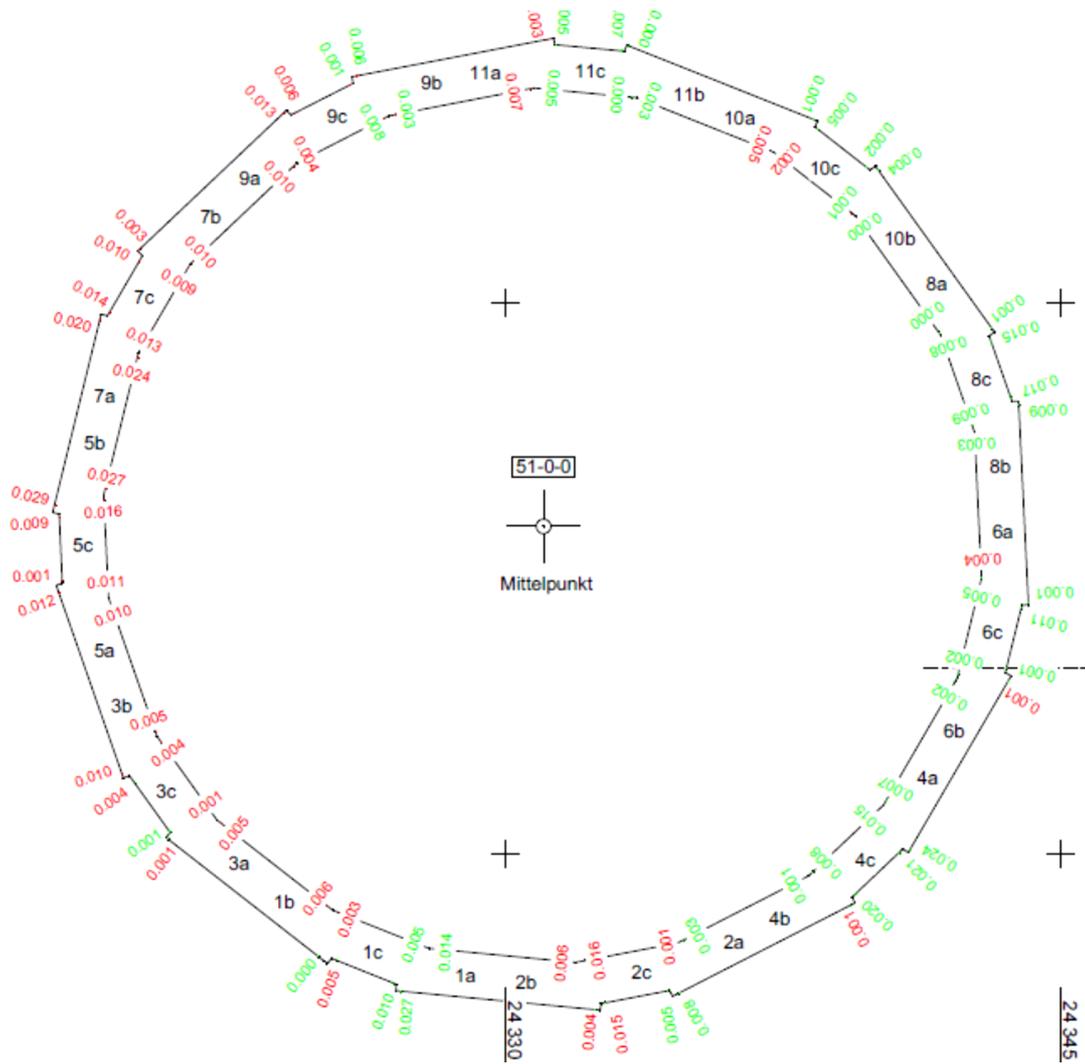


Abbildung 8: Kontrollmessung am Schacht S_051, Soll- und Ist-Lageplan (Emschergenossenschaft, 2012)

Die grün markierten Werte stellen die Abweichung der Leitwand nach außen dar und die roten Werte die Abweichung nach innen.

Die Kontrollmessungen wurden zusätzlich von der Emschergenossenschaft durchgeführt und ebenfalls in einem Soll- und Ist-Lageplan abgebildet. Die beiden Lagepläne wurden anschließend miteinander verglichen und sollten keine nennenswerten Abweichungen enthalten. Bei auffälligen Differenzwerten waren sowohl Ursachenforschung als auch eventuelle Maßnahmen einzuleiten. In einem etwaigen Extremfall hätte die Leitwand zurückgebaut und neu hergestellt werden müssen.

Analog zur Kontrollmessung der Leitwände wurden die Bohrschablonen vermessen. Die geforderten Messgenauigkeiten der Leitwand- bzw. Bohrkontrollmessung sind der folgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Messgenauigkeiten für Kontrollmessungen Leitwand bzw. Bohrschablone (Emschergenossenschaft, 2012)

Geforderte Messgenauigkeiten	Höhe: +/- 1,00 mm Lage: +/- 2,00 mm
Anwendung	Alle Schächte Schlitzwände

3.2 Schlitzwandverlaufsmessung und Kontrollmessung der Bohrpfahlwände

Sowohl während, als auch nach der Herstellung des Verbaus waren Kontrollmessungen durchzuführen. Über den gesamten Zeitraum der Herstellung konnten eventuell auftretende Abweichungen frühzeitig erkannt werden und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Die Anforderung an den Verbau musste dabei zu jeder Zeit gewährleistet sein, was durch Nachweise mittels Vermessung erzielt werden konnte.

Mit der Schlitzwandverlaufsmessung wurde während der Herstellung der Schlitzwände der Arbeitsweg des Schlitzwandgreifers kontrolliert. Dazu war an dem Greifer ein Messgerät (Nemo Sensor) angebracht, das kontinuierlich die Abweichungen des Schlitzes in X- und Y-Richtung (längs und senkrecht zum Graben) sowie Verdrehungen der Einzelstiche aufzeichnete und mittels Funk an das Auswertungsgerät (Taralog) übersendete. Die Komponenten des Messsystems sind in der Abbildung 9 dargestellt.

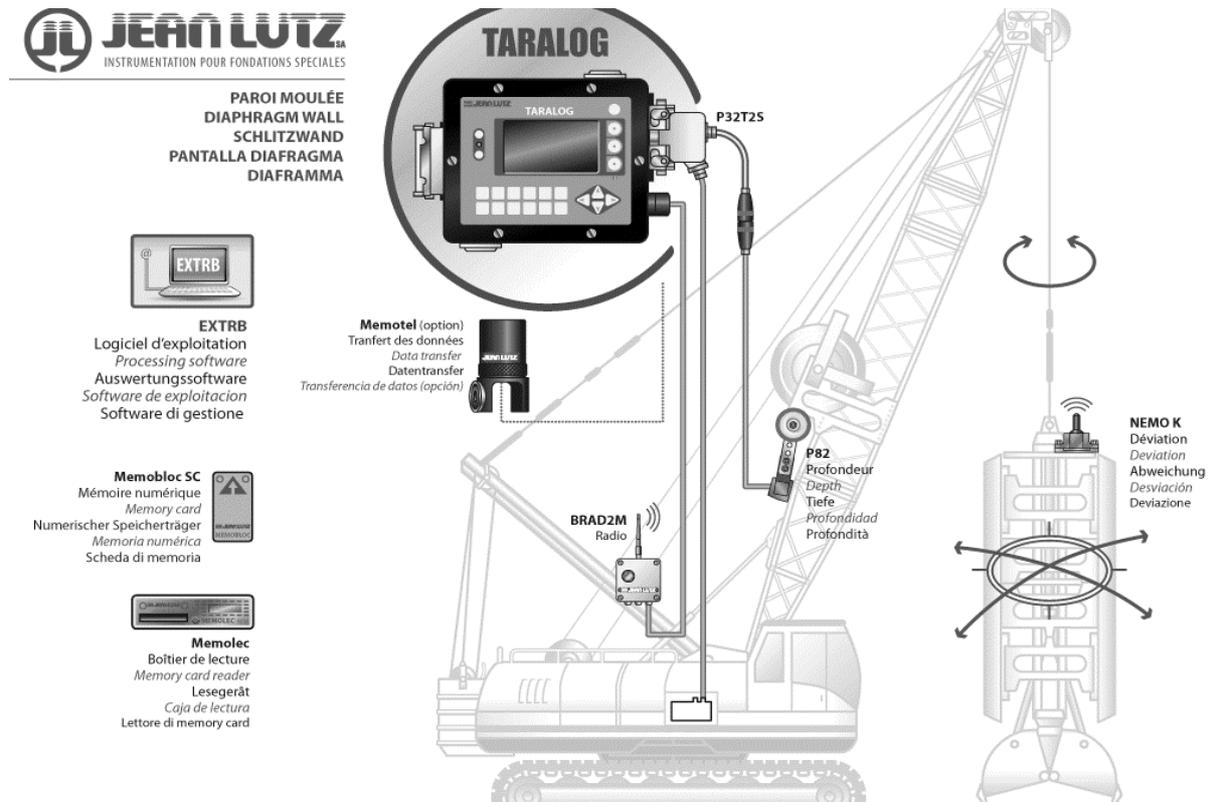


Abbildung 9: Komponenten des Messsystems Jean Lutz (Jean Lutz, 2012)

Das Taralog befand sich in der Fahrerkabine des Schlitzwandgerätes. Es speicherte die Daten und stellte die Messergebnisse grafisch dar. Im Einzelnen sind alle drei Achsen, die fortgeschrittene Tiefe, die aktuelle Tiefe und der Standort des Sensors dargestellt worden (Wayss & Freytag, 2012).

In Abbildung 10 ist eine grafische Darstellung des Schlitzwandgreiferverlaufes exemplarisch dargestellt.

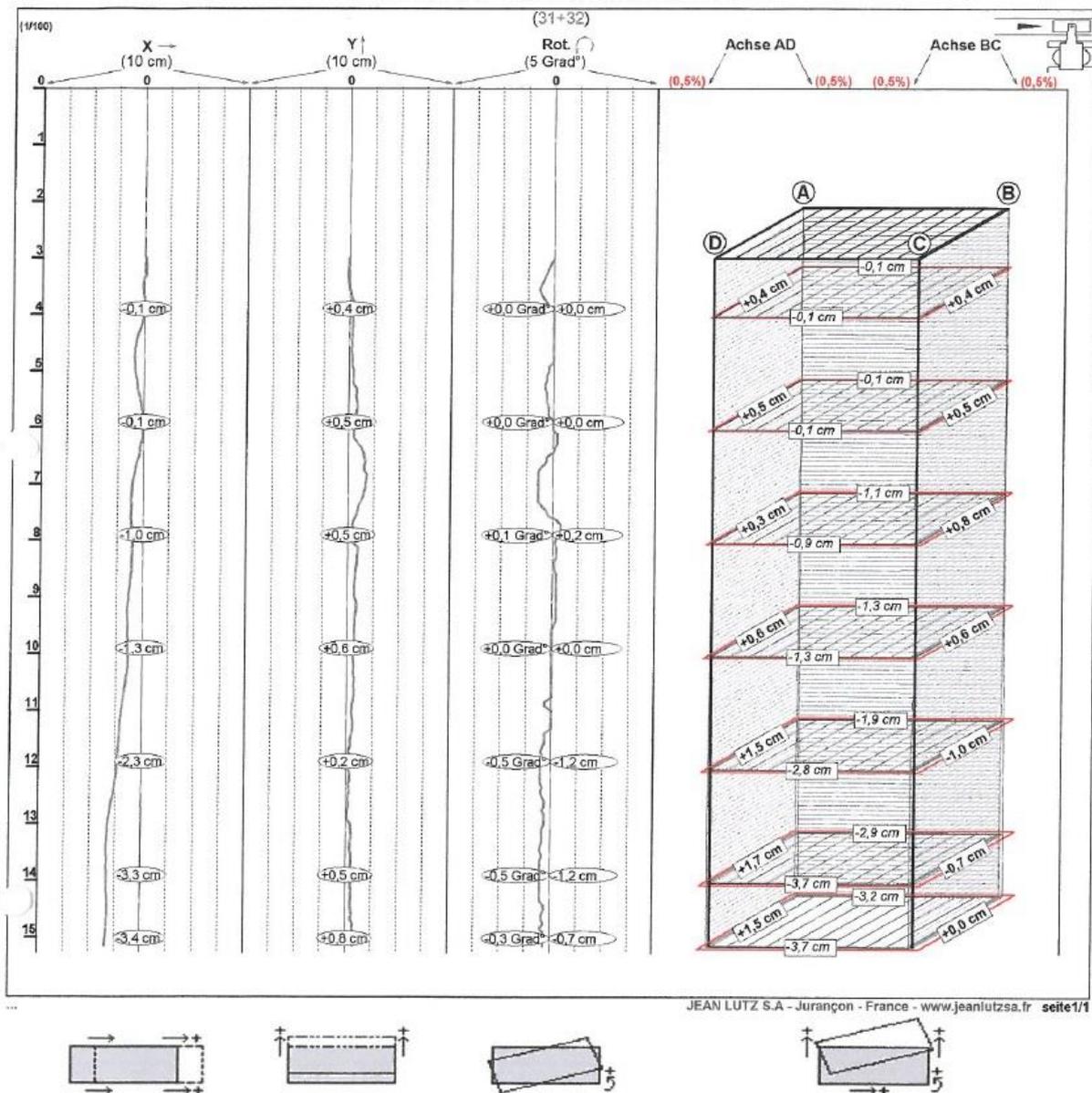


Abbildung 10: Exemplarische Verlaufmessung Jean Lutz (Emschergenossenschaft, 2012)

Der Nullpunkt wurde vor Beginn der Schlitzwandarbeiten i.d.R. an der Oberkante der Leitwand festgelegt. Ab Unterkante Leitwand startete die Messung des Sensors automatisch. Die Daten wurden aufgezeichnet und an das Taralog gesendet, sobald der Greifer aus dem Schlitz auftauchte. Auf die Gesamttiefe bezogen ließ sich aus den einzelnen Messebenen ein dreidimensionales Gebilde eines Schlitzes erzeugen, welches dann den Gesamtverlauf darstellte. Mit Hilfe der ermittelten Daten konnten schnittweise Ebenen

in Vogelperspektive erstellt werden (wie in Abbildung 11), die die Abweichungen des Greifers somit erkennbar abbilden.

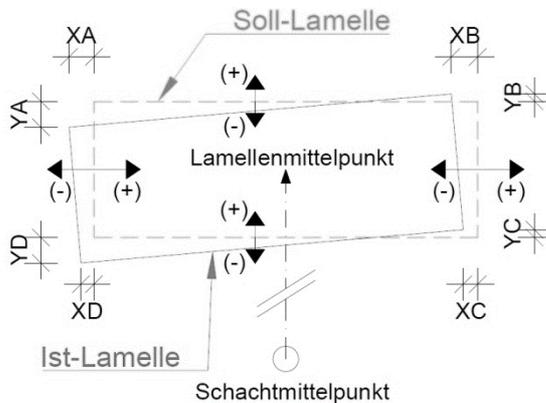


Abbildung 11: Systemskizze-Abweichung (Emschergenossenschaft, 2012)

Die gestrichelt dargestellte Lamelle stellt die geplante Lage dieser Lamelle dar. Die durchgezogene gezeichnete Lamellenlage stellt die tatsächliche Abweichung der erstellten Lamelle dar. Das Bezugskoordinatensystem richtet sich nach der Position des Baggers. D. h. der Bagger gibt das Koordinatensystem vor. Die Y-Achse befindet sich in der Achse des Baggers und die X-Achse senkrecht dazu. Die Abweichungen wurden für alle vier Eckpunkte des Rechteckes in X- und Y-Richtung ermittelt und somit sowohl die Abweichung nach innen als auch die Abweichung nach außen berechnet. Des Weiteren wurde die Verdrehung vom Schwerpunkt aus ermittelt.

Diese Darstellung wurde als Gesamtergebnis eines Schachtes für alle Lamellen ermittelt und in einem Lageplan mit Soll- und Ist-Vergleichen abgebildet. Anhand dessen konnten die Abweichungen und Verdrehungen einer Lamelle bezogen auf die Nachbarlamellen mit entsprechenden Toleranzbereichen abgebildet und verglichen werden (Abbildung 12). Der grau unterlegte Bereich ist der Toleranzbereich. Die Lagen der Ist-Lamelleneckpunkte müssen sich alle in diesem Bereich befinden, sonst ist davon auszugehen, dass die Schlitzwand nicht lagegenau gebaut wurde und somit kein wasserdichter Verbau gewährleistet werden konnte. In diesem Fall hätten Gegenmaßnahmen eingeleitet werden müssen.

SD.063-A.S01
Abweichung und
Verdrehung
(Mitte - Tiefe=20m)

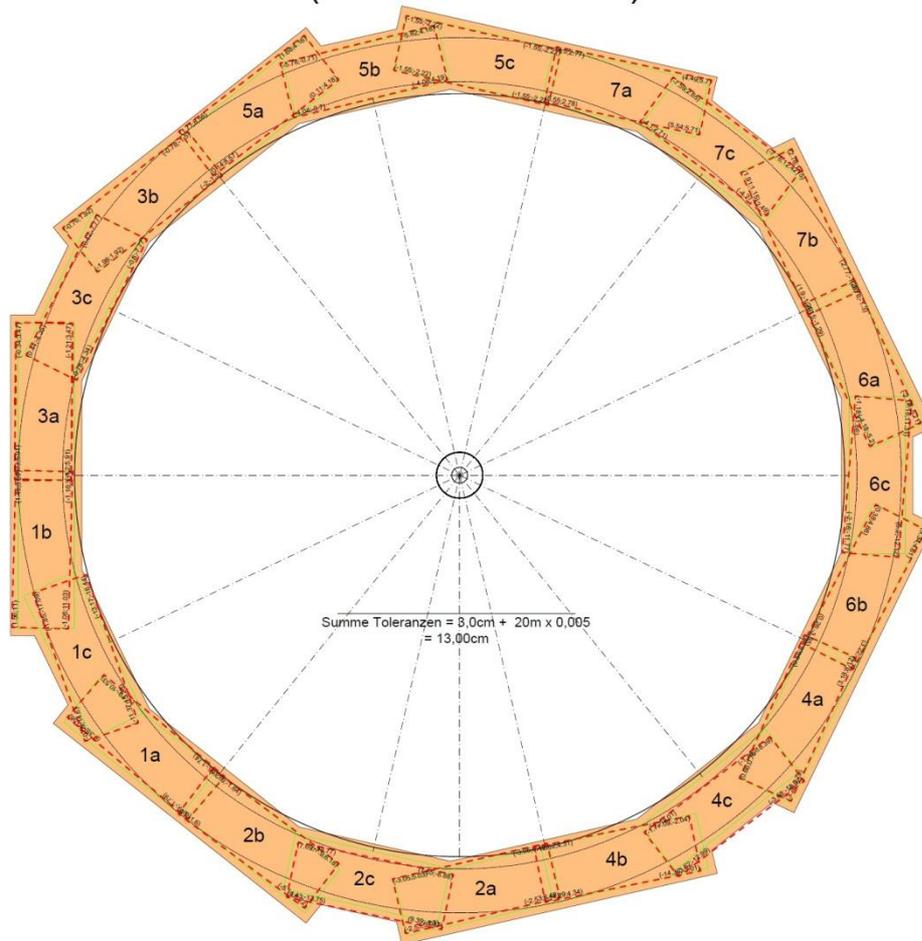


Abbildung 12: Soll-Ist-Vergleich Schlitzwandverlaufsmessung (Emschergenossenschaft, 2012)

Nachdem die Endtiefe der Schlitzwand erreicht war, wurde eine abschließende „Greiferfahrt“, bei der über die gesamte Tiefe erneut vermessen wurde, durchgeführt. Die Messdaten wurden grafisch und tabellarisch abgebildet. Diese Soll-Ist-Vergleiche stellten eine Grundvoraussetzung für die Durchführung des Baugrubenaushubs dar. Nur bei entsprechender Überprüfung jeder einzelnen Lamellen-Verlaufsmessung und einer Inbezugsetzung der Verläufe der Einzellamelle mit den Nachbarlamellen wurde der Aushub freigegeben. Andernfalls konnten sich hier Toleranzen ggf. addieren.

Die Kontrollvermessung der Bohrpfahlwände wurde vergleichbar als Inklinometermessung umgesetzt. Für alle Bohrpfahlwände mussten, nach Abbrechen des Überbetons der

Bohrpfahlköpfe, die Mittelpunkte der Bohrpfähle vermessen werden. Ebenfalls wurden die verbleibenden Stegbreiten zwischen den Primär- und Sekundärpfählen gemessen.

Die Messgenauigkeiten der vorgenannten Verlaufsmessungen sind in der folgenden Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Messgenauigkeiten für Schlitzwandverlaufsmessung und Kontrollmessung der Bohrpfahlwände (Emschergenossenschaft, 2012)

Geforderte Messgenauigkeiten	Höhe: +/- 1,00 mm Lage: +/- 2,00 mm
Anwendung	Alle Schächte Schlitzwände

4. Umgesetzte Lean Methoden

Die Realisierung der vertraglich festgelegten Vorgaben stellten die Bauausführung regelmäßig vor Herausforderungen. Unzureichende Bauplanung, verspätete Lieferungen, unqualifiziertes Personal, Umwelteinflüsse oder auch unvorhersehbare Ereignisse sind nur einige Faktoren, die zur Verzögerung oder Veränderung des Bauablaufs führten. Manche Einflüsse sind leichter steuerbar als andere. Um auf die gravierendsten Ursachen Einfluß zu nehmen, werden bei Wayss & Freytag seit einigen Jahren erfolgreich Lean Construction Methoden auf die Planung und Durchführung von Bauvorhaben übertragen.

Da jedes Bauprojekt einzigartig ist und im Gegensatz zur Automobilbranche nicht am Fließband produziert werden kann, müssen die Instrumente immer wieder optimiert und angepasst werden. Dieses Vorhaben ist ein kontinuierlicher Prozess, um auf veränderte Entwicklungen aktiv zu reagieren und einen fortlaufenden Verbesserungsprozess zu ermöglichen. Durch erfolgreiche Pilotprojekte soll die Verbreitung der leistungssteigernden Ansätze gefördert werden, sodass sie auf viele weitere Bauvorhaben angewendet werden können. Das Großprojekt AKE BA 30 mit einer Vielzahl von Wiederholungen in der Herstellung der Bauwerke war ein solches Pilotprojekt.

Für die erfolgreiche Anwendung von Lean Construction Methoden im Spezialtiefbau musste zunächst die Ausgangslage hinsichtlich der Spezialtiefbauarbeiten auf der Baustelle dokumentiert und analysiert werden. Anschließend wurden anhand der Ergebnisse Vorschläge zur Implementierung leaner Methoden gemacht, diskutiert und umgesetzt.

Nach der ersten Evaluierung der Arbeiten fanden sich in vielen Bereichen der Verbauarbeiten Verbesserungspotentiale, die mit Hilfe von Lean Construction Methoden ausgearbeitet werden können. Dazu gehörte die genaue Zuteilung der einzelnen Tätigkeiten an die jeweiligen Mitarbeiter, die Weiterentwicklung eines Visualisierungsinstruments und die Fokussierung auf einen übersichtlichen Arbeitsplatz.

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Tätigkeitsanalyse und dem daraus resultierenden optimalen Ablauf der Spezialtiefbauarbeiten war es möglich, die Zeiten für die Herstellung des Verbaus zu minimieren. Zusammen mit den erhobenen Daten ließ sich auf dieser Grundlage eine Taktplanung entwickeln. Neben der Gestaltung der Taktpläne spielte die Taktkontrolle eine wesentliche Rolle. Für jeden Mitarbeiter wurde der Ablauf der Arbeiten bei der Ausführung seiner Aufgaben dargestellt. So war es möglich, die einzelnen Arbeitskräfte hinsichtlich der geplanten Zeit pro Tätigkeit zu überprüfen.

Zusätzlich wurde die Taktplanung in Form von täglichen kurzen Meetings mit allen Beteiligten gesteuert.

Zuerst wurde der Takt geplant, anschließend ausgeführt und mit Hilfe der Taktkontrolle überprüft. Bei auftretenden Veränderungen konnte direkt darauf reagiert und neue Informationen in das Bauvorhaben integriert werden (PDCA-Zyklus). Auf diese Weise wurde ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess und eine übergreifende Erfolgskontrolle realisiert. Die entwickelte Taktplanung bietet die Grundlage für einen standardisierten „seriellen“ Prozess Bohrpfahl- bzw. Schlitzwandarbeiten und war Voraussetzung für einen verschwendungsarmen Ablauf.

Anhand von Visualisierungselementen wird bei den Methoden von Lean Construction die Kommunikation und die Transparenz von Informationen gefördert. Lösungen können schneller gefunden werden, damit eine vorausschauende Planung entwickelt werden kann.

Von Beginn an werden alle Beteiligten mit in die Planung einbezogen, so dass weniger Verzögerungen durch Wartezeiten und Überschneidungen entstehen. Die 5 S Methode als ergänzendes Leanwerkzeug verbindet dabei die Minimierung von unnötigen Wegen und Suchzeiten mit einer gesamtheitlichen Ordnung und Sauberkeit auf dem Baufeld.

Mit Hilfe dieser Ansätze war es möglich, Abläufe zu optimieren und Zeiten zur Verbauherstellung zu stabilisieren, so dass der Bau der rd. 130 Schächte des AKE BA 30 in weiten Teilen als serieller Prozess ausgestaltet werden konnte.

Literatur

Emschergenossenschaft (2012), 'Grundlagen der Planung (Planungskonzept)'

Fritz-Henßler Berufskolleg der Stadt Dortmund (2012), 'Der Theodolit',
www.fhbk.de/vermessungstechniker/aufgabemittelstufe/theodolit.doc (Stand: August 2012)

Jean Lutz (2012), 'Diaphragm Walls, Media an Schemes',
www.jeanlutzsa.fr/DNN/en/Techniques/Foundation%20Engineering/Diaphragmwall.aspx (Stand: Oktober 2012)

Korndörfer, C. (2016), 'Der Emscher-Umbau – Rohrvortrieb auf 45 km Länge im Bauabschnitt 30', *Bauportal* 6/2016, 2-7

Wayss & Freytag (2012), 'Qualitätsmanagementplan, Anlage 5, Schlitzwandarbeiten'

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 'Emscher 3.0 – Von Grau zu Blau oder wie der blaue Himmel über der Ruhr in die Emscher fiel., *Bönen/Westfalen: Kettler* 2013.

THEMENBLOCK II

Deiche

Emscher-Deiche – Ertüchtigung eines gewachsenen Hochwasserschutzes im urbanen Raum

*Martin Röllecke, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
Dr. Aloys Kisse, CDM Smith Consult GmbH*

Zusammenfassung

An der Emscher wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts die ersten Deiche errichtet. Mit dem Voranschreiten des Bergbaus wurden diese kontinuierlich erweitert, so dass heute über 80 Jahre gewachsene Deiche die Emscher-Region vor Überflutungen schützen. Um auch weiterhin die Region vor Hochwasser zu schützen, sollen diese Deiche zu einem robusten zukunftssicheren Hochwasserschutz ausgebaut werden.

Hierzu erfolgen umfangreiche Erkundungen des Deichkörpers und des Untergrundes zur Beschreibung der aktuellen Situation und Gewinnung von Parametern für die Nachweisführungen und ggf. notwendigen Ertüchtigungsmaßnahmen.

All diese Arbeiten und Planungen erfolgen in enger Abstimmung mit der ökologischen Umplanung der Emscher.

1. Historie der Emscher-Deiche

1.1 Technischer Ausbau des Emscher-Systems

Die Emscher war ursprünglich ein Flachlandfluss, der aufgrund seines flachen Gefälles – und ohne ein ausgeprägtes Flussbett – mäandrierte. Bei Hochwasserereignissen trat sie regelmäßig über die Ufer und verursachte Überschwemmungen. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wandelte sich die Emscher-Region von einem landwirtschaftlich geprägten Raum zu einer Industrieregion. Durch diesen Wandel kam es zu einer Vervielfachung der Bevölkerungszahl im Emscher-Gebiet. Die sich ausbreitende Industrie und die daraus resultierenden Abwässer sowie die steigende Bevölkerungszahl führten zu zunehmenden Herausforderungen in der Abwasserentsorgung. Die Abwässer wurden ungeklärt in die Emscher eingeleitet. Bereits leichte Hochwässer führten zum Ausufer der Emscher, was durch die mitgeführte Schmutzfracht zu hygienisch problematischen Verhältnissen führte. Die Folge waren Krankheiten wie Ruhr, Typhus, Malaria, Diphtherie oder auch Cholera und die Gefahr, dass diese sich zu Epidemien entwickelten. Mit dem Bergbau entstanden in der Region Bergsenkungen, was zu signifikanten Veränderungen der Flusslandschaft in der Emscher-Region und zur Verschärfung des Problems einer

fachgerechten Abwasserbeseitigung führte. Um die Vorflut aufrecht zu erhalten, wurde die Emscher begradigt, reguliert und Senkungs-mulden in Nebenläufen und der Emscher angehoben. Mit diesen Bergsenkungen und regulierenden Maßnahmen einhergehend startete 1908 auch der Deichbau an der Emscher.



Abbildung 1: Historischer Bau des technischen Emschersystems (Quelle: EGLV)

1.2 Entwicklung der Emscher-Deiche

Der Deichbau in der Emscher-Region startete mit der Regulierung der Emscher. Durch das Anheben der Flusssohle wurden die umliegenden Flächen zu Polderflächen, die fortan durch Deiche vor Überflutungen geschützt werden mussten. Mit dem Voranschreiten des Bergbaus entstanden immer wieder neue Senkungen, die jeweils basierend auf Bergsenkungsprognosen ein präventives Erhöhen der Deiche erforderten. So wurden über die Jahre immer wieder Deichanpassungen durchgeführt.

Aufgrund dieses etappenweisen „Wachsens“ der Deiche besitzen die Emscher-Deiche häufig einen inhomogenen Aufbau. Es erfolgte kein flächendeckender Ausbau eines ein-

heitlich zonierten Deichquerschnitts, sondern je nach aktueller Abbauplanung wurde lokal der Hochwasserschutz angepasst. Somit sind die Deiche in ihrer Gesamtheit eher inhomogen, unterscheiden sich stark in ihrer Herstellungshistorie und lassen sich den in Kapitel 3.1 beschriebenen unterschiedlichen Typen zuordnen.

1.3 Für den Deichbau verwandtes Material

Über den Lauf der Emscher ergibt sich eine unterschiedliche Materialzusammensetzung der Deichkörper. Je nach örtlicher Verfügbarkeit, Einbauzeitpunkt und technischem Erfordernis kamen unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Eine lokale Besonderheit ist dabei die Nutzung von so genannten "Waschbergen" in den Emscher-Deichen.

Für den Deichbau entlang der Emscher wurden große Bodenmassen benötigt. Die im Deichbau üblichen feinkörnigen Böden sind im Emscher- und Lippe-Gebiet anzutreffen, konnten aber wegen der dichten Bebauung und starken Nutzung des Gebietes nur selten in der Nähe der Baustellen gewonnen werden. Gleichzeitig fiel beim Kohlebergbau mit der gewonnenen Steinkohle Nebengestein an. Die Trennung des Nebengesteins von der Kohle erfolgt in der Kohlenwäsche mit Hilfe einer schweren Trennflüssigkeit. Im Folgenden wird das Material "Waschberge" oder auch "Berge" genannt. Waschberge bestehen überwiegend aus Schieferton, der dem Material auch die charakteristische graue bis schwarze Farbe verleiht. Der Anfall an Waschbergen überstieg den Bedarf an zum Wiedereinbau benötigten Boden zum Versatz ausgekohelter Flöze, so dass Bergehalden angelegt wurden und das Material damit für zusätzliche Zwecke verfügbar war. Daher wurde zwischen dem Mangel an Böden für den Deichbau und dem Bergeüberschuss der Zechen ein Ausgleich geschaffen und die Berge für Teile des Deichbaus verwandt (Annen, G. & Stalman, V., 1968).

2. Hochwasserschutz heute im Emscher-Gebiet

2.1 Ausdehnung der Deichstrecken und Hochwasserschutzziel

Die Emscher entspringt südöstlich von Dortmund in Holzwickede und mündet nach 85 km in Voerde in den Rhein. In Summe wird die Emscher durch 60 km Deiche gesäumt, wobei der Schwerpunkt im Unterlauf zwischen Gelsenkirchen und Voerde liegt. Bis auf kleine Ausnahmen ist die Emscher hier beidseitig durch Schardeiche eingefasst. In diesem Bereich schützen die Deiche vor einem 200 jährlichen Hochwasserereignis.

Mit dem Emscher-Umbau wurde das Schmutzwasser aus dem Fluss in den neuen Abwasserkanal verbannt und die Emscher wird ökologisch umgestaltet. Die Aue entlang der Emscher ist dabei ein wichtiger Raum des übergeordneten Biotopverbunds. Diese verbindet einzelne ökologische Schwerpunkte, die eine ökologische Besiedlung des Gewässers in Form des Strahlwirkungskonzepts ermöglicht. Zur Sicherstellung des Hoch-

wasserschutzes wurden an der Emscher und ihren Nebenläufen ergänzend neue Hochwasserrückhaltebecken gebaut, so dass der Bemessungshochwasserstand im ökologisch verbesserten Zustand der Emscher den ursprünglichen Bemessungs-hochwasserstand im technisch ausgebauten Zustand nicht übersteigt.

2.2 Typische Geometrie und Höhe der Emscher-Deiche

Die in den vergangenen Jahrzehnten gebauten Deichanlagen entlang der Emscher haben sich an dem ehemaligen Deichregelprofil der Emschergenossenschaft und des Lippeverbandes orientiert und wurden an der Emscher mit einer Böschungsneigung von ca. 1:2 gebaut. Dabei besitzt der Deichkörper wasserseitig eine Berme, die schon bei kleineren Hochwasserereignissen überflutet wird. Es schließen sich wasserseitige Deichböschung, Deichkrone und landseitige Deichböschung an. Landseitig gibt es keinen Dränkörper und nur vereinzelt Drainagen am Deich. Die Deichverteidigung erfolgt über die Deichkrone.

Die Deichhöhen an der Emscher variieren stark je nach eingetretenen Bergsenkungen. Die mittlere Deichhöhe beträgt 3 bis 5 m, wobei in Einzelbereichen Deiche mit bis zu 10 m Höhe bestehen.



Abbildung 2: Emscher und Deichhinterland in Herne (Quelle: EGLV)

2.3 Charakteristische Hochwasserwelle der Emscher

Das Gewässersystem der Emscher unterscheidet sich im Abflussverhalten bei Hochwasser wesentlich von anderen Gewässern in Nordrhein-Westfalen, da das Einzugsgebiet

sehr hohe Versiegelungsgrade aufweist und sowohl die Gewässerstrecken der Nebenläufe als auch die Emscher selbst technisch ausgebaut sind. Durch die starke anthropogene Überformung des Einzugsgebietes und den kanalisierten Ausbau können sehr schnell ansteigende und somit steile Hochwasserwellen entstehen. In den letzten 50 Jahren sind die Hochwasserabflüsse aufgrund der weiter steigenden Versiegelung der Emscher-Region stark angestiegen, die Niedrigwasserabflüsse hingegen sind stark gefallen. Durch die hohe Versiegelung des Gebietes entstehen Hochwasserwellen durch starke Niederschlagsereignisse von 2 h bis 12 h. Dabei ist die Hochwasserwelle durch ein extrem schnelles Ansteigen und Abfallen des Wasserspiegels gekennzeichnet. Der Anstieg vom Mittelwasserabfluss zum Hochwasserscheitel beträgt dabei nur etwa 4 Stunden (Abb. 3). Aufgrund des technisch ausgebauten Profils der Emscher benötigt der Hochwasserscheitel für die gesamte Laufstrecke von der Quelle bis zur Mündung nur ca. 9 Stunden.

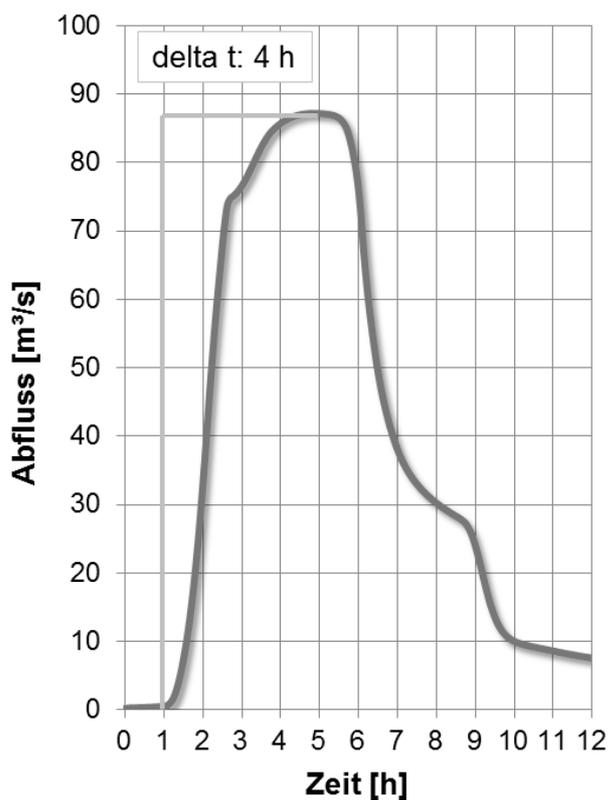


Abbildung 3: Hochwasserwelle der Emscher (Quelle: EGLV)

3. Ertüchtigung des Hochwasserschutzes

Der Deichbau an der Emscher hat Anfang des 20. Jahrhunderts begonnen und erfolgte massiv zu Hochzeiten des Steinkohleabbaus in der Emscher-Region. Dabei wurden die Deiche jeweils nach dem Stand der Technik gebaut und mit den verfügbaren Einbaumethoden hergestellt. Um auch weiterhin die Region sicher vor Hochwasser zu schützen, sollen diese Deiche sukzessive angepasst und zu einem robusten zukunftssicheren Hochwasserschutz ertüchtigt werden. Dabei bietet die ökologische Umgestaltung der Emscher die Möglichkeit, Synergien für die Baumaßnahmen an der Emscher zu heben. Für die Umsetzung der Deichertüchtigungen wurden polderbasierte Abschnitte gebildet und priorisiert. Die Ertüchtigung des Hochwasserschutzes ist eins der wichtigen Gewässerthemen für die Emschergenossenschaft in den kommenden Jahren. Dabei sind die Planungen für die Ertüchtigung eines ersten Deichabschnitts in Oberhausen angelaufen und der Baubeginn der Deichertüchtigung ist für 2024 vorgesehen.

3.1 Aktueller Zustand der Deiche

Grundsätzlich werden drei Typen an Deichquerschnitten entlang der Emscher unterschieden, die Einflüsse auf die weitere Gestaltung und die Standsicherheit der Deiche haben:

- Reine Sanddeiche
- Sanddeiche mit Waschbergeabdeckung
- Waschbergedeiche

Da die Deiche im Zuge der erwarteten Bergsenkungen immer wieder erhöht wurden und diese Senkungen sich nicht im vollen Maße einstellten, weisen die heutigen Deiche vielfach eine überhöhte und überbreite Geometrie auf. Hiermit ist gemeint, dass der statisch notwendige Deichkörper kleiner ist als der vorhandene Deichkörper.

Zudem sind die Deiche historisch gewachsen und die erdbauliche Ausführung ist meistens nicht dokumentiert. Auch die Waschberge stellen sich nicht als ein homogenes Material dar, da auch diese über die Zeit aufgebaut sind und deren Herkunft und Zusammensetzung heute weitgehend unbekannt ist. Eine qualifizierte Zonierung, wie sie etwa in der DIN 19712 beschrieben ist, ist bei den Emscher-Deichen i. d. R. nicht gegeben.

Die Emscher-Deiche sind zudem geprägt von einer großen Anzahl an Leitungen, Rohren und Kabeln (parallel, querend, schräg verlaufend, in Betrieb, außer Betrieb). Der bauliche Zustand dieser Leitungen (z.B. Materialbeschaffenheit) sowie die Lage und genaue Tiefe sind häufig unbekannt. Darüber hinaus gibt es Planungsanforderungen aus künfti-

gen weiteren Deichquerungen wie auch längs verlaufende Leitungen (z.B. Erdgasleitungen, Wasserstoffleitungen) im Bereich des Emscher-Laufs.

Die Deiche besitzen im Wesentlichen eine gut unterhaltene Grasnarbe, so dass Angriffspunkte für Leckagen minimiert werden und somit Erosionserscheinungen entgegengewirkt wird. Stellenweise weisen die Deiche einen Bewuchs auf der Deichkrone oder auf der landseitigen Böschung sowie im nahen Hinterland zum Deichfuß auf, der hinsichtlich der Standsicherheit der Deiche zu bewerten ist (siehe z.B. Kisse, A. & Ellebracht M., 2015).

Bei den Nachweisführungen zur Standsicherheit der Bestandsdeiche nach DIN 19712 lässt sich festhalten, dass die höchsten Ausnutzungsgrade in der Bemessungssituation „Schnell ablaufendes Hochwasser (Sunk)“ auftreten. Dies liegt im Wesentlichen an der Steilheit der wasserseitigen Böschung mit einer Neigung von 1:2 und steiler. Die wasserseitige Böschung ist für die Deichstandsicherheit von großer Bedeutung, da sie in den entsprechenden Nachweisen als Auflast wirkt und so die wasserseitige Böschung stützt.

3.2 Ökologische Umgestaltung

Im Zuge der Umgestaltung der Emscher außerhalb der ökologischen Schwerpunkte erfolgt eine Anhebung der Sohle -soweit es die Grundwasserverhältnisse zulassen. Wenn es die Raumverhältnisse und die Deichstandsicherheit ermöglichen, erfolgt eine Aufweitung des Flussbettes, so dass die Emscher im besten Fall eingeschränkt mäandern kann. In der Abb. 4. ist dies exemplarisch für die rechte Deichseite im Bereich Oberhausen dargestellt. Zur Verbreiterung des Flusslaufes ist es notwendig einen Teil der wasserseitigen Böschung zu entfernen – um dennoch die Standsicherheit des Deiches zu gewährleisten, sind Abflachungen der wasserseitigen Deichböschung und zusätzliche Ertüchtigungsmaßnahmen wie die Einbringung von Spundwänden geplant. In anderen Abschnitten kann der Verbleib der Deich stützenden Bermen erforderlich werden, so diese Abschnitte ökologisch die Funktion eines Strahlweges erhalten.

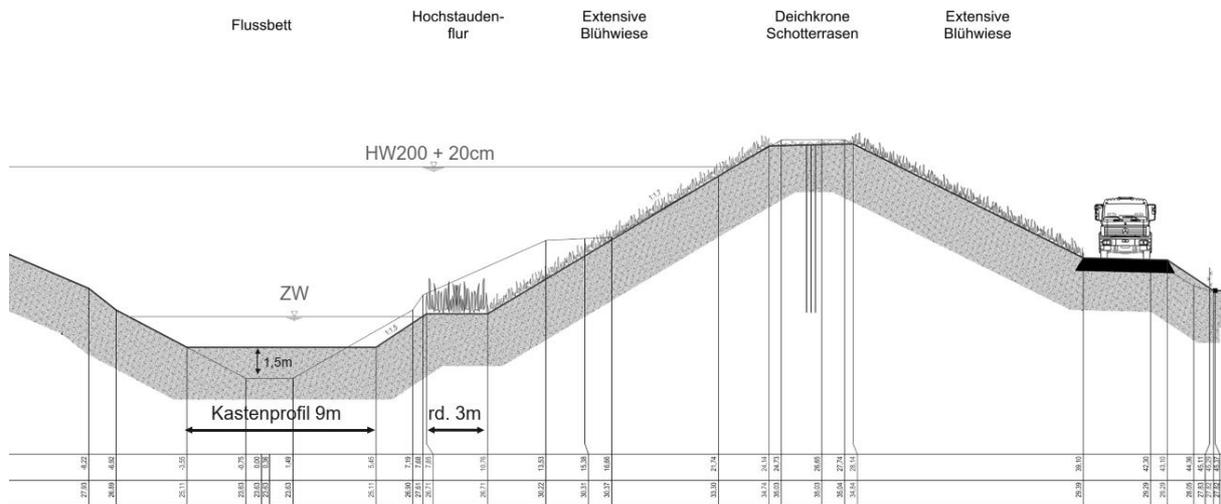


Abbildung 4: Beispiel zur ökologischen Umgestaltung (Entwurf)

4. Betrachtungen zu den Nachweisführungen

Die Emscher-Deiche liegen teils als näherungsweise homogene Deiche mit unterschiedlichen oberflächlichen Abdeckungsschichten oder als unregelmäßig aufgebaute Deiche vor, die häufig wechselnde Zonen oder Einbaulagen aus gemischtkörnigem oder grobkörnigem Material aufweisen. Zur Erkundung dieser Deiche wurde ein Mindestuntersuchungsraster für eine erste Haupterkundung der Deiche festgelegt (Abb. 4). Die Erkundungen setzen sich aus Kleinbohrungen und Rammsondierungen (RKS), großkalibrigen Bohrungen (KB) und Baggerschürfen (Schurf) zusammen.

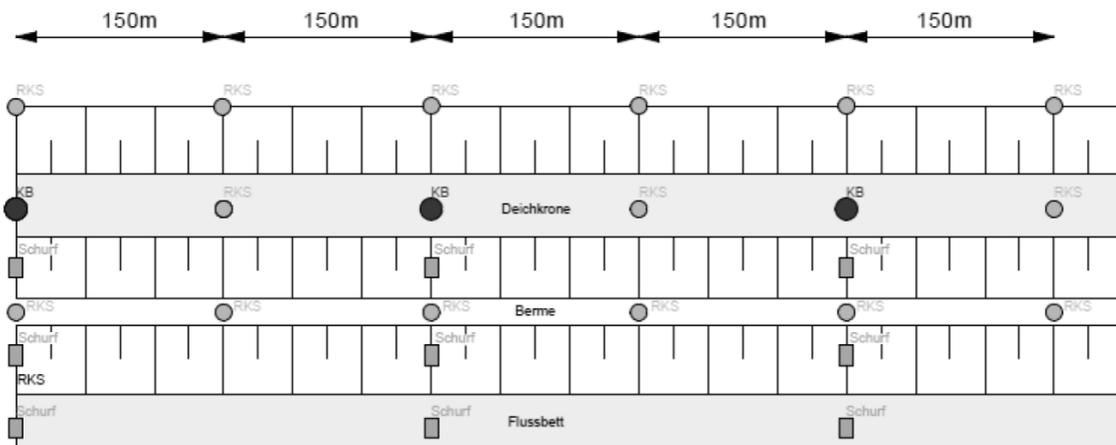


Abbildung 5: Beispiel Mindestuntersuchungsraster (Emschergenossenschaft, 2022)

Die vorgesehenen Schürfe auf der wasserseitigen Böschung und Berme dienen gleichzeitig als Leitungsschurf und Erkundungsschurf der oberflächennahen Schichten.

Die Erkundungen sind auch im Hinblick auf die Anforderungen aus der Mantelverordnung, die zum August dieses Jahres in Kraft tritt, zu planen. Hier ist eine gegenüber der bisherigen Vorgehensweise geänderte Analytik und Bewertung durchzuführen, die zudem eine erhöhte Probenmenge erfordert. Für die Bereitstellung ausreichender Probenmengen sind ggf. mehrere Sondierungen an den Ansatzstellen durchzuführen oder es ist auf großkalibrige Bohrungen und Baggerschürfe zurückzugreifen.

Die bodenchemische Bewertung ist von zentraler Bedeutung, da es im Zuge der Aufweitung zu großen Bodenbewegungen kommen wird und der Umgang mit diesen Böden einen entscheidenden Anteil an den Kosten für die Umgestaltung darstellt.

Zur Bestimmung der geotechnischen Kennwerte für die Waschberge wurden von der Emschergenossenschaft zahlreiche Untersuchungskampagnen im Zeitraum von 1968 bis heute vorgenommen (siehe z.B. Borchert et al., 2009). Auf Basis dieser Erkenntnisse ist ein Kennwertsatz für die im Deich verdichtet eingebrachten grob- bis gemischtkörnigen Waschbergematerialien erstellt worden, der als Grundlage für die Nachweisführungen heranzuziehen ist und den geotechnischen Büros zur Verfügung gestellt wird.

Für die geotechnische Nachweise an den Deichen der Emscher sind die Anforderungen aus der DIN 19712 bindend. Es sind die Nachweise für die Einwirkung BHW (BS-P, ggf. BS-T) und Bordvoll (BS-A) zu führen. Hierbei gilt, dass die Nachweisführung der wasserseitigen Böschungen bei schneller Wasserspiegelabsenkung vorzugsweise mittels instationären Strömungsberechnungen vorgenommen werden kann. Die Anwendbarkeit stationärer Zustände im Zuge der Nachweisführungen bleibt gemäß DWA M 507-1 aber erhalten. Der Ansatz der stationären Sickerlinie ist dabei als konservativer Ansatz zu verstehen, der insbesondere in Situationen mit einer schnell durchlaufenden Hochwas-

serwelle und bei landseitig niedrigen Grundwasserständen nach der Arbeitshilfe Deichertüchtigung (Emschergenossenschaft, 2022) zu sehr ungünstigen und auch unrealistischen Ergebnissen führen kann.

Der in den Nachweisführungen anzusetzende Bemessungshochwasserstand (BHW) stellt den Emscher-Wasserstand auf Grundlage des „technisch ausgebauten Zustands“ des Emscher-Einzugsgebiets (vor Beginn des Emscher-Umbaus 1990) dar. Diese Vorgehensweise folgt dem Grundsatz, dass dieser BHW auch nach dem Emscher-Umbau nicht überschritten werden soll. Dies stellt eine konservative Vorgehensweise zur Dimensionierung der Deichhöhen dar. Zur Berücksichtigung des Klimawandels und zur Verbesserung der Klimaresilienz wurde auf das BHW ein Zuschlag von 20 cm aufgesetzt, wie in Abb. 4 dargestellt.

Für etwaige instationäre Durchströmungsbetrachtungen der Deichanlagen wurden durch die Emschergenossenschaft auf der sicheren Seite liegend Bemessungsabfluss-/wasserstandsganglinien entwickelt. Hierfür wurden gemessene Abflussganglinien berücksichtigt und aus diesen eine maßgebende und repräsentative Bemessungsganglinie für den Spitzenabfluss eines BHQ = HQ200 zzgl. Klimazuschlag extrapoliert bzw. abgeleitet.

Zur Berücksichtigung und Bewertung des Umgangs mit den bestehenden Leitungen verfasste die Emschergenossenschaft eine Arbeitshilfe. Dort wird dargelegt, welchen Einfluss die Lage der Leitung auf den Deich hat und ob diese einen Einfluss auf die Standsicherheit hat. Falls ein Einfluss besteht, sind Handlungsmaßnahmen aufgezeigt.

Die ggf. notwendigen Ertüchtigungsmaßnahmen werden in Abstimmung mit dem Planer*innen, den Geotechniker*innen und der Emschergenossenschaft geplant. Im Vordergrund steht hierbei die Sicherstellung des Hochwasserschutzes. Erreicht werden kann dies u. a. durch Spundwände mittig im Deichkörper bzw. im Bereich der Deichkrone oder durch land- wie wasserseitig angeordnete Stützelemente (Spundwände, Gabionen, Winkelstützmauern etc.) zur Verlängerung der Sickerlinie oder Stützung des jeweiligen Böschungsfußes, wenn vorhandene Defizite dies erfordern. Können die einschlägigen Nachweise ggf. mit begleitenden Maßnahmen wie z.B. Auflastfiltern mit zulässiger Ausnutzung erbracht werden, wird eine Spundwand nicht notwendig. Weiterhin bestehen Möglichkeiten zur Stabilisierung und Abdichtung der Böschungen durch z.B. Geotextilien. All diese Maßnahmen werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die ökologische Umgestaltung der Emscher überprüft. So wird gewährleistet, dass unter der Vorgabe eines ausreichenden Hochwasserschutzes eine ökologische Verbesserung der Emscher gelingen kann.

5. Schlussbemerkungen

Die Emscher-Deiche zeichnen sich auch nach über 80 Jahren noch als funktionierendes Hochwasserschutzsystem aus, dass nun im Zuge der ökologischen Umgestaltung der Emscher fit gemacht wird für die Zukunft.

Die Emschergenossenschaft hat hierfür in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden eine Arbeitshilfe und Handlungsempfehlungen auf Basis vorliegender Erkenntnisse und den einschlägigen Richtlinien erstellt, die den Planer*innen und Gutachter*innen als Basis für ihre Arbeit dienen. Mit Hilfe dieser Werkzeuge und dem engen Schulterschluss zu den Planer*innen gelingt es einen zukunftssicheren Hochwasserschutz in Verbindung mit der ökologischen Umgestaltung der Emscher zu gestalten.

Literatur

Annen, G. & Stalman, V. (1968), 'Die Eignung von Nebengestein des Kohlebergbaus (Waschberge) zum Bau von Deichen und Dämmen', Technisch Wissenschaftliche Mitteilungen der Emschergenossenschaft und des Lippeverbandes

Bannach, M. (2016), 'Umgestaltung der Emscher im Einklang zwischen Ökologie und Hochwasserschutz', Bachelorarbeit RWTH Aachen

Borchert, C., Grün, E., Dudzik, A. & Jagsch, N. (2009), 'Einsatz von Waschbergen im Deichbau', Geotechnik 32 Nr. 2

Emschergenossenschaft (2022), 'Deichertüchtigung an der Emscher und ihren Nebenläufen - Arbeitshilfe für die Planung sowie für die geotechnischen und geohydraulischen Untersuchungen und Berechnungen', Essen 2022

Grün, E & Johann, G (2012), 'Hochwasser - eine Daueraufgabe' Bericht zum 42. IWASA Symposium

Kisse, A. & Ellebracht M. (2015), 'Bäume auf Deichen - Hochwasserschutz kontra ökologische Landschaftsplanung', 5. Symposium Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, Siegen

Geotextile Dammbasisbewehrung im Deichbau – Was ist zu beachten?

Dr. Arash Alimardani Lavasan, Ruhr-Universität Bochum

Dr. Oliver Detert, HUESKER Synthetic GmbH

Prof. Dr. René Schäfer, Hochschule Ruhr West

Zusammenfassung

Zur Kompensation von Standsicherheitsdefiziten beim Deichbau kommen häufig geotextile Bewehrungslagen zum Einsatz. Die Ermittlung der erforderlichen Zugfestigkeiten der Bewehrungslagen kann mithilfe von etablierten Berechnungsverfahren und vorhandener Normen und Regelwerke durchgeführt werden. Bei der Berechnung und der darauffolgenden bautechnischen Planung sind verschiedene Aspekte zu beachten, die in diesem Beitrag präsentiert und diskutiert werden. Hierzu gehören unklare Formulierungen in den Regelwerken, wie z.B. eine generelle Dehnungsbegrenzung der Bewehrung, sowie baupraktische relevante Aspekte, wie z.B. die Verteilung der ermittelten Defizitkräfte auf eine oder mehrere Bewehrungslagen. Ebenso wird die Kostenrelevanz aufgezeigt, für den Fall, dass stringente Empfehlungen gefolgt wird, ohne einen Zugewinn der Standsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit zu erlangen.

1. Einführung

Hochwasserschutzdeiche können in verschiedenen Formen und Höhen aufgebaut werden. Deichbauwerke an Fließgewässern werden grundsätzlich zoniert gebaut. In dieser Kategorie besteht der Deichquerschnitt eines klassischen 3-Zonen-Deiches aus einer Dichtungsschicht, dem Stützkörper und dem landseitigen Dränkörper. Die Dichtungsfunktion des Deiches kann je nach Bauweise durch eine Kerndichtung oder eine oberflächennahe Dichtung, die auf der wasserseitigen Böschung angeordnet wird, erreicht werden. Die Abdichtung wird in der Regel mittels einer mineralischen Schicht oder alternativ mit einer geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD) hergestellt. Das Dichtungssystem hat im Regelfall keinen relevanten Einfluss auf die globale Standsicherheit des Deiches selbst. Im Zuge der Auslegung des Deichbauwerkes sind sowohl die Standsicherheit als auch die Verformungen zu bewerten und darauf zu achten, dass das Abdichtungselement nicht negativ beeinträchtigt wird. Im Fall eines nicht ausreichend tragfähigen Untergrunds kann die Standsicherheit des Deichbauwerkes durch den Einbau einer geotextilen Basisbewehrung verbessert werden. Eine adäquate Bemessung des

Hochwasserschutzsystemen befasst sich in der Regel mit dem Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS). Bei Hochwasserschutzdeichen mit geotextiler Basisbewehrung gibt es technische und konzeptionelle Aspekte, die besonders beachtet werden müssen. In den derzeit gültigen Bemessungsrichtlinien gibt es Unklarheiten und Missverständnisse in Bezug auf das Systemverhalten und den relevanten Anforderungen, die einer technischen Diskussion bedürfen. Der vorliegende Beitrag soll dabei helfen, die Unklarheiten und Missverständnisse mithilfe von numerischen Modellierungen, Laboruntersuchungen und Feldmessungen zu thematisieren.

2. Klassen und Formen von Deichbauwerken

Laut Merkblatt DWA-M 507-1 (2011) gibt es drei Deichklassen in Abhängigkeit der Deichhöhe und des Schadenspotentials im Versagensfall (Deichklasse I=hohes Schadenspotential, Deichklasse II=mittleres bis geringes Schadenspotential, Deichklasse III=geringes Schadenspotential). Die Anforderungen an den Deichquerschnitt variieren in Abhängigkeit von der Deichklasse, wobei bei Deichen der Klasse III mit geringem Schadenspotential grundsätzlich ein homogener Aufbau zulässig ist. In diesem Fall übernimmt der Stützkörper gleichzeitig die Funktion der Tragfähigkeit und der Dichtung. Bei Deichen der Klassen I and II ist eine zonierte Ausführung mit einer Trennung zwischen den Funktionen Tragfähigkeit durch den Stützkörper (St), Dichtung durch die Dichtungsschicht (Di) und Dränung durch den Dränkörper (Dr) erforderlich. Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines typischen 3-Zonen-Deichs, wobei sich die Wasserseite (Deichvorland) auf der linken Seite befindet.

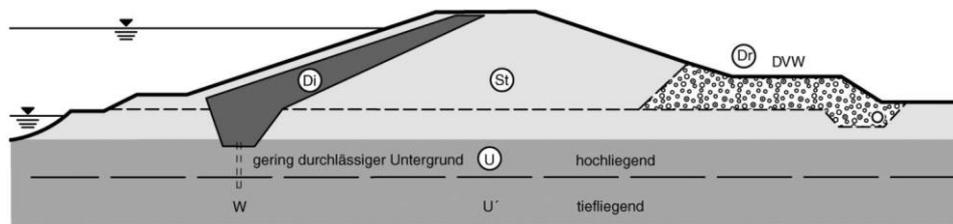


Abbildung 1: 3-Zonen-Deich (Merkblatt DWA-M 507-1)

3. 3 Zonen Deich: Funktionen und Nachweise

3.1 Dichtung

Die Funktion einer Dichtung besteht darin, das Wasser zurückzuhalten, die Sickerströmung durch den Deich zu minimieren und die Belastung durch Sickerströmung auf den Stützkörper zu verringern. Hierfür werden Materialien mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit eingebaut. Bei einem zonierten Deichbau kann die Abdichtungsschicht als wasserseitige Oberflächenabdichtung (Außendichtung, Böschungsdichtung) oder Innen- bzw. Kernabdichtung eingebaut werden. Oberflächenabdichtungen werden üblicherweise auf der wasserseitigen Böschung des Stützkörpers entweder als mineralische Dichtung (Einbau von ausreichend gering durchlässigem Bodenmaterial) oder als geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD) hergestellt. Häufig wird eine Innendichtung in der Form von z. B. Mixed-in-Place- oder Bentonit-Schmalwänden, in der Mitte des Deichquerschnitts angeordnet. Diese Bauweise hat einerseits Vorteile hinsichtlich des Schutzes der Dichtungsschicht, z.B. gegen Witterungseinflüsse, andererseits aber auch statische Nachteile, da innerhalb der wasserseitigen Deichböschung kein Potentialabbau erfolgt und i.d.R. der volle Wasserdruck auf die Innendichtung wirkt. Demzufolge steht nur die landseitige Deichböschung für die Sicherheit gegenüber einem Abschieben des Deichkörpers infolge der hydraulischen Beanspruchung zur Verfügung. Eine Ausnahme bildet hier die Ausbildung eines statischen Ersatzsystems, bei dem das Dichtungselement zusätzlich statische Aufgaben übernimmt.

Gemäß DIN 19712 (2013) müssen die Dichtungssysteme in Deichen:

- über eine ausreichend geringe Permittivität ψ verfügen,
- suffosions- und erosionsicher (innere und äußere Erosion) sein,
- Verformungen der Umgebung schadlos aufnehmen können,
- Alterungs- und Langzeitbeständigkeit aufweisen sowie
- witterungsbeständig (Hitze, Frost, etc.) sein.

3.2 Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit des Baugrundes ist entscheidend für die Standsicherheit des Deichbauwerkes. Bei geringtragfähigen Bodenschichten sind häufig Zusatzmaßnahmen zu ergreifen, um die Standsicherheit eines Deiches, z.B. ein kombiniertes Böschungs-Grundbruchversagen, zu gewährleisten. Mögliche Maßnahmen sind z.B. ein Bodenaustausch, eine alternative Form der Bodenverbesserung oder die Verwendung einer geotextilen Damm- bzw. Deichbasisbewehrung. Wenn die technische Machbarkeit gegeben ist, ist die zuletzt genannte Möglichkeit häufig die wirtschaftlichste Variante.

Bei der Planung und Prüfung eines Hochwasserschutzdeiches sind geotechnische Nachweise gemäß DIN 19712 bzw. DWA-Merkblatt M 507-1 zu führen. Die Inhalte beider Dokumente sind aufeinander abgestimmt und beziehen sich auf den übergeordneten Eurocode 7 (DIN EN 1997-1) und den zugehörigen nationalen Anhang sowie die ergänzende nationale Norm DIN 1054:2010. In diesem Rahmen sollte der allgemeine geotechnische Nachweis von Hochwasserschutzdeichen nach Eurocode 7 / DIN 1054 sowohl den ULS (Ultimate Limit State = Grenzzustand der Tragfähigkeit) als auch den SLS (Serviceability Limit State = Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) berücksichtigen. Der ULS beschreibt den Zustand eines Bauwerks, der bei Überschreitung zu einem rechnerischen Einbruch oder Versagen führt. Um diese Bedingung mit hinreichender Sicherheit zu erfüllen, wird ein Teilsicherheitskonzept eingeführt, das eine Erhöhung der charakteristischen Einwirkungen um einen Teilsicherheitsfaktor γ_F bei gleichzeitiger Reduzierung der Widerstände um einen Teilsicherheitsfaktor γ_M betrachtet. Nachzuweisen ist, dass die einwirkenden (erhöhten) Kräfte kleiner sind als die vorhandenen (reduzierten) Widerstände.

Die Relation zwischen den erhöhten einwirkenden Kräften und den reduzierten Widerständen bestimmt den sogenannten „Ausnutzungsgrad“, der bei einer ordnungsgemäßen Planung nachweislich kleiner oder gleich 1,0 beträgt.

Gemäß DIN 19 712 werden die erforderlichen Nachweise im ULS in drei Kategorien unterteilt:

- i) Nachweise der Gesamtstabilität (Böschungsbruch, Böschungsgrundbruch und Abschieben des Deichkörpers),
- ii) Nachweise der lokalen Standsicherheit (Nachweis der Böschungen gegen oberflächennahes Versagen und gegen Spreizung der Böschungssohle),
- iii) Nachweise der Lagesicherheit (hydraulische Nachweise wie Auftriebssicherheit, Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch und Stabilität der Dichtungsschicht bei Wasserdruck aus dem Deichkörper).

Dabei ist zu beachten, dass im Zuge der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung nachgewiesen werden muss, dass die Funktion der Deiche, und ihrer sicherheitsrelevanten Elemente nicht durch Verformungen (z.B. Setzungen) und Rissbildung in der Dichtung beeinträchtigt wird.

Beim Bau von Hochwasserschutzdeichen ist es nicht selten, dass das Bauwerk auf einem weichen Boden errichtet werden muss und daher der Nachweis der Standsicherheit (Gesamt- oder lokale Standsicherheit) zusätzliche Maßnahmen erfordert. Wie zuvor erwähnt, wird häufig der Einbau von geotextilen Damm- bzw. Deichbasisbewehrungen in Form von Geogittern oder Gewebe als eine der wirtschaftlichsten und technisch sinnvollsten Maßnahme angewandt.

3.3 Dränen

Die Ableitung von Sickerwasser aus dem Deichkörper erfolgt i.d.R. über landseitig angeordnete Dränkörper. Die Aufgabe des Dränkörpers besteht darin, das anfallende Sickerwasser drucklos (ausreichende hydraulische Filterwirkung) abzuführen und gleichzeitig eine ausreichende Filterstabilität gegenüber dem Stützkörper des Deichs zu gewährleisten. Darüber hinaus muss im Deichbau neben der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit grundsätzlich auch die Sicherheit gegen Materialtransport infolge Durchströmung und Unterströmung des Deichkörpers nachgewiesen werden. Hierzu zählen die Transportmechanismen der Oberflächenerosion, die Kontakterosion im Bereich von Schichtgrenzen, die Suffosion und der Erosionsgrundbruch am landseitigen Böschungsfuß. Während die Erdbaumaterialien für den Deichkörper hinsichtlich der Anforderungen an die Sicherheit gegenüber Materialtransport abgestimmt werden können, stellt jedoch insbesondere die Unterströmung des Deichkörpers, d.h. der Strömungsvorgang innerhalb des anstehenden Böden des Deichlagers eine besondere Anforderung an die Suffosionssicherheit der Böden sowie der Sicherheit gegenüber einem rückschreitenden Erosionsgrundbruch, dem sog. Piping, dar. Die typischen Lösungen hierzu zielen auf eine Verlängerung des Sickerwegs, vielfach durch die Anordnung eines zusätzlichen wasserseitigen Dichtungsteppichs, zur Begrenzung der auftretenden hydraulischen Gradienten.

4. Technische Aspekte bei der Bemessung der Deichbauwerken mit geosynthetischer Basisbewehrung

In der Regel wird eine geosynthetische Basisbewehrung bei Deichbauwerken eingesetzt, um:

1. Standsicherheitsdefizite beim Nachweis der globalen und lokalen Standsicherheit sowie dem Nachweis der Lagesicherheit des Deichbauwerkes im Grenzzustand zu kompensieren. Hierbei ist die Grundvoraussetzung für den Einsatz einer Basisbewehrung eine Mindestfestigkeit bzw. -steifigkeit des Deichlagers gegenüber der Einwirkung aus Eigengewicht des Deichkörpers. Treten zu große Setzungen ein, kann dies die Funktionsfähigkeit des Deiches beeinträchtigen, da entweder kein ausreichender Freibord

infolge zu großer Setzungen sichergestellt werden kann oder innenliegenden Dichtungselemente zu stark gedehnt werden und Risse auftreten,

2. den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit durch die Reduzierung der Differenzverformungen zwischen den verschiedenen Bestandteilen des Deichkörpers zu führen. Diesem Aspekt liegt die Forderung nach DWA-M 507-1 einer ausreichenden Sicherheit gegenüber einer Rissbildung der Dichtungsschicht zugrunde. Bei zu großen Differenzsetzungen und daraus resultierenden Dehnungen der einzelnen Querschnittselementen des Deichs besteht das Risiko, dass insbesondere bei zonierten Dichtungen (z.B. 3-Zonen-Deich mit wasserseitiger Oberflächendichtung mit begrenzter Schichtstärke) Risse auftreten können, welche zum einen die Abdichtungsfunktion beeinträchtigen und zum anderen den Ausgangspunkt eines Materialtransports darstellen können.

Bei sehr weichem bzw. geringtragfähigem Baugrund können zur Begrenzung der Setzungen weitere Maßnahmen, wie z.B. Bodenaustausch oder andere Formen der Bodenverbesserung erforderlich werden.

4.1 Zulässige Dehnung in der Basisbewehrung

Eine Frage, die in der Bemessungsphase geklärt werden muss, betrifft die maximale Dehnung der Basisbewehrung, um die Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion ohne Rissbildung innerhalb des Abdichtungssystems zu gewährleisten. Grundlage für die Bemessung und Ausführung von Deichbauwerken sind, wie bereits erwähnt, die DIN 19712 und das Merkblatt DWA-M 507-1. Hinsichtlich der Verwendung von Geokunststoffen im Deichbau gibt die DIN 19712 (Kapitel 12.2) folgende Empfehlung: *„Bewehrungen aus Geokunststoffen in Deichkörpern können zur Verbesserung bzw. Sicherung der Standsicherheit beitragen. Hierfür können Geogitter oder geotextile Gewebe verwendet werden. Zu beachten ist, dass bei Geokunststoffen erhebliche Dehnungen auftreten. Um die Gebrauchstauglichkeit (Rissbildung) zu sichern, wird empfohlen, die sich aus den Tragfähigkeitsberechnungen aufgrund der maximalen Dauerbelastung des Geokunststoffes ergebenden relative Dehnung auf 1 % zu begrenzen.“*

Diese Empfehlung ist nicht ganz eindeutig und auch aus technischer Sicht in Frage zu stellen:

- Was bedeutet „maximale Dauerlast“? Dies könnte z.B. die Einwirkung aus dem fertiggestellten Deichbauwerk sein. Wie wäre hier eine temporärer Vorbelastungsschüttung zu berücksichtigen?
- Was ist mit „relative Dehnung“ gemeint? Dies könnte z.B. die Dehnung sein, die über die Zeit unter der „maximalen Dauerlast“ nach Fertigstellung des Deichkörpers eintritt (dem sogenannten Kriechen) oder die absolute Dehnung zur Aktivierung der Zugkraft, die sich auf Grundlage der statischen Berechnungen ergibt oder die Summe aus Kriechen und der Aktivierungsdehnung aus der statischen Berechnung.

- Wozu ist die Dehnung in Bezug zu setzen?
- Worauf gründet diese Empfehlung und ist sie an sich für die unterschiedlichen Ausführungsvarianten der Deichbauwerke sinnvoll?
- Ist es generell sinnvoll den ULS mit den SLS Nachweis zu vermischen?

Zu beachten ist, dass eine zu strenge und möglicherweise unnötige Dehnungsbegrenzung erhebliche Mehrkosten verursachen kann.

Um diesen Fragestellungen genauer auf den Grund zu gehen, wurde in einer numerischen Studie untersucht, inwieweit eine Begrenzung der Dehnung auf 1% bei der Verwendung von außenliegenden GTDs als wasserseitige Dichtung sinnvoll ist.

4.1.1 Numerische Bewertung der Verformungsanforderung der DIN 19712 in Bezug auf Deichsetzungen, Dehnungen in der Basisbewehrung sowie dem Dichtungselement

Zur Untersuchung der oben genannten Problematik wurden numerische Berechnungen durchgeführt. Die gekoppelten hydromechanischen Analysen wurden mit Hilfe der Software PLAXIS 2D durchgeführt. Das hydromechanische Verhalten des Stützkörpers und des weichen Untergrunds wurde mit dem "Hardening Soil" (HS) bzw. "Soft Soil" (SS) Modell modelliert. In diesem Rahmen wird ein konventioneller Deichquerschnitt mit einer Höhe von 3 m, einer Böschungsneigung von 1:3, einer Kronenbreite von 3 m und einer Deichbasisbreite von 21 m angenommen. Das Deichbauwerk wird auf einer 10 m mächtigen, sehr weichen Tonschicht errichtet. Der Grundwasserspiegel wird als an der Geländeoberkante liegend angenommen, so dass der Baugrund vollständig gesättigt ist. Sowohl die geringe Steifigkeit des Untergrundes als auch der Grundwasserspiegel an Geländeoberkante stellen in Bezug auf die Anforderungen der DIN 19712 sehr ungünstige Randbedingungen dar, deren Einfluss auf die Dichtelemente untersucht werden sollen. Die axiale Dehnsteifigkeit der Basisbewehrung beträgt $J = 1000 \text{ kN/m}$, was eine relativ weiche geotextile Bewehrung im Sinne einer Worst-Case-Analyse darstellt. Die axiale Dehnsteifigkeit der GTD wurde mit $J = 500 \text{ kN/m}$ angesetzt.

Um den Einfluss der Baugrundsteifigkeit auf das Deichverhalten zu untersuchen, wurden in dieser Studie zwei verschiedene Baugrundszszenarien betrachtet: eine "normale" Tonschicht (ca. $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 2,000 \text{ kN/m}^2$ bei $p_{\text{ref}} = 100 \text{ kN/m}^2$) und eine sehr weiche Tonschicht (ca. $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 660 \text{ kN/m}^2$ bei $p_{\text{ref}} = 100 \text{ kN/m}^2$). In beiden Fällen wird eine Basisbewehrung in der Modellierung berücksichtigt. Weitere Erläuterungen zu den in der vorliegenden Studie verwendeten Stoffmodellen finden sich in Brinkgreve et al. (2014). Die Bodenparameter sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Bodenparameter (HS Modell)

Eigenschaften	Deich	tragfähiger Bau- grund
$E_{\text{oed.}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}}$ (MN/m ²)	50	30
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MN/m ²)	150	90
c (kN/m ²)	0,2	0,5
ϕ (deg)	38	32,5
ψ (deg)	8	2,5
γ_{sat} (kN/m ³)	20,5	19

Tabelle 2: Bodenparameter Tonschicht (SS Modell)

Eigenschaften	„normaler“ Ton	Sehr weicher Ton
λ^*	0,05	0,15
κ^*	0,01	0,03
e_{ini}	1,0	1,0
c_{ref} (kN/m ²)	1,0	1,0
ϕ (deg)	23	23
ψ (deg)	0	0
γ_{sat} (kN/m ³)	13	13

Der Aufbau des Deiches wurde lagenweise mit einer Dicke von 50 cm simuliert.

Ein Vergleich der äußeren Deichkubatur vor und nach der Setzungsberechnung (siehe Abb. 2) zeigt, dass in den Böschungen aufgrund der Setzungsmulde eine Stauchung eintritt. Diese resultiert aus den größeren Setzungen unterhalb der Deichkrone im Vergleich zu den Setzungen am Böschungsfuß. Für die geosynthetische Tondichtungsbahn bedeutet dies, dass unabhängig von der Dehnung in der Basisbewehrung immer eine Stauchung bei Setzungen der Deichbasis eintreten wird. Ein Zugbeanspruchung, die bei sehr großer Dehnung zu Undichtigkeiten in der geosynthetischen Tondichtungsbahnen führen könnte, tritt nicht ein. Die Betrachtung setzt an dieser Stelle voraus, dass die Baugrundsichtung horizontal verläuft und sich somit eine klassische Setzungsmulde unterhalb des Deichs mit der maximalen Setzungsordinate in der Deichachse einstellt. Sofern die Schichtmächtigkeiten der stark kompressiblen Weichschichten über den Deichquerschnitt variieren, können die Ergebnisse von dieser Annahme abweichen. Unabhängig davon könnten GTDs jedoch Dehnungen von bis zu 10% erfahren, ohne an Dichtwirkung zu verlieren. D.h. das Auftreten von Zugdehnungen innerhalb der GTD, z.B. als Folge einer sehr ungünstigen Schichtenfolge des Deichlagers, führen bei weitem nicht automatisch zum Risiko einer Rissbildung.

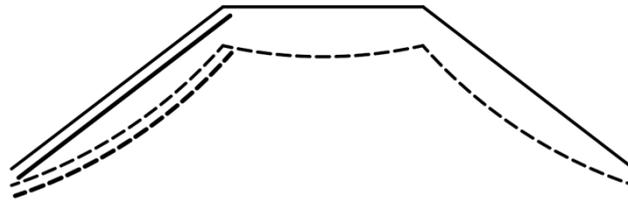


Abbildung 2: Darstellung der Deichverformung mit einer GTD auf der linken Seite vor (durchgezogene Linien) und nach (gestrichelte Linien) den Konsolidierungssetzungen

Abbildung 3 verdeutlicht die Dehnungs- und Stauchungs- bzw. Kompressionsbereiche im Deichkörper und Baugrund. Die Bereiche 1 und 3 werden gestaucht bzw. komprimiert, während Bereich 2 gedehnt wird. Hier wird ersichtlich, dass es bei innliegenden Dichtungselementen durchaus sinnvoll ist, eine Begrenzung der zulässigen Verformungen bzw. Setzungen vorzunehmen, um die Dichtheit des innenliegenden Dichtungselementes über die Gebrauchsdauer sicherzustellen. Eine Verformungsbegrenzung bei innenliegenden Dichtelementen ist daher sinnvoll, unabhängig davon, ob eine geotextile Deichbasisbewehrung verwendet wird oder nicht.

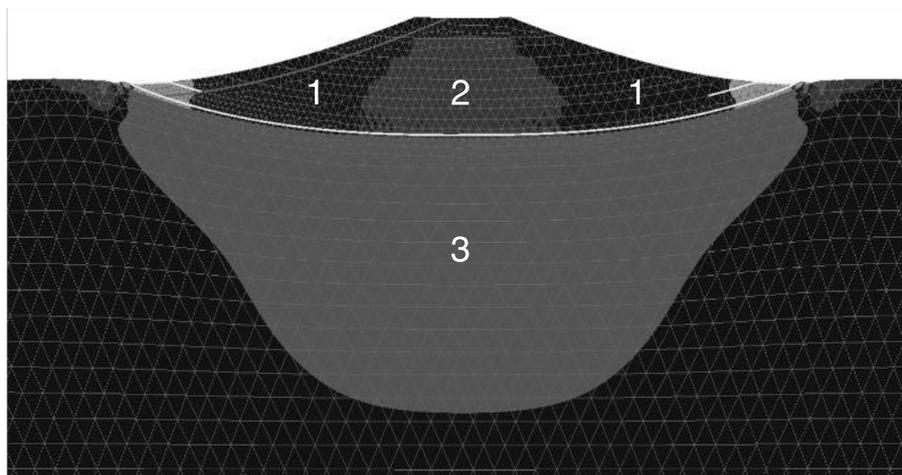


Abbildung 3: Dehnungs- und Kompressionsbereiche im Modell (1: Kompression bei Konsolidierungssetzung; 2: Dehnung; 3: Kompression infolge Deichgewicht)

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der axialen Dehnung der GTD (negative Werte bedeuten Stauchung) pro Bauphase (1. bis 6. Schicht), wobei der 7. Zeitpunkt der reinen Konsolidierung nach dem Bau entspricht. Es wird deutlich, dass die Kompression in der Ton-Dichtungsbahn umso geringer ist, je höher die Steifigkeit des Baugrundes ist, oder

andernrum, je größer die Setzungen und somit auch die Dehnungen der Deichbasisbewehrung, desto größer die Stauchung der außenliegenden Dichtung.

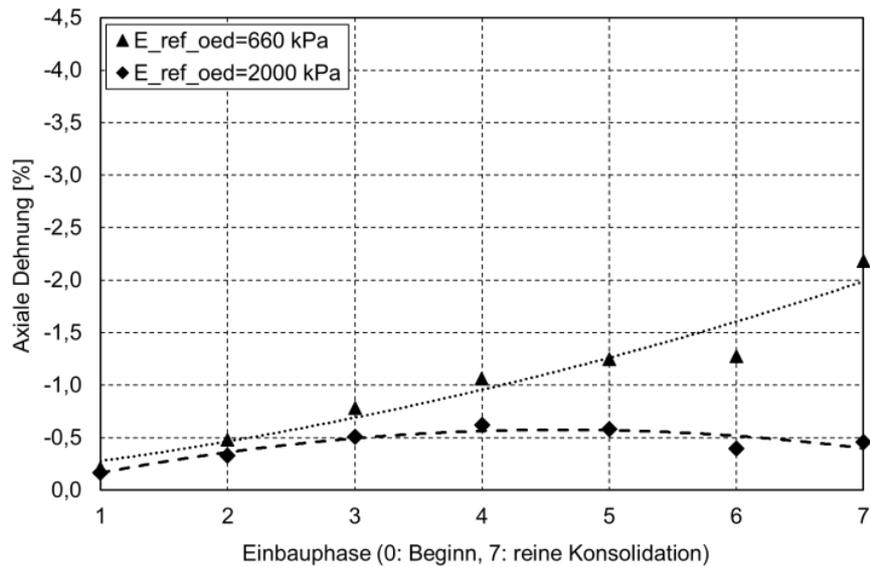


Abbildung 4: Maximale Stauchung in der GTD zu unterschiedlichen Bauphasen des Deiches

Abbildung 5 zeigt die Verschiebungen und Verformungen der Tondichtungsbahn bei unterschiedlichen Baugrundszszenarien. Die Deichsetzungen führen zu einer entsprechenden Verformung der Tondichtungsbahn. Je größer die Setzungen oder Setzungsdifferenzen sind, desto größer ist grundsätzlich die Stauchung der Tondichtungsbahn. Hinsichtlich der Relevanz der Dehnungsbegrenzung für verschiedene Deich- und Abdichtungsarten fordert die DIN 19712 in Kapitel 11.4.2.1: „Es ist nachzuweisen, dass sicherheitsrelevante Elemente bzw. Bereiche im Deichkörper oder Untergrund keinen Verformungen ausgesetzt sind, die ihre Funktion einschränken.“

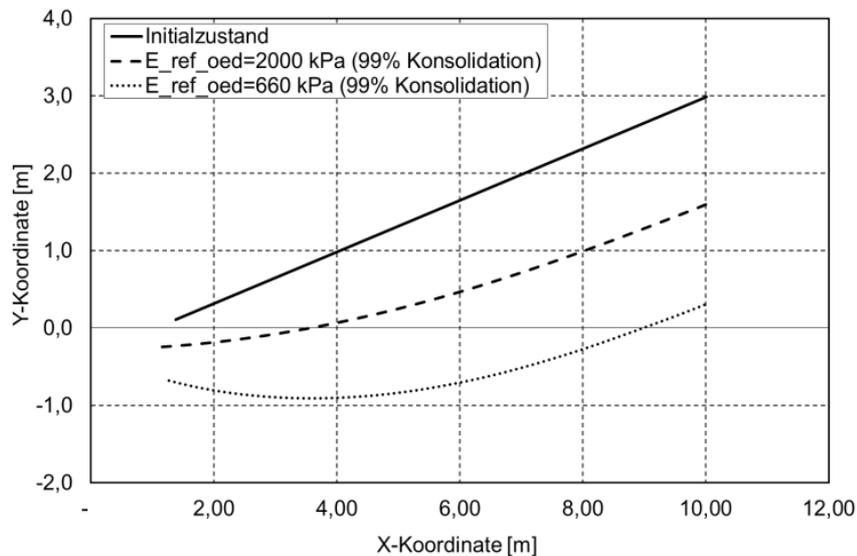


Abbildung 5: Verschiebung und Verformung der GTD nach der Konsolidierungsphase

Die Auswertung der numerischen Ergebnisse zeigt, dass eine generelle Begrenzung der Dehnung einer Basisbewehrung auf maximal 1 % nicht notwendig ist, um (Zug-) Dehnungen (bzw. Zugrisse) in der außenliegenden Tondichtungsbahn zu vermeiden. Dies betrifft vor allem den Anwendungsfall einer horizontalen Baugrundsichtung.

Da die Deichsetzung keine (Zug-)Dehnungen, sondern Stauchungen innerhalb der Böschungen bewirkt, entspricht eine höhere Dehnung in der Basisbewehrung als 1% einer größeren Setzung des Deiches und einer höheren Stauchung in der Tondichtungsbahn im Bereich der wasserseitigen Deichböschung. Daher ist eine größere (Zug-)Dehnung in der Basisbewehrung nicht mit dem Risiko einer möglichen Rissbildung im außenliegenden Dichtungselement und einer daraus resultierenden erhöhten Durchlässigkeit verbunden. Infolge der Setzungen des Deiches und den damit verbundenen Verformungen wird die Abdichtung tendenziell eher gestaucht als gedehnt.

Die Schlussfolgerungen gelten jedoch nicht für innenliegende Kerndichtungen. Wie in Abbildung 3 ersichtlich wird, treten im Kernbereich des Deichkörper bei Setzung des Deichs Dehnungen auf, die zu einer Rissbildung führen können. Hier ist auf eine Verträglichkeit der Verformungen mit der Unversehrtheit des Dichtungselementes sehr wohl zu achten.

Darüber hinaus können nicht horizontal verlaufende Schichtgrenzen des Baugrunds, d.h. variierende Schichtmächtigkeiten der Weichschichten über den Deichquerschnitt, zu abweichenden Ergebnissen führen. In diesem Fall kann eine gesonderte Betrachtung des Systemverhaltens, z.B. mittels FE-Berechnungen, erfolgen, um das Risiko von Zugdehnungen im Bereich des Abdichtungselements bewerten zu können.

4.1.2 Auswirkungen einer Dehnungsbegrenzung auf die erforderliche Zugfestigkeit der Basisbewehrung

Die Verwendung einer technisch nicht erforderlichen Dehnungsbegrenzung bei Ausführung der Deichbasisbewehrung führt zu erheblichen Mehrkosten des Deichbauwerkes. Die Berücksichtigung der 1%-Dehnungsanforderung nach DIN 19712 führt in vielen Fällen dazu, dass geotextile Basisbewehrungen mit extrem hohen Zugfestigkeiten verlegt werden müssen, ohne eine tatsächliche Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit für die Abdichtungsfunktion zu gewährleisten. Folgendes Beispiel soll dies verdeutlichen: Wenn die Standsicherheitsberechnung (Grund- und Böschungsbruchberechnung basierend auf Bishop- oder Blockgleitmethode) eine erforderliche Bemessungsfestigkeit von 130 kN/m ergibt, resultiert dies unter Berücksichtigung aller Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren für ein Bewehrungselement aus dem Rohstoff Polyester (PET) in einer Kurzzeitfestigkeit des Geokunststoffes von ca. 300 kN/m. Bei Anwendung des 1% Kriterium als maximal zulässige Dehnung ergibt sich hingegen eine erforderliche Kurzzeitzugfestigkeit von 2500 kN/m, eine um den Faktor 8 höhere Festigkeit. Dies wird sich auch in den Kosten mit Faktor 8 oder größer widerspiegeln. Diese deutlich höhere erforderliche Kurzzeitfestigkeit ergibt sich maßgeblich aus der sehr geringen Auslastung der Bewehrung und der Berücksichtigung der Kriechdehnung der Geokunststoffe unter Last.

4.2 Ein- oder mehrlagige Basisbewehrung

Aus Standsicherheitsanalysen ergibt sich ein gegebenenfalls vorhandenes Kräftedefizit, welches mithilfe einer Deichbasisbewehrung in der Aufstandsfläche des Deichbauwerkes kompensiert werden muss. Das teilweise recht große Kräftedefizit stößt häufig die Überlegung an, dies mittels einer mehrlagigen Anordnung von Geokunststoffbewehrungen geringerer Zugfestigkeit zu kompensieren, welche in Summe die erforderliche Zugfestigkeit dem System zur Verfügung stellen. Aus baupraktischer Sicht bedeutet dies zunächst einen erhöhten Aufwand beim Einbau, da zum einen der Verlegeaufwand mit der Anzahl der Bewehrungslagen zunimmt und auch der Bodeneinbau zwischen den einzelnen Bewehrungslagen in geringerer Schichtmächtigkeit erfolgt, sodass der Verdichtungsaufwand ansteigt. Neben den baupraktischen Nachteilen hat sich aus Messungen instrumentierter Damm- bzw. Deichbauwerke und numerischen Analysen herausgestellt, dass es zudem zu einer stark abweichenden Be- bzw. Auslastung der einzelnen Bewehrungslagen kommt. Obwohl die Bewehrungslagen in einem vertikalen Abstand von nur 30 bis 50 cm eingebaut bzw. simuliert wurden, ergab sich bei einem zweilagigen Aufbau eine rund zweimal so hohe Auslastung der unteren Lage im Vergleich zur darüberliegenden Lage. Die Dehnsteifigkeiten und Festigkeiten der beiden Bewehrungslagen waren dabei identisch bzw. handelt es sich um dasselbe Produkt.

Ein baupraktisches Beispiel für die ungleiche Aus- bzw. Belastung der Bewehrungslagen zeigt sich am Beispiel einer Brückenanrampung im Zuge des Ausbaus der A26. Für den bis 16 m hohen Damm wurde eine Bemessungsfestigkeit von knapp 400 kN/m ermittelt. Aufgrund formeller vertraglicher Gründe wurde beschlossen, anstatt einer Bewehrungslage mit einer Kurzzeitfestigkeit von 1200 kN/m zwei Bewehrungslagen mit einer Kurzzeitfestigkeit von 600 kN/m mit einem vertikalen Abstand von 50 cm einzubauen. Der Damm wurde langweise aufgebaut, so dass sich der entstehende Porenwasserüberdruck zwischen den einzelnen Schüttstufen teilweise abbauen konnte. Die Dehnungen der Bewehrungslagen wurden während der Bau- und anschließenden Konsolidierungsphase kontinuierlich erfasst. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Dehnungen sowie der Dammhöhe über die Zeit. Es wird ersichtlich, dass die untere Lage deutlich stärker ausgelastet ist als die obere Lage.

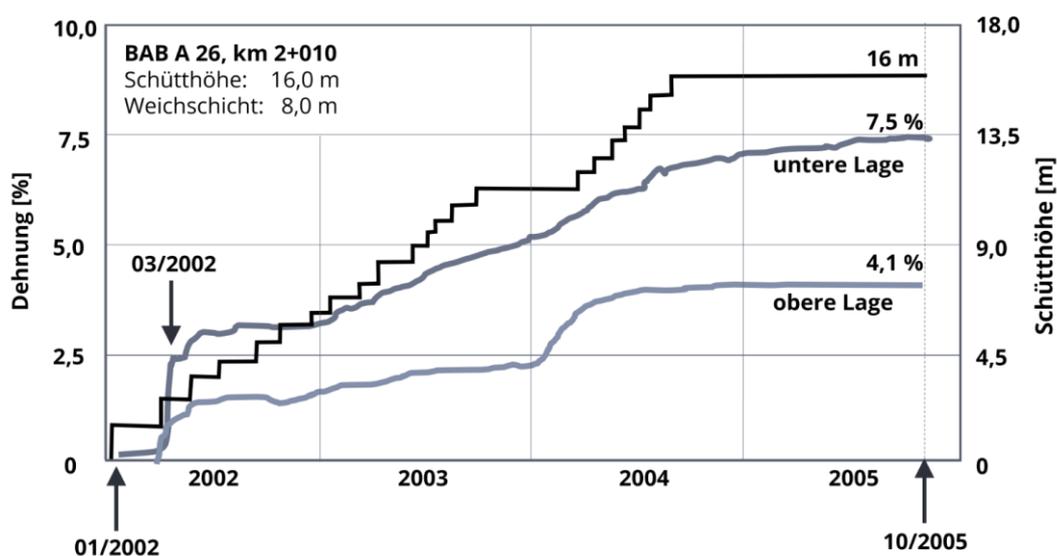


Abbildung 6: Dehnungsentwicklung in mehrlageriger Geokunststoffbewehrung, Blume et al. (2006)

Von ähnlichen Ergebnissen bei einem Bauwerk in Frankreich berichten Rowe und Li (2003), bei welchem die untere Bewehrungslage bei einem 5,8 m hohen Damm auf weichem Untergrund knapp zweifach höhere Dehnungen aufwies als die obere Bewehrungslage.

Bei der Bemessung einer Basisbewehrung ist somit eine gleichmäßige Aufteilung der Defizitkräfte auf die Anzahl der Bewehrungslagen nicht realistisch bzw. zulässig. Ein solches Vorgehen birgt die Gefahr, dass die untere Lage überlastet wird und versagt. Tritt dies ein, kann auch die obere Bewehrungslage das Kräftedefizit nicht mehr auffangen und wird ebenfalls versagen. Die Modellvorstellung, das Kräftedefizit auf mehrere Lagen aufzuteilen, um somit auch eine höhere Redundanz im System zu erhalten, bildet

das tatsächliche Systemverhalten nicht zutreffend ab und liegt darüber hinaus auf der unsicheren Seite. Ist eine Aufteilung des Kräftedefizits auf mehrere Lagen erwünscht, so müssen die Dehnsteifigkeiten und Zugfestigkeiten der Produkte entsprechend aufeinander abgestimmt werden, um eine Unter- bzw. Überlastung der Bewehrungslagen zu vermeiden. Aus heutiger Sicht ist dies mittels numerischer Simulationen grundsätzlich möglich. Alternativ ist zu prüfen, ob das vorhandene Kräftedefizit gegebenenfalls mit einer einzigen Bewehrungslage höher Zugfestigkeit kompensiert werden kann. Neben den baupraktischen Vorteilen erfolgt bei einer einlagigen Damm- bzw. Deichbasisbewehrung eine eindeutige Kraftzuweisung bzw. -aufnahme. Bei korrekter Bemessung und Auslegung kann so eine Überbeanspruchung der Bewehrungslage mit der Gefahr des Versagens ausgeschlossen werden. Demnach ist es technisch sinnvoll, wenn immer möglich eine einlagige Bewehrung zu wählen. Dieser Sachverhalt wurde u.a. im British Standard 8006-1-2010 „Code of Practice for Strengthened / Reinforced Soils and other Fills“ (British Standard Institute ,2010), der britische Bemessungsempfehlung für Erdbauwerke mit Geokunststoffen, aufgenommen. Hier wird in Abschnitt 8.4.4.5 empfohlen, dass wenn immer möglich, eine einlagige Bewehrung zu wählen ist.

5. Zusammenfassung und Fazit

Bei der Errichtung von Deichbauwerken ist es häufig notwendig konstruktive Maßnahmen zu ergreifen, um die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks zu gewährleisten. Bei Standsicherheitsproblemen kommen geotextile Deichbasisbewehrungen zur Kompensation von Kräftedefiziten zum Einsatz. Bei der Bemessung und Auslegung des Deichbauwerks und eventueller konstruktiver Maßnahmen ist darauf zu achten, dass eintretende Verformungen die Funktionstauglichkeit des Deiches und seiner Bestandteile, beim 3 Zonen-Deich den Stützkörper, die Dichtung und den Dränkörper, nicht beeinträchtigen. In der DIN 19712 wird in Bezug auf die Verwendung von geotextilen Deichbasisbewehrungen eine maximale relative Dehnung unter Dauerlast von 1% gefordert. Nicht eindeutig geregelt sind die Bedeutungen von „relative Dehnung“ und „Dauerlast“. Hinzu kommt, dass eine allgemein Dehnungsbegrenzung ohne Berücksichtigung der Lage und Art des Dichtungselementes nicht sinnvoll ist und hohe, unnötige Kosten verursachen kann. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass eine Dehnungsbegrenzung bei einer innenliegenden Kerndichtung durch aus sinnvoll ist, jedoch bei einer außenliegenden, böschungsp parallelen Tondichtungsbahn, als Dichtelement keine Rolle spielt. Bei vorwiegend horizontaler Baugrundsichtung, d.h. bei Ausbildung einer Setzungsmulde unterhalb des Deichbauwerks, kommt es zu einer Stauchung der Böschungsfanken und somit ebenfalls des wasserseitigen Dichtungselementes Zugdehnungen treten demgegenüber nur im Kernbereich des Erdkörpers auf. Je größer die Setzungen und somit die Dehnung in der Bewehrung, desto größer sind auch die Stauchung des

Dichtelementes. Im Weiteren wurde die Anzahl der Bewehrungslagen zur Kompensation des Kräfte-defizites diskutiert. In Feldmessungen sowie numerischen Simulationen wird ersichtlich, dass z.B. bei einem zweilagigen Aufbau mit dem gleichen Produkt, die untere Lage nahezu doppelt so hoch belastet wird, wie die obere Lage. Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ist daher die Verwendung einer einlagigen Basisbewehrung zu bevorzugen.

Literatur

Merkblatt DWA-M 507-1 (2011), 'Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb.

DIN 19712:2013-01 (2013), 'Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern.'

Brinkgreve, R., Engin, E., & Swolfs, W. (2014). *PLAXIS reference manual*. Delft, Netherlands: Plaxis BV.

Blume, K., Alexiew, D., Glötzl, F. (2006). The new federal highway (Autobahn) A26 in Germany with high geosynthetic reinforced embankments on soft soil, *Geosynthetics*, J. Kuwano & J. Koeseki, Rotterdam

Rowe, K., Li, A. (2003). Insights from case histories: Reinforced embankments and retaining wall, *Landmarks in Earth Reinforcement*, International symposium on earth reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan

British Standard Institute (2010). BS 8006-1, Code of Practice for Strengthened / Reinforced Soils and other Fills, London, British Standard Institut

Geotechnische Lösungen für die Herstellung eines Hochwasserschutzdeichs auf stark mächtigen Torfablagerungen

Anna Amchislavski, Dr. Spang GmbH, Witten

Prof. Dr. René Schäfer, Dr. Spang GmbH, Witten

Hartmut Hangen, HUESKER Synthetic GmbH

Zusammenfassung

Im Zuge der Umgestaltung des Emschereinzugsgebiets in Dortmund wurde im Bereich des Ortsteils Wischlingen die Herstellung eines Hochwasserschutzdeichs als Lückenschluss erforderlich, um eine topografisch geeignete Fläche zukünftig für die Rückhaltung von Starkregenabflüssen zu nutzen. Die Besonderheit des Projektgebiets besteht in den örtlich anstehenden, stark mächtigen Torfbänken und stark organischen Schluffschichten, welche eine besondere Betrachtung der Standsicherheit und des Zeitsetzungs-Verhaltens des Deichs bzw. des Deichlagers erforderten. Hierzu wurden in einer Variantenstudie unterschiedliche Verfahren der Baugrundverbesserung zur Erhöhung der Standsicherheit und zur Beschleunigung der eintretenden Verformungen durchgeführt. Die Lösungsvariante sah eine dehnsteife Deichbasisbewehrung über ein Geogewebe vor, wodurch die Standsicherheit des Deichs insbesondere für den Anfangszustand sichergestellt werden konnte. Dadurch entstand die Möglichkeit, den Deichkörper kontinuierlich aufzubauen ohne erforderliche Konsolidationsphasen innerhalb des Bauablaufs abwarten zu müssen und die Herstellungsarbeiten dafür zu unterbrechen. Zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit wurde der Deich um das Maß der zu erwartenden Setzungen überhöht ausgeführt, was angesichts der anstehenden Weichschichten zu einer Überhöhung von bis zu 100 cm führte. Über eine hydraulische Anbindung des Deichlagers an eine zusätzliche Dränageschicht unterhalb des Deichkörpers konnte die Konsolidationsdauer auf ein vertretbares zeitliches Maß begrenzt werden, so dass auf zusätzliche Maßnahmen zur Konsolidationsbeschleunigung verzichtet werden konnte. Die Anwendung der Beobachtungsmethode im Hinblick auf die auftretenden Setzungen ermöglichte eine Rückrechnung der maßgebenden bodenmechanischen Kennwerte und eine Beurteilung der in der Planung zugrunde gelegten Parameter.

1. Umbau des Emschereinzugsgebiets im Stadtgebiet Dortmund

1.1 Umgestaltung des Roßbachs und seiner Fließgewässer

Mit dem Auslaufen des Bergbaus im Ruhrgebiet entfiel die Notwendigkeit, das Abwasser über offene Fließgewässer innerhalb des Emschersystems abzuleiten. In der Folge wurde es möglich, Abwasserkanäle zu verlegen und die ökologische Funktion der Fließgewässer im Emschereinzugsgebiet wiederherzustellen und auszubauen. Neben dem ökologischen Ausbau zählt vor dem Hintergrund des Klimawandels hierzu ebenfalls die Gewährleistung des Hochwasserschutzes.

Innerhalb des westlichen Stadtgebiets von Dortmund diente der Roßbach jahrzehntelang als Vorfluter für Schmutz- und Niederschlagswasser. Die Abwässer wurden zur Zeit des aktiven Bergbaus ungeklärt in den Roßbach eingeleitet, welcher seinerseits in die Emscher mündet. Im Zuge des Umbaus des Emschersystems wurden Abwasserkanäle entlang des Roßbachs gebaut, wodurch die Abwassereinleitung in das Gewässer entfallen konnte und die Abwässer nun der Kläranlage Dortmund-Deusen zugeleitet werden.

Der Umbau des Roßbachsystems erfolgte innerhalb von 3 Entwurfsabschnitten (EA). Neben dem Hauptlauf des Roßbachs zählen hierzu die Dünnebecke, der Schmechtingsbach, der Dellwiger Bach, der Bärenbruchgraben, der Rahmer Graben und der Winkelgraben. Abbildung 1 stellt die Entwurfsabschnitte im Einzugsgebiet des Roßbachs dar. Insgesamt umfasst die Baumaßnahme eine Länge von ca. 10 km und eine Einzugsfläche von ca. 30 km².

Im Ausgangszustand waren der Roßbach und seine Zuläufe als v-förmiges Abflussprofil mit einer Sohlshalenbefestigung und einer Einschnittstiefe von ca. 3 – 5 m in das Gelände weitestgehend gradlinig ausgebaut. Die Böschungsneigungen betragen ca. 1:1,5. Die ökologischen Umbaumaßnahmen umfassten zum einen den Rückbau der vorhandenen Sohlbefestigungen der Gewässer, zum anderen eine Gewässeraufweitung innerhalb der zur Verfügung stehenden Flächen zur naturnahen Neugestaltung. Darüber hinaus wurden im Zuge dieser Arbeiten ebenfalls Hochwasserschutzmaßnahmen umgesetzt. Der Neubau bzw. die Ertüchtigung von vorhandenen Deichbauwerken war erforderlich, da infolge des langjährigen Bergbaus großräumige Geländesenkungen von bis zu 12,5 m eingetreten und hierdurch entsprechende Hochwasserrisiken innerhalb des anthropogen stark überprägten Stadtgebiets entstanden sind. Insbesondere die hohen Abflussspitzen stellen ein Risiko innerhalb der Poldergebiete der Ortsteile Marten und Wischlingen, Tiefpunkte innerhalb des Gewässersystems, dar. Das Starkregenereignis vom 26.07.2008, bei welchem u.a. die Ortslage Dortmund-Marten stark betroffen war, hat dies eindrücklich gezeigt und als katastrophales Extremereignis in das Bewusstsein der Anwohner eingepreßt. Die u.a. als Konsequenz dieses Ereignisses vorgesehenen Hochwasserschutzmaßnahmen umfassen den Neubau bzw. die Ertüchtigung von Deichen, die

Bereitstellung von Rückhalteflächen bzw. Hochwasserrückhaltebecken (HRB) sowie den Bau von Polderpumpwerken.

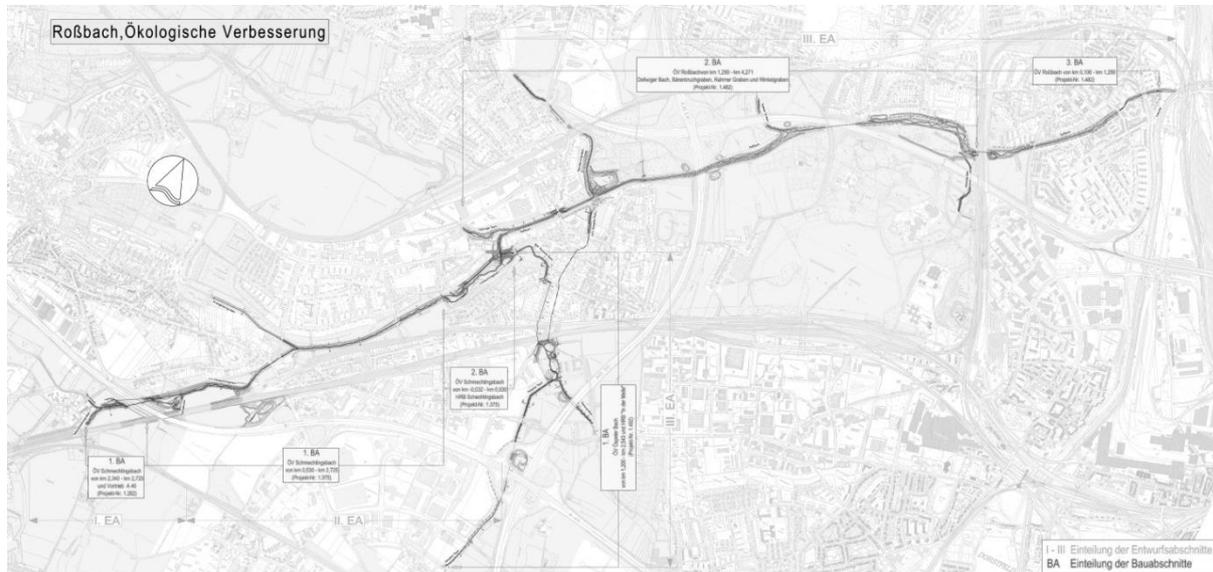


Abbildung 1: Roßbach-Einzugsgebiet (Übersicht)

1.2 Baumaßnahmen und Hochwasserschutz im Bereich Dortmund Wischlingen

Im Gebiet des III. EA des Roßbachs befinden sich die Ortslagen Dorstfeld, Huckarde, Marten und Kirchlinde. Ebenfalls liegt innerhalb dieses Abschnitts das Poldergebiet Wischlingen, innerhalb dessen der Roßbach vor der Umbaumaßnahme S-kurvenförmig zwischen beidseitig hoch aufragenden Deichen verlief und über einen Freigefälledurchlass DN 2600 mit rechtsseitigem Düker-Bypass DN 3450 die vorhandene S-Bahnlinie S4 kreuzte. Rechtsseitig an diesen Gewässerabschnitt schloss sich eine Freifläche an, welche bereits durch die S4-Bahntrasse und den Damm der Stadtautobahn OWIIIa eingefasst war und durch den Neubau eines Hochwasserschutzdeichs als Lückenschluss nun zwischen dem bestehenden DB- und OWIIIa-Damm zur Rückhaltefläche mit einem Rückhaltevolumen von ca. 120.000 m³ ertüchtigt werden sollte.

Für die Nutzung dieser Fläche wurde es erforderlich, den innerhalb des Streckenabschnitts liegenden rechtsseitigen Deich zu durchstoßen, um den Roßbach breitflächig in den vorhandenen Naturraum überleiten zu können. Gleichzeitig erfolgte der Lückenschluss durch den Neubau eines Hochwasserschutzdeichs mit einer Länge von ca. 150 m, einer Höhe von 6,70 m und wasser- und landseitige Böschungsneigungen von 1:2 (s. Abb. 2).

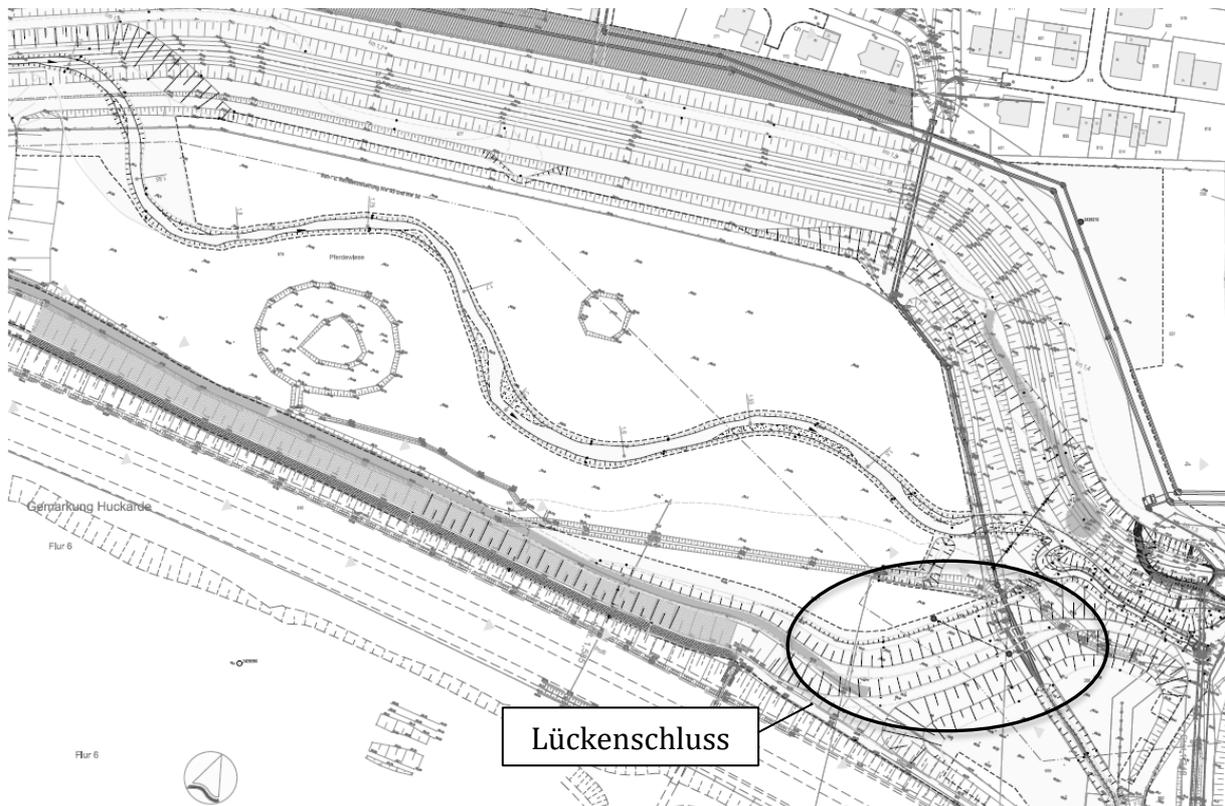


Abbildung 2: Retentionsfläche Wischlingen mit Lückenschluss

2. Planung des Hochwasserschutzdeichs Wischlingen

2.1 Anforderungen an Planung und Ausführung

Bei der Planung und Ausführung von Hochwasserschutzdeichen sind ergänzend zum übergeordneten Rahmen des Handbuchs EC 7-1 die Anforderungen der DIN 19712 und des Merkblatts DWA M-507-1 zu beachten. Neben den Nachweisen für die Grenzzustände der globalen und lokalen Tragfähigkeit sind Gebrauchstauglichkeitsnachweise zu führen, mit denen u.a. sichergestellt wird, dass die Setzungen begrenzt und somit die Vorgaben eines ausreichenden Freibords sichergestellt werden und das zu große Differenzsetzungen, welche zu einer Rissbildung und damit zu einer Beeinträchtigung der Hochwasserschutzfunktion führen können, ausgeschlossen sind. Differenzsetzungen sind insbesondere dort zu erwarten, wo kleinräumig veränderte Baugrundverhältnisse vorliegen, z.B. im Falle von linsenförmigen, stark kompressiblen organischen Boden- und Torfeinlagerungen. Die vorgenannten Grenzzustände werden durch weitere hydraulische Nachweise sowie Nachweise gegen Materialtransport ergänzt.

Der innere Aufbau des Deichkörpers orientiert sich grundsätzlich an der maßgebenden Deichklasse. Je höher das Bemessungshochwasser BHW und das Schadenspotential im

Falle eines Deichversagens sind, desto höhere erdbautechnische Anforderungen werden an den Deichaufbau gestellt. Für Deiche der Klasse I (höchste Deichklasse nach DWA M-507-1) ist i.d.R. eine dreizonige Querschnittsgestaltung bestehend aus einer wasserseitigen Dichtungsschicht, dem Stützkörper sowie dem landseitigen Dränkörper vorzusehen. Das Ziel einer zonierten Ausbildung des Deichprofils besteht darin, die Strömungsbeanspruchung des Deichs möglichst zu reduzieren, in dem der Potentialabbau weitestgehend innerhalb der Dichtung erfolgt und die sich flach ausbildende Sickerlinie landseitig zusätzlich über eine Filterschicht druck- und erosionsfrei abgeführt werden kann. Grundsätzlich besteht jedoch auch die Möglichkeit, einen 2-Zonen-Deich bestehend aus einem kombinierten Dichtungs-/Stützkörper und Dränkörper auszubilden.

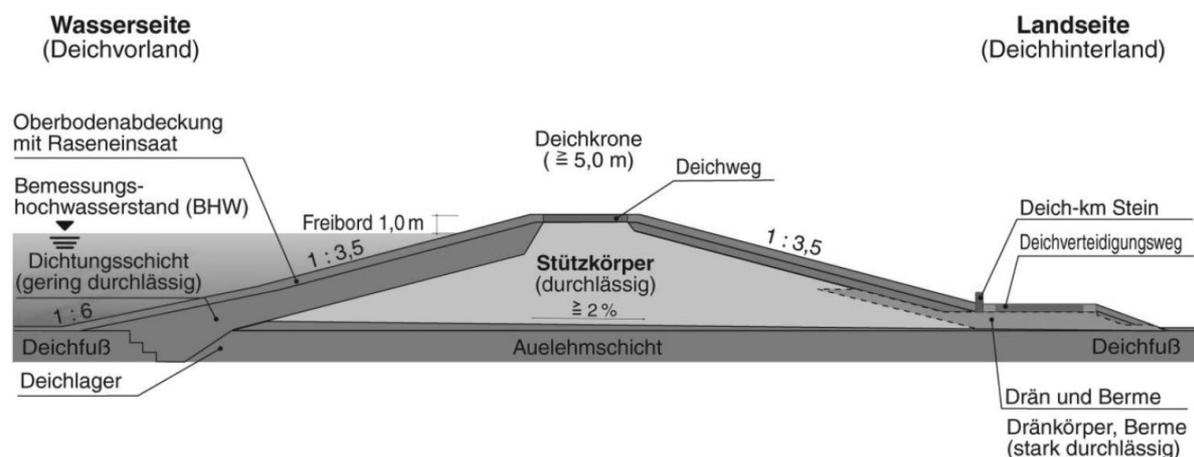


Abbildung 3: Deichregelprofil Rheindeich (DWA-M 507-1)

Für Rheindeiche wurde von der Bezirksregierung Düsseldorf ein Regelprofil (s. Abb. 3) entwickelt, welches bei Neubaumaßnahmen entlang des Rheins i.d.R. Anwendung findet aber grundsätzlich auch auf andere Hochwasserschutzmaßnahmen übertragen werden kann. Durch die relativ flachen Böschungsneigungen des Regelprofils von 1:3,5 resultieren bei der Anwendung selten Schwierigkeiten bei der Tragfähigkeit, so dass geotechnische (Sonder-) Lösungen vielfach nur zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und der Sicherheit gegenüber Materialtransport (Kontakterosion, Suffosion, rückschreitender Erosionsgrundbruch) zu ergreifen sind. Das nachfolgende Kapitel 2.2 stellt dazu einige Lösungsmöglichkeiten zur Baugrundverbesserung für Hochwasserschutzdeiche kurz vor.

2.2 Geotechnische Lösungen für die Baugrundverbesserung unterhalb von Deichen

Im Falle von relativ flachen Böschungsneigungen stellt die Tragfähigkeit i.d.R. nicht den maßgebenden Grenzzustand dar, da i.d.R. eine ausreichende Sicherheit gegenüber einem Böschungs- bzw. Böschungsgrundbruch- und einem Spreizversagen nachgewiesen werden kann. Eine Ausnahme bilden weiche und gering-scherfeste Böden, welche unmittelbar in oder mit einer nur geringen Überdeckung zur Deichaufstandsebene anstehen. Insbesondere im unkonsolidierten Zustand (sog. Anfangszustand) besteht das Risiko, dass es aufgrund einer zu geringen undrained Scherfestigkeit c_u zu einem Böschungsgrundbruchversagen kommt, sofern der Deichkörper zu schnell aufgebaut wird und Porenwasserüberdrücke erst zeitverzögert dissipieren. In diesen Fällen kann als Alternative zum klassischen Bodenaustausch eine hochzugfeste Geokunststoffbewehrung in der Aufstandsfläche des Deichs verlegt werden (s. Abschnitt 2.4). Auf diese Weise können Massentransporte erheblich reduziert und bei Bodenaustausch in schlecht tragfähigem Baugrund häufig erforderliche Wasserhaltungsmaßnahmen entfallen. In Abhängigkeit von der gewählten Festigkeit der Geokunststoffbewehrung kann auch die Schüttgeschwindigkeit des Bauwerks gesteuert werden.

Neben Aspekten der Standsicherheit hat die Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit bei Deichbauwerken eine besonders hohe Bedeutung. Die Betrachtung bezieht sich dabei in erster Linie auf das Setzungsverhalten des Erdbauwerks, da ein Mindestfreibord sichergestellt werden muss. Insbesondere bei stark mächtigen, kompressiblen Bodenschichten, z.B. stark organischen Böden oder Torf, und großen Deichhöhen sind Setzungen in der Größenordnung mehrerer Dezimeter zu erwarten. Diese können zu einer Unterschreitung des erforderlichen Freibords führen und die Wahrscheinlichkeit einer Überströmung des Deichs im Hochwasserfall deutlich erhöhen. Zudem können lokal stark unterschiedliche Baugrundverhältnisse zu Setzungsdifferenzen führen, wodurch Risse innerhalb der Dichtungsschicht hervorgerufen werden könnten.

Die geotechnischen Lösungen hierzu sehen häufig die Vorbelastung des Baugrunds und die Vorwegnahme der zu erwartenden Verformungen vor. Da es sich bei Deichen um Erdbauwerke handelt, kann die Vorbelastung durch den Deichkörper selbst erfolgen, welcher um das entsprechende Setzungsmaß überhöht (und mit größerer Breite) ausgeführt wird. In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Zeit kommen hierzu unterschiedliche Lösungen in Betracht:

- Überhöhung des Deichs ohne zusätzliche Maßnahmen zur Konsolidationsbeschleunigung;
- Überhöhung des Deichs in Verbindung mit Konsolidationshilfen;
- Vorbelastung der anstehenden Böden durch Vakuumkonsolidation, ggf. in Verbindung mit einer statischen Auflast.

Entsprechend der eindimensionalen Konsolidationstheorie von Terzaghi (1954) hängt die Konsolidationsdauer t wassergesättigter, geringdurchlässiger Böden von der Schichtmächtigkeit H der zu entwässernden Bodenschicht, der Steifigkeit E_s , der vertikalen Wasserdurchlässigkeit k_v sowie den Entwässerungsbedingungen (ein- oder beidseitige Entwässerung) ab. Insbesondere die Schichtmächtigkeit H wirkt sich quadratisch auf die Dauer von t aus, so dass bei großen Schichtmächtigkeiten in Verbindung mit einer geringen Durchlässigkeit sehr lange Konsolidationszeiten entstehen. Sofern diese Zeit im Bauablauf zur Verfügung steht, stellt diese Variante die wirtschaftlichste Lösung dar. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Auflast (=Deichkörper) im Falle einer sehr geringen undrännierten Scherfestigkeit c_u der anstehenden Böden nur stufenweise aufgebracht werden kann, da andernfalls ein Böschungsgrundbruchversagen zu erwarten ist. Zur Sicherstellung der Standsicherheit kann in diesen Fällen eine Basisbewehrung des Deichlagers ausgeführt werden. Die Geokunststoffbewehrung stellt dann ein zusätzliches rückhaltendes Moment zur Verfügung. Die Zugfestigkeit dieser Bewehrung ist dabei in Abhängigkeit von der vorgesehenen Schüttgeschwindigkeit des Erdkörpers zu bemessen. Erfahrungen mit dieser Bauweise wurden in Deutschland bereits vor rund 35 Jahren gesammelt, siehe z.B. Hangen und Althoff (2022). Erfahrungen im Ausland sind in (Rowe, R.K and Li, A.L., 2003.) dokumentiert.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Konsolidationszeiten durch den Einsatz zusätzlicher Konsolidationshilfen weiter zu verkürzen. Hierzu werden z.B. vor dem Aufbringen der Deichschüttung Kunststoff-Vertikaldräns innerhalb des Deichlagers in den Boden eingebracht. Es handelt sich dabei um ein flexibles Filtergewebe mit einem durchlässigen Kern, welches das anfallende Wasser zur Deichaufstandsebene transportiert. Da der Boden nun auch horizontal über die Dräns entwässern kann und als Entwässerungsweg somit nicht mehr die Schichtmächtigkeit H sondern das Rastermaß s der Dräns maßgebend wird (s. Kirsch, K. & Bell, A., 2013) kann die Konsolidationszeit wesentlich reduziert werden. Des Weiteren wird nun die horizontale Wasserdurchlässigkeit k_h des Bodens maßgebend, welche i.d.R. größer ist als die Durchlässigkeit in vertikaler Richtung k_v und somit zu einer zusätzlichen Beschleunigung der Konsolidation führt. Kunststoff-Vertikaldräns stellen ausschließlich eine Konsolidationsbeschleunigung dar, sie bewirken hingegen keine Reduktion der auftretenden Setzungen, da sie nicht für den Lastabtrag dienen können. Ebenso liefern Vertikaldränagen über die mit fortschreitendem Konsolidationsgrad einhergehende Erhöhung der Scherfestigkeit allenfalls einen indirekten Beitrag zur Erhöhung der Standsicherheit. Wenn Defizite in der Standsicherheit des Deiches zu erwarten sind, werden Vertikaldränagen daher in der Regel immer zusammen mit einer Basisbewehrung eingebaut.

Sanddräns stellen grundsätzlich eine Alternative zu geosynthetischen Dränagen dar, werden aber aufgrund der höheren Kosten heute kaum noch eingesetzt. Als eine Ausnahme sind hierbei jedoch die s.g. geokunststoffummantelten Sandsäulen zu nennen. Bei diesem Gründungsverfahren werden geokunststoffummantelte Bodensäulen hergestellt,

welche üblicherweise Durchmesser von 0,6 bis 0,8 m aufweisen. Neben dem im Vergleich zu einem typischen geosynthetischen Dränelement erheblich größeren Wirkungsradius und der dadurch beschleunigten Konsolidation tragen ummantelte Bodensäulen auch vertikale Lasten aus dem Deichbauwerk ab und leiten diese in tieferliegende tragfähige Bodenschichten weiter, siehe auch (Raithel, 1999) und (M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew, 2013).

2.3 Geotechnische Randbedingungen des Projektstandorts

Aufgrund der eingetretenen z.T. starken Geländesenkungen sind die Baugrundverhältnisse innerhalb des Roßbachsystems oberflächennah durch flächige heterogene Auffüllungen gekennzeichnet, welche aus feinkörnigen Böden durchsetzt mit mineralischen Fremdbestandteilen aus Schlacken, Waschbergen, Haldenmaterial, z.T. durchsetzt mit Kohle, bestehen. Unterhalb der Auffüllungen folgen tonig-sandige Lösslehme sowie im Bereich der Gewässerläufe jüngere Auelehme des Quartärs, welche ihrerseits durch Mergersedimente der Oberkreide unterlagert werden.

Im Bereich des Hochwasserschutzdeichs in Wischlingen weisen die quartären Lockergesteine eine Mächtigkeit von ca. 10 – 12 m auf. Die Schichtenfolge setzt sich aus organischen Schluffen in weicher Konsistenz und bis zu 4 m mächtigen Schichtpaketen aus Torfbänken, stark organischen Schluffen und Wiesenkalke in Wechsellagerung mit eingelagerten Sandschichten zusammen. Im Hinblick auf das Setzungsverhalten des Deichkörpers und des Risikos einer Rissbildung innerhalb der Dichtungsschicht aufgrund zu großer Setzungsdifferenzen war zudem von Bedeutung, dass die Mächtigkeiten der organischen Weichschichten im Bereich der Deichaufstandsfläche stark variierten.

Da aufgrund der z.T. sehr geringen Konsistenz und der hohen Organikanteile der anstehenden Böden kritische Auswirkungen auf die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit des Deichs zu erwarten waren, wurden triaxiale Kompressionsversuche zur Bestimmung der dränierten (ϕ' , c' , CU-Versuche) und undränierten (c_u , UU-Versuche) Scherfestigkeit sowie Kompressionsversuche zur Bestimmung der spannungsabhängigen Steifemoduli E_s an gering gestörten Bodenproben durchgeführt.

Für die organischen bis stark organischen Schluffböden konnten eine undränierte Scherfestigkeit in einer Spanne von $c_u = 13 - 30 \text{ kN/m}^2$ und in Abhängigkeit des Spannungsniveaus eine Steifigkeit bei Erstbelastung von $E_s = 2,5 - 12 \text{ MN/m}^2$ gemessen werden. Die Torfablagerungen weisen eine etwa vergleichbare undränierte Scherfestigkeit auf, sind jedoch durch eine deutlich geringere Steifigkeit in einer Größenordnung von $E_s < 1 \text{ MN/m}^2$ gekennzeichnet. Die geringen Steifigkeiten sind insbesondere auf sehr hohe Wassergehalte von bis zu $w > 400 \text{ Gew.-%}$ zurückzuführen.

2.4 Lösungsvariante

Zur Abschätzung der zu erwartenden Setzungen des Deichs wurde eine Variantenuntersuchung durchgeführt. Hierzu wurden sowohl die Schichtmächtigkeiten der Weichschichten als auch die Steifigkeiten jeweils mit oberen und unteren Grenzwerten berücksichtigt. Im Ergebnis ergaben sich für den Endzustand rechnerische Setzungen des Deichkörpers zwischen ca. 50 cm und 120 cm. Weiterhin waren aufgrund der unterschiedlichen Mächtigkeiten der Torf- und stark organischen Schluffschichten große Differenzsetzungen zu erwarten. Eine ausreichende Sicherheit gegen die Bildung von Zugrissen und damit einhergehenden Schäden an der Dichtung konnten ohne weitergehende Maßnahmen nicht sichergestellt werden. Abschließend ergaben Standsicherheitsberechnungen, dass für den Anfangszustand ein Standsicherheitsdefizit im Bereich der Böschungsfüße vorlag.

Als Lösungsvariante wurde entschieden, den Deichkörper mit einer Überhöhung von 1,0 m auszuführen, um die zu erwartenden Maximalsetzungen zur Sicherstellung des erforderlichen Freibords zu kompensieren. Zur Sicherstellung der Standsicherheit im Anfangszustand wurde darüber hinaus eine einlagige Deichbasisbewehrung angeordnet. In Abbildung 4 ist das Querprofil des Deichkörpers für den Endzustand dargestellt.

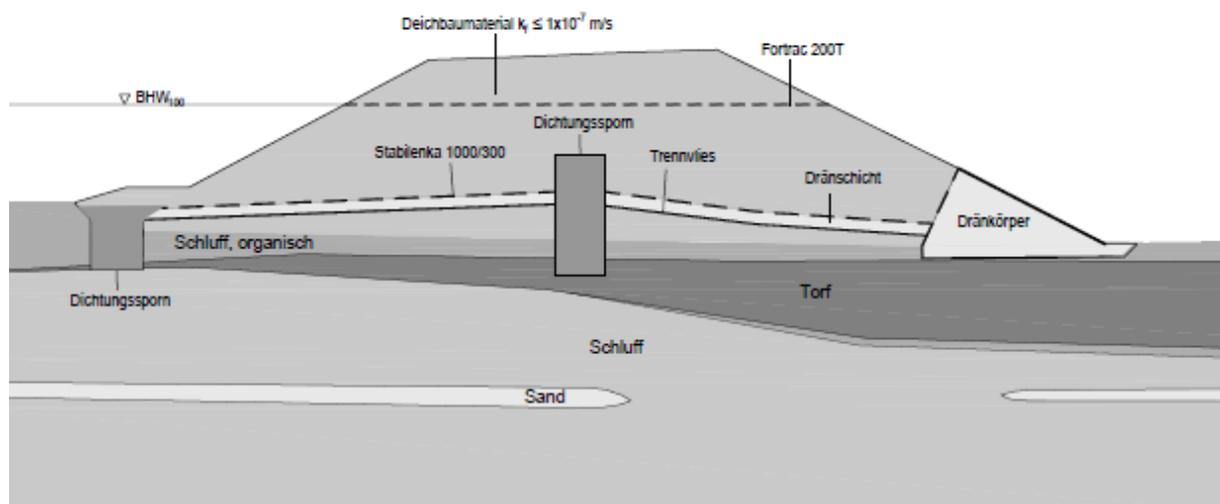


Abbildung 4: Querprofil Lückenschluss

Ziel des Bauzeitenplans war es, dass zur Inbetriebnahme des Retentionsbeckens 90 % der zu erwartenden Konsolidationssetzungen eingetreten sein sollten. Zur Abschätzung der Konsolidationsdauer wurde daher ebenfalls eine Variantenuntersuchung durchgeführt. Hierzu wurden zum einen der Einfluss der Wasserdurchlässigkeit k_f ($k_f = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s} / 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) der zu entwässernden Schichten sowie der Steifigkeit $E_{s,\text{Torf}}$ der Torfe ($E_{s,\text{Torf}} = 0,25 / 0,5 / 1,0 \text{ MN/m}^2$) für den Fall untersucht, dass ausschließlich eine eindimensionale, vertikal gerichtete Entwässerung stattfindet. Aus dieser Betrachtung her-

aus ergeben sich Konsolidierungsbeiwerte für die Torfschicht in einer Größenordnung von $c_v = k_f \cdot E_s / \gamma_w = 1,25 \times 10^{-7}$ bis $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Diese Bandbreite entspricht in etwa den von Gudehus (1981) genannten Erfahrungswerten für Torf und Klei.

Weiterhin wurde für die Durchlässigkeit $k_f = 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ der Einfluss zusätzlicher Vertikaldräns auf die zu erwartende Konsolidationsdauer rechnerisch untersucht. Die horizontalen Durchlässigkeiten der Böden k_h wurden dabei gegenüber den vertikalen um den Faktor 2 erhöht.

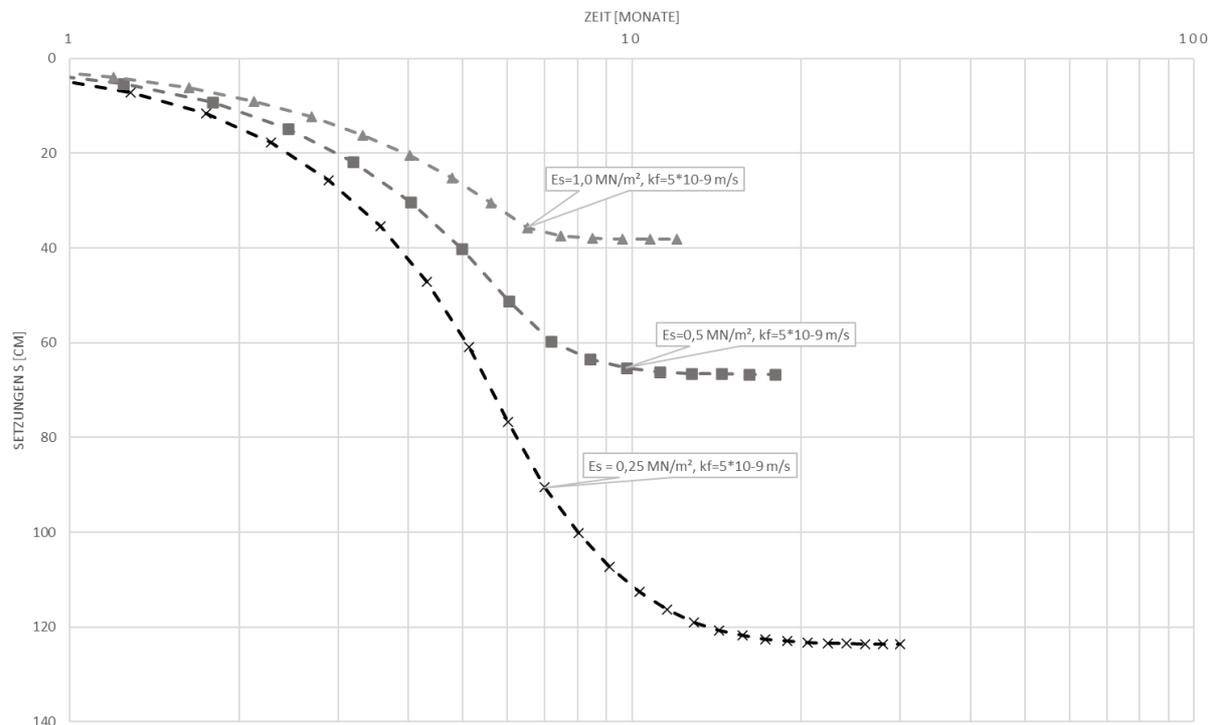


Abbildung 5: Rechnerisch ermittelter Zeit-Setzungsverlauf bei eindimensionaler Konsolidation

Abb. 5 stellt im halb-logarithmischen Maßstab den Zeit-Setzungsverlauf exemplarisch für den Bereich der Deichkrone und einer Durchlässigkeit der Weichschichten von $k_f = 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ dar. Als bodenmechanischer Parameter wurde bei den Berechnungen die Steifigkeit E_s der Weichschicht variiert. Für alle Berechnungen ergibt sich im dargestellten Zeitmaßstab der charakteristische S-förmige Zeit-Setzungsverlauf. Je geringer dabei die Steifigkeit E_s des Bodens ist, desto größer sind die rechnerischen Setzungen und desto länger dauert die Konsolidationsphase. Während jedoch der Einfluss der Steifigkeit auf die Setzungen des Deichs erwartungsgemäß groß ist, wirkt sich diese auf die rechnerische Konsolidationsdauer nur nachrangig aus. Bei einer Reduktion der Steifigkeit von $E_s = 1 \text{ MN/m}^2$ auf $E_s = 0,25 \text{ MN/m}^2$ nimmt die Konsolidationsdauer um lediglich ca. 2 Monate zu.

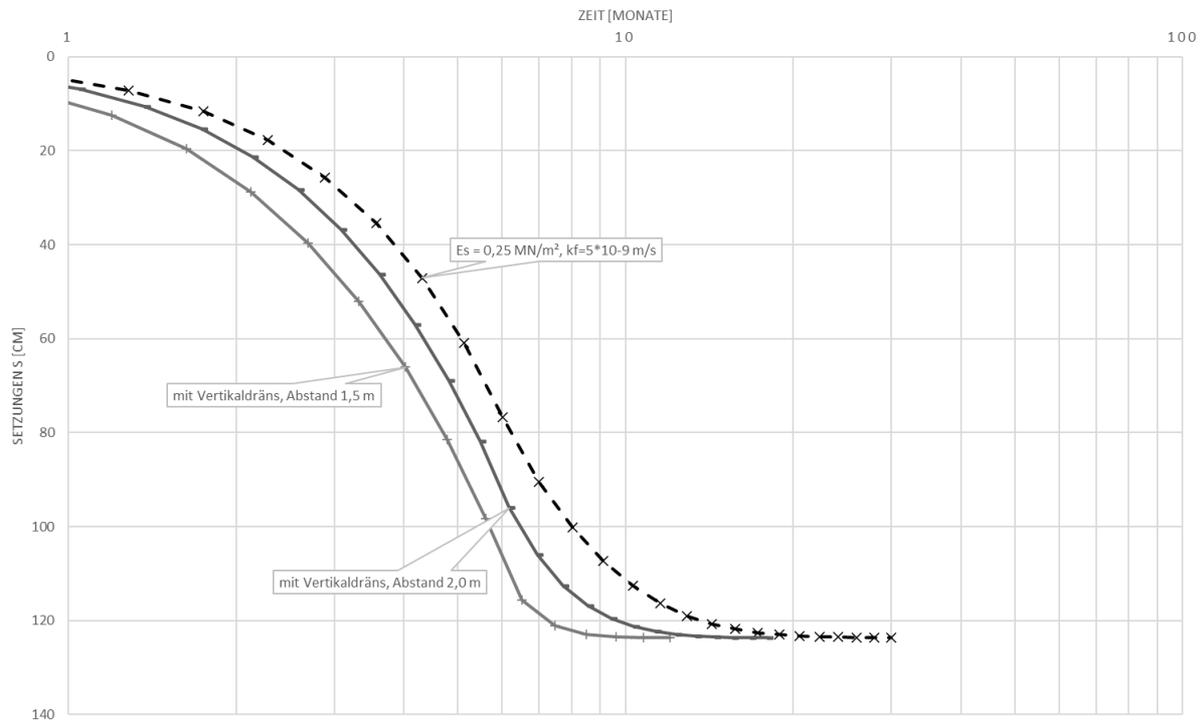


Abbildung 6: Rechnerisch ermittelter Einfluss von Vertikaldräns auf den Zeit-Setzungsverlauf

Abb. 6 stellt zum Vergleich dazu die entsprechenden Zeit-Setzungskurven für den Fall dar, dass zusätzlich Vertikaldräns als Konsolidationshilfe eingebaut werden. Die dargestellten Kurvenverläufe wurden für eine Wasserdurchlässigkeit des Bodens von $k_f = 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, einer Steifigkeit von $E_s = 0,25 \text{ MN/m}^2$ sowie einem Dränraster von 1,5 m und 2,0 m ermittelt. Deutlich wird die beschleunigende Wirkung der Vertikaldräns auf die Konsolidation des Bodens. Je enger das Raster der Dräns angeordnet wird, desto schneller klingen die Setzungen ab. Für ein Raster von 1,5 m halbiert sich die Konsolidationsdauer entsprechend von 17 auf 8,5 Monate. Angesichts der zur Verfügung stehenden Bauzeit wurde jedoch aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus entschieden, auf zusätzliche Vertikaldräns zur Beschleunigung der Konsolidation zu verzichten.

Zur Sicherstellung einer Entwässerung der Böden über das Deichlager war es jedoch erforderlich, in Höhe der Deichaufstandsfläche eine Dränschicht aus filterfähigem Bodenmaterial anzuordnen. Die Anordnung erfolgte in Form eines Dachprofils mit einer Überhöhung innerhalb der Deichachse von ca. 1 m gegenüber den Deichfüßen, s. Abb. 4. Diese Profilierung sollte sicherstellen, dass die Dränschicht auch nach Abschluss der zu erwartenden Setzungen von ca. 1 m beidseitig im Freigefälle in Richtung Deichfüße entwässern kann. Zur Sicherstellung der Filterwirkung wurde zusätzlich ein Filtervlies zwischen der Dränschicht und dem Deichplanum angeordnet.

Die Dränfunktion des Deichlagers wurde nur innerhalb der Bauzeit des Deichs benötigt. Im Hinblick auf den Endzustand und die erforderliche Hochwasserschutzfunktion wirkt

die Dränschicht widersprüchlich, da hierdurch eine gezielte Unterströmung des Deichkörpers eintreten würde. Um dieses Szenario auszuschließen, wurde nach Abschluss der Konsolidation eine Dichtungsplombe wasserseitig zur Abdichtung der Dränschicht eingebaut, welche als 2,5 m tiefer Dichtungssporn zur Vermeidung einer Umläufigkeit in das Deichplanum eingebunden wurde. Als zweites Sicherungselement wurde innerhalb der Deichachse eine weitere Dichtplombe eingebaut, welche zum einen die Dränschicht vollständig unterbricht und zum anderen ebenfalls als Sporn in das Deichlager tiefergeführt wurde (s. Abb. 4).

Obwohl Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit eines mit Geokunststoffbewehrung durchsetzten Bodenkörpers keinerlei Anlass dazu geben, könnte eben eine solche Dichtungsplombe auch dazu dienen, theoretisch denkbare Fließwege in der Ebene eines Geokunststoffes, wie z.B. der Basisbewehrung oder dem Filtervlies abzuschneiden.

Entsprechend Merkblatt DWA-M 507-1 ist im Zuge der Gebrauchstauglichkeitsnachweise eine ausreichende Sicherheit gegenüber Rissbildung innerhalb der Dichtung sicherzustellen. Für den Fall eines 3-Zonen-Deichs wird die Dichtfunktion allein über eine ca. 1,5 m mächtige Dichtungsschicht sichergestellt. Angesichts der stark unterschiedlichen Mächtigkeit der Weichschichten war davon auszugehen, dass große Differenzsetzungen auftreten werden und die Ausbildung von durchlaufenden Trennrissen und somit einer Beeinträchtigung der Dichtfunktion nicht ausgeschlossen werden können. Hierzu wurde in einer frühen Projektphase diskutiert, zunächst nur den Stütz- und Dränkörper des Deichs aufzubauen und erst nach Abschluss der Konsolidationssetzungen die wasserseitige Dichtungsschicht herzustellen. Zum einen hätte in diesem Fall jedoch die wasserseitige Auflast zu zusätzlichen (Differenz-) Setzungen geführt, zum anderen wäre es erforderlich gewesen, die Erdarbeiten in zwei Kampagnen durchzuführen. Zur Vereinfachung des Bauablaufs wurde daher entschieden, vom 3-Zonen-Konzept auf ein 2-Zonen-Konzept der Deichzonierung zu wechseln. Die Dichtungsschicht und der Stützkörper wurden dazu zu einer Zone mit einer erforderlichen Wasserdurchlässigkeit von $k_f \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s zusammengefasst. Der Vorteil dieser Lösungsvariante besteht darin, dass die Dichtschicht über die vollständige Querschnittsbreite des Deichkörpers reicht und damit das Risiko einer kritischen Rissbildung deutlich reduziert wird. Da landseitig weiterhin ein Dränkörper als Sicherungselement angeordnet wird, welcher im stationären Fall das anfallende Sickerwasser fasst und drucklos ableitet, kann der Nachteil einer fehlenden wasserseitigen Dichtungsschicht ausgeglichen werden.

Vor dem Hintergrund der vorgenannten Herausforderungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit des Dichtungskörpers wurde bei der Auswahl der Basisbewehrung ferner Wert darauf gelegt, dass das Defizit an Scherfestigkeit im Baugrund durch nur eine hochzugfeste und kriecharme Bewehrungslage aus PET-Multifilamenten vom Typ Stablenka® ausgeglichen wurde. Ergebnisse von Dehnungsmessungen an einem mehrlagig bewehrten Straßendamm auf wenig tragfähigem Baugrund (Blume, K., Alexiew, D., and Glötzl, F. (2006)) unterstreichen deutlich, dass zwei in nur geringem Abstand zuei-

inander angeordnete Bewehrungslagen gleicher Festigkeit nicht gleichmäßig ausgelastet werden. Einer relativen Überbeanspruchung einzelner Bewehrungslagen bzw. der damit verbundenen relativ größeren Dehnung konnte auf diese Weise entgegnet werden. Bei den klassischen analytischen Berechnungsverfahren, z.B. der Gleitkreisberechnung nach Bishop findet dieser Umstand in der Regel keine Berücksichtigung.

3. Setzungsmonitoring während der Bauausführung

Angesichts des kritischen Last-Setzungsverhaltens wurde entschieden, im Zuge der Bauausführung ein Setzungsmonitoring der eintretenden Setzungen im Sinne der Beobachtungsmethode nach Handbuch EC 7-1 durchzuführen. Das Messprogramm sollte so gestaltet sein, dass die Setzungen des Deichlagers bereits während des lageweisen Aufbaus des Deichkörpers an verschiedenen Positionen beobachtet werden können. Gewählt wurde ein Monitoring in Form klassischer Setzungspegel. Abbildung 7 stellt dazu im Lageplan die Positionen der einzelnen Setzungsmesspegel dar.

Als Pegel wurden Stahlsteller an den entsprechenden Stellen des Deichlagers aufgelegt, auf die jeweils eine Gewindestange aufgeschraubt wurde. Mit fortschreitendem Aufbau des Deichs wurden die Gewindestangen nach oben verlängert und zusätzlich über die gesamte Höhe durch ein Kunststoffrohr (KG-Rohr) geschützt. Der Erdbau musste dazu um die KG Rohre herumgeführt werden. Aufgrund der vergleichsweise günstigen Platzverhältnisse war dies jedoch größtenteils bis zum Abschluss der Schüttungen möglich. Die Setzungsmessungen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten während und nach Abschluss der Erdarbeiten jeweils auf OK der Gewindestangen ausgeführt. Die Null-Messung erfolgte am 29.10.2018 und die Abschlussmessung (50. Folgemessung) am 16.08.2022.

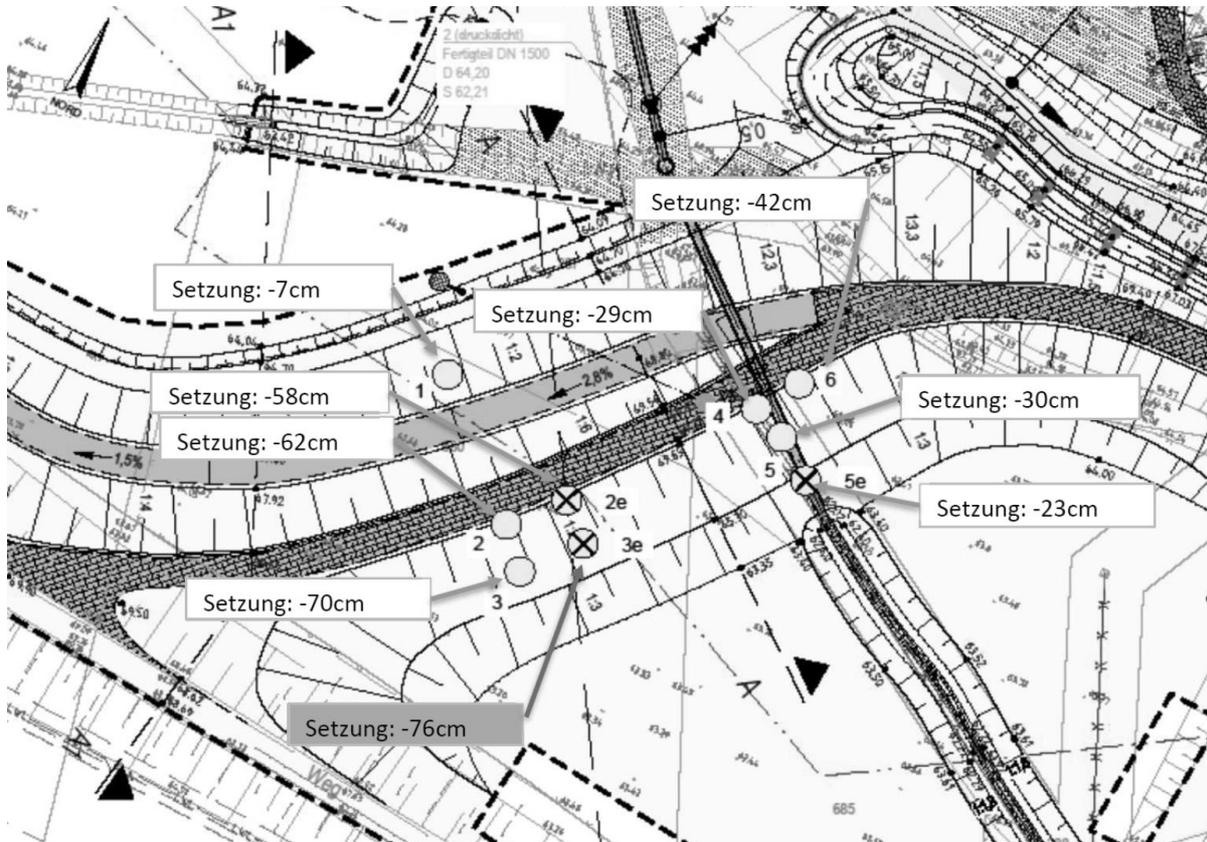


Abbildung 7: Gemessene Setzungen während des Monitorings (weiß = letzte Messung November 2019; dunkel hervorgehoben = letzte Messung August 2022)

In Abbildung 8 sind die gemessenen Setzungen über der Zeit im halblogarithmischen Maßstab aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass lediglich für den Setzungspegel 3e die Messungen über den gesamten Zeitraum durchgeführt werden konnten. Für die übrigen Pegel wurde aus baubetrieblichen Gründen entschieden, die Messungen im November 2019 zu beenden. Diese Entscheidung war vertretbar, da aus den Setzungsverläufen (mit Ausnahme des Pegels 6) bereits ein deutliches Abklingen des Setzungszuwachses zu verzeichnen war.

Die Setzungspegel 3 und 3e liegen im westlichen Bereich der landseitigen Deichböschung, in welchem die größte Schichtmächtigkeit der Torfe angetroffen wurde. Aus dem Verlauf der Setzungen ist zu erkennen, dass in diesem Bereich mit $s = 76$ cm die größten Setzungen gemessen wurden. Die Setzungen der Deichkrone (Pegel 2 und 2e) im westlichen Abschnitt liegen demgegenüber bei ca. $s = 65$ cm (extrapoliert für $T_v = 1,0$) und für die wasserseitige Böschung (Pegel 1, nicht in Abb. 8 dargestellt) bei lediglich $s = 7$ cm. Die geringen Setzungen der Wasserseite sind darauf zurückzuführen, dass in diesem Bereich keine bzw. nur sehr untergeordnete Torfbänke anstehen.

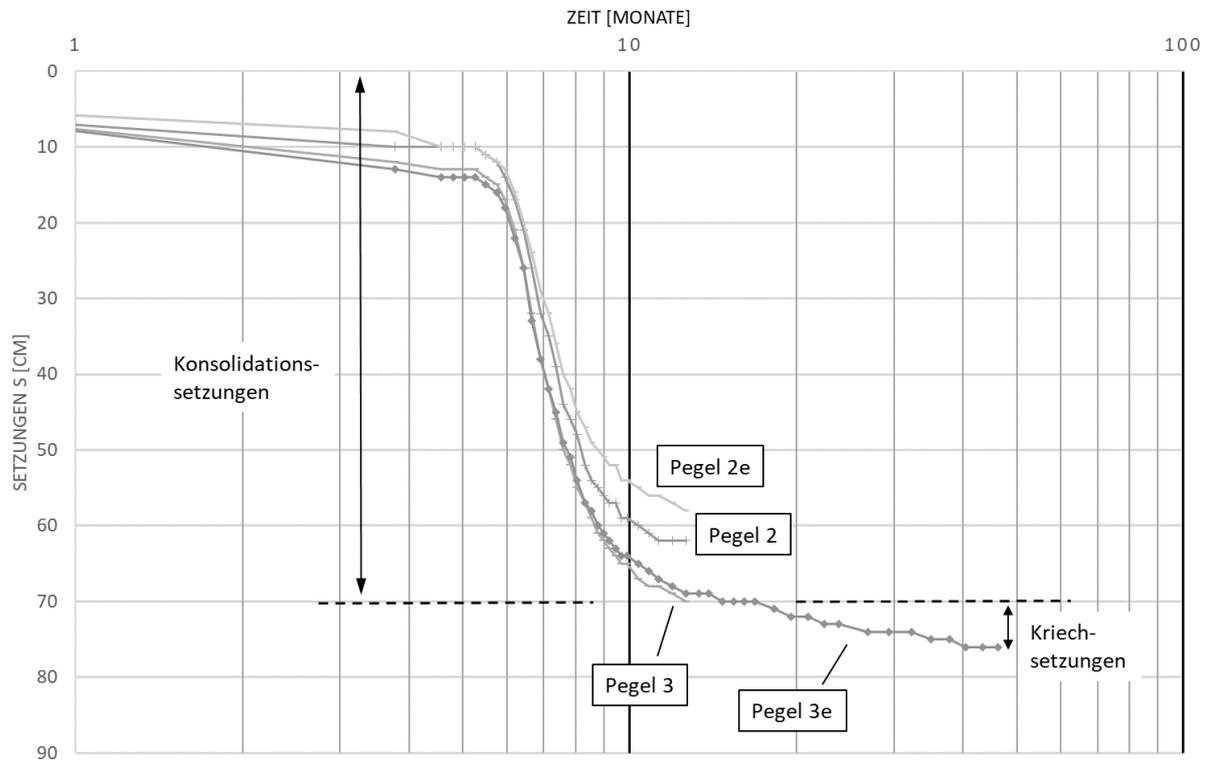


Abbildung 8: Ergebnisse der Setzungsmessungen

Bei der Auswertung der Setzungsmessungen ist zu berücksichtigen, dass sich die Gesamtsetzungen sowohl aus Konsolidations- als auch aus Kriechsetzungen zusammensetzen. Dabei entstehen die Konsolidationssetzungen infolge der Zusammendrückung der Weichschichten und dem Auspressen vom vorhandenen (freien) Porenwasser. Kriechsetzungen dagegen sind auf Kompression von gebundenen Wasserhüllen zurückzuführen und treten in einem geringeren Umfang jedoch auch deutlich zeitverzögert auf. Anhand des logarithmischen Zeitmaßstabs in Abbildung 8 lässt sich entsprechend Buisman (s. Gudehus 1981) eine Trennung zwischen den Konsolidations- und den Kriechsetzungen treffen. Die Konsolidationssetzungen weisen über den Logarithmus der Zeit einen typischen S-förmigen Verlauf auf, welcher in eine horizontale Asymptote (gestrichelte Linie in Abb. 8) übergeht. Kriechsetzungen hingegen nehmen weiter annähernd linear mit dem Logarithmus der Zeit zu. Dieser bodenmechanische Zusammenhang lässt sich sehr gut am zeitlichen Verlauf der Setzungen des Pegels 3e erkennen. Demnach betragen die Konsolidationssetzungen ca. 70 cm und die Kriechsetzungen bis zum Ende der Messungen ca. 6 cm. Bei dieser Überlegung wird jedoch unterstellt, dass die Kriechverformungen erst nach Abschluss der Konsolidation eintreten bzw. bis zu diesem Zeitpunkt eine untergeordnete Größenordnung besitzen.

Aus dem Verlauf der Kurve ist weiterhin zu entnehmen, dass für den Pegel 3e die Konsolidation nach ca. 17 Monaten abgeschlossen war. Schätzt man die Konsolidationsdauer stark vereinfacht über eine eindimensionale Betrachtung der Weichschicht zu $t_{98} \approx t_{100} \approx$

d^2/c_v (t_{98} / t_{100} = Zeitdauer bis 98 % / 100 % der Konsolidation abgeschlossen, d = längster Entwässerungsweg) ab und setzt man für die ca. 4 m mächtige Weichschicht eine beidseitige Entwässerung und somit $d = 200$ cm an, so ergibt sich ein Konsolidationsbeiwert von $c_v = 9,1 \times 10^{-4}$ m/s. Im Vergleich mit den Erfahrungswerten, z.B. Gudehus (1981), sowie der in Kapitel 2.4 genannten, rechnerisch abgeschätzten Größenordnung für c_v , erscheint dieser Wert als sehr hoch. Neben einer zu geringen Abschätzung der Durchlässigkeit k_f des Bodens kann eine weitere Begründung darin liegen, dass im vorliegenden Fall keine ausschließlich eindimensionale Konsolidation der Weichschicht vorliegt sondern der Porenwasserüberdruck u.U. auch lateral dissipieren konnte. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass der Entwässerungsweg und somit das Maß d über eingelagerte Sandbänder innerhalb der Weichschicht verkürzt wurde. Insgesamt ist jedoch festzustellen, dass die Konsolidation mit ca. 17 Monaten angesichts einer Herstellungsdauer des Deichs von rund 7 Monaten als verhältnismäßig schnell einzustufen ist. Rund 50 % der Gesamtsetzungen sind bereits während der Bauzeit eingetreten.

Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine mehrschichtige Konsolidation, da neben den organischen Weichschichten ebenfalls die nicht bzw. gering organischen Schluffe und Tone mit einer zeitverzögerten Zusammendrückung reagieren. Anhand des Zeit-Setzungs-Verlaufs der Pegel 2 und 2e wurde daher mithilfe des Programms GGU-CONSOLIDATE eine Rückrechnung durchgeführt. Durch die Anpassung der Berechnungsergebnisse an die Messergebnisse kann ein best-estimate des Konsolidationsbeiwerts c_v für die Weichschichten erfolgen und für die Genauigkeit der Abschätzung für längere Betrachtungszeiträume erhöhen. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei trotz allem um eine vereinfachte Betrachtung handelt. Zum einen wurden ausschließlich die bodenmechanischen Parameter k_f und E_s der Weichschicht angepasst und zum anderen ermöglicht diese Berechnung nur eine eindimensionale Entwässerung. Die gewählte Vorgehensweise mit „best-estimate“ Kennwerten stellt aber eine im Hinblick auf Aufwand und Nutzen für die gestellte Aufgabe hinreichende Methode dar.

Die Abbildung 9 stellt die Ergebnisse der Rückrechnung den gemessenen Setzungen der Pegel 2 und 2e gegenüber. Eine sehr gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs ergibt sich für eine Durchlässigkeit der Weichschicht von $k_f = 5 \times 10^{-9}$ m/s und einer Steifigkeit von $E_s = 0,55$ MN/m². Darauf hinzuweisen ist, dass bei den Berechnungen eine zeitabhängige Aufbringung der Belastung zur Berücksichtigung der Bauzeit für den Deich von ca. 7 Monaten vorgenommen wurde. Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die Bandbreite der Variantenuntersuchung (s. Kapitel 2.4) sich bereits sehr gut in die tatsächlichen Randbedingungen eingepasst hat.

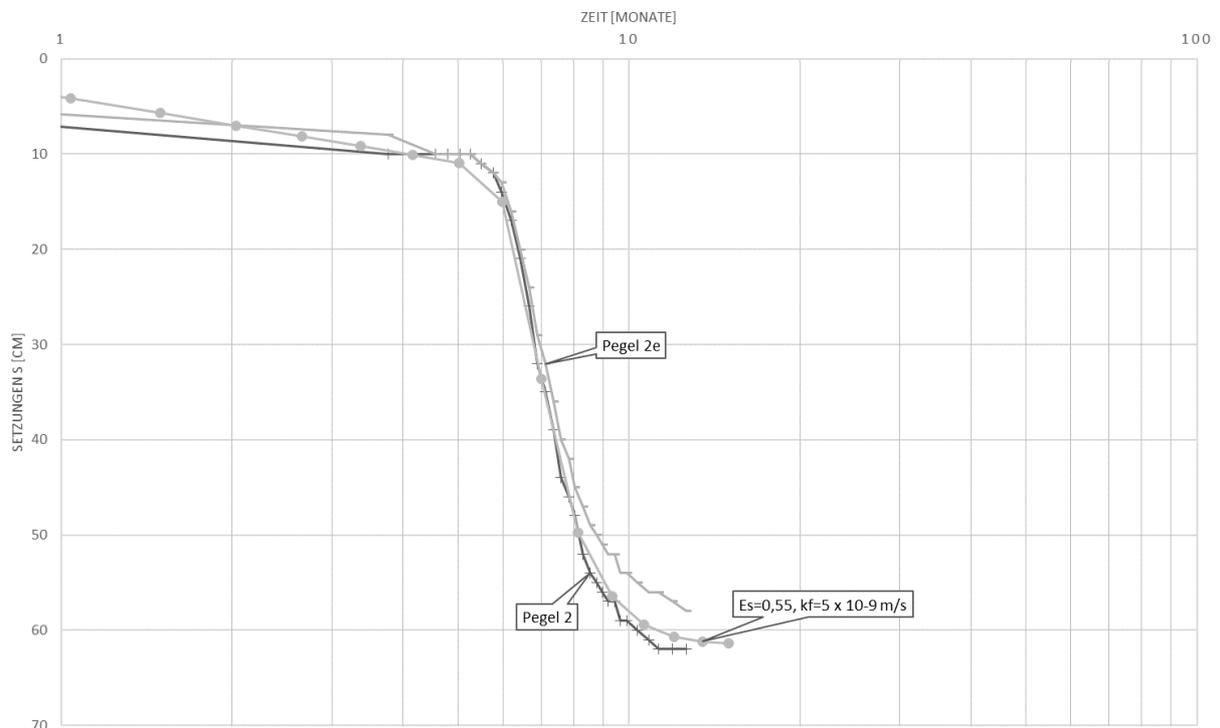


Abbildung 9: Rückrechnung der Zeit-Setzungskurve für die Deichkrone (Pegel 2 und 2e)

4. Fazit

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei schwierigen Baugrundverhältnissen praktikable Lösungen gefunden werden müssen, um trotz der gegebenen Randbedingungen dauerhaft einen Hochwasserschutz gewährleisten zu können. Im Zuge des Planungsprozesses sind Risiken bzgl. mögliche Auswirkungen aus den örtlichen Gegebenheiten zu erkennen und bereits in der Planung zu berücksichtigen. Dabei helfen gezielte Baugrunduntersuchungen sowie rechnerische Überprüfungen der Randbedingungen die ungünstigsten Fälle zu identifizieren, Diskussionen mit den Projektbeteiligten anzuregen sowie den Fokus und die Vorgehensweise für die Ausführung festzulegen. Weiterhin ist die Begleitung der Bauarbeiten sowie ein intensives Monitoring ein wichtiges Element für die Überprüfung der getroffenen Annahmen und zur Sicherstellung einer planmäßigen Umsetzung des Vorhabens.

In dem hier beschriebenen Fall des Deichlückenschlusses stellten große und ungleichmäßige Schichtmächtigkeiten von Torfablagerungen eine Herausforderung in Bezug auf die zu erwartenden Setzungen und Setzungsdifferenzen innerhalb der Deichaufstandsebene dar. Mit der Planung des Deichkörpers wurde auf die Besonderheiten des Baugrunds reagiert sowie erforderliche Ausführungsschritte erarbeitet. Hierzu zählte z.B. auch, dass in Abstimmung mit allen Projektbeteiligten von dem ursprünglichen Deich-Regelprofil eines 3-Zonen-Deichs abgewichen und eine auf die Belange des Projekt-

standorts abgestimmte Lösung des Deichquerprofils erarbeitet wurde. Das durchgeführte Setzungsmonitoring während und nach der Deichherstellung zeigt, dass die ursprünglichen Annahmen gut getroffen wurden und die Konsolidationsdauer der Weichschichten als verträglich mit der Bauzeit der Gesamtmaßnahme zu bewerten ist.

Literatur

Handbuch Eurocode 7 (2011), Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regeln, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 19712 (2013): Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern.

Merkblatt DWA-M 507-1 (2011): Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

Kirsch, K. & Bell, A. (2013), Ground Improvement, 3rd Edition, CRC Press Taylor & Francis Group

Witt, K. J. (Hrsg.) (2018), Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, 8. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Terzaghi, K. & Jelinek, R. (1954), Theoretische Bodenmechanik, Springer-Verlag.

Gudehus, G. (1981), Bodenmechanik, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

H. Hangen, S. Althoff (2022), Erkenntnisse aus 35 Jahren Dehnungsmonitoring einer geotextilen Dammbasisbewehrung, Beitrag in: Geotechnik Schweiz, Frühjahrstagung 2022 Geotechnische Herausforderungen bei weichen Böden

Blume, K.-H. (1995). Großversuch zum Tragverhalten textiler Bewehrung unter einer Dammaufstandsfläche, Straße und Autobahn, Heft 06/95

Rowe, R.K and Li, A.L. (2003). Insights from case histories: Reinforced embankments and retaining walls. Landmarks in Earth

Raithel, M. (1999). Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Universität Kassel.

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew (2013), 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen, *geotechnik* 36 (2013), Heft 4, Ernst & Sohn

Blume, K., Alexiew, D., and Glötzl, F. (2006). The new federal highway (Autobahn) A26 in Germany with high geosynthetic reinforced embankments on soft soil, *Geosynthetics*, J. Kuwano & J. Koeseki, Rotterdam

THEMENBLOCK III
Bodenmanagement und
ökologischer Umbau

Bodenmanagement und Bodenschutz beim Emscherumbau

Dr. Benjamin Hindersmann, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Dr. Benjamin Schieber, Taberg Ingenieure GmbH, Lünen

Zusammenfassung

Im Rahmen des Emscherumbaus wurden in den letzten 10 Jahren pro Jahr zwischen 1 – 2 Mio. t Bodenaushub extern verwertet oder beseitigt und dabei die Bodendeklarationen, Entsorgungswege sowie weitere Informationen tourenscharf für jedes Projekt in einer Datenbank dokumentiert. Die Auswertung der Bodenmassen zeigen dabei, dass etwa die Hälfte der Bodenmassen anthropogene Auffüllungen oder umgelagerte Böden mit technogenen Substraten waren und entsprechend nach der LAGA M20 oder bei hohen Schadstoffanteilen nach der Deponieverordnung zu bewerten und entsorgen waren. Auch in den nächsten Jahren ist im Zuge der ökologischen Verbesserung der Gewässer und den geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen im Emschergebiet mit vergleichbaren Jahresmengen an zu entsorgenden Bodenmassen pro Jahr zu rechnen. Je nach Streckenabschnitt und gebietsabhängigen Einzelmaßnahmen ergeben sich im Zusammenhang mit dem Emscherumbau daraus vielfältige Aufgabenstellungen und Anforderungen in Bezug auf die Themenbereiche Bodenmanagement und Bodenschutz. Anhand von 3 Beispielen mit spezifischen Herausforderungen und markanten Fragestellungen (ökologischer Schwerpunkt, Hochwasserrückhaltebecken, ökologische Verbesserung am Emscherhauptlauf) wird aus verschiedenen Perspektiven (Planung bis Bauausführung) aus der Praxis berichtet. Es wird aufgezeigt wie mit bekannten Herausforderungen umgegangen wurde und Teilprojekte zum Emscherumbau bereits erfolgreich abgeschlossen werden konnten.

Insbesondere die Anforderungen und Auswirkungen der im August 2023 in Kraft tretenden Mantelverordnung stellen das zukünftige Bodenmanagement vor neue Herausforderungen und erfordern bereits jetzt für die sich noch in der Planungsphase befindlichen Baumaßnahmen gut durchdachte und detaillierte Probenahmestrategien zur Konzeptionierung von Bodenschutz- und Bodenentsorgungsmaßnahmen.

1. Bodenmanagement bei EGLV

1.1 Abfalldokumentation

Seit Ende 2012 werden zur projektübergreifenden Dokumentation Bodenmassen, die im Rahmen von Baumaßnahmen der Emschergenossenschaft (EG) und des Lippeverbandes (LV) anfallen und außerhalb der Baumaßnahme entsorgt werden, erfasst und in einer Datenbank tourenscharf, d.h. für jeden Transportvorgang, vorgehalten. Hierbei werden folgende Informationen festgehalten

- Das jeweilige Projekt
- die Anfallstelle zur Zuordnung der Örtlichkeit im Baufeld
- die Beschreibung des Abfalls (Angabe zur Bodenart, Differenzierung in natürliche Böden oder Auffüllungen, Anteil der mineralischen Fremd Beimengungen-) mit Angabe der Abfallschlüsselnummer gemäß AVV zur Differenzierung von nicht gefährlichen und gefährlichen Abfällen
- LAGA- oder Deponieklasse
- der Beförderer
- der Entsorger bzw. Entladestelle

Diese Dokumentation bezieht sich auf die Abfälle aus den laufenden Baumaßnahmen. Betriebliche Abfälle werden im Hause gesondert gefasst und werden hier nicht betrachtet. Ebenso wird auch kein Bodenmaterial sowie sonstige Aushubmaterialien (Gemische) in der Abfalldatenbank dokumentiert, welche innerhalb der Baumaßnahme genehmigungskonform wiederverwertet wurde und somit das Projektgebiet nicht verlassen haben. Hierzu legen die Fachgutachter gesonderte Berichte zur Abschlussdokumentation vor. Die bewegten Stoffströme sind daher noch um einiges größer als die extern verwerteten und entsorgten Bodenmassen.

1.2 Auswertung der Entsorgungswege und Bodenmassen

Die oben beschriebene Abfalldokumentation ermöglicht eine Auswertung der wesentlichen Qualitäten der angefallenen Bodenmaterialien hinsichtlich der bislang bestehenden Entsorgungswege.

- **Entsorgungsweg 1 (EW 1):**
Bodenmaterial oder Ausgangsgestein natürlichen Ursprungs ohne Fremdstoffe, die die Vorsorgewerte der BBodSchV einhalten. Diese Böden können frei verwertet werden.

- **Entsorgungsweg 2 (EW 2):**
Auffüllungen oder umgelagertes Bodenmaterial mit technogenen Substraten Eine Entsorgung erfolgt in technischen Bauwerken oder in entsprechenden Entsorgungsanlagen.
- **Entsorgungsweg 3 (EW 3):**
Bodenmaterial oder Auffüllungen mit Schadstoffbelastungen. Die Entsorgung ist auf Deponien (Klasse I bis III) oder in entsprechenden Entsorgungsanlagen möglich.

Von 2012 bis Ende 2021 wurden die Entsorgungsströme von nahezu 300 Projekten im Emscher- und Lippegebiet erfasst, dabei wurden in Summe rund 15,2 Mio. t an Aushubmassen extern verwertet oder beseitigt. Die Datenaufbereitung für das Jahr 2022 findet derzeit noch statt, daher können noch keine detaillierten Ausgaben und Auswertungen über die in 2022 angefallenen Entsorgungsmengen gemacht werden

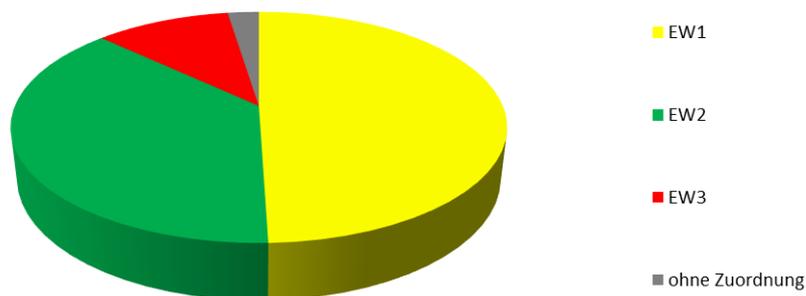


Abbildung 1: Gesamtmassen (15,2 Mio t) je Entsorgungsweg; EW 1: rd. 50 % , EW 2: rd. 38 %, EW 3: rd. 11 %

Von den 15,2 Mio. t Bodenmassen (entspricht ca. 610.000 LKW-Ladungen) sind rd. 94 % in der Datenbank zur Abfalldokumentation enthalten. In Abbildung 2 ist die Verteilung der Entsorgungsmengen auf die LAGA-Einbauklassen für die Jahre 2012 bis 2021 dargestellt. Hierbei sind deutlich die sprunghaften Veränderungen im Entsorgungsweg 1 über die Zeit erkennbar, während sich die Entsorgungsmengen innerhalb des Entsorgungsweges 2 auf einem nahezu einheitlichen Niveau bewegen. Hier macht sich der Einfluss von Projekten mit großen Bodenbewegungen der ökologischen Schwerpunkte (ÖSP) und Hochwasserrückhaltebecken (HRB) bemerkbar, u.a. die Projekte HRB Mengede, HRB Ellinghausen und ÖSP Emschermündung. Auch waren die großen Mengen des Ausgangsgestein aus den Vortriebsmaßnahmen meist geogen mit erhöhten Stoffkonzentrationen an Sulfat und Arsen anzutreffen, so dass sich insbesondere mit dem Fortschreiten

der ökologischen Verbesserungen und ökologischen Schwerpunkte eine Verschiebung zugunsten der LAGA M20 Z0/Z0* Werte gezeigt hat. Aufgrund der starken bergbaulichen und montanindustriellen Prägung des Emschergebietes sind hingegen für die für die Bodenklassifikation in die Entsorgungswege 2 und 3 primär einstufigsrelevanten Parameter(gruppen) die PAK, TOC, Sulfat, Cyanide und Schwermetalle.

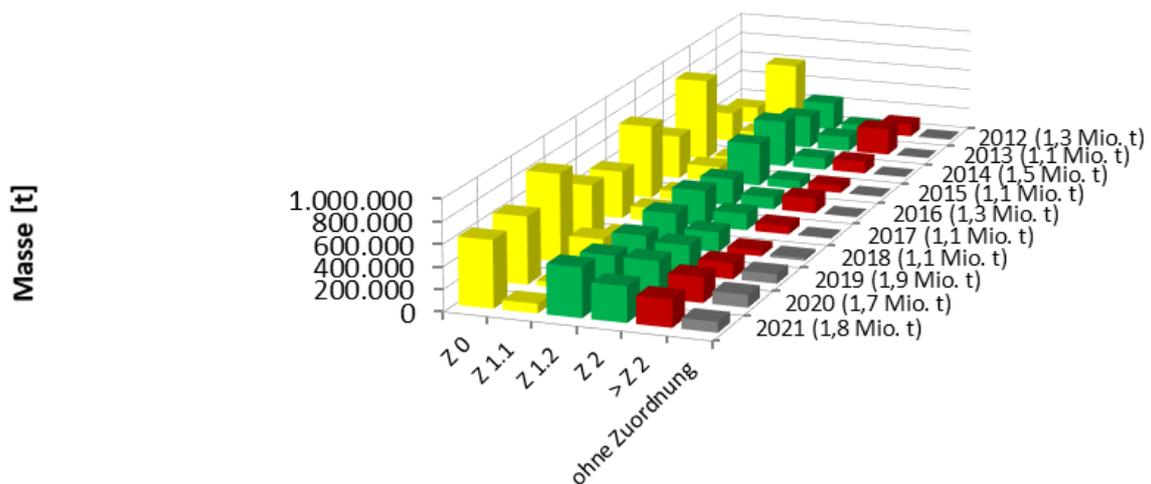


Abbildung 2: Massen je LAGA-Einbauklasse / Deponieklasse

Bis Ende 2021 entfielen beim **Emscherumbau** rd. 53 % der entsorgten Bodenmassen auf Maßnahmen des Abwasserkanalbaus, rd. 26 % auf Maßnahmen zur ökologischen Verbesserung sowie rd. 21 % auf die Errichtung von Hochwasserrückhaltebecken. Durch die Fertigstellung und Inbetriebnahme des neuen Abwasserkanals Ende 2021 wird sich zukünftig der Anteil an Bodenmassen, die im Zuge der ökologischen Verbesserung anfallen, deutlich erhöhen.

In Abbildung 3 sind die Anfall- und Entsorgungsstellen in Form zweier Übersichtslage-skizzen für den Zeitraum von 2012 bis 2021 dargestellt.

Mit rd. 23 % wurde der größte Anteil auf die ehemalige Bergehalde Lohberg Nord-Erweiterung verbracht. Auf den vier Standorten Abgrabung Gut Grunland, Zentraldeponie Emscherbruch, Bauvorhaben Kläranlage Emschermündung und Bergehalde Gropenbruch wurden rd. 29 % der Gesamtmassen entsorgt, so dass die Entsorgung von mehr als 50 % der Bodenmassen über lediglich fünf Standorte erfolgte. Der restliche Anteil wurden über weitere rd. 350 Annahmestellen verwertet oder beseitigt.

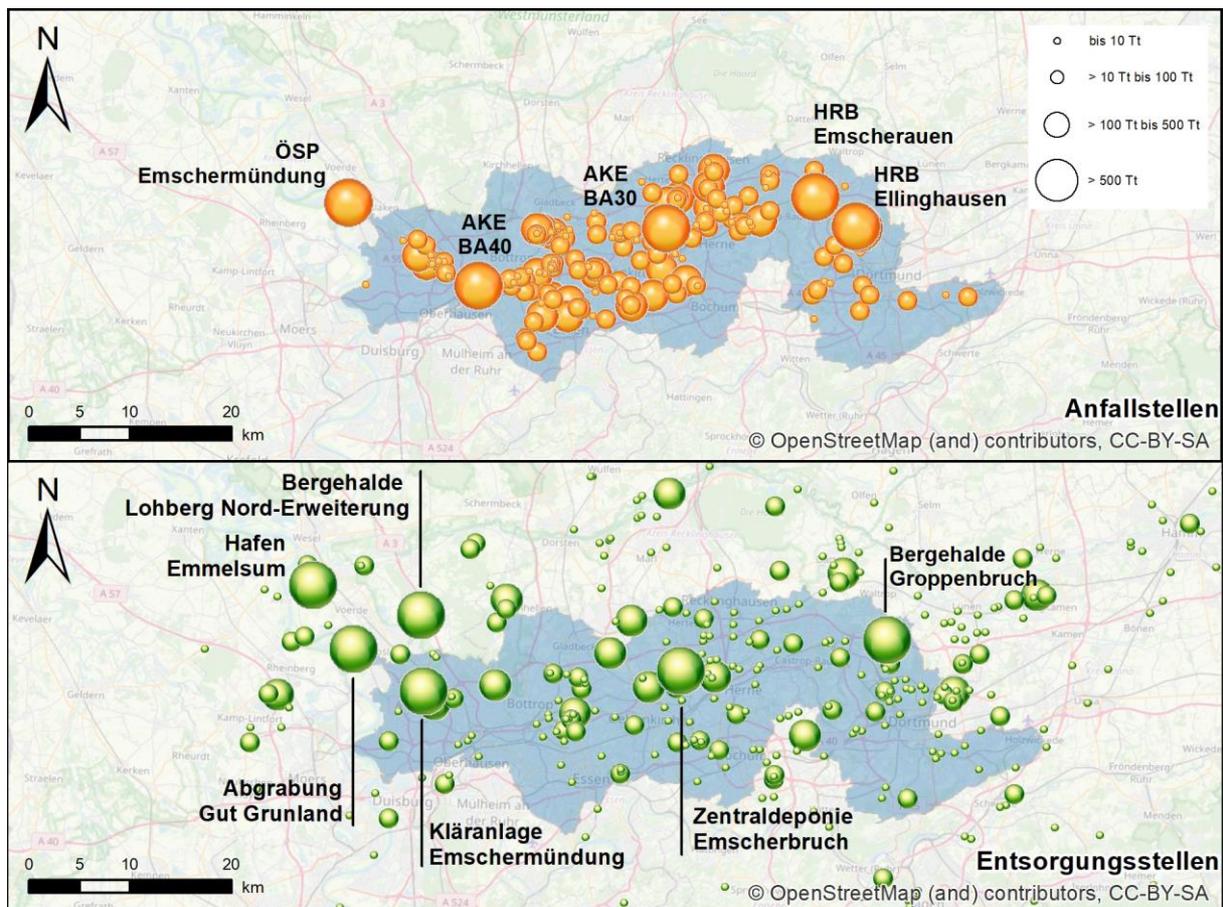


Abbildung 3: Anfallstellen und Entsorgungsstellen

Unter der Annahme, dass die tatsächlich zurückgelegte Strecke rd. 30 % höher als die Luftlinien-Entfernung zwischen der Anfallstelle (Projekt-Mittelpunkt-Koordinate) und der Entladestelle liegt, beträgt die mittlere Transportentfernung rd. 22 km pro Tour. Demnach wurden rd. 11,3 Mio. km Entsorgungskilometer zurückgelegt.

1.3 Prognose zum Bodenmanagement für die kommenden Jahre Beispiel Emschergenossenschaft

Für die Prognose der EG-Massen wurden dem Projektinformationsdienst von EGLV die Bauzeiten der bis 2028 Jahre geplanten Projekte entnommen und die projektspezifischen Überschussmengen linear über die einzelnen Ausführungszeiten interpoliert. Demnach fallen ab Januar 2022 bis 2028 voraussichtlich rd. 8,1 Mio. t für den weiteren Emscherumbau (ÖV-Maßnahmen, Hochwasserschutz) an, was weiterhin einer jährlichen Tonnage von über 1 Mio. t entspricht.

Wie bereits beschrieben wird sich zukünftig der Schwerpunkt der Bodenentsorgung vom unterirdischen Kanalbau hin zu oberflächennahen ÖV-Maßnahmen im und entlang der Gewässer weiter verändern. Hierdurch wird sich der Anteil an gewachsenem Bodenmaterial an der Gesamtentsorgung (ca. 60%) weiter verringern und zukünftig noch mehr Bodenmaterial mit technogenem Substrat heute als sogenannte Gemische in der Mantelverordnung definiert anfallen.

Eine Extrapolation der in der Vergangenheit über die LAGA klassifizierten Massen auf zukünftige Entsorgungswege ist aufgrund der ab August 2023 verbindlich geltenden ErsatzbaustoffV und BBodSchV nicht mehr unmittelbar möglich. Insbesondere die Änderungen bei den Eluat-Untersuchungen (Wasser Feststoffverhältnis 2:1 statt vormals 10:1) verhindern eine Auswertung der bei EGLV vorgehaltenen Bodenanalysen für die Abschätzung zukünftige Entsorgungswege.

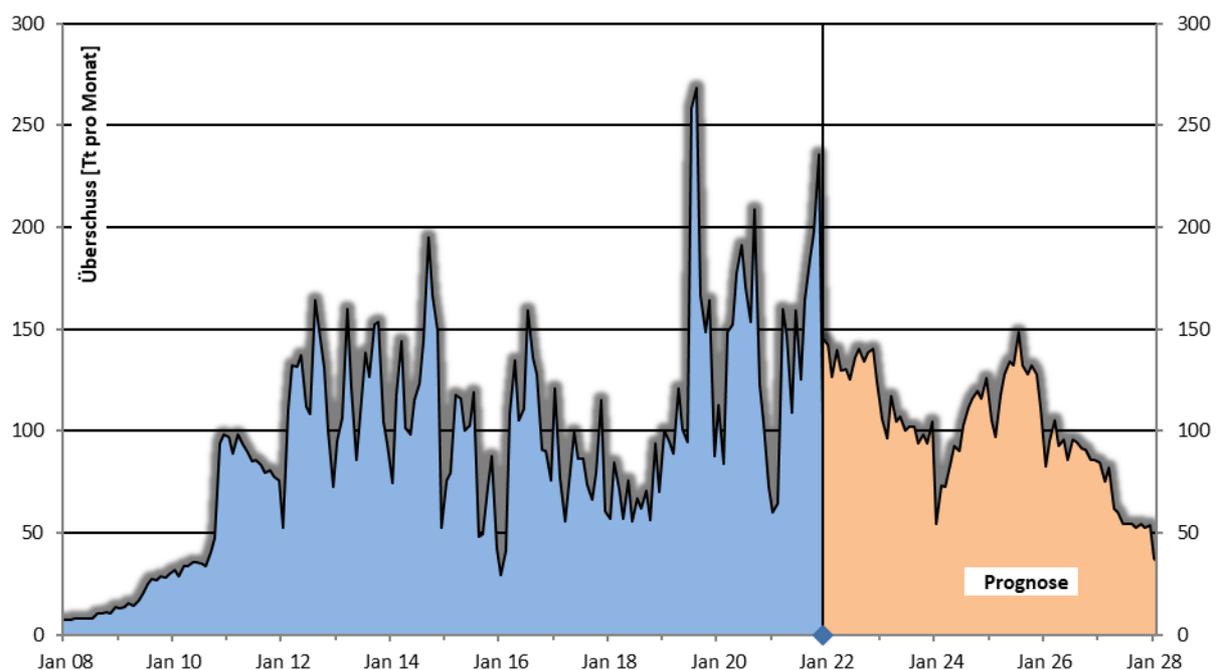


Abbildung 4 Emschergenossenschaft, tatsächlich und prognostizierte entsorgte Massen pro Monat

2. Auswirkungen der neuen Mantelverordnung auf das Bodenmanagement bei EGLV

2.1 Zukünftiges Bodenmanagement

Für fast alle Baumaßnahmen der Emschergenossenschaft und des Lippeverbandes sind, soweit sie Eingriffe in bzw. Auswirkungen auf den Boden oder das Grundwasser beinhalten Beschreibungen des Baugrundes, Gefährdungsabschätzungen und für die Ausführung, Gründungsgutachten sowie ein Bodenmanagementkonzept und im Bedarfsfall auch Sanierungspläne nach den Anforderungen des BBodSchG zu erstellen.

Insbesondere bei den in den kommenden Jahren anstehenden ökologischen Verbesserungen (ÖV) der Gewässer liegt der Schwerpunkt der fachgutachterlichen Anforderungen, im Vergleich zu siedlungswasserwirtschaftlichen Tiefbauprojekten, nicht nur auf den baugrundtechnischen und bodenmechanischen Fragestellungen, sondern auf einem Bodenmanagement, welches sich insbesondere auf die Bewertung der umwelttechnischen und ökologischen Aspekte in der Wechselwirkung Boden/Grundwasser/Gewässer fokussiert. Ziel der ökologischen Verbesserungen ist es, die Gesamtheit des ökologischen Systems so zu verbessern, dass sich aus den ehemaligen Abwasserläufen im Emschergebiet wieder natürliche Gewässer entwickeln, die den Anforderungen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie und der Oberflächengewässerverordnung genügen. Neben der Struktur und der chemischen Güte des Gewässers, sind auch die Ufer- und Auenbereiche des Gewässers und die dort anstehenden Böden mit ihren unterschiedlichen Bodenfunktionen entscheidende Einflussfaktoren für die ökologische Entwicklung.

Daher sind bereits in der Planung Bodenmanagement- und Bodenschutzkonzepte zu entwickeln, welche trotz oder gerade aufgrund der starken industriellen Prägung der Böden im Emschergebiet, sowohl Maßnahmen zum Schutz des Gewässers als auch zur Vermeidung und Minimierung von schädlichen Bodenveränderungen (physikalisch, chemisch) und Verluste von gesetzlich geschützten natürlichen Bodenfunktionen im jeweiligen Projektgebiet beinhalten.

2.2 Was regelt die neue Ersatzbaustoffverordnung

Neben der Änderung des Schwerpunktes von AK- hin zu ÖV-Maßnahmen, ergeben sich durch die im August 2023 in Kraft tretende Mantelverordnung und damit einhergehende Ablösung der LAGA M20 und der in NRW derzeit geltenden Verwertererlasse durch

die neue Ersatzbaustoffverordnung weitere Veränderungen die sich deutlich auf das zukünftige Bodenmanagement und den Bodenschutz bei EGLV auswirken.

In der neuen Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV) werden für 16 verschiedene mineralische Ersatzbaustoffe, wie z. B. , RCL-Material, Schlacken, Aschen, aber auch nicht aufbereitetes Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG), das ausgehoben und abgeschoben werden soll, die zulässigen Einbauweisen in technische Bauwerke (17 Einbauweisen) gemäß der jeweiligen Materialklasse definiert. Die Ersatzbaustoff gilt dabei nicht für das Einbringen von Material in durchwurzelbare Bodenschichten welches in § 6 und 7 der BBodsSchV geregelt wurde. Der Einbau von Bodenmaterial unterhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht in sogenannte bodenähnliche Anwendungen ist neu im § 7 und 8 der BBodSchV geregelt. Ausgenommen wurden aus der Mantelverordnung Regelungen zum Umgang mit Bodenmaterial auf Halden oder Absetzteichen des Bergbaus, im Deichbau und in Gewässern sowie für Deponieersatzbaustoffe. Neben den Einbauweisen werden auch die Probenahme und notwendige Analytik sowie die Bewertungskriterien für die Klassifizierung der jeweiligen Ersatzbaustoffe geregelt. Ein für das Ruhrgebiet typisches und gerade im Emscheraum entlang der Gewässer und Deiche oft verbautes Substrat, das „Bergematerial“, wird z.B. nicht als Ersatzbaustoff gelistet und bedarf daher einer gesonderten Einzelfallzustimmungen der Behörden gemäß § 21 der ErsatzbaustoffV. Damit sind beim Umbau der Gewässer zukünftig für das Bodenmanagement eine umfangreichere gutachterliche Bewertung im Sinne der unter § 21 ErsatzbaustoffV Abs. 3 bis 5 sowie der BBodSchV § 6 Abs. 3 und 4 erforderlich, um sowohl im Rahmen der Baumaßnahme selbst als auch innerhalb des überprägten Emschergebietes mit anfallendem Bodenmaterial sinnvoll und zugleich unschädlich in Bezug auf die Gewässerentwicklung umgehen zu können.

2.3 Was ändert sich hinsichtlich der Bodenklassifikation und der dafür notwendigen bodenchemischen Untersuchungen im Planungsprozess?

Für Aushubböden bei Baumaßnahmen wurde die Ersatzbaustoff-Materialklasse „nicht aufbereitetes Bodenmaterial (BM)“ bzw. „nicht aufbereitetes Baggergut (BG)“ eingeführt, welches auch neben dem nicht definiertem Bergematerial die primäre Ersatzbaustoffklasse für die zukünftigen Baumaßnahmen im Emschergebiet darstellen wird. Baggergut unterscheidet sich dabei definitionsgemäß vom Bodenmaterial dadurch, dass es „im Rahmen von Unterhaltungs-, Neu- oder Ausbaumaßnahmen aus oder an Gewässern entnommen oder aufbereitet wird oder wurde; Baggergut kann bestehen aus Sedimenten und subhydrischen Böden der Gewässersohle, aus dem Oberboden, dem Unterboden oder dem Untergrund im unmittelbaren Umfeld des Gewässerbettes oder aus Oberbö-

den im Ufer- und Überschwemmungsbereich des Gewässers. Nach der aktuellen Definition würde somit ein großer Teil der Aushubmassen von ÖV Maßnahmen (Sohle, Berme, Aue) in die Klassifikation Baggergut fallen.

Eine wesentliche Neuerung ist der „Grenzwert“ der prozentualen Anteile an mineralischen Fremd Beimengungen in der Bodenprobe. Zwar war in der LAGA TR Boden 2004 auch bereits vorgegeben, dass diese i.d.R. nur bis 10% mineralischer Fremdbestandteile anzuwenden ist, jedoch musste der Anteil nicht angegeben werden und hatte auch keinen Einfluss auf die durchzuführende Analytik. Innerhalb der ErsatzbaustoffV wird nun jedoch unterschieden zwischen <10%, 10 – 50% und > 50% mineralische Fremd Beimengungen und je nach Anteil an mineralischen Fremdbestandteilen sowie nach dem Zeitpunkt der Probenahme (Vorerkundung oder Aushub) haben die Untersuchungen an unterschiedlichen Fraktionen zu erfolgen. Die Bestimmung der prozentualen Anteile erfolgt dabei allerdings nicht nach einem analytischen genormten Verfahren im Labor, sondern durch die subjektive Wahrnehmung und Einschätzung des Probenehmers. Für eine ansatzweise vergleichbare Abgrenzung von Bodenmassen in einem Projektgebiet ist es daher allerdings erforderlich, dass die Probenahme und Bodenansprache immer von der gleichen Person durchgeführt wird.

Gemäß ErsatzbaustoffV nach § 9 Abs. 4 haben bei weniger als 10 % mineralischer Fremd Beimengungen in einer Bodenprobe die Untersuchungen an der < 2mm Fraktion analog zur BBodSchV zu erfolgen (die Siebung wird hierbei von der Untersuchungsstelle durchgeführt). Zusätzlich sind Partikel >2mm, an denen Schadstoffe anhaften könnten, gesondert zu analysieren. Bei 10 – 50% mineralischen Fremdbestandteilen ist zu unterscheiden, ob es sich um eine Probenahme von Haufwerken zur Deklarationsanalytik oder eine Probenahme in situ zur Vorerkundung von Böden oder Haufwerken am Anfallort“ handelt. Im ersten Fall ist die Analytik und Bewertung an der Gesamtfraktion der Bodenprobe durchzuführen. Im zweiten Fall hingegen ist analog zu Bodenaushub mit mineralischen Fremd Beimengungen <10% zu verfahren. Beträgt der Anteil an mineralischer Fremdbestandteile mehr als 50%, ist keine Klassifikation mehr als Bodenmaterial im Sinne der ErsatzbaustoffV möglich. In diesem Fall ist, insofern es sich nicht um ein RC-Gemisch handelt, die anteilige Bestimmung der einzelnen enthaltenen Ersatzbaustoffkomponenten notwendig und eine Bewertung als Worst-Case Betrachtung bzgl. der Grenzwerte durchzuführen. Insgesamt ist durch die Betrachtung und Bewertung unterschiedlicher Fraktionen sowohl die analytische Vergleichbarkeit als auch statistisch korrekte Auswertung nicht mehr gegeben.

Eine weitere entscheidende Neuerung der ErsatzbaustoffV und novellierten BBodschV ist, dass die Bestimmung der Eluatkonzentrationen nun im 2:1 und nicht mehr 10:1 Eluat zu erfolgen hat. Eine Vergleichbarkeit von „alten“ Ergebnissen im 10:1 Eluat zum neuen 2:1 Eluat ist jedoch nicht gegeben, so dass für das Bodenmanagement aller Pro-

jekte mit Genehmigung in bzw. Umsetzung nach 2023, für die bereits Untersuchungen durchgeführt wurden, ergänzende Untersuchungen im 2:1 Eluat Analysen erforderlich werden. Für die Klassifikation nach Deponieverordnung ist jedoch weiterhin das 10:1 Eluat anzuwenden. Als Folge des nun für die ErsatzbaustoffV durchzuführenden 2:1 Eluats sind zudem größere Probenvolumina als bisher für die LAGA erforderlich, um alle nach Anlage 1 Tabelle 3 erforderlichen Parameter sowie ggf. einzelne Stoffe nach Tabelle 4, zu analysieren. Nach ersten Schätzungen verschiedener akkreditierter Labore beträgt die hierfür notwendige Probenmenge in etwa 2,5 bis 3,5 kg je zu analysierender Probe. Bei diesen Mengenangaben ist der behördeninterne NRW PFAS Erlass, der seit 2022 ebenfalls die Klassifizierung von PFAS Eluatgehalten an Verwertungsklassen ergänzt, noch nicht mitberücksichtigt.

Daher bedarf es zukünftig bereits im Planungsprozess von Baumaßnahmen einer durchdachte Probenahmestrategien, um den erhöhten Aufwand der Probengewinnung und -mengen, z.B. durch Mehrfachbohrungen, Baggerschürfe oder größere Bohrdurchmesser bis zu 80 mm, besser planen und hinsichtlich der verschiedenen Fragestellungen des Bodenschutzes und der umwelttechnischen und ökologischen Aspekte und der Wechselwirkung der Kompartimente Boden – Grundwasser - Gewässer bewerten zu können. Für eine solche Probenahmestrategie ist aufgrund der o.g. Anforderungen zugleich ein Bodenmanagementkonzept mit potentiellen Verwertungs- oder ggf. auch Beseitigungsmöglichkeiten/-standorten frühzeitig d.h. im Rahmen der Entwurfsplanung vorzudenken.

3. Ergebnisse und Erfahrungen aus der Umsetzung – Praxisbeispiele

3.1 Umsetzung von Bodenmanagement und Bodenschutz im bisherigen Emscherumbau

Rückblickend auf die bereits im Rahmen der damaligen Veranstaltung zum Ruhrgeotag beschriebenen Anforderungen aus dem Emscherumbau an das Bodenmanagement (vgl. Hellmann und Kurtenacker 2010) kann zum jetzigen Zeitpunkt – neben dem im Kapitel 3.2 folgenden Ausblick aus der jetzigen Perspektive – auf bereits abgeschlossene oder derzeit im Bau befindliche Projekte zurückgeblickt werden. Dabei kann sowohl von Erkenntnissen, Herausforderungen und Erfolgen im Rahmen der Planungs- und Erkundungsphase sowie aus der baulichen Umsetzung dieser Maßnahmen berichtet werden. Mit konkretem Praxisbezug wird hinsichtlich markanter Fragestellungen oder Ergebnissen aus folgenden Projekten im Zusammenhang mit dem Emscherumbau berichtet:

- a) Emscherland2020 (ökologischer Schwerpunkt)
- b) HRB Mengede (Hochwasserrückhaltebecken)
- c) Durchgeführte und laufende Erkundungen zur ökologischen Verbesserung am Hauptlauf zwischen km 20 und km 53,5 (Kapitel 3.2)

Dabei stützt sich – wohlwissend der herausragenden Bedeutung für alle Einzelprojekte – jedes Beispiel thematisch etwas detaillierter und ausführlicher auf eine der wesentlichsten Herausforderungen und Aspekte wie die Umlagerung vor Ort (Emscherland2020), den Umgang mit wassergesättigten Böden (HRB Mengede) und die Anforderungen an die Untersuchungsphase (ÖV Emscher km 20 bis km 58).

Wie bereits zum damaligen Zeitpunkt beschrieben liegt eine der großen Herausforderungen beim Emscherumbau beim Umgang mit dem anfallenden Bodenmassen, wovon ein Großteil als Überschussmassen erwartet wurde (Hellmann und Kurtenacker 2010). Es wurde auf die Konfliktpotenziale von gesetzlichen Änderungen und der Verwertung von anfallenden Böden / Auffüllungen sowie die begrenzten Kapazitäten auf Deponien verwiesen. Da viele (natürliche) Böden aufgrund der TOC-Gehalte oder Überschreitungen der Vorsorgewerte über rein konventionelle Verwertungswege nicht verwertet werden können, müssen individuelle Lösungen gefunden werden.

Hinzu kommt die in den letzten Jahren stetig gewachsene Bedeutung des Bodenschutzes. Die geplanten Vorhaben zur Umsetzung des Emscherumbaus mit den Anforderungen des Bodenschutzes in Einklang zu bringen, stellt eine weitere Herausforderung dar, welche bereits frühzeitig in den Planungsphasen berücksichtigt werden muss. Dieser Aspekt kann jedoch auch im direkten Zusammenhang mit dem Bodenmanagement betrachtet werden. Gemäß der Vorgabe, die schützenswerte und begrenzte Ressource Boden möglichst schonend zu nutzen und sich anfallender Aushubböden nicht über konventionelle Entsorgungswege zu entledigen, unterstreicht eine von allgemeinen Parameterwerten losgelöste Betrachtung bei der Verwertung. In Verbindung mit den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft (Abfallvermeidung) und den Anforderungen des Bodenschutzes (sinnvoller und zweckgebundener Wiedereinbau von Böden als Vorzugslösung zur Entsorgung) sowie unter Berücksichtigung gebietstypischer Hintergrundgehalte ergeben sich Potenziale zur ökologischen und ökonomischen Optimierung des Bodenmanagements.

Bewusst werden nachfolgend, im Sinne einer möglichst praxisnahen Erläuterung, konkrete Beispiele aus dem Emscherumbau in Bezug auf die Herausforderungen und die Umsetzung der o.g. Fragestellungen gewählt, welche sich nach der jeweiligen Kategorie bzw. Stellung im Emscherumbau (ökologischer Schwerpunkt, Hochwasserrückhaltebecken, ökologischer Umbau am Hauptlauf) unterscheiden.

3.1.1 Ökologische Schwerpunkte (Beispiel Emscherland2020)

Ökologische Schwerpunkte weisen aufgrund der flächenhaften Eingriffe, neben dem außerordentlich hohen ökologischen Entwicklungspotenzial, große Herausforderungen und zugleich Chancen in Bezug auf das Bodenmanagement aus. Im Vergleich zum linienhaften, ökologischen Umbau am Hauptlauf oder den zahlreichen Nebenläufen, greifen Planungsmaßnahmen zur Realisierung der flächig ausgeprägten ökologischen Schwerpunkte oftmals weitreichend in natürlich anstehende Böden (v.a. landwirtschaftlich genutzte Flächen) ein. Insofern eine vom Hauptlauf losgelöste Umsetzung der ökologischen Schwerpunkte erfolgt (vgl. dazu auch Aspekte zur Integration von ökologischen Schwerpunkten in den Umbau des Hauptlaufs in Kapitel 3.2) sind dabei frühzeitig die i.d.R. hohen Potenziale zum Wiedereinbau dieser Böden zu identifizieren und in den Planungs-, Untersuchungs- und Abstimmungsprozess miteinzubeziehen.

Einhergehend mit den großflächigen Eingriffen in natürlich anstehende Böden sind ebenso die damit aufkommenden Fragestellungen zur Schutzwürdigkeit der anstehenden Böden sowie die daraus resultierenden Anforderungen an den vorsorgenden Bodenschutz. Eine bodenkundliche Beratung im Sinne der DIN 19639 ist bereits in den ersten Planungsphasen (idealerweise ab der Vorplanung) zu etablieren. Erste Auswertungen anhand von Bodenkarten, welche in Nordrhein-Westfalen im mittel- bis kleinmaßstäbigen Format flächendeckend und frei zugänglich vorliegen (z.B. BK50), geben einen ersten Aufschluss über das Vorkommen potenziell schutzwürdiger sowie empfindlicher Böden und dienen somit als Grundlage für die Erarbeitung eines Untersuchungskonzeptes. Die Verfügbarkeit großmaßstäbiger Bodenkarten (z.B. kommunale Bodenfunktionskarte im Maßstab 1:5.000) ist im Rahmen jeder Grundlagenermittlung zu prüfen. Bei der Erkundung ergeben sich Synergieeffekte zwischen geotechnischen, umwelttechnischen und bodenschutzfachlichen Fragestellungen. Eine Begleitung von Kleinrammbohrungen durch bodenkundliches Fachpersonal ermöglicht die Datenerhebung (Bodenansprache nach KA5) für eine weitergehende, projektspezifische Bewertung der Böden hinsichtlich deren Funktionserfüllungen / Schutzwürdigkeit sowie Empfindlichkeit hinsichtlich der geplanten Maßnahmen (z.B. Verdichtungs- und Bewegungsempfindlichkeit, Erosionsempfindlichkeit etc.). Alternativ oder ergänzend können, losgelöst von der geotechnischen Erkundung, Pürckhauer-Aufschlüsse (bis 2,0 m Tiefe) ausgeführt werden.

Der ökologische Schwerpunkt „Emscherland 2020: Ökologische Verbesserung der Emscher und des Suderwicher Baches“ i.V.m. der Herstellung eines Natur- und Wasser-Erlebnisparks und der Umgestaltung der Emscher-Terrassen befindet sich unmittelbar westlich des Wasserkreuzes Emscher – Rhein-Herne-Kanal zwischen dem Kreis Recklinghausen und der Stadt Castrop-Rauxel. Dieses Projekt wird an dieser Stelle beispielhaft beschrieben, da bereits alle Stufen von der Vorplanung über die Genehmigungs- und

Ausführungsplanung bis hin zur Bauausführung durchlaufen wurden und die bauliche Realisierung kurz vor dem Abschluss steht.

Zur Aufweitung der Emscher, mit Herstellung einer angebundenen Sekundäraue sowie der durchgängigen Anbindung des Suderwicher Baches inkl. Laufverlängerung und Sekundärauen, im Zusammenhang mit weiteren Maßnahmen zur Förderung der Gewässer- und Auenstrukturen waren umfangreiche Bodeneingriffe (ca. 350.000 m³ Bodenaushub, davon ca. 50.000 m³ Oberboden und 33.000 m³ anthropogen überprägte Auffüllungen) erforderlich. Neben gewässerbaulichen und ökologischen Zielen wurden Flächen und Bauwerke zur Umsetzung touristischer, sozialer und landschaftspflegerischer Ziele errichtet (z.B. Brücken, Eingangsbereiche, Informations- und Bewirtschaftungseinrichtungen etc.). Ein Großteil des Bodenaushubs resultierte aus dem Abtrag eines ca. 90 m breiten Landschaftsstreifens parallel zur Emscher, mit einer Abtragsmächtigkeit von ca. 7 m, bestehend aus Emscherböschung, Betriebswegen und landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Im Untersuchungsgebiet wurden gemäß vorliegenden Bodenkarten (BK50 und Bodenfunktionskarte des Kreises Recklinghausen im Maßstab 1:5.000) v.a. Gleye und Podsole (sowie verschiedene Subtypen und vereinzelt Pseudogleye) erwartet. Den meisten im Projektgebiet anstehenden Böden wurde eine mittlere bis hohe Funktionserfüllung zugeordnet. Anhand ergänzender bodenkundlicher Kartierungen (v.a. Ansprache durchgeführter Kleinrammbohrungen nach KA 5) konnten die Bodenkarten in weiten Teilen bestätigt, jedoch lokal auch Abweichungen festgestellt werden (z.B. maßgebende anthropogene Überprägung, abweichende Bodentypenverteilungen und teils reliktsche hydromorphe Merkmale etc.). Die Ergebnisse der bodenkundlichen Bestandsaufnahme wurden in einem integrierten Bodenschutzkonzept inkl. erforderlicher Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen zusammengefasst und im weiteren Verlauf bei der Planung und Bauleistik (Abstimmung mit Behörden, Anpassung der Bauausführungsanforderungen, Erstellung eines Bodenschutzplans, Vorgaben zur Umlagerung, Reaktivierung und Wiederherstellung von Bodenfunktionen etc.) berücksichtigt. Zudem erfolgte eine bodenkundliche Begleitung der Baumaßnahme von der Zustandsfeststellung im Rahmen der Baustelleneinrichtung über die Bauausführung bis zur derzeitigen Wiederherstellung / Rekultivierung bauzeitlich beanspruchter Flächen.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse und in Abstimmung mit den zuständigen Behörden konnte ein – bis auf auffällige und klar abgrenzbare Bereiche – nahezu vollständiger Wiedereinbau der vor Ort natürlich anstehenden Oberböden erreicht werden. Zur Gestaltung der Parkanlagen (Natur-, Wasser- und Erlebnispark) wurde eine Geländemodellierung geplant. Der dort vorher abgetragene Oberboden wurde nach dem Auftrag von zuvor im Abtragsbereich für die Gewässerumgestaltung gewonnenen Auensedimenten wieder aufgetragen.



Abbildung 5: ÖSP Emscherland 2020 mit Neutrassierung des Suderwicher Baches, Aufweitung und Neutrassierung der Emscher, Natur-, Wasser- und Erlebnispark (links) sowie erweiterten Emscherterrassen vor Anlage der Weingärten (rechts). Quelle: Emschergenossenschaft (2023)

Ein besonderes Augenmerk bei dem Wiedereinbau der Böden vor Ort lag auf der Erweiterung der zuvor, im Rahmen von Baumaßnahmen am Wasserkreuz sowie der Erweiterung des Rhein-Herne-Kanals, errichteten Emscherterrassen. Zur Rekultivierung der dort entstandenen Ablagerungsfläche sowie zur Umsetzung weiterer übergeordneter Ziele (z.B. naturbasierte Ökosystemleistungen als Grundlage einer ökologischen Landschaftsentwicklung, Angebote für Bildung etc.) erfolgte eine zusätzliche Überdeckung mit vor Ort gewonnenen, natürlich anstehenden Aushubböden. Zur Initiierung des regionalen Weinbaus werden hier derzeit Weingärten gestaltet. Hierzu mussten die Aushubarbeiten so geplant und gesteuert werden, dass die anfallenden Substrate (Mergel, Auenlehme, Auensande, Oberböden) entsprechend ihrer jeweiligen Eignung (z.B. bodenphysikalische Eigenschaften wie Durchlässigkeit und bodenchemische Eigenschaften wie Nährstoffverfügbarkeit) eingebaut wurden.

Insgesamt konnten im Rahmen der Umsetzung der Baumaßnahme, entsprechend der vorherigen Planung, nahezu alle geeigneten Böden (d.h. natürlich anstehende Böden mit gebietstypischen Stoffgehalten) wiedereingebaut werden. Lediglich ca. 22.000 t (Stand: März 2023) wurden einer Beseitigung auf Deponien zugeführt. Hierbei handelte es sich um Auffüllungen mit erhöhten Schadstoffgehalten (z.B. aus der Emscherberme und -

böschung sowie zurückgebauten Betriebswegen), welche bei den gegenwärtigen Einbauszenarien vor Ort als nicht wiedereinbaufähig einzustufen waren. Die Abgrenzung dieser Bereiche erfolgte mit ergänzenden, baubegleitenden Untersuchungen auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse im Rahmen der Entwurfs- und Ausführungsplanung.

3.1.2 Hochwasserrückhaltebecken (Beispiel HRB Mengede)

Neben den ökologischen Schwerpunkten handelt es sich bei der Errichtung und Gestaltung von Hochwasserrückhaltebecken um weitere, besonderen Einzelvorhaben im Zusammenhang mit dem Emscherumbau mit einer herausragenden Bedeutung in Bezug auf das Bodenmanagement.

Das Rückhaltebecken in Mengede dient im Wesentlichen der Sicherstellung des Hochwasserschutzes im Unterlauf und ist auf ein 100-jähriges Hochwasserereignis bemessen. Im Endzustand sollen hier auf ca. 300.000 m² mehr als 1 Mio. m³ Rückhaltevolumen zur Verfügung stehen. Hierzu fallen Gesamtaushubmassen in einer Größenordnung von ca. 1,3 Mio. m³ an. Ein Großteil dieser Massen wurden bereits im Rahmen der Herstellung der Retentionsflächen im Zuge der Fertigstellung eines Zwischenzustandes bewegt.

Intern waren die Möglichkeiten zur Wiederverwertung begrenzt. Jedoch konnten durch die Planung und Errichtung eines Landschaftsbauwerkes ca. 300.000 m³ im Projektgebiet wiedereingebaut werden. An diesem Beispiel soll, neben den reinen Bodenmassen sowie dem allgemeinen Umgang, die im Gewässerumbau allgegenwärtige Thematik der stark grundwasserbeeinflussten Aushubböden näher veranschaulicht werden. Insgesamt war von ca. 220.000 m³ Böden in breiigem bis zähflüssigen Zustand auszugehen, was sowohl den Wiedereinbau vor Ort als auch die Entsorgung vor große Herausforderungen stellt. Insbesondere die Planung, Überwachung sowie Umsetzung einer darauf optimierten Baulogistik ist von zentraler Bedeutung; wobei sich viele Feinheiten bei der Umsetzung erst vor Ort herauskristallisieren und diesen im laufenden Baubetrieb entsprechend begegnet werden muss.

Für den Wiedereinbau vor Ort wurde für das Landschaftsbauwerk ein kassetten- bzw. zonenartiger Aufbau festgelegt. Auf Basis der Kenntnisse über die Verteilung und die jeweiligen Eigenschaften der Aushubböden wurden sehr weiche, teils wassergesättigte Böden mit reduzierten Scherfestigkeiten lagenweise im Kern eingebaut. Eine darüberliegende verzahnt eingebaute Zone mit erhöhten Scherfestigkeitsanforderungen dient der Böschungstabilität sowie als Aufstandsfläche für die zuoberst vorgesehene Aussichtsplattform bzw. Verweilfläche.

men naturgemäß nicht in voller Gänze möglich. Ein erfolgreiches Bodenmanagement sollte sich ebenso zum Ziel setzen, den Anteil der Böden, die über den freien Markt einer zuvor nicht bestimmbar Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden, möglichst gering zu halten. Im Falle des HRB Mengede konnte durch die Vereinbarung eines Rahmenvertrages ein Großteil der Überschussmassen zielgerichtet zur Endgestaltung einer Bergehalde in wenigen km Entfernung zum Aushubort gesteuert werden. Entscheidend für den Erfolg einer entsprechend geplanten und vorab vereinbarten Andienung ist, neben der umfangreichen Vorabstimmung und Vorbereitung, die chemische und bodenmechanische Einstufung sowie Kontrolle durch die fachgutachterliche Baubegleitung. Im Rahmen der aktuell laufenden Baumaßnahme zur Herstellung des Endzustandes können die noch anfallenden, teils wassergesättigten Aushubböden nicht im Baufeld zwischengelagert oder vorentwässert werden (hier ist bereits in weiten Teilen ein eingestautes und bewachsenes Biotop entstanden). Aus diesem Grund ist die Zwischenlagerung von Böden auf angrenzenden Flächen unvermeidbar. Geeignete Flächen sind im Umfeld nur begrenzt verfügbar und mit einem Eingriff in natürlich anstehende Böden verbunden. Aus diesem Grund waren umfangreiche bodenkundliche Voruntersuchungen und Abstimmungen erforderlich, um eine bodenschutzfachlich vertretbare Lösung zu finden. Die Flächenauswahl (Alternativenvergleich) erfolgte unter Berücksichtigung zahlreicher Beurteilungskriterien wie z.B. Verfügbarkeit, Erschließbarkeit, Naturnähe, Bodentypen (Empfindlichkeit und Schutzwürdigkeit), bauleistungsliche Eignung, klimatische Aspekte etc. Anschließend wurden die Böden im Bereich der Vorzugsfläche bodenkundlich untersucht und bewertet (Bodenkartierung nach KA 5, Zustandserfassung der Lagerungsdichte, Bodenfunktionsbewertung). Im Ergebnis weiterer bauleistungslicher Optimierungen (v.a. mit dem Ergebnis einer Reduzierung der Flächeninanspruchnahme) i.V.m. flächenspezifischen Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen wurde ein Bodenschutzkonzept ausgearbeitet. Neben der umwelt-/geotechnischen Begleitung der Baumaßnahme wurde ebenfalls eine bodenkundliche Baubegleitung etabliert.

3.2 Aktuelle Untersuchungen am Emscherhauptlauf und Herausforderungen zur Umsetzung der Mantelverordnung

Die ökologische Verbesserung am Hauptlauf unterscheidet sich in einigen Fragestellungen und damit einhergehenden Herausforderungen von den vorgenannten Beispielen. Auch in dem derzeit in der (Vor-)Planung befindlichen Streckenabschnitten zwischen km 20 (Höhe Bottrop/Oberhausen) bis km 37 (Höhe Herten) sowie daran anschließend bis km 53,5 (Höhe Dortmund) existieren integrierte ökologische Schwerpunkte, welchen eine besondere Bedeutung für das Bodenmanagement zukommt. Am Hauptlauf selbst gibt es aus Platzgründen nur begrenzte Möglichkeiten, die ökologische Umgestal-

tung durch Bodeneingriffe zu realisieren. In Bezug auf den potenziellen Abtrag sowie die Gewässerentwicklung liegt der Fokus auf den am Böschungsfuß der Deiche und Hochufer angeordneten Bermen. Unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Standsicherheit der angrenzenden Böschungen kann eine gewässerdynamische Entwicklung durch den (Teil-)Abtrag der Bermen begünstigt werden. Im Aufbau dominieren anthropogene Substrate wie Gemische aus umgelagerten Böden und technogenen Beimengungen wie z.B. Bergematerial und Schlacken. Je nach Lage und Schichtaufbau können gebiets-typische Belastungen oder lokale Hotspots erwartet werden. Gemäß der historischen Nutzung sind v.a. auffällige Konzentrationen an PAK, BTEX und Cyaniden verbreitet anzutreffen. Neben Eingriffen in die Berme sind Maßnahmen im Bereich der Emschersonhle sowie ggf. der Deich-/Hochuferkronen denkbar.

Aufgrund der verschiedenen Verwertungs- und Entsorgungsszenarien sowie der Belastungssituation kommt der vorlaufenden Untersuchung eine besondere Bedeutung zu. So wurden bereits in der aktuellen Projektphase (Vorplanung) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Im Abschnitt zwischen km 37 und km 53,5 wurden im Jahr 2020 bereits 137 Rammkernsondierungen sowie 100 Rammsondierungen durchgeführt. Anhand von gewonnenem Probenmaterial wurden knapp 200 chemische Analysen durchgeführt. Die Untersuchung erfolgte zum damaligen Zeitpunkt schwerpunktmäßig nach den Parametern der LAGA 2004, welche entsprechend den Sonderfragestellungen durch weitere Untersuchungsparameter (z.B. Tabelle 3.1 BBodSchV im 2:1-Eluat, Chrom(VI)-Analysen im Feststoff und 2:1-Eluat, Analyse von leichtflüchtigen Verbindungen in Methanolvorlage) ergänzt wurden. Durch die Analyse von Bergematerialien hinsichtlich des Säurebildungspotenzials durch chromreduzierbare Schwefelverbindungen in Gegenüberstellung zur Säureneutralisationskapazität konnte zudem die Fragestellung der potenziellen Versauerung in Verbindung mit einer Pyritoxidation durch eine etwaige Umlagerung / Belüftung dieser Materialien behandelt werden. In knapp 80 % der untersuchten Proben wurde eine positive Netto-Säureneutralisationskapazität nachgewiesen, d.h. in den meisten Fällen ist das Risiko einer Versauerung infolge einer potenziellen Pyritoxidation als gering einzustufen. Deskriptiv-statistische Auswertungen können auf Basis des hohen Untersuchungsumfangs zur Abschätzung gebietstypischer Stoffgehalte sowie Abgrenzung lokaler Schadstoffhotspots dienen (vgl. Abbildung 7).

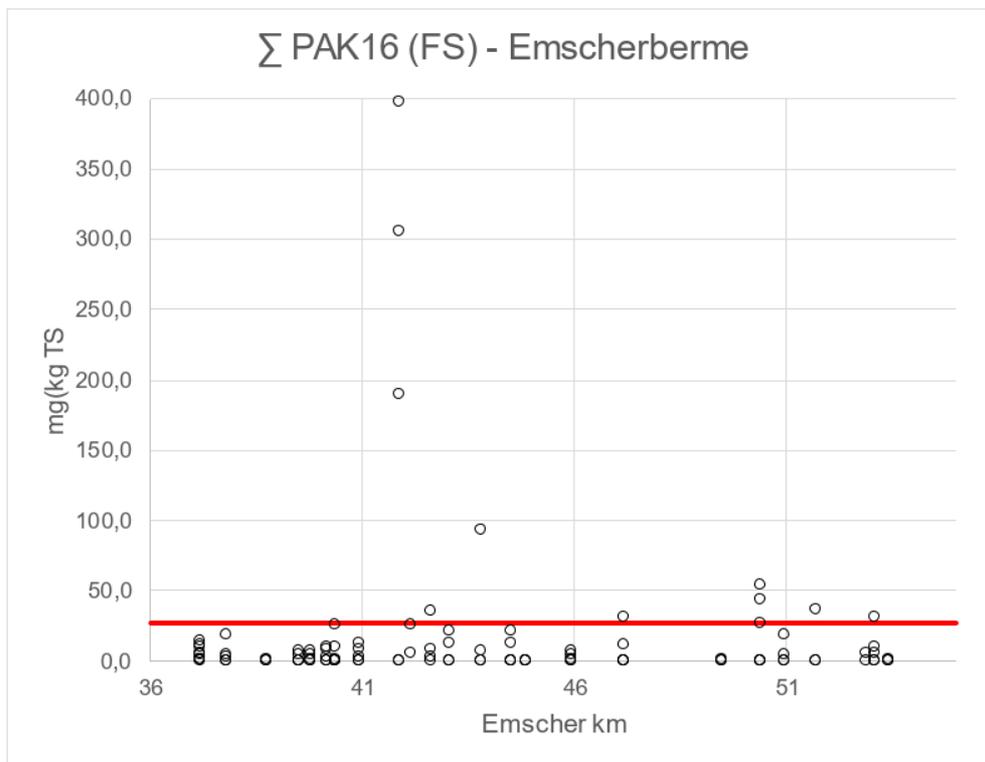


Abbildung 7: PAK-Gehalte im Bereich der Emscherberme im Längsverlauf zwischen km 37 und km 53,5 mit Darstellung des 90. Quantils (rote Linie)

Aktuell laufen umfangreiche Untersuchungen im Abschnitt zwischen km 20 und km 37. Insgesamt ist im Rahmen der Vorplanung die Durchführung von ca. 460 Rammkernsondierungen, ca. 240 Rammsondierungen, ca. 350 Erkundungsschürfen sowie 60 großkalibrigen Bohrungen vorgesehen. Der hohe Erkundungsaufwand resultiert hier insbesondere aus den Anforderungen an die Untersuchung der Deiche im Hinblick auf eine Defizitanalyse und damit verbundene Maßnahmen zur erforderlichen Sanierung bestimmter Deichabschnitte. Durch die aus geotechnischer Sicht erforderliche, hohe Erkundungsdichte ergeben sich entsprechende Synergieeffekte zum Bodenmanagement (v.a. chemische Vorerkundung und räumliche Verteilung verschiedener Substratschichten). Gerade angesichts der Aktualität der Mantelverordnung (Ersatzbaustoffverordnung sowie novellierte BBodSchV) resultieren besondere Anforderungen an die chemische Voreinstufung der anstehenden Substrate. Bei grobkörnigen Materialien (z.B. Bergematerial und Schlacken) ist für die nunmehr obligatorische Untersuchung im 2:1-Eluat sowie dem Erfordernis mehrerer Eluatansätze (z.B. Untersuchung der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe nach EPA im Eluat) die Gewinnung großer Mengen Probenmaterial (bis zu ca. 5 kg je Untersuchung) erforderlich. Hinzu kommen weitere Eluatuntersuchungen nach dem Leitfaden zur PFAS-Bewertung (vgl. auch Erlass des MULNV NRW vom 04.02.2022) Der geplante Untersuchungsumfang von ca. 200 Analysen streckt sich

zu je 50 % auf die erste Erkundung mittels Rammkernsondierungen (Mischprobenbildung erforderlich) sowie die daran anschließende Untersuchung mit Hilfe von Baggerschürfen und Großbohrungen (Gewinnung von großen Probenmengen und Einzelanalysen möglich).

Eine besondere Schwierigkeit liegt in der Erkundung und Bewertung der im aktuellen Zustand anstehenden Emschersohle. Je nach Streckenabschnitt besteht im Sinne der natürlichen Gewässerdurchgängigkeit ein nicht unerhebliches Potenzial zur Anhebung der Emschersohle. Grundsätzlich stellt sich die Frage nach den Auswirkungen eines Verbleibs der Emschersohle auf die zukünftige Gewässergüte sowie in den vorgenannten Abschnitten zudem die Frage nach einem ökologisch verträglichen Aufbau der Sohlerrhöhung. Die Untersuchung der potenziellen Abtragsbereiche am Gewässer sowie ergänzende Untersuchungen an den ökologischen Schwerpunkten liefern wichtige Erkenntnisse zur Verfügbarkeit von Einbausubstraten. Die Erkundung der Emschersohle gestaltet sich jedoch anhand konventioneller Untersuchungsmethoden schwierig. Erste orientierende Erkenntnisse zum Sohlaufbau und den chemischen Eigenschaften konnten im Rahmen einer Erkundung mit Hilfe von Linerbohrungen im Jahr 2011 gewonnen werden. Im Rahmen von Baumaßnahmen sowie zur Vorerkundung durchgeführte Baggerschürfe zur Gewinnung von Probenmaterial liefern weitere Ergebnisse; sind jedoch verfahrenstechnisch, aufgrund der Aufwirbelung von Feinstanteilen, als orientierende Richtwerte zur Ersteinschätzung zu verstehen. Derzeit geplant ist eine weitere Erkundungskampagne mit Hilfe von Linerbohrungen zwischen km 8,0 bis km 61,5 sowie die Durchführung von Schurferkundungen an im Rahmen von laufenden Baumaßnahmen temporär trockengelegten Streckenabschnitten.

Die Herausforderungen an das Bodenmanagement beginnen hier folglich bereits vollumfänglich bei der Planung und Durchführung der qualitativen Voreinstufung der zumeist anthropogen überprägten Substrate. Im Ergebnis stellen sich, neben der klassischen Aufgabenstellung zur Massenquantifizierung (welche Aushubmassen stehen wo und in welcher Qualität an), weitere Fragen zur Gefährdungsbeurteilung, Eingrenzung und gewässerökologischen Verträglichkeit bei verschiedensten Bestands- und Einbauszenarien. Das Bodenmanagement versteht sich als integrierter und oftmals iterativer Prozess im Zusammenspiel mit den fachplanerischen, ökologischen, logistischen und ökonomischen Fragestellungen, welcher bereits in der jetzigen Planungsphase intensiv und umfangreich behandelt wird.

Literatur

Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 43 (2021): Verordnung zur Einführung einer Ersatz- baustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bonn am 16. Juli 2021.

Hellmann C. & Kurtenacker M. (2010), 'Anforderungen aus dem Emscherumbau an das Bodenmanagement', RuhrGeo Tag 2010, 111-120.

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2022), 'Kreislaufwirtschaft, Bodenschutz, Altlasten, Wasserwirtschaft – Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), hier: Leitfaden zur PFAS-Bewertung', Erlass vom 04.03.2022.

Das ökologische Konzept für den Umbau der Emscher: Leitbild, Entwicklungsziele, Maßnahmen, Umsetzung

Mechthild Semrau, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Peter Reese, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen

Zusammenfassung

Für den Umbau der Emscher wurde im Rahmen der Erarbeitung des Masterplans im Jahr 2006 ein ökologisches Konzept erstellt. Dieses besteht aus unterschiedlichen Bausteinen und hat bis heute Bestand. Es wird nach und nach realisiert. Die Entwicklung des umgebauten Flusses wird intensiv gemonitort, um zu prüfen, ob die Ziele für den Umbau und die Bewirtschaftungsziele der WRRL erreicht werden.

1. Einleitung: Die Emscher, ein urban-industrielles Fluss-Ökosystem

Die Emscher hat wie kaum ein anderer Fluss die Entwicklung einer ganzen Region nicht nur begleitet, sondern erst ermöglicht. Ein kleiner, ländlicher Fluss wurde dafür in einen technischen Vorfluter für die offene Abwasserableitung und den Hochwasserschutz umgewandelt. Industriegeschichte und Stadtentwicklung haben tiefe, teils nicht mehr zu beseitigende Spuren hinterlassen.

Das Generationenprojekt des Emscher-Umbaus schafft eine neue Fluss-Landschaft mit vielfältigen ökologischen, sozialen und ökonomischen Funktionen. Die neue Emscher kann aufgrund ihrer Vorgeschichte und den damit verbundenen irreversiblen Veränderungen immer nur Natur aus zweiter Hand sein. Aber auch oder gerade als urban-industrielles Ökosystem wird sie einen großen Mehrwert haben, z. B. als neuer Lebens- und Erlebnisraum und vor dem Hintergrund des Klimawandels für die Resilienz der Emscherstädte von morgen.

Die Emscher verändert sich zum dritten Mal. Vor gut einem Jahrhundert wurde aus einem gewundenen Flachlandfluss inmitten einer dünn besiedelten Agrarlandschaft ein schnurgerader Abwasserlauf – die Hauptachse einer von Schwerindustrie- und Zechen geprägten Region. Erst dieser technische Umbau machte den Weg frei für die Entstehung einer der größten Metropolregionen Deutschlands. Durch die Nordwanderung des Bergbaus und das damit verbundene Ende der Bergsenkungen wurde es gegen Ende des Jahrtausends möglich, das Abwasser wieder aus der Emscher und ihren Nebenläufen zu

verbannen und in den anderenorts üblichen unterirdischen Abwasserkanälen zu führen. Das Betonkorsett der Wasserläufe verschwand, sauberes Wasser suchte sich – immer in den Grenzen des Hochwasserschutzes und der örtlichen Bebauung – wieder ein weitgehend naturnahes Flussbett. In ehemaligen Meidezonen entstehen heute ökologisch wertvolle Biotope und attraktive, durch Fuß- und Radwege erschlossene Freizeitareale.



Abbildung 1: Die wieder offen gelegte Emscher am Phoenix See, Dortmund. (Quelle: EGLV)

Auch wenn die Neue Emscher möglichst weitgehend dem Leitbild eines natürlichen Flachlandflusses entsprechen soll, ist sie nicht mehr das ungebändigte Tieflandgewässer vergangener Jahrhunderte. Sie ist vielmehr ein in Teilbereichen möglichst naturnaher Fluss in einer dicht besiedelten Landschaft, bei dem die Ansprüche von Ökologie, Hochwasserschutz, Freiraumplanung und urbaner Nutzung auf jedem Kilometer individuell abgestimmt werden müssen.

Der Emscher-Umbau ist ein Projekt, das auch im europäischen Maßstab seinesgleichen sucht. Allein die wasserwirtschaftlichen Kernaufgaben erforderten milliarden schwere Investitionen mit einem Planungshorizont von mehreren Jahrzehnten. Darüber hinaus werden die in der „Vision vom Neuen Emschertal“ angestoßenen Veränderungen die Zukunft der Region nachhaltig prägen und die Interessen einer Vielzahl von Gruppen berühren.

2. Masterplan Emscher Zukunft

Zentrales Instrument für den Dialog und die Planung war der 2006 veröffentlichte Masterplan Emscher-Zukunft. Er dokumentierte den damals aufwändig abgestimmten Konsens und schaffte damit eine verlässliche Basis für Planung und Umsetzung. Der Masterplan konnte und sollte nie formelle Planungsverfahren ersetzen. Vorhandene rechtsgültige Planungen wurden in den Masterplan aufgenommen.

Ergebnis der intensiv im Dialog abgestimmten Raumanalyse war 2005 ein Masterplangentwurf im Maßstab 1:40.000. Unmittelbar nach der Veröffentlichung des Entwurfs im Februar 2005 begann die Überprüfung, Konkretisierung und programmatische Weiterentwicklung im Maßstab 1:5.000. Hierbei wurde auch der Emscher-Oberlauf in die Planung einbezogen; der Masterplan Emscher-Zukunft umfasst damit den gesamten Emscherlauf einschließlich der Trasse für den Emscher-Kanal.

Die Umsetzung des Masterplans wurde damals von mehreren Behördenarbeitskreisen unter Leitung des Umweltministeriums begleitet.

Seit seiner Aufstellung wurde der Masterplan nicht fortgeschrieben. Wesentliche Inhalte wie das ökologische Konzept oder die Hauptziele für den Umbau haben weiterhin Bestand.

2.1 Planerische Grundlagen

2.1.1 Bewirtschaftungsziele für den Fluss nach WRRL

Im behördenverbindlichen Bewirtschaftungsplan und Maßnahmenprogramm NRW von 2016 sind die zu erreichenden Bewirtschaftungsziele für die Emscher und die dafür erforderlichen Maßnahmen beschrieben. Die Emscher wird im Sinne des § 28 WHG und der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) als „erheblich verändert“ eingestuft. Gemäß den Anforderungen des § 27 Abs. 2 WHG und der WRRL ist daher nicht der „gute ökologische Zustand“, sondern das „gute ökologische Potenzial“ zu erreichen. Das Zeitziel für die Erreichung der Bewirtschaftungsziele wurde in der WRRL zunächst auf 2015 und mit Verlängerung um zwei Bewirtschaftungszyklen von je sechs Jahren schließlich auf 2027 festgelegt. Die heutige Weiterführung der Ziele der WRRL über zwei zusätzliche Bewirtschaftungszyklen gibt nun eine Zielerreichung bis 2039 vor.

Die Emscher ist in zwei Wasserkörper unterteilt. Der obere Wasserkörper beginnt an der Quelle und reicht bis zur Kläranlage Deusen. Der zweite Wasserkörper umfasst den Abschnitt von der Kläranlage Deusen bis zur Emschermündung.

Insgesamt handelt es sich bei der Emscher um ein erheblich verändertes Gewässer mit der Fallgruppe Einzelfallbetrachtung. Um diese Bewertung operabel zu machen, wurden für den oberen Wasserkörper die Fallgruppe Bebauung mit Vorland und für den unteren Wasserkörper die Fallgruppe Bebauung ohne Vorland zugeordnet. Wegen der Komplexi-

tät der geplanten Maßnahmen soll nach Umsetzung aller hydromorphologischen Maßnahmen und einer angemessenen Entwicklungszeit eine Prüfung erfolgen, ob die gewählte Fallgruppe die verbleibenden hydromorphologischen Belastungen hinreichend abbildet oder ggf. ein „Aufschlag“ auf die Bewertung erfolgen soll. Ziel ist, dass hydromorphologisch vollständig naturnah umgebaute Gewässersysteme das gute ökologische Potenzial erreichen können, sofern die verbleibenden hydromorphologischen Belastungen nicht durch andere Belastungen (z.B. stoffliche Belastungen) überlagert werden. Es besteht auch die Möglichkeit aufgrund der gegebenen stofflichen Hintergrundbelastungen verminderte Bewirtschaftungsziele für die Emscher zu vereinbaren. Im Bewirtschaftungsplan und Maßnahmenprogramm NRW 2022 – 2027 sind die Planungen der EG für den Umbau des Flusses übernommen worden.

2.1.2 Restriktionen und Voraussetzungen für die Flussentwicklung

Ziel für den Umbau des Flusses ist eine möglichst typische Gewässerentwicklung unter den veränderten, anthropogen überformten und teils irreversiblen Randbedingungen. Je mehr Flächen der Emscher wieder zurückgegeben werden können, desto größer sind die Möglichkeiten für eine eigendynamische Entwicklung mit einem möglichst geringen Unterhaltungsaufwand und einer maximalen Nachhaltigkeit der weiteren Entwicklung. Um den für die Umgestaltung nutzbaren Raum zu ermitteln, wurden alle Restriktionen im Umfeld der Emscher erfasst und dargestellt. Nutzungsbedingt steht das Umfeld der Emscher – vor allem im Mittel- und Unterlauf – meist nur begrenzt zur Verfügung, entsprechend reduziert sich der gewässerökologisch erreichbare Zielzustand und die Möglichkeiten einer eigendynamischen Entwicklung. Als Restriktionen zu nennen sind u. a. Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieräume, Leitungs- und Verkehrsinfrastrukturen, Deponien, Altlasten und Schutzgebiete.

Auch die große Einschnittstiefe der Emscher stellt eine relevante Restriktion dar: Je tiefer die Flusssohle liegt, umso mehr Boden muss im Umfeld bewegt werden, um der Emscher mehr Raum zu geben. Es können sich sehr ungünstige Verhältnisse zwischen Bodenaushub und Zuwachs an Raum für die Emscher ergeben, die die Möglichkeiten der Gewässerentwicklung deutlich beschränken.

Ebenfalls eine Restriktion für die geplante Gewässerentwicklung sind die flussbegleitenden Deiche. Aus Sicherheitsgründen dürfen die Deiche selbst sowie begleitende Flächen zur Deichunterhaltung und Sicherung im Regelfall nicht mit Gehölzen bepflanzt werden und auch nicht in flussdynamische Prozesse einbezogen werden. Daher werden die ökologische Umgestaltung der Emscher und die Deichsanierung gemeinsam geplant und auch bauzeitlich aufeinander abgestimmt.

Die Abflussverhältnisse haben sich durch den Ausbau der Gewässer zum Abwassersystem und das urbane Umfeld erheblich verändert. So werden große Teile des künftigen Emscherwassers aus gereinigtem Abwasser bestehen. Aufgrund des hohen Versiege-

lungsgrades gelangt Niederschlag sehr rasch in die Gewässer und bewirkt dort Abflussspitzen. Weiterhin muss der neue Fluss auch zukünftig das Wasser aus den angrenzenden Poldergebieten über Pumpwerke aufnehmen. Diese Umstände in Kombination mit dem urbanen Umfeld bedingen ein anspruchsvolles Hochwasserrisikomanagement und erschweren die laterale Durchgängigkeit v. a. zu den südlichen Nebenläufen.

Insgesamt bietet das weitgehend erhaltene, offene Fließgewässersystem aber auch erhebliche Potentiale. Aufgrund der bergbaulichen Einwirkungen erfolgte im Emscherraum nicht die sonst übliche Verrohrung von Gewässerstrecken im urbanen Raum, da dies vielfach nicht möglich bzw. die Gewässerstrecke für die offene Abwasserableitung notwendig war. Dadurch besteht nun mit den umgebauten Nebenläufen ein großes biologisches Entwicklungspotential für den noch umzubauenden Emscherhauptlauf. Durch ihn können viele Arten aus den nie verbauten naturnahen Oberläufen zuwandern. Gleichzeitig haben viele Nebenläufe gute Voraussetzungen für eine naturnahe Entwicklung und damit ein gutes Wiederbesiedlungspotential. Bei einer Reihe bereits umgestalteter Nebenläufe ist das gute ökologische Potenzial für das Makrozoobenthos bereits erreicht.

Wesentliche Voraussetzung für eine typische Besiedlung der Emscher selbst ist die durchgängige Anbindung an den Rhein. Hierin liegt eine große Chance, aus dem ehemaligen offenen Abwassersystem wieder ein vernetztes Gewässersystem zu entwickeln. Vor allem im Hinblick auf die Fischfauna ist der durchgängige Umbau der Emschermündung von großem Wert. Es wird davon ausgegangen, dass sich die erste Besiedlung der Emschermündung sehr rasch einstellt.

Um den Emscher-Umbau möglichst kosteneffizient zu gestalten und mit dem vorhandenen Budget möglichst viele wirksame Maßnahmen realisieren zu können, soll stärker als bisher auf die eigendynamische Entwicklung gesetzt werden. So soll – wo möglich – nur ein Mindestmaß an Gewässer- und Auengestaltung vorgegeben werden und stattdessen die Emscher vermehrt in die Lage versetzt werden, die weitergehende Auenentwicklung selbst durchzuführen.

2.2 Das Konzept für den Umbau

2.2.1 Die Vereinbarkeit von Flussentwicklung und Hochwasserschutz

Der Hochwasserschutz hat oberste Priorität. In den Gewässerprofilen ermöglichen erst die abflussdämpfenden Maßnahmen des Hochwasserschutzes die geplanten ökologischen und landschaftsgestalterischen Verbesserungen. Gleichzeitig muss der Schutz der Bevölkerung vor Überschwemmungen auch in der Umbauphase gewährleistet sein. Die Hochwasserschutzmaßnahmen gehen den Maßnahmen des ökologischen Umbaus daher zeitlich voraus.

Die im Masterplan definierten dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen wie Gewässeraufweitungen, Rückhaltungen und Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen an den Nebenläufen können die bemessungsrelevanten Hochwasserabflüsse der Emscher um bis zu 20 Prozent reduzieren. Hinzu kommt die Aufweitung des Emscherprofils in den ökologischen Schwerpunkten sowie die Einrichtung zentraler Hochwasserrückhaltebecken. Durch Retention und verringerte Zuflüsse werden Hochwasserwellen zukünftig deutlich langsamer an- und ablaufen. Eine aktive Steuerung der Hochwasserschutzmaßnahmen sorgt zusätzlich dafür, dass sich Hochwasserwellen aus der Emscher und ihren Nebenläufen nicht überlagern und dabei gegenseitig verstärken.

Grundlage für den Hochwasserschutz ist das potenzielle Schadenspotenzial von Überschwemmungen. Aufgrund der dichten Bebauung und der hohen Deiche würden am Unterlauf der Emscher besonders große Schäden entstehen. Daher ist der Hochwasserschutz dort so ausgelegt, dass er selbst Hochwasserereignisse, die statistisch nur alle 200 Jahre auftreten (Bemessungshochwasser HQ200), bewältigt. Deichüberlaufstrecken und Notfallpolder sorgen dafür, dass auch extreme Hochwässer nur geringe Überschwemmung am weniger sensiblen Oberlauf der Emscher bedeuten. Maßnahmen und potenzielle Gefährdungen werden im regelmäßig fortgeschriebenen Hochwasseraktionsplan (HWAP) dargestellt.

Die Hochwassersicherheit der Emscher liegt, je nach Nutzung des Hinterlandes und Volumen der Hochwasserwelle, zwischen HQ50 und HQ200. Das Hochwassermanagement gewinnt durch den aktuellen Klimawandel zusätzlich an Bedeutung. Gerade die regional voraussichtlich zunehmenden Starkregenereignisse als Folge der Veränderung der Niederschlagsverteilung stehen im besonderen Fokus.

2.2.2 Das Ökologische Konzept

Mit dem Masterplan Emscher-Zukunft wurde bereits vor der Entwicklung des Strahlwirkungskonzeptes ein Konzept erarbeitet, das wesentliche Prinzipien der heute mit dem Begriff „Strahlwirkung“ bezeichneten Wechselwirkungen zwischen naturnäheren und naturferneren Gewässerabschnitten berücksichtigt. Die vorhandenen Restriktionen entlang der Emscher bestimmen maßgeblich die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des Strahlwirkungs- und Trittsteinkonzeptes. Die definierten Anforderungen für Strahlursprünge mit entsprechender Qualität und Quantität, um die dazwischen liegenden Strecken als Strahlwege funktionieren zu lassen, sind für den gesamten Flussverlauf mittelfristig nicht umsetzbar. Die Planung umfasst daher eine alternierende Abfolge von Ökologischen Schwerpunkten und Restriktionsabschnitten. Bereits damals wurde davon ausgegangen, dass nicht alle Abschnitte der Emscher gleichermaßen hohe Standards ihrer Strukturverhältnisse erreichen müssen, um dennoch einer Vielzahl von Arten der leitbildgemäßen Biozönose ein Leben in der künftigen Emscher und ihren Zuflüssen nachhaltig ermöglichen zu können.



Abbildung 2: Das ökologische Konzept für den Umbau der Emscher (Quelle: EGLV)

2.2.3 Ökologische Schwerpunkte

Innerhalb der Ökologischen Schwerpunkte werden die strukturreichsten Abschnitte entstehen, von denen eine Besiedlung der übrigen Gewässerstrecken ausgehen kann. Wie lang die Fließstrecke ist, die von diesen guten Bedingungen im Einzelfall profitiert (Strahlweg), ist insbesondere abhängig von den Möglichkeiten, über Trittsteine gute Habitateigenschaften auf dem Weg zwischen zwei Ökologischen Schwerpunkten zu schaffen.

Die ökologischen Schwerpunkte

- bieten einer Vielzahl spezialisierter Tier- und Pflanzenarten optimale Lebensraumbedingungen und übernehmen Funktionen eines Nahrungs-, Aufzucht- und Rückzugsraums,
- sorgen durch Drift und aktive Wanderung für positive ökologische Ausstrahlungen im gesamten Neuen Emschertal,
- werden nicht über den gesamten Verlauf gleich gestaltet, sondern die speziellen Eigenheiten des Standorts und seines Umfeldes werden bei der Planung berücksichtigt.

So erhält jeder ökologische Schwerpunkt seine ganz eigenständige Charakteristik und fördert in der Gesamtheit aller Schwerpunkte die Vielfalt der neuen Emscher auch unter den gegebenen, erheblichen Restriktionen.

Positiv für die Flussentwicklung ist, dass diese Schwerpunkte rhythmisch über den gesamten Flusslauf verteilt sind. Dazwischen liegen Abschnitte mit restriktiven Möglichkeiten – hier sind ökologische Mindestanforderungen herzustellen.

Soweit dies möglich ist, sollen bei den ökologischen Schwerpunkten die Grundprinzipien des Strahlwirkungskonzeptes Berücksichtigung finden (z. B. DRL 2008).

Hinzu kommen die Vernetzungen ins übrige System über die sogenannten Bachmündungsausläufe sowie ökologische Ergänzungsräume in Form von Siedlungswasserausläufen und Feuchtbiotopen.

Mit der Planung und Umsetzung der Ökologischen Schwerpunkte (ÖSP) konnten schon umfangreiche Erfahrungen gesammelt werden.

2.2.4 Gestaltung der Zwischenstrecken – Ergebnisse der Versuchsstrecke Emscher in Dortmund-Deusen

Im zweiten Schritt galt es für die sogenannten Zwischenstrecken zwischen den ÖSP sinnvolle Maßnahmenpakete zu ermitteln. Dazu wurden in der sogenannten Versuchsstrecke in Dortmund Deusen fünf verschiedene Umgestaltungsvarianten angelegt. Diese dienen der Erprobung des Bauaufwandes und der hydromorphologischen sowie der gewässerökologischen Wirksamkeit des Umbaus. Ziel ist in den Zwischenstrecken zum einen die gewässerökologischen Mindestanforderungen einzuhalten und zum anderen die Variante mit dem effizientesten Entwicklungspotential zu ermitteln.

Die Entwicklung dieser Versuchsstrecke wurde über ein intensives 3-jähriges wissenschaftliches Untersuchungsprogramm (2016-2019) begleitet.

Die Versuchsstrecke ist in fünf Abschnitte zu je ca. 400 m Länge, mit unterschiedlichen Umbauvarianten unterteilt worden. Die Abschnitte wurden so umgebaut, dass die Strukturvielfalt im Fließverlauf sukzessive zunimmt. So wurden in Abschnitt 1 die Wasserbausteine der Uferbefestigung entfernt und in Abschnitt 2 zusätzlich die Berme abgetragen und einseitig ein schlängelnder Uferverlauf initiiert. In Abschnitt 3 wurden zusätzlich mehr Berme abgetragen und in Abschnitt 4 zusätzlich beidseitig ein schlängelnder Verlauf initiiert. Diese Abschnitte stehen unter dem Einfluss der großen Kläranlage Dortmund-Deusen. Abschnitt 0 befindet sich oberhalb der Kläranlageneinleitung und stellt baulich eine Sondersituation dar. Hier wurden die Wasserbausteine der Uferbefestigung entfernt und einseitig Lenkbuhnen (Instream River Training) aus Stein oder Holz eingebaut.

Bei einer Beurteilung der Ergebnisse des Monitorings müssen die Ausgangs- und Rahmenbedingungen für die Versuchsstrecke Emscher-Hauptlauf Dortmund-Deusen berücksichtigt werden. Durch die Einleitung der Kläranlage Dortmund-Deusen wird der Abfluss und die physiko-chemische Gesamtsituation in der Versuchsstrecke maßgeblich durch das gereinigte Abwasser (im Jahresdurchschnitt ca. 80 % des Gesamtabflusses) geprägt. So bestimmen die Sauerstoffdefizite und die Nährstoffbelastung die Besiedlung des Makrozoobenthos, der Fische und der Makrophyten in der Versuchsstrecke.

Der Abschnitt oberhalb der Einleitung der Kläranlage Dortmund-Deusen steht bei Trockenwetter oft unter Rückstau einfluss. Die Versuchsstrecke wird durch dichten Makro-

phytenbewuchs dominiert. Diese prägen auch das Erscheinungsbild der Versuchsstrecke. Der dichte Makrophytenbestand vermindert einen Transport von Sedimenten bei Trockenwettersituationen und beeinflusst zudem maßgeblich die Fließdiversität und den Wasserstand in der Versuchsstrecke. Bei gleichem Abfluss variieren die Wasserspiegellagen in der Versuchsstrecke im jahreszeitlichen Verlauf durch die Makrophyten um bis zu 70 cm.

Die zukünftige Emscher wird auf großen Abschnitten voraussichtlich nur eine geringe Eigendynamik aufweisen. Das deutet darauf hin, dass man die grundsätzliche hydro-morphologische Verbesserung je nach Geologie, Gefälle und Abflussverhältnissen mit dem Bagger vorprofilieren sollte. So wird die Emscher ihr Bett aufgrund der oft anthropogenen und eher befestigend wirkenden Substrate sowie seltener Hochwässer nur bedingt aktiv selber formen.

3. Stand der Umsetzung

Mit den ersten Maßnahmen zur ökologischen Verbesserung der Nebenläufe im Einzugsgebiet der Emscher wurde bereits in den 1990er Jahren begonnen. Hier war die Umgestaltung des entflochtenen, von Abwasser befreiten Dellwiger Baches in Dortmund als erstes Pilotprojekt der Emschergenossenschaft der Auftakt. Weitere Maßnahmen folgten in zeitlicher Abhängigkeit der Kanalbaumaßnahmen entlang der Nebenläufe sukzessive. Schwerpunkte waren im Wesentlichen die Nebenläufe sowie der Emscherhauptlauf in Holzwickede sowie auf Dortmunder Stadtgebiet, im Einzugsgebiet der Kläranlage Dortmund Deusen, dem oberen Wasserkörper des Emschersystems. Die gewonnenen Erfahrungen aus den Bauabläufen sowie den darauffolgenden Gewässerentwicklungsstufen flossen regelmäßig in die Planungen weiterer ökologisch umzugestaltender Gewässerstrecken ein. Insgesamt wurden bis heute 165 km von insgesamt 329 km Gewässerstrecken ökologisch umgebaut. Zielführend ist die Umsetzung der Baumaßnahmen von oberen zu unteren Abschnitten, da sonst die Bodenentnahme zur Profilaufweitung zu Sedimentablagerungen in bereits umgestaltete Gewässerstrecken führen würde und damit die Struktur der geschaffenen Lebensräume für Flora und Fauna erheblich beeinträchtigen kann und somit die Entwicklung stören würde. Im Einzugsgebiet der Kläranlage Dortmund Deusen war die Abwasserfreiheit der genossenschaftlichen Wasserläufe 2011 weitestgehend erreicht worden, so dass im oberen Wasserkörper die Umsetzung der Gewässerumgestaltungen weit vorangeschritten ist. Bis auf wenige Abschnitte, wie am Grotenbach, Kirchhörder Bach sowie am Hörder Bach sind die Maßnahmen bereits vollständig umgesetzt. Ebenso in den Nebeneinzugsgebieten im unteren Wasserkörper konnte bereits sehr frühzeitig insbesondere in den Oberläufen begonnen werden. Inge-

samt reicht der Zeithorizont bis zum Abschluss aller Maßnahmen nach derzeitigem Planungsstand bis 2031.

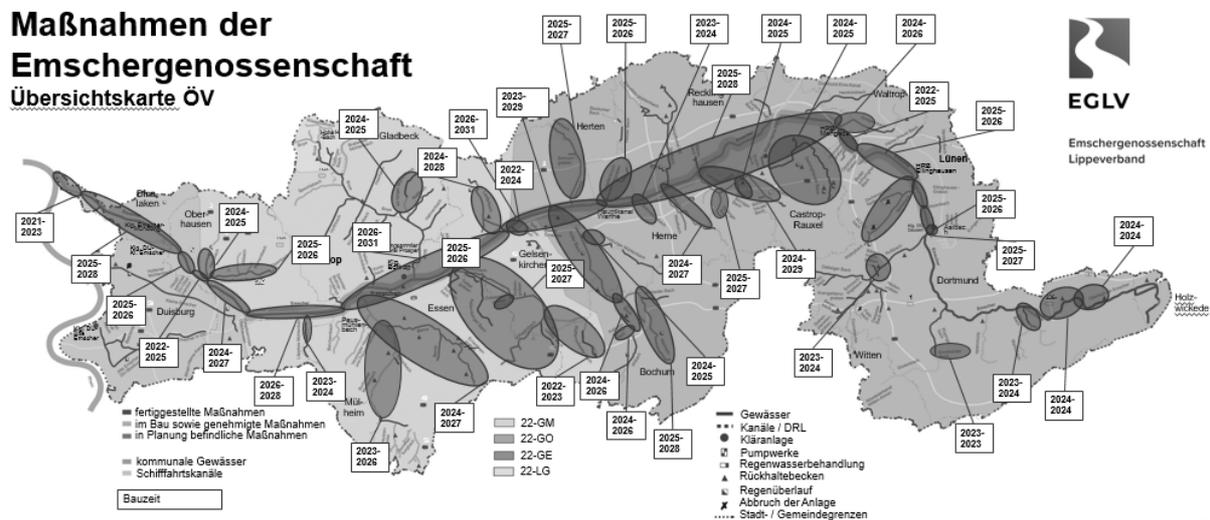


Abbildung 3: Übersichtskarte Maßnahmenumsetzung Ökologische Verbesserungen (Quelle EGLV)

4. Flussentwicklung

Die ökologische Entwicklung der neuen, renaturierten Gewässer wird durch ein intensives Monitoring begleitet. Dies umfasst neben den Grundlagendaten (Luftbilder, Geländemodelle) limnologische Untersuchungen (biologische Qualitätskomponenten nach Europäischer Wasserrahmenrichtlinie, Hydrochemie), Kartierungen der Biototypen und der Vegetation der Aue und hydromorphologische Erhebungen (Gewässerstrukturkartierung, Aufnahme von Quer- und Längsprofilen und der Sohlsubstrate). Hauptziele sind die Dokumentation der Eigenentwicklung nach Umbau und der Erreichung vordefinierter Ziele (z. B. planerische leitbildorientierte Entwicklungsziele, Erreichung der Bewirtschaftungsziele gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie). Umfassende Auswertungen während und zum Abschluss der Monitoring-Phase liefern für die noch laufenden Renaturierungsprojekte wertvolle Erfahrungen mit unterschiedlichen Bauweisen und können auf möglichen Korrekturbedarf hinweisen.

Auswertungen des Besiedlungsverlaufes an neu umgestalteten Gewässerabschnitten anhand von Langzeit-Datenreihen haben gezeigt, dass besonders bei isolierten, ehemaligen Schmutzwasserläufen mindestens 10 Jahre anzusetzen sind, bis die Neubesiedlung des Gewässers abgeschlossen ist. Die Besiedlung erfolgt dabei in drei unterscheidbaren

Schritten, die als Pionierphase (Erstbesiedlung durch hochmobile Arten, oft mit mehreren Generationen pro Jahr), Stabilisierungsphase (Biozönoson-Ausbau durch weitere Arten, Abnahme der Pioniere) und Ausreifungsphase (sukzessives Hinzukommen in Bezug auf die Habitatausstattung spezialisierter und anspruchsvoller Arten) bezeichnet werden können.

Seit Beginn des ökologischen Umbaus hat sich die Anzahl der aquatischen Tierarten (Makrozoobenthos) der Fließgewässer des Emschergebietes fast verdreifacht. Zahlreiche bedrohte oder gefährdete Arten der sogenannten Listen sind zurückgekehrt und finden in den umgestalteten Gewässern einen neuen Lebensraum.

Literatur

EmscherGenossenschaft (Hrsg.) (1991): Rahmenkonzept zum ökologischen Umbau des Emscher-Systems, Materialien zum Umbau des Emscher-Systems, Heft 1, Essen.

EmscherGenossenschaft (Hrsg.) (1992): Konzept zur Umgestaltung der Wasserläufe, Materialien zum Umbau des Emscher-Systems, Heft 6, Essen.

EmscherGenossenschaft (Hrsg.) (2005): Masterplan „Emscher:Zukunft“

EmscherGenossenschaft (Hrsg.) (2013): Fließgewässer im Emschergebiet. Biologie, Beschaffenheit, Bachsysteme. Wehlmann Druck. Essen: 71 S.

Jähnig, S., D. Hering & M. Sommerhäuser (Hrsg.) (2011): Fließgewässer-Renaturierung heute und morgen. EG-Wasserrahmenrichtlinie, Maßnahmen und Effizienzkontrolle. Stuttgart (Schweizerbart): 279 S.

LANUV NRW (2011): Strahlwirkungs- und Trittsteinkonzept in der Planungspraxis, LANUV-Arbeitsblatt 16

Semrau, M., Hurck, R. (2005): Leitbildermittlung in stark überformten Landschaften - Erfahrungsbericht aus dem Emschergebiet. GWF Wasser Abwasser 2005 (5): 408-411

Semrau, M., Brinkmann, S., Wegner, R. (2010): Das ökologische Konzept für den Umbau der Emscher – eine WRRL-konforme Planung einer anthropogen überformten Flusslandschaft, Wasserwirtschaft 04/2009

Winking, C., A. W. Lorenz, D. Hering (2015): Die naturnahe Umgestaltung des Emschersystems und das Ökologische Potenzial: zur Entwicklung aquatischer Biodiversität in ehemaligen Abwasserrinnen. Natur und Landschaft 90, 383.

Autorenverzeichnis

Anna Amchislavski
Dr. Spang GmbH, Witten
Geotechnik.Wasserbau@dr-spang.de

Björn Bauckhage
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
bauckhage.bjoern@eglv.de

Dr. Oliver Detert
HUESKER Synthetic GmbH
detert@huesker.de

Kai Eglinger
Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Bereich Mitte, Düsseldorf
Kai.Eglinger@wf-ib.de

Thomas Fiedler
Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Bereich Mitte, Düsseldorf
Thomas.Fiedler@wf-ib.de

Hartmut Hangen
HUESKER Synthetic GmbH
hangen@huesker.de

Dr. Benjamin Hindersmann
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
hindersmann.benjamin@eglv.de

Dr. Aloys Kisse
CDM Smith Consult GmbH
Aloys.Kisse@cdmsmith.com

Christian Korndörfer
Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt a. Main
christian.korndorfer@wf-ib.de

Markus Kühnel
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
kuehnel.markus@eglv.de

Dr. Arash Alimardani Lavasan
Ruhr-Universität Bochum
Arash.AlimardaniLavasan@rub.de

Dr. Sven Lyko
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
lyko.sven@eglv.de

Irina Melzer
PORR GmbH & Co. KGaA, Düsseldorf
irina.melzer@porr.de

Dr. Frank Obenaus
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
obenaus.frank@eglv.de

Peter Reese
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
reese.peter@eglv.de

Martin Röllecke
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
roellecke.martin@eglv.de

Prof. Dr. René Schäfer
Hochschule Ruhr West/Dr. Spang GmbH
rene.schaefer@hs-ruhrwest.de

Dr. Benjamin Schieber
Taberg Ingenieure GmbH, Lünen
schieber@taberg.de

Mechthild Semrau
Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen
semrau.mechthild@eglv.de

**Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen,
Herausgeber: H.L. Jessberger**

- 1 (1979) **Hans Ludwig Jessberger**
Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum
- 2 (1978) **Joachim Klein**
Nichtlineares Kriechen von künstlich gefrorenem Emschermergel
- 3 (1979) **Heinz-Joachim Gödecke**
Die Dynamische Intensivverdichtung wenig wasserdurchlässiger Böden
- 4 (1979) **Poul V. Lade**
Three Dimensional Stress-Strain Behaviour and Modeling of Soils
- 5 (1979) **Roland Pusch**
Creep of soils
- 6 (1979) **Norbert Diekmann**
Zeitabhängiges, nichtlineares Spannungs-Verformungsverhalten von gefrorenem Schluff unter triaxialer Belastung
- 7 (1979) **Rudolf Dörr**
Zeitabhängiges Setzungsverhalten von Gründungen in Schnee, Firn und Eis der Antarktis am Beispiel der deutschen Georg-von-Neumayer- und Filchner-Station
- 8 (1984) **Ulrich Güttler**
Beurteilung des Steifigkeits- und Nachverdichtungsverhaltens von ungebundenen Mineralstoffen
- 9 (1986) **Peter Jordan**
Einfluss der Belastungsfrequenz und der partiellen Entwässerungsmöglichkeiten auf die Verflüssigung von Feinsand
- 10 (1986) **Eugen Makowski**
Modellierung der künstlichen Bodenvereisung im grundwasserdurchströmten Untergrund mit der Methode der finiten Elemente
- 11 (1986) **Reinhard A. Beine**
Verdichtungswirkung der Fallmasse auf Lastausbreitung in nichtbindigem Boden bei der Dynamischen Intensivverdichtung
- 12 (1986) **Wolfgang Ebel**
Einfluss des Spannungspfades auf das Spannungs-Verformungsverhalten von gefrorenem Schluff im Hinblick auf die Berechnung von Gefrierschächten
- 13 (1987) **Uwe Stoffers**
Berechnungen und Zentrifugen-Modellversuche zur Verformungsabhängigkeit der Ausbaubeanspruchung von Tunnelausbauten in Lockergestein
- 14 (1988) **Gerhard Thiel**
Steifigkeit und Dämpfung von wassergesättigtem Feinsand unter Erdbebenbelastung

- 15 (1991) **Mahmud Thaher**
Tragverhalten von Pfahl-Platten-Gründungen im bindigen Baugrund,
Berechnungsmodelle und Zentrifugen-Modellversuche

Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Herausgeber: H.L. Jessberger

- 16 (1992) **Rainer Scherbeck**
Geotechnisches Verhalten mineralischer Deponieabdichtungsschichten bei
ungleichförmiger Verformungswirkung
- 17 (1992) **Martin M. Bizialiele**
Torsional Cyclic Loading Response of a Single Pile in Sand
- 18 (1993) **Michael Kotthaus**
Zum Tragverhalten von horizontal belasteten Pfahlreihen aus langen
Pfählen in Sand
- 19 (1993) **Ulrich Mann**
Stofftransport durch mineralische Deponieabdichtungen: Versuchs-
methodik und Berechnungsverfahren
- 20 (1992) **Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von
Prof. Dr.-Ing. H. L. Jessberger**
20 Jahre Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum
- 21 (1993) **Stephan Demmert**
Analyse des Emissionsverhaltens einer Kombinationsabdichtung im
Rahmen der Risikobetrachtung von Abfalldeponien
- 22 (1994) **Diethard König**
Beanspruchung von Tunnel- und Schachtausbauten in kohäsionslosem
Lockergestein unter Berücksichtigung der Verformung im Boden
- 23 (1995) **Thomas Neteler**
Bewertungsmodell für die nutzungsbezogene Auswahl von Verfahren zur
Altlastensanierung
- 24 (1995) **Ralph Kockel**
Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von
Deponien
- 25 (1996) **Jan Laue**
Zur Setzung von Flachfundamenten auf Sand unter wiederholten
Lastereignissen
- 26 (1996) **Gunnar Heibroek**
Zur Rissbildung durch Austrocknung in mineralischen
Abdichtungsschichten an der Basis von Deponien
- 27 (1996) **Thomas Siemer**
Zentrifugen-Modellversuche zur dynamischen Wechselwirkung zwischen
Bauwerken und Baugrund infolge stoßartiger Belastung
- 28 (1996) **Viswanadham V. S. Bhamidipati**
Geosynthetic Reinforced Mineral Sealing Layers of Landfills

- 29 (1997) **Frank Trappmann**
Abschätzung von technischem Risiko und Energiebedarf bei Sanierungsmaßnahmen für Altlasten
- 30 (1997) **André Schürmann**
Zum Erddruck auf unverankerte flexible Verbauwände
- 31 (1997) **Jessberger, H. L. (Herausgeber)**
Environment Geotechnics, Report of ISSMGE Technical Committee TC 5 on Environmental Geotechnics

**Schriftenreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik,
Herausgeber: Th. Triantafyllidis**

- 32 (2000) **Triantafyllidis, Th. (Herausgeber)**
Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrung und Forschungsergebnisse (Workshop)
- 33 (2002) **Christof Gehle**
Bruch- und Scherverhalten von Gesteintrennflächen mit dazwischenliegenden Materialbrücken
- 34 (2003) **Andrzej Niemunis**
Extended hypoplastic models for soils
- 35 (2004) **Christiane Hof**
Über das Verpressankertragverhalten unter kalklösendem Kohlensäureangriff
- 36 (2004) **René Schäfer**
Einfluss der Herstellungsmethode auf das Verformungsverhalten von Schlitzwänden in weichen bindigen Böden
- 37 (2005) **Henning Wolf**
Zur Scherfugenbänderung granularer Materialien unter Extensionsbeanspruchung
- 38 (2005) **Torsten Wichtmann**
Explizites Akkumulationsmodell für nichtbindige Böden unter zyklischer Belastung
- 39 (2008) **Christoph M. Loreck**
Die Entwicklung des Frischbetondruckes bei der Herstellung von Schlitzwänden
- 40 (2008) **Igor Arsic**
Über die Bettung von Rohrleitungen in Flüssigböden
- 41 (2009) **Anna Arwanitaki**
Über das Kontaktverhalten zwischen einer Zweiphasenschlitzwand und nichtbindigen Böden

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Grundbau, Boden- und Felsmechanik,

Herausgeber: T. Schanz

- 42 (2009) **Yvonne Lins**
Hydro-Mechanical Properties of Partially Saturated Sand
- 43 (2010) **Tom Schanz (Herausgeber)**
Geotechnische Herausforderungen beim Umbau des Emscher-Systems,
Beiträge zum RuhrGeo Tag 2010
- 44 (2010) **Jamal Alabdullah**
Testing Unsaturated Soil for Plane Strain Conditions: A New Double-Wall
Biaxial Device
- 45 (2011) **Lars Röchter**
Systeme paralleler Scherbänder unter Extension im ebenen
Verformungszustand
- 46 (2011) **Yasir Mawla Hammood Al-Badran**
Volumetric Yielding Behavior of Unsaturated Fine-Grained Soils
- 47 (2011) **Usque ad finem**
Selected research papers
- 48 (2012) **Muhammad Ibrar Khan**
Hydraulic Conductivity of Moderate and Highly Dense Expansive Clays
Highly Dense Expansive Clays
- 49 (2014) **Long Nguyen-Tuan**
Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Analysis: Experiment and Back
Analysis
- 50 (2014) **Tom Schanz (Herausgeber)**
Ende des Steinkohlenbergbaus im Ruhrrevier: Realität und Perspektiven
für die Geotechnik, Beiträge zum RuhrGeo Tag 2014
- 51 (2014) **Usque ad finem**
Selected research papers
- 52 (2014) **Houman Soleimani Fard**
Study on the Hydro-Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Fine Grained
Soils, with Application to the Preservation of Historical Monuments
- 53 (2014) **Wiebke Baille**
Hydro-Mechanical Behaviour of Clays - Significance of Mineralogy
- 54 (2014) **Qasim Abdulkarem Jassim Al-Obaidi**
Hydro-Mechanical Behaviour of Collapsible Soils
- 55 (2015) **Veselin Zarev**
Model Identification for the Adaption of Numerical Simulation Models -
Application to Mechanized Shield Tunneling
- 56 (2015) **Meisam Goudarzy**
Micro and Macro Mechanical Assessment of Small and Intermediate Strain
Properties of Granular Material

- 57 (2016) **Oliver Detert**
Analyse einer selbstregulierenden interaktiven Membrangründung für Schüttkörper auf geringtragfähigen Böden
- 58 (2016) **Yang Yang**
Analyses of Heat Transfer and Temperature-induced Behaviour in Geotechnics
- 59 (2016) **Alborz Pourzargar**
Application of suction stress concept to partially saturated compacted soils
- 60 (2017) **Hanna Haase**
Multiscale Analysis of Clay-Polymer Composites for Geoenvironmental Applications
- 61 (2017) **Kavan Khaledi**
Constitutive modeling of rock salt with application to energy storage caverns
- 62 (2017) **Nina Silvia Müthing**
On the consolidation behaviour of fine-grained soils under cyclic loading
- 63 (2017) **Elham Mahmoudi**
Probabilistic analysis of a rock salt cavern with application to energy storage systems
- 64 (2017) **Negar Rahemi**
Evaluation of liquefaction behavior of sandy soils using critical state soil mechanics and instability concept
- 65 (2018) **Chenyang Zhao**
Numerical Modeling of Mechanized Tunnel Excavation: Effects of Sub-systems and Advanced Process Simulation
- 66 (2018) **Tom Schanz (Herausgeber)**
Innovationen im Spezialtiefbau und in der Umweltgeotechnik, Beiträge zum RuhrGeo Tag 2018
- 67 (2019) **Linzhi Lang**
Hydro-Mechanical Behaviour of Bentonite-Based Materials Used for Disposal of Radioactive Wastes
- 68 (2019) **Usama Al-Anbaki**
Hydraulic Interaction of Soil and Nonwoven Geotextiles under Unsaturated Conditions
- 69 (2019) **Abhishek Rawat**
Coupled Hydro-mechanical Behavior of a Compacted Bentonite-Sand Mixture: Experimental and Numerical Investigations

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Bodenmechanik, Grundbau und Umwelt-geotechnik, Herausgeber: T. Wichtmann

- 70 (2019) **Mahmoud Qarmout**
Tunnel face stability using Kinematical Element Method (KEM)
- 71 (2021) **Raoul Hölter**
Optimal Experimental Design in Geotechnical Engineering
- 72 (2022) **Wolfgang Lieske**
Impact of polymer constitution on the hydro-mechanical behavior of modified bentonite for the application in geotechnical and geoenvironmental engineering
- 73 (2022) **Patrick Staubach**
Contributions to the numerical modelling of pile installation processes and high-cyclic loading of soils
- 74 (2022) **Lingyun Li**
On the hydromechanical behaviour of loess and its effect on slope stability under rainfall infiltration
- 75 (2022) **Debdeep Sarkar**
Influence of particle characteristics on the behavior of granular materials under static, cyclic and dynamic loading
- 76 (2023) **Torsten Wichtmann (Herausgeber)**
Umbau des Emscher-Systems – Geotechnische Erfahrungen, Beiträge zum RuhrGeo Tag 2023