



DR. SPANG

INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR BAUWESEN, GEOLOGIE UND UMWELTECHNIK MBH

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasser-
wirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Betriebsstelle Cloppenburg
z. Hd. Herrn Geils
Drüdinger Straße 25
49661 Cloppenburg

Projekt-Nr.
32.2872

Datei
P2872_BG 110926.docx

Diktat
Csp/Sch/Kr

Büro
Witten

Datum
28.09.2011

MACHBARKEITSSTUDIE

SANIERUNG DER DÄMME DER GEHOBENE HASE

- Geotechnische Untersuchung / Baugrundbeurteilung -

Ergebnisse der Labor-und Feldversuche

Ingenieurvertrag
vom 12.04.2011

Gesellschaft: HRB 8527 Amtsgericht Bochum, USt-IdNr. DE126873490, Geschäftsführer Dipl.-Ing. Christian Spang

Zentrale Witten: Westfalenstraße 5 - 9, D-58455 Witten, Tel. (0 23 02) 9 14 02 - 0, Fax 9 14 02 - 20, zentrale@dr-spang.de
<http://www.dr-spang.de>

Niederlassungen: 09599 Freiberg/Sachsen, Halsbrücker Str. 34, Tel. (03731) 798789-0, Fax 798789-20, freiberg@dr-spang.de
73734 Esslingen/Neckar, Weilstr. 29, Tel. (0711) 351 30 49-0, Fax 351 30 49-19, esslingen@dr-spang.de
06618 Naumburg, Jakobsring 4a, Tel. (03445) 7620, Fax (03445) 762162, naumburg@dr-spang.de
90441 Nürnberg, Waldaustraße 13, Tel. (0911) 964 5665-0, Fax 964 5665-5, nuernberg@dr-spang.de

Banken: Stadtparkasse Witten, BLZ 452 500 35, Kto. 4911, Deutsche Bank AG, Witten, BLZ 430 700 24, Kto. 8139511



INHALT	SEITE
1. ALLGEMEINES	3
1.1 Projekt	3
1.2 Auftrag	3
1.3 Unterlagen	3
1.4 Untersuchungen	4
2. RANDBEDINGUNGEN	7
2.1 Allgemeines	7
2.2 Landschaftsbild	7
3. GEOTECHNISCHE VERHÄLTNISSE	8
3.1 Geologie	8
3.2 Hydrologie	9
3.3 Bodenaufbau im Bereich der gehobenen Hase bei Quakenbrück	11
3.3.1 Bodenaufbau Damm	11
3.3.2 Bodenaufbau Dammlager / gewachsene Böden	16
4. BODENMECHANISCHE LABORVERSUCHE	18
5. BODENKLASSIFIZIERUNG / RECHENWERTE	28
5.1 Bodenklassen	28
5.2 Bodenmechanische Eigenschaften der angetroffenen Böden	29
6. FOLGERUNGEN / EMPFEHLUNGEN	30
6.1 Bewertung des derzeitigen Zustands	30
6.2 Sanierungsmöglichkeiten	32
6.3 Empfehlungen	33
7. ANLAGEN	
Anlage 1: Übersichtslagepläne 1 : 5000 (3)	
Anlage 2: Geotechnische Schnitte (4)	
Anlage 3.1: Kleinrammbohrungen 1 : 100 (72)	
Anlage 3.2: Mittelschwere Rammsondierungen 1 : 100 (54)	
Anlage 4: Bodenmechanische Laborversuche (77)	



1. ALLGEMEINES

1.1 Projekt

Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Cloppenburg, beabsichtigt die Sanierung der Seitendämme der „Gehobenen Hase“ im Raum Osnabrück. Es handelt sich dabei um einen ca. 6,4 km langen Streckenabschnitt stromaufwärts vom Schützenhofwehr. Die „Gehobene Hase“ ist in diesem Bereich gestaut und verläuft in Dammlage. Die Seitendämme sind teilweise übersteil ausgeführt und weisen z.T. keine ausreichenden Standsicherheiten auf [U4]. Darüber hinaus wurden als Dammbaumaterialien überwiegend enggestufte, nicht bindige Böden angetroffen, welche geringere Lagerungsdichten und unzureichende Wasserdurchlässigkeiten sowie Sicherheiten gegen Erosion und Suffusion aufweisen [U3]. Auf der Grundlage der bisher durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen ist zu schließen, dass die Dämme der Gehobenen Hase nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) entsprechen und somit saniert bzw. ertüchtigt werden müssen, um einen ausreichenden Hochwasserschutz zu gewährleisten. Die Machbarkeitsstudie zur Sanierungsplanung wird durch die Dr. Salveter GmbH erstellt.

1.2 Auftrag

Mit Ingenieurvertrag vom 12.04.2011 erhielt die Dr. Spang GmbH vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Cloppenburg, den Auftrag, geotechnische Untersuchungen entlang der Seitendämme der „Gehobenen Hase“ innerhalb des o.g. Streckenabschnitts durchzuführen. Anhand der gewonnenen Bodenproben sind umfangreiche bodenmechanische Laborversuche zur Klassifizierung der umgelagerten und gewachsenen Böden durchzuführen und eine Dammmzustandsanalyse zu erstellen.

1.3 Unterlagen

Seitens des Auftraggebers wurden der Dr. Spang GmbH folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:



-
- [U1] **Lageplan Teil 1 bis Teil 16, Teile 19, 20 (Vermessung NLWKN 8. KW 2011) 1 : 250**, Machbarkeitsstudie – Sanierung der Dämme an der gehobenen Hase, Dr. Salveter GmbH, Blätter 1/1 bis 1/16, 1/19, 1/20, März 2011.
- [U2] **Geotechnische Querprofile Teil 1 bis Teil 4 1 : 100**, Machbarkeitsstudie – Sanierung der Dämme an der gehobenen Hase, Dr. Salveter GmbH, Blätter 1/4 bis 4/4, Juni 2011.

Des Weiteren wurden folgende Unterlagen herangezogen:

- [U3] **Dammzustandsanalyse Gehobene Hase bei Quakenbrück**, Geotechnische Untersuchung / Baugrundbeurteilung, Dr. Spang GmbH, 09.09.2010
- [U4] **Gehobene Hase – Geotechnische Beratung und Überprüfung der Standsicherheit gemäß DIN 4020**, Ingenieurgemeinschaft Wasserbau Dr. Spang und Dr. Salveter GmbH, vom 15.11.2010.
- [U5] **Erläuterungsbericht zum Untersuchungsprogramm Gehobene Hase**, Ingenieurgemeinschaft Wasserbau Dr. Spang und Dr. Salveter GmbH, vom 04.02.2010;
- [U6] **Geologische Grundkarte 1 : 25.000**, Blatt Quakenbrück (3313), Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 22.01.2010.

1.4 Untersuchungen

In Abstimmung mit dem NLWKN, Betriebsstelle Cloppenburg und der Dr. Salveter GmbH wurde zusätzlich zu den vorliegenden Untersuchungen [U3] ein ergänzendes Aufschlussprogramm definiert. Darin wurden anhand der Topographie und einer örtlichen Einschätzung Dammquerschnitte ausgewählt, an denen Kleinrammbohrungen und Rammsondierungen durchgeführt werden sollten.

Die Grundlage der Stationierung der neuen geotechnischen Querprofile bildet die Neuvermessung des Streckenabschnitts durch den NLWKN. Die Stationierung beginnt am Schützenhofwehr mit Bau-km 0+000 und läuft stromaufwärts.



Die nachfolgende Tabelle 1.4-1 stellt den festgelegten Umfang der zusätzlichen Querprofile zusammenfassend dar.

Querprofil	Bau-km	Dammseite ¹⁾
1	0+311	Links
2	0+436	Links
3	0+931	Rechts
4	1+177	Rechts
5	1+259	Links
6	1+426	Links
7	3+096	Rechts
8	4+111	Rechts
9	4+354	Links
10	4+811	Rechts
11	4+811	Links
12	4+928	Links
13	4+928	Rechts
14	5+033	Rechts
15	5+138	Rechts
16	5+238	Rechts
17	5+403	Rechts
18	6+437	Rechts

1) in Fließrichtung

Tabelle 1.4-1: Untersuchte geotechnische Querprofile

Für jedes geotechnische Querprofil wurden zur **Erkundung der Bodenverhältnisse** im Bereich der Dämme durch Mitarbeiter der Dr. Spang GmbH zwischen dem 04.04.2011 und 06.05.2011 insgesamt **72 Kleinrammbohrungen (BS)** bis max. 7 m Tiefe und **54 Mittelschwere Rammsondierungen (DPM)**, bis ebenfalls max. 7 m Tiefe niedergebracht. Dabei wurde folgendes Untersuchungskonzept je Querprofil umgesetzt:

- 1 BS / 1 DPM am wasserseitigen Dammfuß / Wasserlinie bis 5 m Aufschlusstiefe
- 1 BS / 1 DPM in der Deichkrone bis 7 m Aufschlusstiefe



- 1 BS im Zwischenbereich Landseite bis 5 m Aufschlusstiefe
- 1 BS / DPM am Deichfuß landseitig bis 3 m / 5 m Aufschlusstiefe.
- 4 Schürfe zur Gewinnung von Bodenmaterial auf der Dammkrone.

Auf den Ausbau der Kleinrammbohrungen zu Grundwassermessstellen zur Messung der ausgespiegelten Grundwasserstände bzw. Sickerwasserlinien wurde seitens des NLWKN verzichtet.

Die Ansatzpunkte der Sondierungen wurden von der Dr. Spang GmbH lagemäßig eingemessen. Eine Höheneinmessung war nicht erforderlich, da die Einzelprofile in die vermessenen Dammquerprofile jeweils auf OK Damm bzw. Gelände (vgl. Anlage 2) eingehängt werden konnten.

In den Lageplänen der Anlage 1 sind die untersuchten geotechnischen Querprofile eingetragen. Die Ergebnisse der Kleinrammbohrungen sind in Form von Schichtprofilen der Anlage 3.1 und die Ergebnisse der Rammsondierungen in Form von Rammdiagrammen der Anlage 3.2 zu entnehmen. Zusätzlich sind geotechnische Querprofile in Anlage 2 beigelegt, aus welchen die Lage der Kleinrammbohrungen je Querprofil entnommen werden kann.

Aus dem Bohrgut wurden insgesamt 477 Bodenproben entnommen. An ausgewählten, repräsentativen Bodenproben wurden bodenmechanische Laborversuche zur Bestimmung der kennzeichnenden Parameter ausgeführt. Insgesamt wurden folgende Laborversuche durchgeführt:

- Bestimmung des Wassergehalts nach DIN 18 121
- Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach DIN 18 122
- Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach DIN 18 123
- Bestimmung des Glühverlusts V_{gl} nach DIN 18 128
- Bestimmung der Proctordichte ρ_{pr} nach DIN 18 127
- Bestimmung der Scherfestigkeit nach DIN 18 137

Die Versuchsergebnisse sind im Einzelnen der Anlage 4 zu entnehmen und wurden bei der Klassifizierung der Böden und zur Festlegung der Kennwerte herangezogen.



2. RANDBEDINGUNGEN

2.1 Allgemeines

Die Gehobene Hase in Niedersachsen befindet sich im Landkreis Osnabrück und ist ein künstlicher Wasserlauf (Staukanal) auf rd. 6 km Länge in Hochlage mit einem Stauziel über dem umliegenden Gelände. Sie ist definitionsgemäß eine Stauanlage und damit als Anlage nach DIN 19700-13, Teil 13: Staustufen, zu behandeln. Die Gehobene Hase befindet sich ca. 1 km östlich von Badbergen und verläuft tendenziell Richtung Nordwesten zum Überfallwehr bei Quakenbrück. Die Hase wird zwischen Flusskilometer 79+200 und 84+200 über das Überfallwehr Quakenbrück mit Fischbauchklappe und die Schleuse III aufgestaut. Bei Flusskilometer 84+200 gibt es einen Zwischenstau an der Schleuse II. Das Wasser kann hier über einen Düker in die Wrau abgeschlagen werden. Bei Flusskilometer 85+900 befand sich ursprünglich die Schleuse I, die inzwischen zu einer Sohlgleite umgebaut worden ist.

Die Dämme stammen z.T. bereits aus dem Mittelalter und wurden um 1960 ausgebaut. Eine Dokumentation über den Ausbau und Informationen über den Dammaufbau liegen nicht vor.

Im Frühjahr 2011 wurde seitens des NLWKs eine Neuvermessung der Stauhaltungsdämme in einem Rastermaß von 200 m veranlasst. Ausgangspunkt der Neuvermessung bildet das Schützenhofwehr mit Bau-km 0+000. Die Stationierung erfolgt stromaufwärts.

Die Ergebnisse der aktuell durch die Dr. Spang GmbH durchgeführten Felduntersuchungen werden in Bezug zur neuen Stationierung dargestellt.

2.2 Landschaftsbild

Das Untersuchungsgebiet liegt im Norddeutschen Tiefland, dem zum südwestlichen Teil Niedersachsens gehörenden Artland. Das Landschaftsbild wurde durch glaziale Prozesse geprägt. Typisch dafür sind flachwellige bis flache Verebnungsflächen, breite flache Talniederungen und nur wenig höher liegende Sanderflächen.



Nach Ende der Eiszeit war das Gebiet des heutigen Artlandes ein großes Schmelzwasserbecken, welches vom örtlichen Fluss, der Hase bzw. ihrem Vorläufer, mit Schwemmsand verfüllt wurde. Die so entstandenen Flächen ermöglichen eine ertragreiche Landwirtschaft, die über Jahrhunderte hinweg die heutige bäuerlich geprägte Landschaft formte. Die dünn besiedelte Region entlang der Hase ist heute überwiegend geprägt von Wiesen, Äckern, Wallhecken, Feldgehölzen und kleinen Wäldchen.

Das Gelände im Umfeld der Gehobenen Hase ist praktisch annähernd eben. Die **Geländehöhen** des Ursprunggeländes liegen bei etwa 24 bis ca. 28 m NN. Hierzu wurde im Rahmen der Erstellung des Erläuterungsberichtes zum Untersuchungsprogramm vom 04.02.2010 [U5] eine Topographische Karte [U1] im Bereich der Dämme der Gehobenen Hase als Anlage 1 farblich hinterlegt.

Gehölzbestände wurden ebenfalls im Rahmen der Erstellung des Erläuterungsberichtes zum Untersuchungsprogramm vom 04.02.2010 [U5] dokumentiert. Die luftseitigen Böschungen sind vielfach mit Bäumen und Sträuchern bestanden und häufig gibt es auch alte Wurzelstöcke, die teilweise neu austreiben.

3. GEOTECHNISCHE VERHÄLTNISSE

3.1 Geologie

Geologisch gesehen stehen im Untersuchungsgebiet sehr junge quartäre Lockergesteinsablagerungen an, die sich aus glazialen Ablagerungen der Weichsel-Kaltzeit und holozänen Flußablagerungen zusammensetzen und von Mutterboden (Oberböden) überlagert werden.

Gemäß [U6] sind im Bereich der gehobenen Hase holozäne fluviatile Auesedimente (Auelehm, fluviatiler Sand) sowie weichselzeitliche fluviatile Ablagerungen der Niederterrasse aufgeschlossen. Es handelt sich dabei aus bodenmechanischer Sicht um Fein- bis Mittelsande mit lagenweise Ablagerungen an Ton- und Schluffsedimenten sowie Einlagerungen an Holz und pflanzlichen Resten.

Insbesondere linksseitig der Fließrichtung sind in der Geologischen Karte [U6] Bereiche gekennzeichnet, innerhalb derer mit reinen Torfablagerungen bzw. Torfeinlagerungen zu rechnen ist.



3.2 Hydrologie

Die jährlichen **Niederschlagsmengen** im Untersuchungsraum liegen etwa bei 700 mm/a bis 750 mm/a. Das Einzugsgebiet der Gehobenen Hase liegt südwestlich bis östlich und nördlich von Quakenbrück.

Vorfluter der Gehobenen Hase ist die nördlich verlaufende Wrau. Die Gehobene Hase teilt sich vor Quakenbrück und wird vor der Schleuse III Richtung Westen und vor dem Überfallwehr Richtung Nordosten aufgestaut. Nach dem Überfallwehr mündet die Gehobene Hase in die Überfallhase und Richtung Westen in die Kleine Hase.

Hauptgrundwasserleiter im Untersuchungsgebiet sind die glazifluviatilen und fluviatilen Sande des Quartärs. Der Grundwasserspiegel wurde als freier Grundwasserspiegel erkundet. In Bereichen mit mächtigeren bindigen Einlagerungen kann er auch gespannt vorliegen. Die Grundwasservorkommen im Bereich der Talaue der Hase werden als mittelhart eingestuft, insbesondere wo Torfe vorhanden sind, ist mit **stark sauren Grundwässern** zu rechnen.

Grundwasser wurde beim Bohren in fast allen Bohrungen angetroffen. Nach der geotechnischen Geländeaufnahme und den Bohrergebnissen lag der angetroffene **Grundwasserspiegel** am landseitigen Dammfuß bei ca. 0,5 m bis 1,90 m. Dies entspricht jedoch einem nicht ausgespiegelten Grundwasserstand, so dass tendenziell mit höheren, ausgespiegelten GW-Ständen auszugehen ist.

Im Rahmen der ersten Erkundungskampagne der Dr. Spang GmbH [U3] wurden eine Reihe von Grundwassermessstellen installiert. Zur Bewertung der hydrogeologischen Randbedingungen wurde am 08.06.2010 eine Stichtagsmessung für alle erstellten Grundwassermessstellen im Untersuchungsbereich durchgeführt, deren Ergebnis in der nachfolgenden Tabelle 3.1-1 dargestellt sind.



Profil	Station	Pegel	Höhe GOK [m NN]	Höhe POK [m NN]	Pegel- länge [m]	08.06.2010	
						Flurabstand [m]	Höhe GW [m NN]
P 5	80+050	BSP 1	27,33	27,88	7,00	2,98	24,35
P 5	80+050	BSP 2	27,03	27,43	6,00	1,55	25,48
P 5	80+050	BSP 3	26,36	26,62	4,00	0,90	25,46
P 6	80+084	BSP 1	25,98	26,98	5,00	1,67	24,31
P 6	80+084	BSP 2	27,03	27,38	6,00	2,11	24,92
P 6	80+084	BSP 3	26,95	27,22	6,00	1,49	25,46
P 7	80+170	BSP 1	25,80	26,33	5,00	1,35	24,45
P 7	80+170	BSP 2	26,93	27,55	7,00	1,75	25,18
P 7	80+170	BSP 3	27,04	27,76	7,00	1,65	25,39
P 7	80+170	BSP 4	26,35	27,29	5,00	0,80	25,55
P 8	80+275	BSP 1 l	26,27	27,03	5,00	1,28	24,99
P 8	80+275	BSP 2 l	27,23	27,55	4,00	1,60	25,63
P 8	80+275	BSP 3 l	26,45	26,70	5,00	1,25	25,20
P 8	80+275	BSP 1 r	27,13	27,40	6,00	2,45	24,68
P 8	80+275	BSP 2 r	27,18	27,87	5,00	2,48	24,70
P 8	80+275	BSP 3 r	26,30	27,00	5,00	1,24	25,06

Tabelle 3.1-1: Gemessene Grundwasserstände

In der vorstehenden Tabelle 3.3-1 sind die ausgespiegelten Wasserstände (Stichtagsmessungen am 08.06.2010) der 5 Pegelreihen angegeben – diese zeigen eine flache Grundwasseroberfläche mit Schwankungen der Grundwasseroberfläche zwischen 24,31 m NN und 25,63 m NN (08.06.2010). Die mittleren gemessenen Grundwasserstände liegen um 25,0 m NN.

Allgemein ist zu berücksichtigen, dass die **Grundwasserstände** stark von Niederschlagsereignissen bzw. von der Jahreszeit abhängen. Bei langanhaltenden ergiebigen Niederschlägen steht das Grundwasser praktisch in Höhe GOK. Damit lagen im Zeitraum der Erkundungsarbeiten der ersten Kampagne im April / Mai 2010 allgemein hohe Grundwasserspiegel und zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung im Juni 2010 eher mittlere Grundwasserspiegel vor.



Hinsichtlich der Durchlässigkeiten der Schichten wird auf die Tabelle 4.2-1 verwiesen. Für das Dammmaterial liegen die Durchlässigkeiten zwischen $5 \cdot 10^{-5}$ m/s und $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Die lokal ange-troffene Dammadichtung auf der Wasserseite hat Durchlässigkeitsbeiwerte um 10^{-6} m/s.

3.3 Bodenaufbau im Bereich der gehobenen Hase bei Quakenbrück

3.3.1 Bodenaufbau Damm

Überwiegend wurde in Höhe der Dammoberfläche eine leicht bis stark durchwuzelte Oberboden-deckschicht (**Schicht 1**) erkundet. Die Mächtigkeit variiert deutlich zwischen ca. 0,60 m – 1,60 m und beträgt durchschnittlich, soweit vorhanden ca. 0,70 m bis 0,80 m. Bodenmechanisch gesehen handelt es sich bei diesen Böden um Fein- bis Mittelsande mit schluffig-humosen Nebenbestand-teilen.

Bei den angetroffenen Dammbaumaterialien handelt es sich ebenfalls um überwiegend Fein- bis Mittelsande (**Schicht 2a**), welche z.T. schwach schluffige bis schluffige sowie humose Beimengungen aufweisen. Der Schichtaufbau ist eher einheitlich, nur lokal konnten bindigere Anteile fest-gestellt werden.

Wasserseitig wurden überwiegend schluffige bis z.T. stark schluffige Feinsande (**Schicht 2b**) an-getroffen, welche ebenfalls z.T. durch humose Nebenbestandteile gekennzeichnet sind. Vermutlich handelt es sich hierbei um eine ursprüngliche Dichtungsschicht. Die Schicht 2b wurde nicht durch-gängig nachgewiesen, so dass von keiner durchgängigen Dichtungsschicht gesprochen werden kann. Vielmehr scheint ein Zusammenhang mit den vor Ort anstehenden bindigen Aue- und Hoch-flutlehmern plausibel, die örtlich als Baumaterial verwendet wurden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus [U3]

In der Tabelle 3.3.1-1 sind die Ergebnisse der Feldansprachen für die verwendeten Auffüllungen bzw. Dammbaustoffe zusammenfassend für alle neu untersuchten Querprofile dargestellt.



DR. SPANG

Projekt: 32.2872

Seite 12

28.09.2011

Bau-km	Dammseite	BS	Bereich	Auffüllungsmaterial nach DIN 4022	UK Schicht
0+311	Links	1	Wasserseite	fS, u	1,10 m
		2	Dammkrone	mS, fs	1,80 m
		3	Luftseite	fS, u, h mS, fs	0,70 m 2,00 m
0+436	Links	1	Wasserseite	fS, u, h U, fs	1,10 m 1,90 m
		2	Dammkrone	fS, u	1,50 m
		3	Luftseite	fS, ms	0,90 m
0+931	Rechts	1	Wasserseite	mS, fs, u	0,70 m
		2	Dammkrone	fS, ms	1,70 m
		3	Luftseite	fS, ms, h	1,10 m
1+177	Rechts	1	Wasserseite	fS, ms*, u, h' fS, u*	0,70 m 1,20 m
		2	Dammkrone	mS, fs, h fS, u	0,80 m 1,10 m
		3	Luftseite	mS, fs	0,40 m
1+259	Links	1	Wasserseite	fS, u*, h mS, fs, z.T. gs, u'	0,60 m 2,40 m
		2	Dammkrone	fS, ms', u'	2,30 m
		3	Luftseite	fS, ms, u'	2,00 m
		4		mS, fs*, u', h'	1,30 m
1+426	Links	1	Wasserseite	fS, ms', u	1,80 m
		2	Dammkrone	fS, ms, u	2,70 m
		3	Luftseite	fS, u	1,20 m
		4		fS, u	0,70 m
3+096	Rechts	1	Wasserseite	fS, u, h mS, fs	0,60 m 1,50 m
		2	Dammkrone	mS, fs – gs'	1,80 m
		3	Luftseite	mS, gs, fg	0,70 m
		4		mS, gs'	0,50 m
4+111	Rechts	1	Wasserseite	fS, u*, h'	0,90 m
		2	Dammkrone	fS, ms – gs	0,90 m



Bau-km	Dammseite	BS	Bereich	Auffüllungsmaterial nach DIN 4022	UK Schicht
				fS, u	1,60 m
		3	Luftseite	fS, ms, u	1,00 m
4+354	Links	1	Wasserseite	fS, u, h', z.T. t'	1,30 m
		2	Dammkrone	U, fs, z.T. fs*	2,00 m
		3	Luftseite	fS, u, h U, fs*	0,50 m 1,10 m
		4		fS, u, z.T. h	1,60 m
4+811	Rechts	1	Wasserseite	fS, u, z.T. h'	0,90 m
		2	Dammkrone	mS, fs, u fS, u*	1,60 m 2,30 m
		3	Luftseite	fS, u' – u*	1,90 m
4+811	Links	1	Wasserseite	fS, u, z.T. u*	1,60 m
		2	Dammkrone	f-mS, u'	1,30 m
				fS, ms'	2,50 m
				fS, u	2,90 m
		3	Luftseite	fS, ms, u	1,80 m
4+928	Links	1	Wasserseite	fS, u, h fS, ms'	0,70 m 1,80 m
		2	Dammkrone	fS, u' – u, z.T. h' fS, ms	1,00 m 2,60 m
		3	Luftseite	G, s, u (Bauschutt) mS	0,60 m 1,00 m
		4		fS, u	1,10 m
4+928	Rechts	1	Wasserseite	fS, ms, u	1,50 m
		2	Dammkrone	mS, fs, u', z.T. u	2,30 m
		3	Luftseite	mS, fs	1,00 m
5+033	Rechts	1	Wasserseite	fS, u, h	0,80 m
		2	Dammkrone	fS, u	1,90 m
		3	Luftseite	mS, gs, fg'	1,20 m
		4		mS, gs, fg'	1,20 m
5+138	Rechts	1	Wasserseite	fS, u' - u, z.T. h	1,00 m
		2	Dammkrone	fS, ms', u'	1,00 m

Bau-km	Dammseite	BS	Bereich	Auffüllungsmaterial nach DIN 4022	UK Schicht
				fs, u*	2,30 m
		3	Luftseite	fS, ms*, u	1,20 m
5+238	Rechts	1	Wasserseite	fS, u, h'	1,80 m
		2	Dammkrone	mS, fs – gs, fg'	1,80 m
		3	Luftseite	mS, fs, u	0,80 m
5+403	Rechts	1	Wasserseite	fS, u', h'	0,50 m
		2	Dammkrone	fS, ms, u	1,70 m
		3	Luftseite	fS, ms', u', h'	1,30 m
6+437	Rechts	1	Wasserseite	fS, u', h'	0,80 m
		2	Dammkrone	mS, fs – gs', u'	1,70 m
		3	Luftseite	fS, u*, h'	1,20 m

Tabelle 3.3.1-1: Angetroffene Auffüllungsmaterialien / Dammbaustoffe

Zur Überprüfung der Lagerungsdichten und der Konsistenzen der Dammbaustoffe wurden je Querprofil mittelschwere Rammsondierungen parallel zu den Kleinrammbohrungen BS 1, BS 2 und BS 3 abgeteuft. Die mittelschwere Rammsonde (DPM) wird mit einem Spitzenquerschnitt von $A_c = 15 \text{ cm}^2$, einem Fallgewicht von 30 kg und einer Fallhöhe von 0,50 m ausgeführt. Im Vergleich zur schweren Rammsonde (DPH), bei der mit einem Fallgewicht von 50 kg, einem identischen Spitzenquerschnitt und einer identischen Fallhöhe gearbeitet wird, ermöglicht die mittelschwere Rammsonde insbesondere bei locker gelagerten Böden eine differenziertere Bewertung der Lagerungsdichten und Festigkeiten. Gemessen wird jeweils die Anzahl der Schläge N_{10} je 10 cm Eindringtiefe der Sonde in den Boden.

Die Eindringwiderstände der Rammsondierungen sind in Anlage 3.2 als Rammdiagramme dargestellt. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass im Bereich der wasserseitigen Böschungsflanken überwiegend nur geringe Eindringwiderstände innerhalb der Dammschüttung gemessen werden konnte. Die Schlagzahlen mit der Rammsonde (DPM) liegen mit Ausnahme der Querprofile Bau-km 4+928, rechts und Bau-km 5+403, rechts durchgängig in einer Größenordnung von $N_{10} < 5$ und überwiegend bei $N_{10} = 1 - 3$.



Für die Ableitung der Lagerungsdichte bzw. der Konsistenz kann in Anlehnung an DIN 4094-3:2002 und EN ISO 14688-2 folgende Korrelation oberhalb des Grundwasserspiegels herangezogen werden:

Lagerung	Anzahl N_{10} für DPM
Locker	4 – 11
Mitteldicht	11 – 26
Dicht	26 – 44
Sehr dicht	> 44

Konsistenz	Anzahl N_{10} für DPM
Weich	3 – 8
Steif	8 – 14
Halbfest	14 – 28
Fest	> 28

Tabelle 3.3.1-2: Empirische Abhängigkeit zwischen Schlagzahl N_{10} und Lagerungsdichte (nicht bindige Böden) bzw. Konsistenz (bindige Böden) oberhalb des Grundwasserspiegels

Innerhalb des Grundwasserleiters sind bei unveränderter Lagerung bzw. Konsistenz i.d.R. geringere Eindringwiderstände zu verzeichnen.

Unter Bezug zur Tabelle 3.3.1-2 ergibt sich somit die Schlussfolgerung, dass die Böden im Bereich der **wasserseitigen Böschungen** durchgängig eine **lockere bis sehr lockere Lagerung** bzw. eine **weiche Konsistenz** aufweisen.

Im Bereich der **Deichachse** (DPM 2) und der **luftseitigen Deichböschung** (DPM 3) wurden bereichsweise höhere Eindringwiderstände gemessen. Jedoch ist zu bemerken, dass die Schlagzahlen im Regelfall ein Maß von $N_{10} = 5 - 8$ nicht überschreiten, woraus zu schließen ist, dass die Dammschüttmaterialien ebenfalls eine nur lockere Lagerung bzw. weiche Konsistenz aufweisen.



3.3.2 Bodenaufbau Dammlager / gewachsene Böden

Unmittelbar unterhalb der Dammschüttung besteht der Baugrund in der Regel aus fluviatilen schwach schluffigen, mittelsandigen **Feinsanden (Schicht 3)**, deren Mächtigkeit bis über die maximalen Endteufen der Sondierungen von 7 m unter Dammkrone hinausreichen.

Die Sande weisen ab einer Sondiertiefe von 1 – 3 m unterhalb des ursprünglichen Geländeniveaus i.d.R. nur geringfügige Feinkornanteile (Korngröße $\leq 0,06$ mm) auf und wurden gemäß Feldansprache als Fein- bis Mittelsande, mit zunehmender Tiefe z.T. als grobsandig eingestuft. Unabhängig davon finden sich jedoch lagenweise Schluffablagerungen bzw. schluffige bis stark schluffige Sandbänder, welche durch organische Einlagerungen in Form von Holz- und Wurzelresten bzw. Torfstücken und geringmächtigen Torfbänken gekennzeichnet sind.

Die Gleichartigkeit zum Dammbaumaterial zeigt, dass der Damm überwiegend aus dem Aushub der fluviatilen Sande hergestellt wurde. Die Farbe der Sande reicht von hellbraun bis ockerfarben bis zu hellgrau bis grau.

In den oberflächennahen Bereichen des Dammlagers dominieren hingegen schluffige bis stark schluffige Sande bzw. feinsandige Schluffe, welche als **Auelehme (Schicht 4a)** zusammengefasst werden können. Der Übergang zwischen den Bodenarten ist fließend, wobei jeweils organische Bestandteile charakteristisch sind.

Der **Auelehm (Schicht 4a)** ist überwiegend durch feinsandige, schwach tonige Schluffe charakterisiert. Die Schluffe sind leicht plastisch, mit organischen Beimengungen in der Größenordnung ebenfalls um 5 Gew.-%. Die bindigen Böden sind stark empfindlich gegen Aufweichen bei Wassersättigung und gleichzeitiger Lagerungsstörung (Übergang von Bodenklasse 4 nach Bodenklasse 2 „fließende Bodenarten“ nach DIN 18 300) und sehr stark erosionsgefährdet. Überwiegend liegen sie in weicher bis steifer Konsistenz vor. Der Auelehm ist gut zusammendrückbar und schlecht verdichtungsfähig. Ein Teil dieser Böden wurde möglicherweise als Abdichtungsschicht des Dammes auf der Wasserseite eingebaut.

Auffällig ist, dass sich die Schicht 4a, soweit angetroffen, i.d.R. über die gesamte Breite der Dammaufstandsfläche erstreckt. Daraus ist zu schließen, dass die Dämme somit unmittelbar auf die bindige Deckschicht des Geländes geschüttet worden sind. Die Einschaltungen der bindigen



Aueablagerungen sowie torfiger Böden wurde an fast allen Profilen nachgewiesen. Von einer vollflächigen Erstreckung kann jedoch nicht ausgegangen werden.

Weiterhin wurden untergeordnet **stark zersetzte Torfe (Schicht 4b)** angetroffen. Die Mächtigkeit dieser Schichten reicht von wenigen Dezimetern bis zu max. ca. 2 m. In der Regel liegen die Schichtmächtigkeiten jedoch um oder unter 1 m.

Die Abgrenzung der **stark zersetzten Torfe (Schicht 4b)** zu dem Auelehm ist unscharf; die Schichten 4a und 4b gehen häufig ineinander über und sind eng miteinander verzahnt. Sie zeichnen sich i. d. R. durch hohe Wassergehalte und stark variierende organische Anteile aus. Die Konsistenz der Böden ist i.d.R. weich bis steif, lokal auch breiig. Die zersetzten Torfe zeichnen sich durch eine sehr starke Zusammendrückbarkeit aus und sind weder als Dammlager noch als Dammbaumaterial geeignet.

Die Lagerungsdichten bzw. Konsistenzen der Schichten 3 und 4 lassen sich ebenfalls anhand der Ergebnisse der Rammsondierungen über die Tabelle 3.3.1-2 korrelieren. Die Rammdiagramme dokumentieren zwei charakteristische Horizonte, welche sich hinsichtlich der gemessenen Eindringwiderstände deutlich voneinander unterscheiden.

Bis zu einer Tiefe von ca. 3 - 5 m unter Dammkrone liegen die Schlagzahlen durchgängig in einer Größenordnung von $n_{10} < 5$. Bereichsweise wurden nur Eindringwiderstände von $n_{10} = 1 - 2$ (z.B. Bau-km 1+177, rechts; Bau-km 1+259, rechts; Bau-km 1+426, links; Bau-km 4,111, rechts; Bau-km 4+811, links) gemessen. Analog zur Bewertung der Auffüllungen entspricht dies einer durchgängig lockeren bis z.T. sehr lockeren Lagerung bzw. weichen Konsistenz der gewachsenen Böden. Der Übergang zwischen dem Dammschüttmaterial und dem Dammlager lässt sich somit nicht anhand der Rammsondierungen, sondern ausschließlich über die Kleinrammbohrungen lokalisieren.

In Summe ist somit festzustellen, dass sowohl die **Dammbaumaterialien** als auch die **gewachsenen Böden** bis zu einer Tiefe von **ca. 1 – 3 m unterhalb der Dammaufstandsfläche** eine **unzureichende Verdichtung bzw. Lagerungsdichte** aufweisen und im Zuge der Sanierungsarbeiten zu ertüchtigen sind.



Ab einer Tiefe von ca. 3 – 5 m unterhalb der Deichkrone ist überwiegend eine deutliche Zunahme der Schlagzahlen auf Werte von $n_{10} = 10 - 20$, z.T. bereits > 30 zu verzeichnen. Die Böden gehen in dieser Tiefe demnach in eine mitteldichte bis dichte Lagerung bzw. steife bis halbfeste Konsistenz über. Bereichsweise (z.B. Bau-km 4+354, links; Bau-km 4+811, rechts; Bau-km 4+928, rechts) sind Schlagzahlen von $n_{10} = 40 - 50$ zu verzeichnen, welche eine dichte bis sehr dichte Lagerung des Korngefüges dokumentieren.

4. BODENMECHANISCHE LABORVERSUCHE

Zur detaillierteren bodenmechanischen Bewertung der anstehenden Böden sowie zur Klassifizierung und Festlegung der Bodenkennwerte wurden von der Dr. Spang GmbH bodenmechanische Laborversuche durchgeführt. Zusammenfassend wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach DIN 18 123 (Anlage 4.1)
- Bestimmung der Zustandsgrenzen nach DIN 18 122 (Anlage 4.2)
- Bestimmung der Glühverluste nach DIN 18 128 (Anlage 4.3)
- Bestimmung des Wassergehalts nach DIN 18 121 (Anlage 4.4)
- Bestimmung der Proctordichte p_{pr} nach DIN 18 127 (Anlage 4.5)
- Bestimmung der Scherfestigkeit nach DIN 18 137 (Anlage 4.6)

Zur Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung wurden in der ersten Untersuchungskampagne an insgesamt 58 Bodenproben (17 x Auffüllung, 41 x gewachsener Boden) kombinierte Sieb- und Schlämmanalysen bzw. Siebanalysen durchgeführt. In der zweiten Kampagne wurden hierzu ergänzend 14 Sieb- und Schlämm- bzw. Siebanalysen erstellt. Die Ergebnisse können als Körnungslinien der beigefügten Anlage 4.1 entnommen werden. Die nachfolgenden Tabellen 4-1 bis 4-3 geben getrennt nach der Bodenart (Auffüllung – gewachsene Böden (nicht bindig) – gewachsene Böden (bindig)) darüber hinaus einen Überblick über die kennzeichnenden Ergebnisse.



Stat.	Bohrung	Tiefe [m]	Feinkornanteil ¹⁾ [Gew.-%]	Bodenart nach DIN 4022	Bodengruppe DIN 18 196
0+311, links	BS 2	0,0 – 1,8	< 5	A (f-mS, u')	SE
0+931, rechts	BS 2	0,5 – 1,7	< 5	A (f-mS)	SE
1+177, rechts	BS 2	0,0 – 0,8	< 5	A (f-mS)	SE
1+259, links	BS 2	1,0 – 2,3	< 5	A (f-mS)	SE
1+426, links	BS 2	2,0 – 2,7	ca. 11	A (S, u')	SU
3+096, rechts	BS 2	1,0 – 1,8	< 5	A (S)	SE
4+811, rechts	BS 2	0,0 – 1,6	ca. 5	A (S, u')	SE
4+811, links	BS 1	1,0 – 1,6	ca. 12	A (f-mS, u')	SU
	BS 2	0,0 – 1,3	ca. 5	A (S, u')	SE – SU
4+928, links	BS 2	1,0 – 2,0	ca. 8	A (f-mS, u')	SU
	BS 4	0,0 – 1,0	ca. 10	A (f-mS, u')	SU
4+928, rechts	BS 2	0,0 – 1,2	ca. 8	A (f-mS, u')	SU
5+033, rechts	BS 2	1,0 – 1,9	ca. 12	A (f-mS, u')	SU
	BS 4	0,5 – 1,1	ca. 18	A (S, g, u)	SU*
5+128, rechts	BS 2	1,0 – 2,3	ca. 15	A (f-mS, u')	SU – SU*
5+238, rechts	BS 1	1,0 – 1,8	ca. 15	A (f-mS, u)	SU – SU*
	BS 2	1,0 – 1,8	< 5	A (S)	SE

1) Korngröße $\leq 0,06$ mm

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Sieb- und Schlämmanalysen - Dammbaumaterial

Die als Dammbaustoffe verwendeten Sandböden weisen überwiegend keine bzw. geringe Feinkornanteile ($d < 0,063$ mm) auf. Überwiegend liegt der Anteil des Schlämmkorns in einer Größenordnung von < 5 Gew.-%, so dass sich in Verbindung mit einer enggestuften Kornzusammensetzung die Zuordnung zur Bodengruppe SE (enggestufte Sande) nach DIN 18 196 ergibt. Insbesondere bei sehr lockerer bis lockerer Lagerungsdichte, welche im Bereich aller untersuchten Dammprofile vorgefunden wurde (vgl. Abschnitt 3.3.1), sind die Sande daher als **fließgefährdet** einzustufen. Die korrelierten Wasserdurchlässigkeiten nach HAZEN liegen angesichts der Körnungslinien in einer Bandbreite von $k_f = 1 \times 10^{-4}$ m/s bis $k_f = 3,2 \times 10^{-4}$ m/s. Lokal höhere Durchlässigkeiten können angesichts der Lagerungsdichten und ggf. bereits eingetretenen Suffusionsschäden nicht ausgeschlossen werden.

Bereichsweise wurden ebenfalls Auffüllungen mit einem etwas höheren Feinkornanteil angetroffen. Die Schichten finden sich lagenweise im gesamten Dammbereich, wurden jedoch verstärkt im Bereich der wasserseitigen Dammsflanke vorgefunden. Vermutlich wurden die schwach bindigen bis bindigen Sande als Dichtungsvorlage eingebaut. Die zugehörigen Körnungslinien dokumentieren jedoch, dass der Feinkornanteil i.d.R. einen Wert von 20 Gew.-% nicht überschreitet und die schluffigen Sande somit als gemischtkörnige Böden der Bodengruppe SU bis SU* nach DIN 18 196 einzustufen sind. Die Wasserdurchlässigkeiten dieser Schichten liegen korreliert in einer Größenordnung von $k_f = 2,3 \times 10^{-6}$ bis $k_f = 9 \times 10^{-5}$ m/s

Die nachfolgende Abbildung 4-1 stellt das Korngrößenspektrum der untersuchten Dammbaumaterialien als umhüllende Kurve zusammenfassend dar.

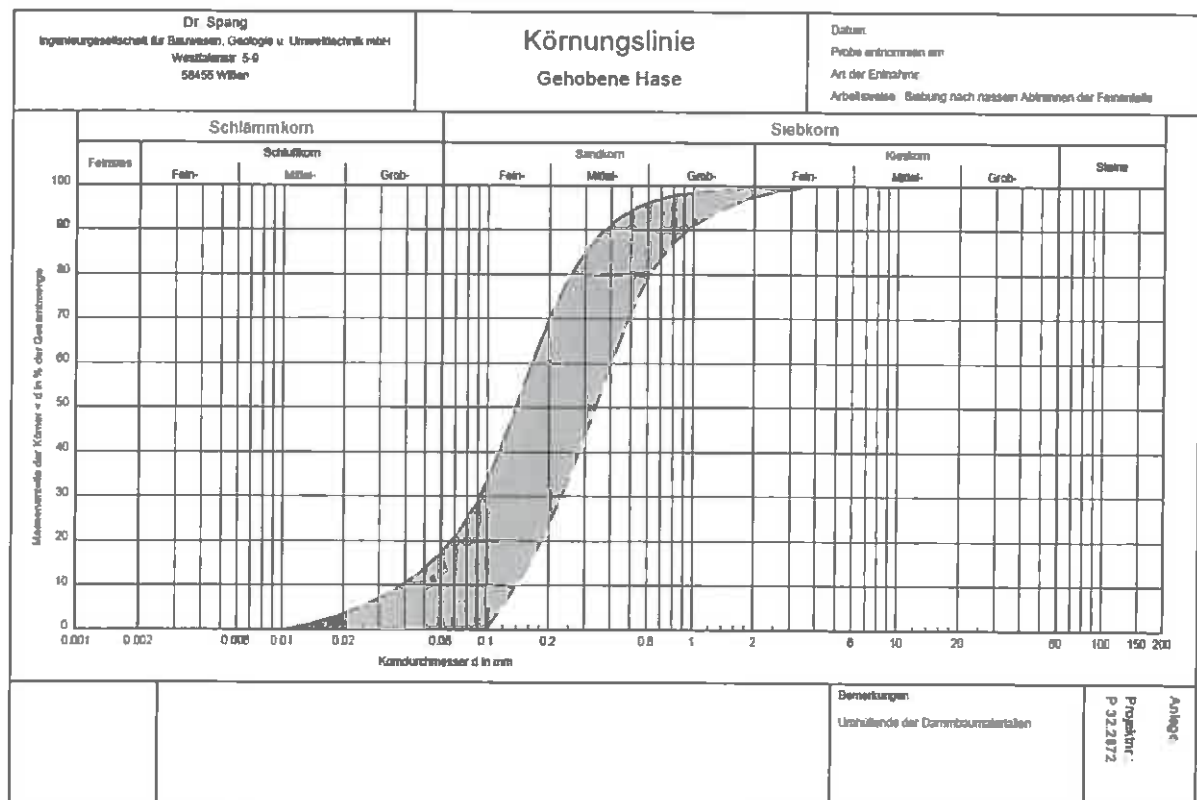


Abb. 4-1: Umhüllende Kornverteilungskurve der untersuchten Dammbaumaterialien



Die nachfolgenden Tabellen 4-2 und 4-3 stellen auszugsweise die Ergebnisse der Sieb- bzw. der kombinierten Sieb- und Schlämmanalysen für die gewachsenen Böden dar. Die Tabellen unterscheiden sich hinsichtlich des Feinkornanteils des Bodens: während in Tabelle 4-2 im Wesentlichen die nicht bindigen bis schwach bindigen Sande zusammengefasst sind, stellt Tabelle 4-3 die bindigen bis stark bindigen Sandböden, welche geologisch als Auelehm einzustufen sind, dar. Es wird darauf hingewiesen, dass der Übergang zwischen den bindigen und stark bindigen Sanden bzw. ggf. stark sandigen Schluffen fließend ist. Eine Klassifizierung des Auenlehms anhand der Kornverteilungskurven ist mit Unschärfen belegt.

Stat.	Bohrung	Tiefe [m]	Feinkornanteil ¹⁾ [Gew.-%]	Bodenart nach DIN 4022	Bodengruppe DIN 18 196
0+311, links	BS 2	1,8 – 3,0	ca. 10	f-mS, u'	SU
0+931, rechts	BS 2	1,7 – 2,5	ca. 8	f-mS, u'	SU
		5,0 – 6,0	ca. 10	f-mS, u'	SU
1+177, rechts	BS 2	2,1 – 3,4	< 5	f-mS	SE
1+259, links	BS 2	4,0 – 5,0	ca. 5	f-mS, u'	SE – SU
3+096, rechts	BS 2	2,0 – 2,9	0	f-mS	SE
4+111, rechts	BS 2	3,2 – 4,0	< 5	f-mS	SE
4+811, rechts	BS 2	3,0 – 4,0	< 5	S, u'	SE
4+928, links	BS 2	2,6 – 3,0	< 5	S	SE
5+033, rechts	BS 4	1,1 – 1,9	< 5	S	SE
5+138, rechts	BS 2	5,0 – 6,0	ca. 5	f-mS, u'	SE – SU
5+238, rechts	BS 2	2,2 – 2,8	< 5	f-mS	SE

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Siebanalysen – gewachsene Sande (auszugsweise)

Stat.	Bohrung	Tiefe [m]	Feinkornanteil ¹⁾ [Gew.-%]	Bodenart nach DIN 4022	Bodengruppe DIN 18 196
1+177, rechts	BS 2	1,1 – 2,1	ca. 20	S, g', u	SU*
1+259, links	BS 2	2,5 – 3,5	ca. 15	S, g', u'	SU – SU*
	BS 4	2,0 – 2,4	ca. 12	S, g', u'	SU
3+096, rechts	BS 2	1,8 – 2,0	ca. 15	S, u'	SU – SU*
4+111, rechts	BS 2	1,6 – 2,5	ca. 18	S, g', u	SU*
	BS 4	0,7 – 1,6	ca. 15	S, u'	SU – SU*



Stat.	Bohrung	Tiefe [m]	Feinkornanteil ¹⁾ [Gew.-%]	Bodenart nach DIN 4022	Bodengruppe DIN 18 196
4+811, links	BS 1	1,8 – 2,6	ca. 12	f-mS, u'	SU
4+928, rechts	BS 3	6,5 – 7,0	ca. 30	f-mS, u	SU*
5+238, rechts	BS 2	1,8 – 2,2	ca. 25	f-mS, u	SU*

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Sieb- und Schlämmanalysen – bindige bis stark bindige Sande (Auelehme, auszugsweise)

Die nicht bindigen bis schwach bindigen gewachsenen Sande weisen vergleichbare Eigenschaften wie die Dammbaumaterialien auf. Der Feinkornanteil liegt überwiegend in einer Größenordnung von < 5 Gew.-% und die Korngrößenzusammensetzung ist enggestuft. Demnach treffen ebenfalls die Merkmale der Bodengruppe SE nach DIN 18 196 zu, so dass auch die gewachsene Sandböden, insbesondere innerhalb der oberflächennahen Horizonte mit lockerer bis sehr lockerer Lagerung des Korngefüges, als **fließgefährdet** einzustufen sind. Die Wasserdurchlässigkeiten liegen in vergleichbarer Größenordnung wie jene der o. g. Dammbaustoffe.

Der Vergleich der Tabelle 4-1 und 4-2 verdeutlicht die Annahme, dass die örtlich anstehenden, gewachsenen Böden als Dammbaustoffe verwendet wurden.

Die Schichten des Auenlehms (Tabelle 4-3) sind aus bodenmechanischer Sicht als Sande mit schwach schluffigen bis schluffigen Nebenbestandteile einzustufen. Der Feinkornanteil liegt jedoch lediglich in einer Bandbreite von 15 – 20 Gew.-%, lokal bei 25 – 30 Gew.-%, so dass die Sande als bindig bis stark bindig einzustufen sind. Feinkörnige Böden (Feinkornanteil > 40 Gew.-% nach DIN 18 196) lassen sich anhand der untersuchten Bodenproben nicht nachweisen.

Die gewonnenen Bodenproben sind gemäß der bodenmechanischen Feldansprache vielfach durch organische Einlagerungen in Form von Torf Beimengungen bzw. –stücken sowie Holzresten gekennzeichnet. Ein hoher Organikgehalt wirkt sich entsprechend nachteilig auf die Zusammenpressbarkeit des Bodens aus. Zur Abschätzung des Einflusses ist es erforderlich, die Größenordnung der organischen Nebenbestandteile zu quantifizieren.

Die Bestimmung der **organischen Bestandteile** in Form des Glühverlustes nach DIN 18 128 wurde am überwiegenden Anteil der organisch auffälligen Bodenproben durchgeführt. Tabelle 4-4 gibt eine Zusammenstellung der Laborergebnisse mit Einstufung der Ergebnisse in Anlehnung an DIN



4022. Nach DIN 4022 kann für den Gehalt an organischer Substanz im Boden folgende Einteilung verwendet werden:

<u>Nicht bindige Böden:</u>	1 – 3 %	schwach organisch
	3 – 5 %	organisch
	> 5 %	stark organisch

<u>Bindige Böden:</u>	2 – 5 %	schwach organisch
	5 – 10 %	organisch
	> 10 %	stark organisch

Die Einzelergebnisse sind der Anlage 4.3 zu entnehmen.

Stat.	Bohrung	Tiefe [m]	Bodenart ¹⁾ DIN 4022	w ²⁾ [%]	Glühverlust V _{gl} [Gew.-%]
0+311, links	BS 2	1,8 – 3,0	fS, u*, o'	29,1	2,9
		4,0 – 5,0	fS, ms, o	41,5	4,8
0+931, rechts	BS 2	2,5 – 2,9	U, fs, t, o*	76,0	11,5
	BS 4	1,4 – 1,9	U, t, fs', o*	75,9	14,0
1+177, rechts	BS 2	3,4 – 4,1	fS, ms, g', o'	24,6	2,1
1+259, links	BS 2	2,3 – 2,5	U, fs, o	40,0	5,8
	BS 4	2,0 – 2,4	U, fs, o*	77,2	16,9
1+426, links	BS 2	2,7 – 3,6	fS, ms, o	25,4	3,3
		3,6 – 4,0	U, fs, o*	87,4	18,5
	BS 4	1,6 – 2,1	U, t, fs', o*	90,3	25,3
4+928, links	BS 3	1,0 – 1,9	U, f-ms, o'	39,0	4,9
5+238, rechts	BS 4	0,0 – 0,8	U, fs, o'	24,3	3,5

1) Feldansprache

2) w = Wassergehalt

Tabelle 4-4: Organische Bestandteile nach DIN 18 128

Die gemessenen Organikgehalte variieren in einer Größenordnung von ca. V_{gl} = 2,1 - 25,3 Gew.-%. Bodenmechanisch gesehen setzt sich der vorliegende Dammkörper aus einer Wechsellage-

nung aus schwach humosen bis stark humosen nicht bindigen bis stark bindigen Sanden zusammen. Unter dem Dammmaterial folgen anstehende bindige Sande und Torflagen über Mittel- bis Feinsanden. In Anlehnung an die DIN 4022 sind die Böden überwiegend als schwach organisch bis organisch, bereichsweise als stark organisch einzustufen.

Hohe Organikgehalte korrelieren mit ebenfalls hohen Wassergehalten und geringen Tragfähigkeiten. Bei äußerer Belastung organischer Böden tritt i.d.R. eine nennenswerte Kompression der Feststoffmatrix infolge des Abfließens des Porenwassers auf. Der Eintrag von Bauwerkslasten ist daher weitestgehend auszuschließen, um eine gebrauchstaugliche Gründung sicherzustellen.

Zur weiteren Klassifizierung der bindigen bzw. gemischtkörnigen Böden wurden an einigen Proben Versuche Bestimmung der Konsistenzgrenzen in Anlehnung an DIN 18 122 durchgeführt. Insgesamt wurden die Zustandsgrenzen an 8 Bodenproben bestimmt. Wegen der teilweise vorhandenen hohen organischen und sandigen Anteile bei relativ geringem Feinkornanteil der untersuchten Bodenproben sind der Versuchsdurchführung und Auswertung durchaus Grenzen gesetzt. Demzufolge ergeben sich z. T. Ergebnisse, welche erfahrungsgemäß die tatsächlichen Zustandsform des Bodens nicht verlässlich wiedergeben.

Die Versuchsergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Versuchsprotokolle in der Anlage 4.2 beigelegt.

Stat.	Bohrung	Tiefe [m]	Bodenart ¹⁾ DIN 4022	w ²⁾ [%]	w _L ²⁾ [%]	w _p ²⁾ [%]	I _p ²⁾ [%]	I _c ²⁾ [-]	Boden- gruppe
0+931, rechts	BS 2	2,5 – 2,9	U, fs, t, h	76,0	81,3	37,1	44,2	0,12	OT - TA
1+177, rechts	BS 2	1,1 – 2,1	S, u, g'	45,0	53,4	30,2	23,2	0,36	OT
1+259, links	BS 2	2,5 – 3,5	S, u', g', h	72,0	92,3	53,2	39,1	0,52	OT
4+111, rechts	BS 2	2,5 – 3,2	U, fs, t', h	37,0	53,1	39,0	14,0	1,15 ^{*)}	UA - OU
4+811, rechts	BS 2	1,6 – 2,3	A (fS, u ^{*)}	19,0	30,4	26,0	4,5	2,56 ^{*)}	UL



Stat.	Boh- rung	Tiefe [m]	Bodenart ¹⁾ DIN 4022	w ²⁾ [%]	w _L ²⁾ [%]	w _P ²⁾ [%]	I _P ²⁾ [%]	I _c ²⁾ [-]	Boden- gruppe
4+928, rechts	BS 3	1,0 – 2,2	fS, u, ms'	25,0	29,8	23,2	6,6	0,72	UL – ST
5+138, rechts	BS 4	0,0 – 0,9	S, u, g', h	29,0	38,1	28,4	9,7	0,94	OU
5+238, rechts	BS 2	1,8 – 2,2	U, fs, h	36,0	43,4	30,3	13,1	0,56	OU

1) Feldansprache

2) w = Wassergehalt, w_L = Fließgrenze, w_P = Ausrollgrenze, I_P = Plastizitätsindex, I_c = Konsistenzzahl

*¹⁾ Wert ist nicht zuverlässig

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Plastizitätsuntersuchung

Die aus dem natürlichen Wassergehalt w_n sowie aus den Wassergehalten an der Fließgrenze w_L und Ausrollgrenze w_P bestimmten Konsistenzzahlen I_c streuen in einer größeren Bandbreite. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Sondierungen und den vorliegenden Körnungslinien weisen sie zum Teil auch nicht plausible Werte auf. Im Besonderen die beiden Konsistenzzahlen mit Werten von I_c von 1,15 und 2,5, die eine halbfeste bis feste bis Konsistenz der Böden signalisieren, entsprechen nicht der in den Feldversuchen festgestellten Konsistenz bzw. Lagerungsdichte der Böden. Abgesehen von den drei „Ausreißern“ spiegeln die Versuchsergebnisse die getroffenen Verhältnisse relativ gut wieder. Die Böden weisen breiige bis weiche Konsistenz auf.

Gemäß DIN 18 122-1 lässt sich zwischen I_c und der Konsistenz des Bodens folgende Beziehung herstellen:

Zustandsform des Bodens	Konsistenzzahl I_c [-]
breiig	0 ¹⁾ bis 0,5
weich	0,5 bis 0,75
steif	0,75 bis 1,0 ²⁾
halbfest	1,00 – 1,25
fest	> 1,25

1) Fließgrenze w_L 2) Ausrollgrenze w_P

Tabelle 4-6: Beziehung zwischen Zustandsform und Konsistenzzahl



Zur Durchführung von geotechnischen Berechnungen und Nachweisen zur Standsicherheit der Böschungen werden die **Scherparameter Reibungswinkel ϕ' und Kohäsion c'** benötigt. Zur Ermittlung des Reibungswinkels und der Kohäsion wurden an 10 Mischproben Rahmenscherversuche gemäß DIN 18 127, T 3, 2002 durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind zusammenfassend in Tabelle 4-7 dargestellt. Die zugehörigen Scherversuchsprotokolle sind der Anlage 4.6 zu entnehmen. Zudem sind die zugehörigen Körnungslinien der untersuchten Böden in dieser Anlage beigelegt.

Mischprobe	Aufschluss	Tiefe [m]	Reibungswinkel cal ϕ' [Grad]	Kohäsion cal c' [kN/m ²]	Bodenart nach DIN 4022
1+259, links	BS 2	3,5 - 4,0	31,9	0	fS, ms*
1+259, links	BS 2	5,0 - 6,0	31,7	0	fS, ms*
1+426, links	BS 2	1,0 - 2,0	32,8	0	fS, ms*, u
1+426, links	BS 2	4,0 - 5,0	32,1	0	fS, ms, u
1+426, links	BS 2	5,0 - 6,0	29,3	0	fS, ms
4+111, rechts	BS 1	0,9 - 1,8	32,6	0	fS, ms
4+811, links	BS 2	1,3 - 2,5	29,6	0	fS, ms, u'
4+811, links	BS 2	2,9 - 4,0	30,0*	0	fS, ms
4+811, links	BS 2	4,0 - 5,0	29,8*	0	mS,fs*,gs'
4+811, links	BS 2	5,0 - 6,0	31,1	0	mS,fs*,gs'

* Auswertung nur für den Bereich 0-200 kN/m²

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Scherversuche als Rechenwerte cal. ϕ' und cal c'

Die Ermittlung der Scherparameter beruht auf der Auswertung der Scherversuche für den unteren und mittleren Auflastspannungsbereich von 0 bis 100 kN/m² und 100 bis 200 kN/m². Der Mittelwert wird als repräsentativ für die Auflastspannungen in einer potentiellen Scherfuge in Tiefen bis 6 m unter GOK angesehen. Für die untersuchten, nichtbindigen Böden wird die Kohäsion als vernachlässigbar bzw. nicht zutreffend angesetzt.

Gemäß EAU sind die Bruchwerte der Laborversuche noch auf Rechenwerte abzumindern. Dazu sind folgende Umrechnungen vorzunehmen.

$$\text{cal. } \tan \phi' = \tan \phi' / 1.1 \quad \text{und} \quad \text{cal. } c' = c' / 1.3.$$



Die ermittelten Rechenwerte **cal. ϕ' und cal c'** sind in der Tabelle 4-6 eingetragen.

Unter Berücksichtigung der DIN 1054, 2005-01 sind die charakteristischen Bodenkennwerte als vorsichtige Schätzwerte des Mittelwertes anzusetzen.

Die Ergebnisse der Scherversuche weisen eine relativ große Bandbreite für die untersuchten nichtbindigen bzw. schwach bindigen Böden auf. Die Unterschiede sind zum einen auf die unterschiedliche Kornzusammensetzung, die variierenden Wassergehalte und Feinkornanteile zurückzuführen. Zum anderen kann anhand der Versuchsergebnisse die Spannungsabhängigkeit der Scherfestigkeit nachgewiesen werden. Dies besteht in der Form, dass mit zunehmendem Spannungsniveau der Reibungswinkel des Bodens abnimmt. Daraus ergibt sich, dass die Scherfestigkeit des Bodens in Abhängigkeit vom Versagensmechanismus und der zugehörigen Tiefenlage der Scherfuge und somit abhängig von der effektiven Normalspannung festgelegt werden muss.

Für die im vorliegenden Fall zu untersuchende Böschungsbruchsicherheit der Dämme kann für das Dammbaumaterial auf der sicheren Seite liegend ein Reibungswinkel von $\phi' = 30^\circ$ angesetzt werden. Die Kohäsion ist in den tieferen Bodenzonen unberücksichtigt zu lassen ($c' = 0,0 \text{ kN/m}^2$).

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Rammsondierungen, die eine lockere bis sehr lockere Lagerung der im Dammprofil anstehenden Böden belegen, sind die ermittelten Rechenwerte der Scherparameter als realistisch einzustufen.

Zur Beurteilung der Verdichtungsfähigkeit und zur Ermittlung der optimalen Einbauwassergehalte und Einbaudichten der Böden wurden **Proctorversuche nach DIN 18127** an den Bodenproben, die in den Schürfen auf der Dammkrone gewonnen wurden, ausgeführt. Bei den Bodenproben handelt es sich um nichtbindige Dammbaustoffe.

Für jeden Boden kann in Abhängigkeit vom Wassergehalt anhand der Proctorkurve eine optimale Einbautrockendichte ermittelt werden. Bei genormter Verdichtungsleistung wird der Boden mit unterschiedlichen Wassergehalten in einen Versuchszylinder eingestampft und die zugehörige erreichte Dichte bestimmt. Werden die ermittelten Trockendichten in einem Diagramm in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen und miteinander verbunden, erhält man die Proctorkurve. Am



Hochpunkt der Kurve lassen sich die zugehörigen optimalen Werte des Einbauwassergehaltes und der optimale Trockendichte (Proctordichte) abgreifen.

Die Ergebnisse der insgesamt 4 Proctorversuche sind in der folgenden Tabelle 4-8 zusammengestellt. Die Versuchsprotokolle einschließlich der Proctorkurve sind in der Anlage 4.5 beigelegt.

Station	Schurf	Tiefe [m]	Proctor- dichte	Wassergehalt	Bodenart nach DIN 4022
			ρ_r [g/cm ³]	w_{opt} [%]	
0,311 links	1	0,0 – 0,5	1,76	13,6	mS,fs*,u',
2+777 rechts	2	0,0 – 0,5	1,73	13,0	fS,ms*,u'
3+926 rechts	3	0,0 – 0,5	1,76	12,7	fS,ms*,u'
5+523 rechts	4	0,0 – 0,5	1,82	11,2	mS,fs*,u',

Tabelle 4-8: Ergebnisse der Proctorversuche nach DIN 18127

5. BODENKLASSIFIZIERUNG / RECHENWERTE

5.1 Bodenklassen

Nach den Aufschlussresultaten lassen sich die Böden gemäß Tabelle 5.1-1 klassifizieren.

Schicht Nr.	Bodenart	Klassifizierung nach		Frostep- findlichkeit ¹⁾	Verdichtungs- fähigkeit ²⁾
		DIN 18 196	DIN 18 300		
1	Oberboden	OH, OU	1	F 3	/
2a	Dammschüttung / Auffüllung (gemischt. bzw. nicht bindig)	A [SE ⁵⁾ , SU]	3 - 4	F 1 (F 2) ⁴⁾	V 1 (V 2) ⁴⁾
2b	Abdichtungsmaterial / Auffüllung (feinkörnig bzw. bindig)	A [SU, SU*]	4 (2) ³⁾	F 3	V 3
3	Fluviatile Sande / Beckensande	SE, SU	3 - 4	F 1 (F 2) ⁴⁾	V 1 (V 2) ⁴⁾



Schicht Nr.	Bodenart	Klassifizierung nach		Frostemp- findlichkeit ¹⁾	Verdichtungs- fähigkeit ²⁾
		DIN 18 196	DIN 18 300		
4a	Aue- / Hochflutlehm, leicht plas- tisch, tlw. organisch	UL, OU, TL, SU*, OT, UA	4 (2) ³⁾	F 3	V 3
4b	Torf, meist zersetzt	OT, HZ (HN)	1-4 (2) ³⁾	F 3	/

Tabelle 5.1-1: Bodenklassifizierung

¹⁾ Nach ZTVE StB09, Tab. 1 (F1 nicht frostempfindlich, F3 sehr frostempfindlich).

²⁾ Nach ZTVA-StB06, Tab. 2 (V1 = verdichtbar, V3 = schwer verdichtbar).

³⁾ Die angegebenen leicht plastischen Böden können bei Wassersättigung infolge Störung der Lagerung in Bodenklasse 2 nach DIN 18 300 übergehen.

⁴⁾ bei hoher Wassersättigung und Schluffanteilen > 10 %

⁵⁾ SE ist schlecht verdichtbar und instabil gegenüber Erschütterungen

5.2 Bodenmechanische Eigenschaften der angetroffenen Böden

Aufgrund von umfangreichen Erfahrungen mit den im Baugebiet anstehenden Böden sowie aufgrund der in Anlage 4 beigefügten Laborversuche lassen sich folgende Bodenkennwerte als Rechenwerte angeben.

Schicht Nr.	Boden- gruppe DIN 18 196	Wichte feuchter Boden γ_k [kN/m ³]	Wichte unter Auftrieb γ'_k [kN/m ³]	Rei- bungs- winkel φ'_k [°]	Ko- häsion c'_k [kN/m ²]	Anfangs- festigkeit c_{uk} [kN/m ²]	Steffe- modul ¹⁾ E_{sk} [kN/m ²]	Durchlässig- keitsbeiwert k_{fk} [m/s]
1	OH, OU	15	5	17,5	/	/	/	/
2a	A [SE, SU]	18	10	30	0	0	5 – 15	ca. 1×10^{-5} – 5×10^{-4}
2b	A [SU, SU*]	18	10	25	2	10	5 – 10	ca. 2×10^{-6} – 1×10^{-4}
3	SE, SU	19	11	32.5	0	/	10 ²⁾ – 40	ca. 1×10^{-4} – 5×10^{-4}



Schicht Nr.	Boden- gruppe DIN 18 196	Wichte feuchter Boden γ_k [kN/m ³]	Wichte unter Auftrieb γ'_k [kN/m ³]	Rei- bungs- winkel φ'_k [°]	Ko- häsion c'_k [kN/m ²]	Anfangs- festigkeit c_{uk} [kN/m ²]	Steife- modul ¹⁾ E_{sk} [MN/m ²]	Durchlässig- keitsbeiwert k_{fk} [m/s]
4a	UL, OU, TL, SU*, UA	17	7	22,5	2 - 5	8 - 20	3 - 10	ca. $10^{-7} - 10^{-9}$
4b	OT, HZ	12	2	15	2	10 - 20	0,5 - 1	ca. $10^{-6} - 10^{-9}$

1) Belastungsbereich von 100 bis 250 kN/m²

2) Abminderung aufgrund oberflächennaher lockerer bis sehr lockerer Lagerung

Tabelle 5.2-1: Bodenkennwerte

6. FOLGERUNGEN / EMPFEHLUNGEN

6.1 Bewertung des derzeitigen Zustands

Die Dämme der Gehobenen Hase weisen durchgängig eine sehr lockere bis lockere Lagerung auf, was auf die Verwendung von z.T. ungeeignetem Dammbaumaterial und eine unzureichende Verdichtung zurückgeführt wird. Sie wurden auf die anstehenden überwiegend als Gründungsfläche ungeeigneten Böden geschüttet, die teilweise zudem eine hohe Zusammendrückbarkeit aufweisen. Der Damm wurde ohne erkennbare landseitige Fußsicherung und ohne qualifizierte wasserseitige Dichtung auf das bestehende Gelände aufgebracht.

Eine relativ hohe Durchlässigkeit des Dammbaumaterials und das Fehlen einer durchgängigen Dammbabdichtung führt zu einer stetigen Durchsickerung der Dämme und ermöglicht zum anderen ein Ausspülen von feinkörnigem Material, so dass sich der Dammzustand nachhaltig verschlechtert. Es muss mit fortschreitender innerer Erosion (Suffosion) und einer Zerstörung des Gesamtgefüges gerechnet werden, was letztendlich mit dem Versagen des Dammkörpers gleichzusetzen ist.



Die teilweise starke Durchsetzung des Dammkörpers mit organischem Material hat eine deutlich variierende Dichte des Dammes zur Folge. Ein lokales Versagen des Dammes aufgrund geringer Wichte und Lagerungsdichte des eingebauten Materials ist nicht auszuschließen.

Für die Standsicherheit der Dämme (Böschungsbruch) ist die Scherfestigkeit des Bodens, ausgedrückt durch den Reibungswinkel φ' und die Kohäsion c' , ein entscheidender Einflussfaktor. Je geringer die Lagerungsdichte des Bodens ist, desto geringer ist ebenfalls die Scherfestigkeit. In [U4] konnte bereits gezeigt werden, dass für den überwiegenden Anteil der dort betrachteten Querprofile keine ausreichende Böschungsbruchsicherheit gemäß DIN 19700 bzw. DIN 4084 vorliegt. Angesichts der aktuellen Sondiererergebnisse, welche die Erkundungsergebnisse aus [U3] bestätigen, ist somit davon auszugehen, dass auch innerhalb der übrigen Streckenabschnitte keine ausreichende Standsicherheit vorhanden ist.

Wie bereits in [U3] ausgeführt, kann die lockere Lagerung nicht ausschließlich auf eine nachträgliche Auflockerung (z. B. Wühltriebfall, Wurzellockerung o.ä.) zurückgeführt werden, da sich die geringen Schlagzahlen bis zur Dammbasis und weiter bis in den gewachsenen Boden (s. Abschnitt 3.3.2) fortsetzen. Vielmehr liegen die Gründe für die sehr lockere bis lockere Lagerungsdichte bzw. die weiche Konsistenz vermutlich darin, dass die Dammbaustoffe ohne ausreichende Verdichtung eingebaut wurden. Die schlechten Verdichtungseigenschaften der enggestuften Sand wirken zudem einem verdichteten Einbau entgegen.

Nach der Herstellung der Dämme kann es durch die innere Erosion (Suffosion) von Feinkorn über längere Zeit ebenfalls zur weiteren Auflockerung gekommen sein. Wenn der Feinanteil des Bodens durch die Poren der gröberen Bodenteilchen hindurch abtransportiert (Suffosion) wird, bleibt das Volumen und die Struktur des Bodens zunächst erhalten, weil sich das Skelett der gröberen Bodenkörner noch gegenseitig stützt. Die Dichte des Bodens nimmt ab, weil der Porenraum zunimmt. Die Durchsickerung von Wasser nimmt zu, da mit der Porosität auch die Durchlässigkeit zunimmt. Die Stabilität kann plötzlich abnehmen, und es besteht die Gefahr eines plötzlichen Verlustes der Gesamttragfähigkeit des Dammes.

Auf der Grundlage der durchgeführten Feld- und Laborversuchsergebnisse ist somit davon auszugehen, dass die Dämme entlang der Gehobenen Hase nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a. a. R. d. T.) entsprechen und saniert bzw. ertüchtigt werden müssen.



6.2 Sanierungsmöglichkeiten

Für die Sanierung bzw. Ertüchtigung der Dämme gemäß den a.a.R.d.T (DIN 19 712-2011: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern (Entwurf); Merkblatt DWA-M 507: Deiche an Fließgewässern, 2007, DIN 19 700:2004, Teil 10: Stauanlagen – Gemeinsame Festlegungen, DIN 19 700:2004, Teil 13: Stauanlagen - Staustufen) kommen grundsätzlich folgende Konstruktionsprinzipien zur Anwendung:

- Einbau einer **wasserseitigen Dichtung** oder einer **Innendichtung** (z.B. Spundwand, Schmalwand, MIP) in Verbindung mit einer Ertüchtigung der Dämme zur Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit.
- Einbau einer **filterstabilen Deichfußentwässerung** (Drainageprisma) inkl. Ableitung des Sickerwassers an eine Vorflut (luftseitiger Entwässerungsgraben) in Verbindung mit einer Ertüchtigung der Dämme zur Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit.

Angesichts der relativ hohen Wasserdurchlässigkeiten der gewachsenen fluviatilen Sande unterhalb der Dämme ist die Abdichtung der Staudämme mit erhöhtem Aufwand verbunden bzw. nicht möglich. Eine Abdichtung der wasserseitigen Böschung scheidet voraussichtlich aus, da hierdurch eine Unterströmung der Dämme nicht unterbunden werden kann. Dies wäre nur für den Fall zielführend, dass das Flussbett der Gehobenen Hase ebenfalls abgedichtet wird bzw. durch eine natürliche Kolmation bereits abgedichtet ist. Der Nachweis einer bereits vorhandenen, flächenhaften Abdichtung der Gewässersohle, ist nur mit sehr hohem Aufwand möglich.

Alternativ besteht die Möglichkeit ausgehend von der Dammkrone eine Innendichtung im Dammkern herzustellen. Die Innendichtung ist jedoch so tief in den gewachsenen Baugrund einzubinden, dass durch die Verlängerung des Sickerweges eine Reduktion der Sickerrate erzielt würde. Eine vollständige Unterbindung einer Unterströmung ist nur für den Fall möglich, dass die Innendichtung an einen natürlich vorhandenen Wasserstauer angeschlossen würde. Ein solcher Stauer wurde im Zuge der Erkundungsmaßnahmen jedoch nicht angetroffen. Demzufolge ist auch für den Fall einer Innendichtung der Dämme davon auszugehen, dass bei Hochwasserstand eine anteilige Durchsickerung bzw. Unterströmung stattfindet und zur schadlosen Aufnahme des Sickerwassers Drainagemaßnahmen am luftseitigen Dammfuß erforderlich werden.



6.3 Empfehlungen

Aus Sicht der Dr. Spang GmbH ist angesichts der Tatsache, dass die vorhandenen Dämme wahrscheinlich bereits seit den 1960er Jahren stetig durchsickert werden, eine Ertüchtigung mittels luftseitiger Deichfußentwässerung im Zuge der weiteren Planung aus technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu favorisieren.

Unabhängig davon, welches Konstruktionsprinzip bei der Sanierung Anwendung findet, ist die Ertüchtigung der vorhandenen Dämme zur Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit unvermeidbar. Im Zuge der Ertüchtigung sind die Dammbaumaterialien und die gewachsenen Böden in Höhe der Deichaufstandsfläche soweit nach zu verdichten, dass die erforderliche Scherfestigkeit mobilisiert werden kann. Zur Wahl des geeigneten Verdichtungsverfahrens ist es erforderlich, die Verdichtungseigenschaften der eingebauten Böden zu beurteilen.

Die Verdichtungseigenschaften von Böden hängen maßgeblich vom Wassergehalt und Feinkornanteil (Korngröße $\leq 0,06$ mm) der Feststoffmatrix ab. Infolge der Verdichtung werden die Bodenteilchen in eine dichtere Lagerung versetzt, wobei ein Teil der Luft und des Wassers aus den Poren verdrängt wird. Aufgrund der relativen hohen Wasserdurchlässigkeit weisen nicht bindige Böden i.d.R. gute Verdichtungseigenschaften auf, da Luft und Wasser zügig aus den Makroporenraum des Bodens verdrängt werden können. Mit zunehmendem Feinkornanteil nimmt jedoch die Wasserdurchlässigkeit des Bodens aufgrund einer veränderten Porenstruktur (der Anteil an Grobporen nimmt ab und der Anteil der Feinporen nimmt zu) ab, was dazu führt, dass die Verdichtungseigenschaften schlechter werden. Stark bindige Böden können i.d.R. nur mit sehr großem Aufwand bzw. ohne Zusatzmaßnahmen (z.B. Bindemittelstabilisierung) nur ungenügend verdichtet werden. Weiterhin kommt bei bindigen Böden hinzu, dass die erzielbare Trockendichte in zunehmendem Maß vom Wassergehalt des Bodens abhängt.

Bei nicht bindigen Böden ist zum anderen die Ungleichförmigkeit ($U = d_{60} / d_{10}$) von entscheidender Bedeutung. Die Ungleichförmigkeitszahl U gibt an, welche Kornabstufung der Boden aufweist. Grundsätzlich gilt, dass sich weitgestufte Böden ($U \geq 6$) gut verdichten lassen, während die Verdichtungseigenschaften von enggestuften Böden ($U < 6$) als mäßig bis schlecht zu bewerten ist. Zwar ist das Verdichtungsverhalten weitestgehend unabhängig vom Wassergehalt w , jedoch lassen sich die gleichkörnigen enggestuften Sande nur schwer in eine dichtere Lagerung versetzen.



Hinzu kommt, dass die verdichteten Bereiche i.d.R. wenig standfest sind und bereits bei geringen Erschütterungen oberflächennah wieder auflockern.

Hinsichtlich der Nachverdichtung der Dämme entlang der Gehobenen Hase ist somit zu folgern, dass die Dammbaustoffe und die gewachsenen Sande angesichts der enggestuften Kornstruktur eine nur mäßige bis schlechte Verdichtungsfähigkeit aufweisen, während die schwach bindigen bis bindigen Sande (max. Feinkornanteil < 10 Gew.-%) mäßig verdichtbar sind.

Hinsichtlich der Wahl des einzusetzenden Verdichtungsgeräts sind folgende Punkte zu beachten:

- Ausreichende Tiefenwirkung der Verdichtung bis in den gewachsenen Boden
- Abnahme des Porenvolumens infolge der Verdichtung und hierdurch Sackungen / Senkungen der Böschungskrone und eine temporäre Reduktion des Freibords
- Einhaltung des bauzeitlichen Hochwasserschutzes

Prinzipiell bieten sich folgende Vorgehensweisen an, welche im Zuge der weiteren Planung unter Berücksichtigung der nachfolgend aufgeführten offenen Punkte zu diskutieren sind:

- Nachverdichtung der Dämme mittels Tiefenverdichtung (Rütteldruckverdichtung)
Offene Punkte: Befahrbarkeit der Dammkrone / bauzeitliche Standsicherheit der Dämme, Verdichtungswirkung innerhalb der bindigen bis stark bindigen Sande
- Nachverdichtung mittels Fallgewicht
Offene Punkte: Tiefenwirkung der Nachverdichtung, Abstimmung / Festlegung der erforderlichen Verdichtungsenergie (Masse des Fallgewichts, Fallhöhe, Anzahl der Übergänge) über ein Probeverdichtungsfeld
- Abschnittsweises Aufnehmen und Neueinbau der vorhandenen Dammbaustoffe
Offene Punkte: bauzeitlicher Hochwasserschutz

Unabhängig von der Art der Ertüchtigung der Dämme wird es voraussichtlich erforderlich sein, die vorhandenen Böschungen abzuflachen. Weiterhin werden zur Sicherstellung einer ausreichend breiten Dammkrone und zur Vorhaltung eines Deichverteidigungswegs die Dämme luftseitig voraussichtlich verbreitert werden müssen. Im Zuge der Verbreiterung können dann zum einen aus-



DR. SPANG

Projekt: 32.2872

Seite 35

28.09.2011

reichend flache Böschungsneigungen hergestellt und eine luftseitige Deichfußdrainage filterstabil integriert werden.

Für weitere Fragen stehen wir gerne jeder Zeit zur Verfügung.

(gezeichnet)

Dipl.-Ing. Christian Spang
(Geschäftsführer)

i.V.

Dr.-Ing. René Schäfer
(Abteilungsleiter)

Verteiler:

- NLWKN, Cloppenburg, Herrn Geils, 2 x, davon 1 x vorab per Email an <jan.geils@nlwkn-clp.niedersachsen.de>
- Dr. Salveter GmbH, Dresden, 1 x per E-Mail an <geritt.salveter@dr-salveter.de>
- Dr. Spang GmbH, Witten, 1 x