



Daniel Höller, BSc

Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....
(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all meinen Kollegen der Moser-Jaritz + Partner ZT GmbH bedanken die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben. Vorrangig gebührt mein Dank Dipl.-Ing Thomas Freudenthaler für die hervorragende Betreuung meiner Arbeit und die vielen spannenden und konstruktiven Diskussionen. Durch seine tatkräftige Unterstützung und großes Engagement war es für mich möglich diese praxisorientierte Arbeit in Kombination mit der Technischen Universität Graz und dem Büro Moser-Jaritz + Partner ZT GmbH zu verfassen.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei der Firma SSK – Salzburger Sand- & Kieswerke, die es mir ermöglicht haben eine wie ich finde sehr spannende Fallstudie in meiner Arbeit präsentieren zu können.

Großer Dank gilt auch meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Roman Marte an der Technischen Universität Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, diese doch sehr praxisbezogene Arbeit zu verfassen und nach meinen Vorstellungen umzusetzen. Seine fachliche Kompetenz und das Interesse an dem Thema waren stets eine wertvolle Stütze und sind maßgeblich am Erfolg beteiligt. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Dipl.-Ing. BSc Michael Havinga für die tatkräftige Unterstützung, speziell bei unseren Versuchen mit dem Feld-Rahmenschergerät.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn OStR Prof. Baurat h.c. Dipl.-Ing. Dr. Breymann Helfried für die konstruktiven Gespräche, die maßgebend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gebührt ebenso meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und Großeltern die mir mein Studium ermöglicht haben. Ohne euch wäre es nie bis zum Verfassen dieser Arbeit gekommen. Ebenso großer Dank gilt meiner Schwester Cornelia die mich in allen Lebenslagen unterstützt und mir immer mit Rat und Tat zur Seite steht.

Ein großer Dank geht natürlich noch an all meine Freunde die mich in jeglicher Art und Weise bei der Realisierung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Danke!

Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wird die Standsicherheit von Schlammteichen (Sedimentationsbecken, Klärteiche oder industrielle Absetzanlagen) ausführlich untersucht. Als Schlammteiche bezeichnete Bauwerke stellen eine Sonderform von Stauanlagen dar und dienen meist ausschließlich zum Rückhalt absetzbarer, in Flüssigkeit suspendierter Schwebstoffe. Mittels geeigneten Einspülverfahren wird die entstandene Spültrübe aus Produktionsrückständen wie z.B. aus der Kies-, Sand- oder Bruchsteinwäsche in den Schlammteich zur Ablagerung gebracht. Angesichts ihrer Art des Aufbaus, der Betriebsweise und der Beschaffenheit der darin abgelagerten Sedimente stellen Schlammteiche ein gewisses Gefahrenpotential für Mensch und Natur dar.

Nach einer detaillierten Literaturrecherche über Planung, Ausführung und Betrieb von Schlammteichen wird in weiterer Folge eine mögliche theoretische Vorgehensweise für die Standsicherheitsuntersuchung und Langzeitverwahrung von außer Betrieb genommenen Schlammteichen beschrieben. Den Abschluss des ersten Teils der Masterarbeit bildet eine allgemeine Beschreibung über die Vorgehensweise bei der Planung von Baugrunderkundungen.

Der zweite Teil dieser Arbeit beinhaltet eine konkrete Fallstudie zu dem Thema Standsicherheitsbeurteilung von Schlammteichen. Es handelt sich dabei um einen ca. 30 Jahre alten außer Betrieb genommenen Schlammteich in einem Sand- & Kieswerk in Salzburg – Thalgau. Die Aufgabe war es den Schlammteich hinsichtlich seiner aktuellen Standsicherheit zu beurteilen und einen Vorschlag für eine Standsichere Langzeitverwahrung zu geben. Nach einer ausführlichen Baugrunderkundungsphase konnten für die drei maßgebenden Rechenquerschnitte geotechnische Modelle für die Standsicherheitsberechnung ausgearbeitet werden. Die Standsicherheitsberechnungen wurden mit dem FEM-Programm Plaxis 2D durchgeführt.

Die erworbenen Erkenntnisse aus dieser Masterarbeit sollen als grober Leitfaden für die Vorgehensweise bei der Standsicherheitsuntersuchung solcher komplex aufgebauter Bauwerke dienen.

Schlagwörter: Schlammteich, Sedimentationsbecken, Klarwasser, Spülstrand, Spültrübe, Porenwasserdruckgeber (Piezometer), CPTU, Dissipationstest

Abstract

This master's thesis deals with the stability of tailings dams. Tailings dams are a special form of reservoirs. Tailings are the fine particle residues which arise from the processing of various materials in industry. By means of suitable sluicing, the tailings get into the tailings dam. Due to the construction, the operating mode and the composition of the deposited tailings, tailings dams present a potential danger to humans and nature.

After a detailed literature research on the planning, execution and operating of tailings dams, a possible theoretical approach for the stability analysis and safe encapsulation of the tailings dams is given. The conclusion of the first part of the master thesis is a general description of the procedure for the planning of the foundation ground reconnaissance.

The second part of this master thesis presents a case study on the assessment of the stability of tailings dams. It is a 30 year old decommissioned tailings dam in a gravel plant in Salzburg – Thalgau. The task was to check the stability of the tailings dam and give a suggestion for a possible safe encapsulation of the tailings dam. After a detailed foundation ground reconnaissance phase, geotechnical models for the stability calculation were worked out for the three decisive cross sections. The stability calculations were carried out using the FEM-program Plaxis 2D.

The acquired knowledge from this master thesis should serve as a rough guideline for the procedure of the stability assessment of such complex structures like tailings dams.

Keywords: tailings dams, pond, beach, tailings, pore water pressure sensor (piezometer), CPTU, dissipation test

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielformulierung und Methodik	2
2	Planung und Ausführung von Schlammteichen	3
2.1	Allgemein	3
2.2	Regelwerke und Begriffe	3
2.3	Beckentypen für Schlammteiche	5
2.3.1	Schlammteich im Tal (Talabriegelung)	6
2.3.2	Schlammteich am Hang (Hufeisendamm)	6
2.3.3	Schlammteich im ebenen Gelände (Ringdamm)	7
2.3.4	Schlammteich als Grubenanlage	7
2.4	Absperrbauwerke	8
2.4.1	Grundsätzliche Bauweisen für Absperrbauwerke	9
2.4.2	Praxisnahe Bauweisen für Absperrbauwerke	11
2.5	Wasserhaushalt eines Schlammteichs	16
2.5.1	Zuflüsse in Betrieb befindlicher Schlammteiche	18
2.5.2	Zuflüsse außer Betrieb befindlicher Schlammteiche	20
2.6	Zusammensetzung der Spültrübe	20
2.7	Betriebseinrichtungen	22
2.8	Mögliche Versagensarten bei Schlammteichen	24
2.8.1	Festigkeitsbedingte Versagensarten (Scherfestigkeitsüberschreitung)	24
2.8.2	Hydraulisch bedingte Versagensarten	27
3	Standsicherheitsuntersuchungen	32
3.1	Vorgehensweise bei der Standsicherheitsbeurteilung von Schlammteichen	32
3.2	Bodenverflüssigungspotential (Erdbeben)	33
4	Langzeitverwahrung außer Betrieb genommener Schlammteiche	36
4.1	Monitoring von Schlammteichen	40
5	Baugrunderkundung	41

5.1	Allgemeines	41
5.2	Regelwerke	42
5.3	Planung von Baugrunderkundungen	42
5.3.1	Umfang von Baugrunderkundungen.....	44
5.3.2	Geotechnischer Bericht.....	45
6	Fallstudie.....	46
6.1	Lage und Geologie der Fallstudie.....	46
6.2	Baugrunderkundung Schlammteich C	47
6.2.1	Ist Zustand des Schlammteichs C - Vorstudie	47
6.2.2	Voruntersuchung.....	49
6.2.3	Hauptuntersuchung.....	54
6.2.4	Zusätzliche In-Situ Versuche.....	61
6.3	Geotechnisches Modell	70
6.3.1	Schnitt 1-1.....	72
6.3.2	Schnitt 2-2.....	73
6.3.3	Schnitt 3-3.....	74
6.4	Berechnung der Sickerlinie	75
6.5	Standsicherheitsberechnung.....	81
6.5.1	Standsicherheitsnachweis Schnitt 1-1	82
6.5.2	Standsicherheitsnachweis Schnitt 2-2	87
6.5.3	Standsicherheitsnachweis Schnitt 3-3	95
6.6	Bodenverflüssigungspotential - Schlammteichmaterial.....	100
6.7	Erdbeben	101
6.7.1	Ergebnisse pseudostatische Berechnung	105
6.8	Zusammenfassung der Ergebnisse und weiter Vorgehensweise.....	106
7	Zusammenfassung.....	109
8	Literaturverzeichnis	111
9	Anhang.....	115

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schematischer Grundriss eines Schlammteichs (U.S. Environmental Protection Agency, Technical Report, 1994)	4
Abb. 2	Schematischer Schnitt eines Schlammteichs (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	4
Abb. 3	Schlammteich im Tal (Talabriegelung) (ATV-DVWK-M 503, 2001)	6
Abb. 4	Schlammteich am Hang (Hufeisendamm) (ATV-DVWK-M 503, 2001)	7
Abb. 5	Schlammteich im ebenem Gelände (Ringdamm) (ATV-DVWK-M 503, 2001).	7
Abb. 6	Schlammteich als Grubenanlage (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	8
Abb. 7	Dammachse zur Luftseite verschoben (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	9
Abb. 8	Dammachse feststehend (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	9
Abb. 9	Dammachse zur Wasserseite verschoben (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	10
Abb. 10	Herstellung von Absperrbauwerken mit Hilfe von Zyklonen (ICOLD/CIGB Bulletin 101, 1995)	10
Abb. 11	Schlammteich mit Spülrübeeinspülung an beliebiger Stelle (ATV-DVWK-M 503, 2001)	12
Abb. 12	Schlammteich mit Spülstrand (upstream method) (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)	13
Abb. 13	Schlammteich mit Spülstrand (downstream method) (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)	14
Abb. 14	Schlammteich mit Spülstrand (centerline method) (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)	14
Abb. 15	Schlammteich mit Spülstrand mit Hilfe von Zyklonen gebaut (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)	15
Abb. 16	Schlammteich mit gemischter Konstruktion (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)	16
Abb. 17	Schematischer Wasserhaushalt eines Schlammteiches (ATV-DVWK-M 503, 2001)	17
Abb. 18	Talabriegelung (ATV-DVWK-M 503, 2001)	18
Abb. 19	Hufeisendamm (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	19
Abb. 20	Ringdamm (ATV-DVWK-M 503, 2001)	19
Abb. 21	Tendenzielles Verhalten bodenphysikalischer Parameter der Spülrübe (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	21
Abb. 22	Beispiel für eine örtlich konzentrierte Einspülung (single point discharge) ..	22
Abb. 23	Beispiel für eine Linienhafte Einspülung (spigotting).....	23
Abb. 24	Übersichtsschnitt Dammaufbau Beispielhaft (ATV-DVWK-M 503, 2001) ...	25
Abb. 25	Gleiten in der Aufstandsfläche (ATV-DVWK-M 503, 2001)	25

Abb. 26	Böschungsbruch (ATV-DVWK-M 503, 2001)	25
Abb. 27	Grundbruch (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	26
Abb. 28	Gleiten parallel zur Böschung (Dammbau, Bodenmechanik und Grundbau VA, WS 2014/15)	26
Abb. 29	Spreizen in der Aufstandsfläche (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	26
Abb. 30	Standicherheit der Randdämme (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	27
Abb. 31	Gespanntes Grundwasser (Aufschwimmen) (ATV-DVWK-M 503, 2001) ...	28
Abb. 32	Auf- oder Abwärtsgerichtete Kontakterosion (Wittmann, 1980).....	29
Abb. 33	Schichtparallele Kontakterosion (Wittmann, 1980).....	29
Abb. 34	Piping (Wittmann, 1980)	30
Abb. 35	Suffosion (Wittmann, 1980)	30
Abb. 36	Methodik für die Standsicherheitsbeurteilung eines Schlammteichs (ATV-DVWK-M 503, 2001)	32
Abb. 37	Siebliniendiagramm mit eingezeichneten verflüssigungsempfindlichen Bereichen (KTA 2201.2,2012)	34
Abb. 38	schematischer Schnitt für die Langzeitverwahrung mit nicht schadstoffbelastetem Schlammteichmaterial (ATV-DVWK-M 503, 2001)	38
Abb. 39	schematischer Schnitt für die Langzeitverwahrung mit lösungsfähigen Inhaltsstoffen im Schlammteichmaterial (ATV-DVWK-M 503, 2001).....	39
Abb. 40	Projektgebiet Schlammteich C Thalgau	46
Abb. 41	Schlammteich C Übersichtsfoto – Blick von bergwärts Richtung Damm ...	48
Abb. 42	Schlammteich C Übergang von Spülstrand auf Freiwasserbereich – Blick vom Damm bergwärts	48
Abb. 43	Probenentnahmerohr für Drucksondierung (http://www.blackinsitutesting.com.au/soil-sampling/ , abgerufen am 13.02.2017).....	54
Abb. 44	Porenwasserdruckgeber Firma Geokon.....	56
Abb. 45	Datenlogger mit angeschlossenen Porenwasserdruckgebern.....	57
Abb. 46	Pegel im Verlauf des Schnitts 1-1	58
Abb. 47	Rammkernsondierung (RKS 1/16).....	59
Abb. 48	Rammkernsondierung (RKS 2/16).....	60
Abb. 49	Rammsondierung 15° zur vertikalen geneigt mit anschließendem Einbau des Pegels P 7/16	60
Abb. 50	Taschenflügelsonde (www.geotechnik-shop.de , abgerufen am 13.02.2017)	61
Abb. 51	Taschenpenetrometer (www.geotechnik-shop.de , abgerufen am 13.02.2017).....	62

Abb. 52	Auswertung Taschenflügelsonde klein und Taschenpenetrometer (Kurosh Thuro & Marion Nickmann', Technische Universität München, 2008).....	63
Abb. 53	Feld-Rahmenschergerät	64
Abb. 54	Ausarbeitung des Probekörpers	65
Abb. 55	Scherrahmen + Überwurfrahmen.....	65
Abb. 56	Wegaufnehmer und Kraftmessdose.....	65
Abb. 57	fertiger Versuchsaufbau.....	66
Abb. 58	Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 25,0 \text{ kN/m}^2$	67
Abb. 59	Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 50,0 \text{ kN/m}^2$	67
Abb. 60	Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 75,0 \text{ kN/m}^2$	67
Abb. 61	Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 75,0 \text{ kN/m}^2$	68
Abb. 62	Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 95,0 \text{ kN/m}^2$	68
Abb. 63	Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 100,0 \text{ kN/m}^2$	68
Abb. 64	$\sigma - \tau$ Diagramm	69
Abb. 65	Schemaskizze Konstruktionsprinzip upstream method (Dammachse zur Wasserseite verschoben).....	71
Abb. 66	Inflow - Einströmhöhe 1 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)	76
Abb. 67	Inflow - Einströmhöhe 2 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)	77
Abb. 68	Inflow - Einströmhöhe 3 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)	77
Abb. 69	Inflow - Einströmhöhe 1 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = 10 \cdot k_y$)	78
Abb. 70	Head (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$).....	79
Abb. 71	Head (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = 10 \cdot k_y$)	80
Abb. 72	Modell Initial Phase, Schnitt 1-1 - Modell 1.0	82
Abb. 73	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 1-1 - Modell 1.0.....	83
Abb. 74	Sättigung, Schnitt 1-1 – Modell 1.0	83
Abb. 75	Modell Initial Phase, Schnitt 1-1 – Modell 1.1.....	84
Abb. 76	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 1-1 – Modell 1.1.....	85
Abb. 77	Sättigung, Schnitt 1-1 – Modell 1.1	85
Abb. 78	Modell Initial Phase, Schnitt 2-2 – Modell 2.0.....	87
Abb. 79	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 – Modell 2.0.....	88
Abb. 80	Sättigung, Schnitt 2-2 – Modell 2.0	88
Abb. 81	Porenwasserdruckverteilung Schnitt 2-2 – Modell 2.0.....	89
Abb. 82	Porenwasserdruckverteilung im Bereich der Porenwasserdruckgeber, Schnitt 2-2 –Modell 2.0.....	90
Abb. 83	Detail A - Porenwasserdruckverteilung	90
Abb. 84	Modell Initial Phase, Schnitt 2-2 – Modell 2.1.....	91

Abb. 85	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 – Modell 2.1	92
Abb. 86	Sättigung, Schnitt 2-2 – Modell 2.1	92
Abb. 87	Porenwasserdruckverteilung Schnitt 2-2 – Modell 2.1.....	93
Abb. 88	Hydrostatische Porenwasserdruckverteilung, Schnitt 2-2 –Modell 2.1	94
Abb. 89	Modell Initial Phase, Schnitt 3-3 – Modell 3.0.....	96
Abb. 90	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 3-3 – Modell 3.0.....	96
Abb. 91	Sättigung, Schnitt 3-3 – Modell 3.0	97
Abb. 92	Modell Initial Phase, Schnitt 3-3 – Modell 3.1.....	98
Abb. 93	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 3-3 – Modell 3.1.....	98
Abb. 94	Sättigung, Schnitt 3-3 – Modell 3.1	99
Abb. 95	Isolinien der maximalen horizontalen Beschleunigung [m/s^2] für das OBE (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band, 1996)	104
Abb. 96	Zoneneinteilung für das MCE (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band, 1996).....	104
Abb. 97	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 OBE.....	105
Abb. 98	Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 MCE	106

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Verflüssigungsanfälligkeit feinkörniger Böden nach Andrews und Martin (2000)	35
Tab. 2	Verflüssigungsempfindlichkeit nach Polito und Martin (2001).....	35
Tab. 3	Aufschlussverfahren (Schmidt, 2006).....	42
Tab. 4	Empfehlungen für Abstände und Anzahl von Aufschlüssen (Schmidt, 2006).	44
Tab. 5	Durchgeführte Voruntersuchungen – In-Situ	50
Tab. 6	Durchgeführte Voruntersuchungen - Labor	50
Tab. 7	Durchgeführte Hauptuntersuchungen – In-Situ	54
Tab. 8	Durchgeführte Hauptuntersuchungen - Labor	55
Tab. 9	Zusammenfassung Messungen Porenwasserrückgeber	57
Tab. 10	Versuchsergebnisse Taschenflügelsonde klein und Taschenpenetrometer	62
Tab. 11	Ermittelte Scherparameter mit Taschenflügelsonde klein und Taschenpenetrometer	63
Tab. 12	maximale Scherspannungen τ_{max}	69
Tab. 13	Ermittelte Scherparameter mit Feld-Rahmenschergerät	69
Tab. 14	Durchlässigkeitsbeiwerte (Übergangszone $k_x = 10 \cdot k_y$).....	75
Tab. 15	Mindestsicherheiten (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1996)	81
Tab. 16	Zusammenfassung Standsicherheit Schnitt 1-1	86
Tab. 17	Zusammenfassung Standsicherheit Schnitt 2-2	95
Tab. 18	Zusammenfassung Standsicherheit Schnitt 3-3	100
Tab. 19	Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 11,0 -12,0 m)	100
Tab. 20	Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 17,5 -18,5 m)	100
Tab. 21	Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 11,0 -12,0 m)	101
Tab. 22	Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 17,5 -18,5 m)	101
Tab. 23	Maximale und effektive Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen.....	105
Tab. 24	Zusammenfassung Standsicherheit Erdbebenlastfälle Schnitt 2-2 OBE und MCE	106
Tab. 25	Zusammenfassung Standsicherheit Schlammteich C	107

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

E_s	[MN/m ²]	Steifemodul
I_D	[-]	Bezogene Lagerungsdichte
σ_N	[kN/m ²]	Normalspannung

Kleine Buchstaben

w	[%]	Wassergehalt
n	[-]	Porenanteil
c	[kN/m ²]	Kohäsion des Bodens
k_x	[m/s]	horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert
k_y	[m/s]	vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert
ν	[-]	Poissonzahl
w_L	[%]	Fließgrenze

Griechische Buchstaben

γ	[kN/m ³]	Wichte des Bodens
γ_s	[kN/m ³]	Kornwichte des Bodens
γ_d	[kN/m ³]	Trockenwichte des Bodens
γ_w	[kN/m ³]	Wichte des Wassers
γ_{sat}	[kN/m ³]	gesättigte Wichte des Bodens
γ'	[kN/m ³]	Wichte unter Auftrieb des Bodens
φ	[°]	Innerer Reibungswinkel des Bodens
ψ	[°]	Dilatanzwinkel

Abkürzungen

FEM	Finite Elemente Methode
CPT	Cone Penetration Test (Drucksondierung)
CPTU	Drucksondierung bei der zusätzlich der dynamische Porenwasserdruck während des Eindringvorgangs mitgemessen wird
DPH	Schwere Rammsonde
mWS	Meter Wassersäule

1 Einleitung

Schlammteiche, oft auch als Klärteiche, Absinkweiher, Absetzanlagen, Industrielle Absetzanlagen oder wie in der DIN 19700-15 „Stauanlagen“ als Sedimentationsbecken bezeichnete Bauwerke stellen eine Sonderform von Stauanlagen dar. Diese Form von Stauanlagen dient im allgemeinen Fall ausschließlich dem Rückhalt absetzbarer, in Flüssigkeit suspendierter Schwebstoffe. Das mit absetzbaren Schwebstoffen beladene Wasser wird als Spültrübe bezeichnet. Die aus verschiedenen Produktionsbereichen entstehenden Rückstände (Spültrübe) werden mittels geeigneten Verfahren durch einspülen in den Schlammteich zur Ablagerung gebracht. Folgende Aufzählung zeigt einen groben Überblick der Produktionsbereiche wo Spülrüben anfallen. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- Wasserrückstände aus Kies-, Sand-, Bruchstein-, oder Zuckerrübenwäsche
- Rückstände aus der Aufbereitung von Erz und Kohle (einschließlich Uranerz) und anderen Rohstoffen wie z.B. aus der Phosphatgewinnung und Aluminiumherstellung
- Verbrennungsrückstände z.B. Braunkohlenaschen
- Bohrschlämme und Baggergut
- Suspensionsartige oder schlammige Rückstände aus chemischen Produktionsprozessen
- Badetorfe

Das Verhältnis Feststoff zu Wasser in der Spültrübe ist sehr stark von der Herkunft, Aufbereitungstechnologie und den Pumperfordernissen abhängig und bewegt sich in einer Größenordnung von 70 g/l bis zu über 200 g/l. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Schlammteiche stellen einen erheblichen Eingriff in die Umwelt dar. Durch ihre Art des Aufbaus, der Betriebsweise und der Beschaffenheit der darin abgelagerten Sedimente stellen sie ein gewisses Gefahrenpotential dar. Nach Ende ihrer Betriebsphase haben Sedimentationsbecken keine Bedeutung mehr für das jeweilige Unternehmen und müssen durch bautechnische Maßnahmen in einen standsicheren Zustand zur Langzeitverwahrung übergeführt werden. Demnach haben Schlammteiche in mancher Hinsicht einige Parallelen zu Deponien.

Im restlichen Teil der Masterarbeit wird einheitlich und ausschließlich der Begriff Schlammteich verwendet.

1.1 Problemstellung

Die Schwierigkeit bestehende Schlamnteiche hinsichtlich ihrer Standsicherheit zu beurteilen liegt darin, dass in den meisten Fällen keine detaillierte Planung vorliegt. Absperrbauwerke für Schlamnteiche entstehen im Normalfall über die Zeit, Schritt für Schritt. Die Bauweise des Dammes, hydrologische Bedingungen in der Umgebung, die Zusammensetzung der Spültrübe, das gewählte Einspülverfahren und das damit zusammenhängende Absetzverhalten der Spültrübe, all das sind enorme Einflussfaktoren auf die Standsicherheit eines Schlamnteichs.

1.2 Zielformulierung und Methodik

Ziel der Masterarbeit ist es, die im Kapitel 1.1 beschriebene, komplexe Problemstellung Schritt für Schritt aufzuarbeiten und verständlich darzustellen.

Im ersten Teil wird eine ausführliche Literaturrecherche über das Thema Schlamnteiche durchgeführt. Dies soll dazu dienen, einen allgemeinen Überblick über die Problematik zu erlangen. Es werden die verschiedenen Beckentypen, Bauweisen für Dämme, der Wasserhaushalt eines Schlamnteiches und die dafür nötigen Betriebseinrichtungen genauer betrachtet. In weiterer Folge wird noch die Zusammensetzung der Spültrübe beschrieben und mögliche Versagensarten von Schlamnteichen angeführt. Anschließend kommt ein allgemeiner Teil über Standsicherheitsuntersuchungen von Schlamnteichen und die generelle Planung von Baugrunderkundungen.

Im zweiten Teil der Masterarbeit wird anhand eines praktischen Beispiels eine Fallstudie durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen kürzlich außer Betrieb genommenen Schlamnteich in Salzburg – Thalgau, der hinsichtlich seiner Standsicherheit beurteilt werden soll.

2 Planung und Ausführung von Schlammteichen

2.1 Allgemein

Schlammteiche unterscheiden sich von herkömmlichen Stauanlagen (bei denen im Normalfall ausschließlich Wasser aufgestaut wird) dadurch, dass durch den Feststoffanteil in der Spültrübe eine dauernde Feststoffablagerung hervorgeht. Diese Besonderheit hat einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit, Bauweisen und die Entwicklung solcher Schlammteiche. Durch die Betriebsweise und die Art des Aufbaues können Schlammteiche eine große Gefahr für die Umwelt darstellen. Dies beweisen einige katastrophale Schadensfälle in der Vergangenheit durch Brüche oder Überströmen von Absperrbauwerken. Die nachfolgenden drei Schadensfälle sollen einen kurzen Überblick über das Gefahrenpotenzial solcher Bauwerke geben.

Der Bruch zweier übereinanderliegender Schlammteiche in Stava (Oberitalien) im Juli 1985 forderte 268 Todesopfer und richtete einen enormen Sachschaden an. Die Katastrophe zählt weltweit zu einer der größten, in Verbindung mit dem Einsturz einer Deponie eines Bergwerkes. Zwei weitere Umweltkatastrophen, die die Gefahr verdeutlichen, waren der Bruch der Anlage Los Frailes (Spanien) im April 1998 und der Bruch des Beckens Baia Mare (Rumänien) im Januar 2000. Bei beiden Schadensfällen gab es zum Glück keine Todesopfer, die Auswirkungen auf die Umwelt waren jedoch enorm. Bedingt durch die Betriebsweise und den Aufbau sind Schlammteiche ständig einem Wandel unterzogen (Betrieb, Außerbetriebnahme, Verwahrung). Nach Außerbetriebnahme dienen sie, nicht mehr ihrem ursprünglichen Zweck (der Feststoffablagerung) und müssen somit durch Renaturierungsmaßnahmen und möglichen Sicherungsmaßnahmen wieder schadlos in die Umwelt eingegliedert werden. Demzufolge können Schlammteiche im Endausbau mit einer Deponie verglichen werden. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.2 Regelwerke und Begriffe

Über den Stand der Technik von Schlammteichen liegt in der deutschen Sprache nur in einem geringen Umfang Literatur vor. Es gibt die DIN 19700 – 15 Stauanlagen – Sedimentationsbecken (2004) und soweit für Schlammteiche zutreffend die DIN 19700 -10 Stauanlagen – Gemeinsame Festlegungen (2004). Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall hat im Jahr 2001 ein Merkblatt, ATV-DVWK-M 503 „Grundlagen zur Überprüfung und Ertüchtigung von Sedimentationsbecken“

veröffentlicht. Dieser Leitfaden soll als Hilfe für die Überprüfung und Ertüchtigung von bestehenden Schlammteichanlagen dienen, kann aber auch durchaus für die Planung von neuen Anlagen hilfreich sein. Die ICOLD (International commission on large dams) hat eine Anzahl von Bulletins (Berichte) über tailings dams (Schlammteiche) in englischer und französischer Sprache veröffentlicht. Die einzelnen Berichte sind im Kapitel 8 Literaturverzeichnis angeführt.

Die folgende Auflistung der Begriffe aus der DIN 19700-15 Stauanlagen – Sedimentationsbecken (2004) soll zum besseren Verständnis der Fachbegriffe für Schlammteiche dienen.

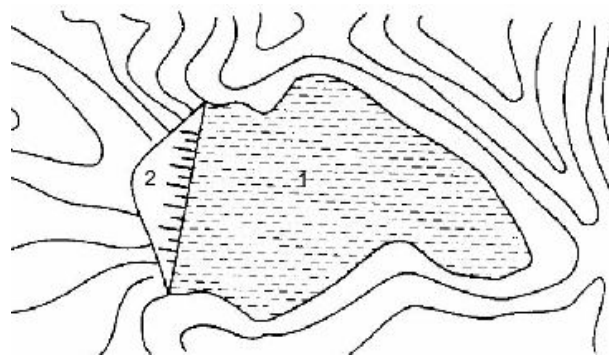


Abb. 1 Schematischer Grundriss eines Schlammteichs (U.S. Environmental Protection Agency, Technical Report, 1994)

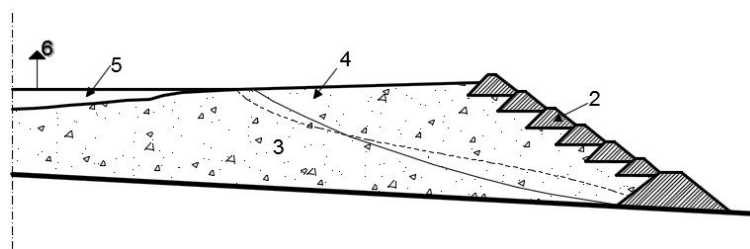


Abb. 2 Schematischer Schnitt eines Schlammteichs (ATV-DVWK-M 503, 2001)

1. Sedimentationsbecken (Schlammteich, en: tailings dams)

„Stauanlage, deren Stauraum im weitesten Sinne dem Rückhalt absetzbarer Schwebstoffe und der (meist endgültigen) Ablagerung der betreffenden Sedimente dient.“¹

¹ (DIN 19700-15, Stauanlagen - Sedimentationsbecken, 2004); S.4

2. Absperrbauwerk (Damm)

„Der bauliche Teil eines Sedimentationsbeckens, der die Spültrübe, das darin enthaltene Porenwasser und das Freiwasser zurückhält. Dabei ist der Übergang vom Absperrbauwerk zum eigentlichen Becken oft fließend.“²

3. Spültrübe

„Das mit absetzbaren Schwebstoffen (en: tailings) beladene Wasser, das in Sedimentationsbecken eingespült wird.“²

4. Spülstrand

„Der aus relativ grobkörnigem Material bestehende, im Bereich der Einspülstelle(n) über den Spülseespiegel ragende Teil des Sedimentkörpers.“²

5. Freiwasser (gebietsweise auch als Klarwasser bezeichnet)

„Geklärter (schwebstofffreier) bzw. weitgehend geklärter Anteil der Spültrübe, der in bestimmten Beckenbereichen gesammelt und über eine Freiwasserabzugseinrichtung dem Sedimentationsbecken entnommen wird.“²

6. Freiwasserabzug

„Einrichtung zum Abzug des Freiwasser.“²

2.3 Beckentypen für Schlammteiche

Der Bau von Schlammteichen wird stark von den vor Ort vorliegenden topographischen, geologischen, hydrologischen und seismischen Gegebenheiten bestimmt. Weitere wichtige Aspekte die noch zu erwähnen sind, sind die Kosten, Stabilität, Standsicherheit, Umweltschutzanforderungen, Hochwasser und mögliche Beeinträchtigungen des Grundwassers durch die Spültrübe. Hinsichtlich der Beckentypen für Schlammteiche kann grob in vier verschiedene Arten unterschieden werden, die in den folgenden Unterkapiteln mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben werden. (DIN 19700-15, 2004)

² (DIN 19700-15, Stauanlagen - Sedimentationsbecken, 2004); S.4

2.3.1 Schlammteich im Tal (Talabriegelung)

Der Vorteil einer Talabriegelung liegt darin, dass der benötigte Absperrdamm eine geringe Länge aufweist und das zu errichtende Dammvolumen im Verhältnis zum Beckenvolumen relativ gering ist. Ein Nachteil ist, dass natürliche Abflüsse im Tal gestört werden und dadurch mit zusätzlichen Wasserzutritten (z.B. durch Bäche) in den Schlammteich zu rechnen ist. Die Problematik mit zusätzlichen Wasserzutritten wird im Kapitel 2.5 Wasserhaushalt eines Schlammteichs näher beschrieben. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

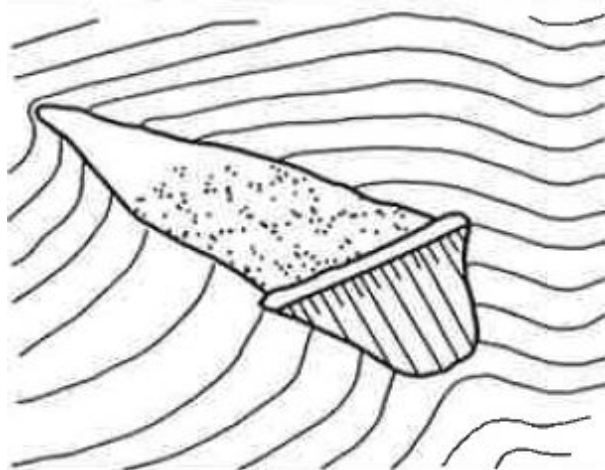


Abb. 3 Schlammteich im Tal (Talabriegelung) (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.3.2 Schlammteich am Hang (Hufeisendamm)

Der Vorteil dieses Beckentyps liegt darin, dass eine geringe Störung der natürlichen Abflüsse vorliegt, jedoch durch die nötige dreiseitige Umschließung mit einem Absperrbauwerk eine relativ große Dammlänge und somit ein großes Dammvolumen entsteht. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

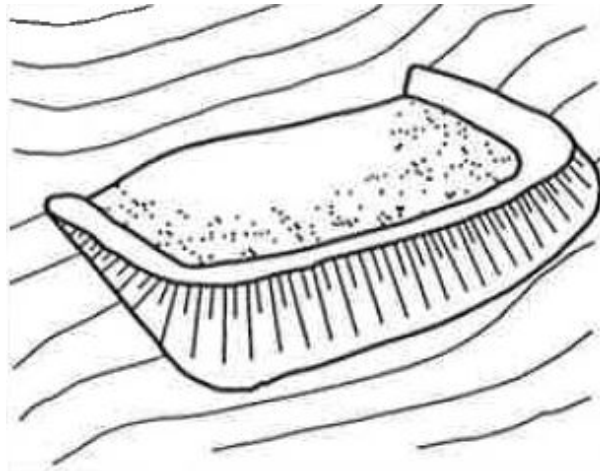


Abb. 4 Schlammteich am Hang (Hufeisendamm) (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.3.3 Schlammteich im ebenen Gelände (Ringdamm)

Der Vorteil einer solchen Anlage liegt darin, dass keine Beeinträchtigung gegenüber natürlichen Abflüssen vorliegt. Dieser Beckentyp weist jedoch das größte Verhältnis von Dammvolumen zum Beckenvolumen auf. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

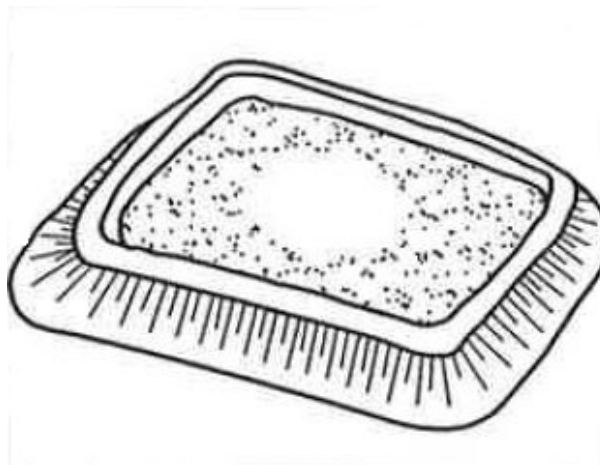


Abb. 5 Schlammteich im ebenem Gelände (Ringdamm) (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.3.4 Schlammteich als Grubenanlage

Grubenanlagen können z.B. in stillgelegten Tagebau Löchern entstehen. Der Vorteil einer Grubenanlage ist, dass keine Abflussbeeinträchtigung vorliegt und im Normalfall keine Absperrdämme benötigt werden. Ein wesentlicher Nachteil kann jedoch darin bestehen, dass eine direkte Beeinflussung des Grundwassers durch die eingespülte Spültrübe entstehen kann. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

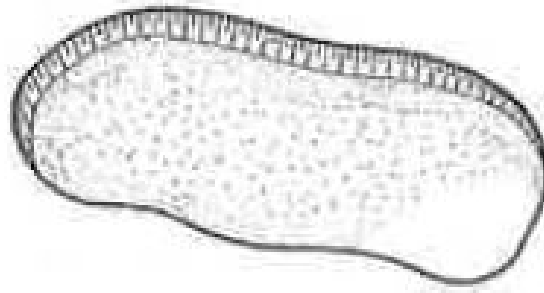


Abb. 6 Schlammteich als Grubenanlage (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.4 Absperrbauwerke

Der wohl größte Unterschied von Dämmen für Schlammteiche zu herkömmlichen für den Wasserbau, ist der im Regelfall stufenweise Aufbau der Absperrbauwerke, über die Zeit. Demzufolge müssen Planungskonzepte für Schlammteiche oft auf Jahrzehnte entwickelt werden und immer wieder den örtlichen Gegebenheiten, der Zusammensetzung der Spültrübe und der Entwicklung in Wirtschaft und Technik angepasst werden. Infolge der erwähnten Veränderungen in der Planung über die Zeit resultiert in der Praxis ein oft sehr ungleichmäßiger, meist äußerst komplexer Aufbau der Absperrbauwerke und des abgelagerten Sediments im Schlammteich. (U.S. Environmental Protection Agency, Technical Report, 1994)

Das in den meisten Fällen vorrangig verfolgte Ziel der Planung liegt darin, so wenig wie möglich „teures Fremdmaterial“ für den Bau des Absperrbauwerks verwenden zu müssen. In den Bereichen der Rohstoffproduktion fallen oft große Mengen an überschüssigen Material an (z.B. Abraum³, Nebengestein⁴, Felsaushub), die beim Anlegen eines Schlammteiches mitverwendet werden können oder als Haldenkörper⁵ bereits vorhanden sind und in das Absperrbauwerk integriert werden. Zusätzlich wird versucht die gröberen abgelagerten Feststoffe im Schlammteich bestmöglich in das Absperrbauwerk zu integrieren um dadurch Fremdmaterial einzusparen. Die Verwendbarkeit der abgelagerten Feststoffe für den Dammbau hängt sehr stark von den Eigenschaften der Spültrübe und den darin enthaltenen Feststoffen ab. Das Problem ist jedoch oft, dass die genaue Kornverteilung der Feststoffe in der Spültrübe

³ Als Abraum wird das über dem Nutzmaterial, für den Betrieb nicht brauchbares und daher abzuräumendes Material bezeichnet.

⁴ Als Nebengestein oder auch taubes Gestein bezeichnet man nicht verwertbares Gestein.

⁵ Als eine Halde wird eine künstliche, aber auch jede natürliche Anhäufung von Material auf einer Geländeoberfläche bezeichnet.

nicht bekannt ist und sich im Laufe der Zeit verändern kann. Daraus entstehen die meist komplexen und sehr heterogen aufgebauten Absperrbauwerke, die insbesondere bei älteren Anlagen stark individuell und schwer nachvollziehbar sein können. (U.S. Environmental Protection Agency, Technical Report, 1994)

2.4.1 Grundsätzliche Bauweisen für Absperrbauwerke

Die Bauweisen für Absperrdämme können im Wesentlichen in drei grobe Hauptgruppen eingeteilt werden und unterscheiden sich sehr stark darin, wie viel durch Sedimentation abgelagertes Material aus der Spültrübe in den Dammaufbau miteinbezogen wird.

1. Dammachse zur Luftseite verschoben (downstream method)

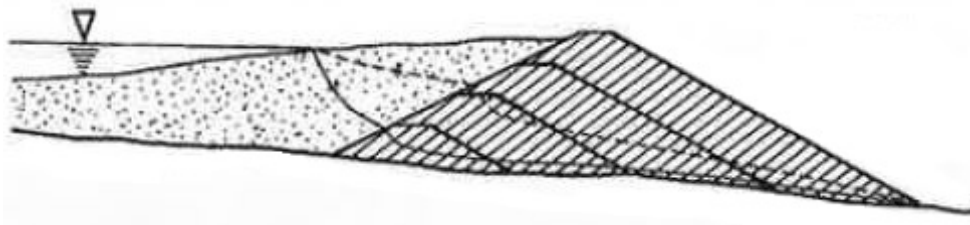


Abb. 7 Dammachse zur Luftseite verschoben (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2. Dammachse feststehend (centerline method)

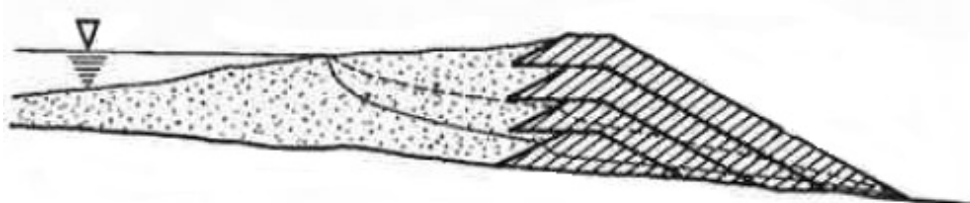


Abb. 8 Dammachse feststehend (ATV-DVWK-M 503, 2001)

3. Dammachse zur Wasserseite verschoben (upstream method)

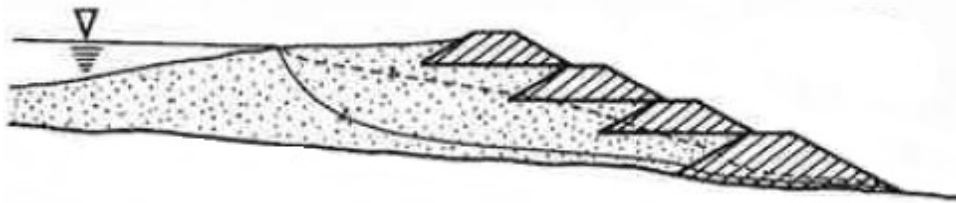


Abb. 9 Dammachse zur Wasserseite verschoben (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Es ist gut zu erkennen, dass die Anforderungen an die abgelagerten Feststoffe als Dammbaumaterial von Abb. 7 bis Abb. 9 zunehmend größer werden. Die in Abb. 7 bis Abb. 9 schraffiert gekennzeichneten Flächen sind Bereiche des Dammes die aus Fremdmaterial hergestellt werden. Die mit Punkten schraffierten Flächen stellen das Schlammeichmaterial dar. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Liegt eine vorteilhafte Kornverteilung der Trübfeststoffe vor, ist es theoretisch möglich mit sogenannten Zyklonen (Hydrozyklonen) Absperrbauwerke zur Gänze ohne Fremdmaterial, nur aus Trübfeststoffen herzustellen. Dabei wird die Spültrübe tangential unter Druck in ein konisches Segment eingebracht. Infolgedessen wird die Spültrübe in eine Kreisbahn gezwungen und strömt in einem abwärts gerichteten Wirbel nach unten. Durch die Verjüngung des konischen Segments kommt es zu einer Verdrängung von Volumen nach innen und zu einem Aufstau im unteren Bereich des Konus, was zur Bildung eines inneren, aufwärtsgerichteten Wirbels führt. Dieser bringt die feinen Fraktionen der Spültrübe zum Überlauf und die schwereren Fraktionen, die zum Dammbau benötigt werden, zum Unterlauf. Der Überlauf wird in den Spülstrand geleitet und der Unterlauf wird für den Dammbau verwendet. (ICOLD/CIGB Bulletin 101, 1995)

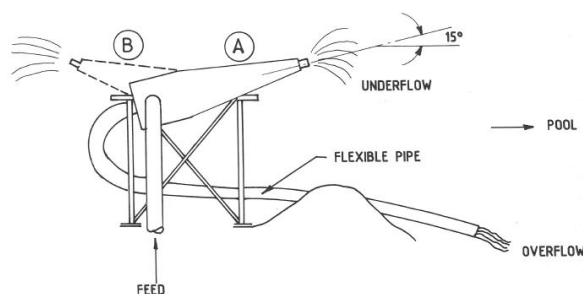


Abb. 10 Herstellung von Absperrbauwerken mit Hilfe von Zyklonen (ICOLD/CIGB Bulletin 101, 1995)

2.4.2 Praxisnahe Bauweisen für Absperrbauwerke

In der Praxis wird man jedoch selten ein Absperrbauwerk, wie im Kapitel 2.4.1 Grundsätzliche Bauweisen für Absperrbauwerke vorfinden, das sich exakt zu einem der drei Bauweisen zuordnen lässt. Vorwiegend wird man auf Kombination der hier angeführten Bauweisen treffen. Vergleicht man Absperrbauwerke für Schlammteiche verschiedener Rohstoffproduktionen miteinander, können beachtliche Unterschiede festgestellt werden, die sehr stark von der Spültrübe abhängen. Die nachfolgende praxisnahe Betrachtung unterscheidet Schlammteiche ohne Spülstrand und Schlammteiche mit Spülstrand. Das abschließende, dritte Beispiel in diesem Kapitel zeigt einen Aufbau eines Schlammteiches der durch vielerlei Umstände (z.B. wechselnde Betriebsbedingungen, langer Werdegang) entstanden ist und die Unübersichtlichkeit und Komplexität solcher Bauwerke verdeutlichen soll.

1. Schlammteich ohne Spülstrand

Um einen Schlammteich ohne Spülstrand errichten zu können, muss das Absperrbauwerk unter erdbautechnischen Bedingungen gänzlich aus Fremdmaterial hergestellt werden. Infolgedessen sind das Material und der Aufbau des Absperrbauwerkes relativ gut bekannt und die Art und Verteilung der Sedimente im Schlammteich spielen für die Standsicherheit eine untergeordnete Rolle. Das bedeutet die Spültrübe kann bei dieser Ausführung des Absperrbauwerkes an beliebiger Stelle eingespült werden. Ein weiterer Vorteil dieser Bauweise besteht darin, dass das Freiwasser (Klarwasser) am Absperrbauwerk anstehen kann. Deswegen ist diese Bauweise mit einem herkömmlichen Damm für das Aufstauen von Wasser vergleichbar. Dies kann natürlich nur unter Einhaltung eines erforderlichen Freibords erfolgen. Prinzipiell handelt es sich bei dieser Ausführung um eine dammbautechnisch gut überschaubare und gegen meteorologische Einwirkungen gering empfindliche Bauweise. Einen Nachteil bilden jedoch die Kosten für das einzubauende Fremdmaterial. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

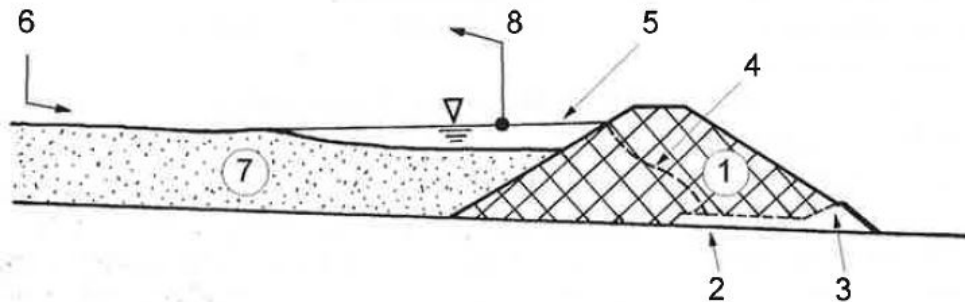


Abb. 11 Schlammteich mit Spültrübeeinspülung an beliebiger Stelle (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- 1 gering durchlässiger Damm aus Fremdmaterial
- 2 Sohlendrainage
- 3 dränierender Stützfuss
- 4 Sickerlinie Stützfuss
- 5 Freiwasser (Klarwasser) am Damm
- 6 Spültrübeeinspülung an beliebiger Stelle im Schlammteich
- 7 Sediment (Schlamm)
- 8 Wasserabzug für Freiwasser (Klarwasser)

2. Schlammteich mit Spülstrand

Eine vollständig andere Situation bieten Schlammteiche mit Spülstrand gegenüber dem Dammaufbau von Schlammteichen ohne Spülstrand. Das Absperrbauwerk besteht nicht zur Gänze aus Fremdmaterial, das erdbautechnisch eingebaut wird, sondern der Großteil des Dammes besteht aus abgelagerten Feststoffen aus der Spültrübe. Bei dieser Bauweise wird die Spültrübe durch einen systematischen Einspülbetrieb vom Damm aus eingebracht, wodurch im Randbereich des Schlammteiches ein Spülstrand entsteht und sich im hinteren Bereich ein Freiwasserspiegel (Klarwasser) ausbildet. Wichtig dabei ist, dass der Spülstrand vom Niveau aus gesehen immer höher liegt wie der Freiwasserspiegel im hinteren Bereich. Infolge des systematischen Einspülens vom Damm aus wird die Kornverteilung der Feststoffe vom Spülstrand bis zum Freiwasser immer feiner. Hinsichtlich der Standsicherheit solcher Absperrbauwerke ist die Lage der Sickerlinie von großer Bedeutung. Das bedeutet ein Wasserüberstau des Spülstrandes im Betrieb muss vermieden werden.

Der meist an der Oberfläche des Spülstrandes vermittelte teilgesättigte Zustand des dort befindlichen Materials ist sehr oft durch Verdunstung begünstigt. Es darf dadurch nicht der Eindruck guter Entwässerung und Festigkeit des Materials entstehen. Die in der Regel recht feinkörnigen Spülstrandsedimente weisen eine hohe kapillare

Wasserbindefähigkeit auf, sodass unter Umständen geringe Wasserzutritte aus z.B. Niederschlagsereignissen oder Überstau des Spülstrandes genügen um den bereits der Durchsickerung unterliegenden Bereich wieder stärker mit Wasser zu sättigen. Demzufolge ist die Bauweise von Schlammteichen mit Spülstrand um einiges empfindlicher gegen unvorteilhafte Veränderungen der hydraulischen Randbedingungen.

Mögliche relevante Gleitflächen für die Standsicherheit solcher Absperrbauwerke liegen in den meisten Fällen relativ tief in dem vom Damm weiter entfernten, feinkörnigeren Sedimenten mit relativ geringer Scherfestigkeit. Infolgedessen sind Schlammteiche dieser Bauweise in ihrer Höhe begrenzt und können nur bis zu einer bestimmten Höhe standsicher sein. (ATV-DVWK-M 503, 2001), (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

Die folgenden Abbildungen zeigen die gängigsten Bauweisen von Schlammteichen mit Ausbildung eines Spülstrandes.

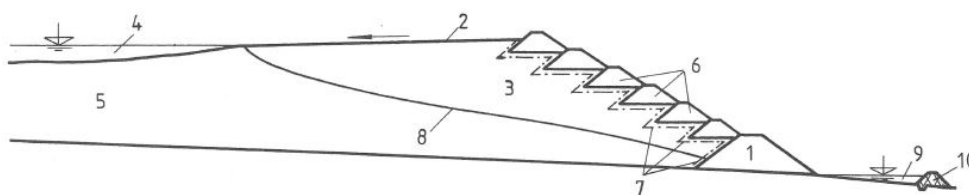


Abb. 12 Schlammteich mit Spülstrand (upstream method) (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

- 1 durchlässiger Grunddamm
- 2 Spülstrand
- 3 Sand
- 4 Freiwasser (Klarwasser)
- 5 sehr feinkörnige Feststoffe
- 6 durchlässige sekundäre Dämme
- 7 Filter
- 8 Sickerlinie
- 9 Teich für die Rückförderung des durchgesickerten Wassers
- 10 Damm für das zurückhalten des durchgesickerten Wassers

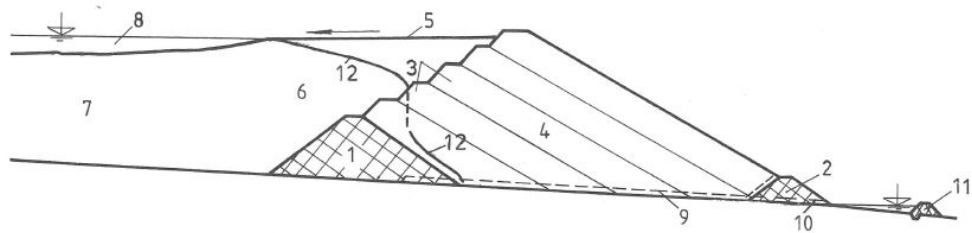


Abb. 13 Schlammteich mit Spülstrand (downstream method) (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

- 1 undurchlässiger Grunddamm
- 2 undurchlässiger Stützfuss
- 3 sekundäre Dämme
- 4 Dammerweiterung mit durch Zyklonen abgesondertem Sand
- 5 Spülstrand
- 6 grobkörnige Fraktionen vom Überlauf der Zyklonen
- 7 sehr feinkörnige Feststoffe
- 8 Freiwasser (Klarwasser)
- 9 Flächendrainage
- 10 Drainageauslass
- 11 Damm für das zurückhalten des durchgesickerten Wassers
- 12 Sickerlinie

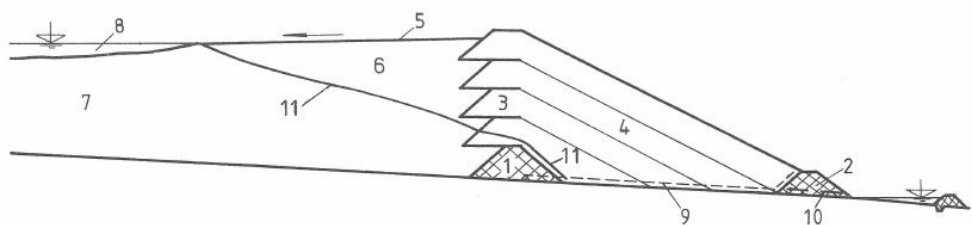


Abb. 14 Schlammteich mit Spülstrand (centerline method) (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

- 1 undurchlässiger Grunddamm
- 2 durchlässiger oder undurchlässiger Stützfuss
- 3 sekundäre Dämme
- 4 Dammerweiterung mit durch Zyklonen abgesondertem Sand
- 5 Spülstrand
- 6 grobkörnige Fraktionen vom Überlauf der Zyklonen
- 7 sehr feinkörnige Feststoffe
- 8 Freiwasser (Klarwasser)
- 9 Flächendrainage
- 10 Drainageauslass
- 11 Sickerlinie

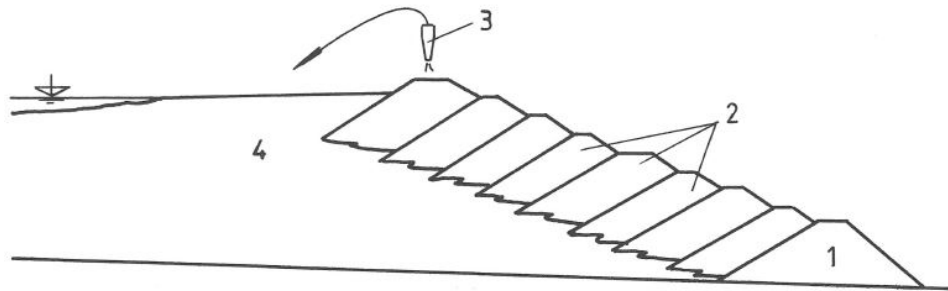


Abb. 15 Schlammteich mit Spülstrand mit Hilfe von Zyklonen gebaut (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

- 1 Grunddamm
- 2 sekundäre Dämme mit durch Zyklonen absonderem Sand
- 3 Wasserzyklon
- 4 sehr feinkörnige Feststoffe (Überlauf Zyklon)

3. Schlammteich mit gemischter Konstruktion des Absperrbauwerkes

Während des Betriebes eines Schlammteiches über Jahre ist es durchaus möglich, dass Änderungen in der Spültrübe auftreten und sich somit der Anlass ergibt, die Bauweise für das Absperrbauwerk zu verändern. Abhängig von der Korngrößenverteilung der Feststoffe in der Spültrübe kann es sinnvoll sein, beispielsweise den Bau des Absperrbauwerkes mit Hilfe von Zyklonen zu stoppen und auf eine linienhafte Einspülung (en: spigotting) umzusteigen. Demnach ist es nicht unüblich und durchaus möglich Absperrbauwerke mit einem Grunddamm ähnlich einem Wasserrückhaltebecken zu beginnen, dann mit der Bauweise Dammachse zur Luftseite verschoben weiterzubauen und schlussendlich auf die Bauweise Dammachse zur Wasserseite verschoben zu wechseln. (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

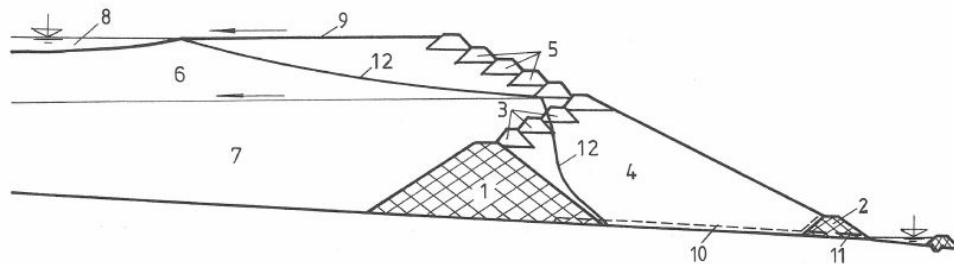


Abb. 16 Schlammteich mit gemischter Konstruktion (ICOLD/CIGB Bulletin 97, 1994)

- 1 gering durchlässiger, hoher Grunddamm
- 2 Stützfuss für die Dammerweiterung
- 3 sekundäre Dämme mit zur Luftseite verschobener Dammachse
- 4 Dammerweiterung mit durch Zyklonen abgesonderten Sand
- 5 sekundäre Dämme mit zur Wasserseite verschobener Dammachse
- 6 eingespülte Feinsedimente aus Zyklonenbetrieb
- 7 Sedimente aus Einspülbetrieb der Gesamtrübe ohne Sandabsonderung
- 8 Freiwasser (Klarwasser)
- 9 Spülstrand
- 10 Flächendrainage
- 11 Drainageauslass
- 12 Sickerlinie

2.5 Wasserhaushalt eines Schlammteichs

Anhand der Tatsache, dass die meisten Schadensfälle von Schlammteichen in der Vergangenheit auf die Einwirkung von Wasser zurückzuführen sind, wird in diesem Kapitel auf den Wasserhaushalt eines Schlammteiches näher eingegangen. Die in der Abb. 17 dargestellte Schemaskizze zeigt die wichtigsten Komponenten der Zu- und Abflüsse eines Schlammteichs. Für die Sicherheit eines Schlammteichs sind vor allem die Komponenten Z_O , Z_N , Z_T , A_W , und ΔS von größter Bedeutung, da sie in ihrer Menge im Regelfall die anderen Anteile überwiegen. Je nach Standort des Schlammteichs ist es naturgemäß möglich, dass Komponenten auch null werden können. Die im Extremfall bei Starkniederschlägen sehr hohen natürlichen Zuflüsse Z_O und Z_N sind am schwierigsten zu beherrschen und hängen sehr stark vom Standort ab. Folglich ist beispielsweise der Beckentyp aus Kapitel 2.3.1 Schlammteich im Tal (Talabriegelung) durch natürliche Zuflüsse aus Niederschlag und oberflächliche Zuflüsse (z.B. Bäche) am ehesten gefährdet und auf die Bemessung der Abzugseinrichtungen ist großer Wert zu legen. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

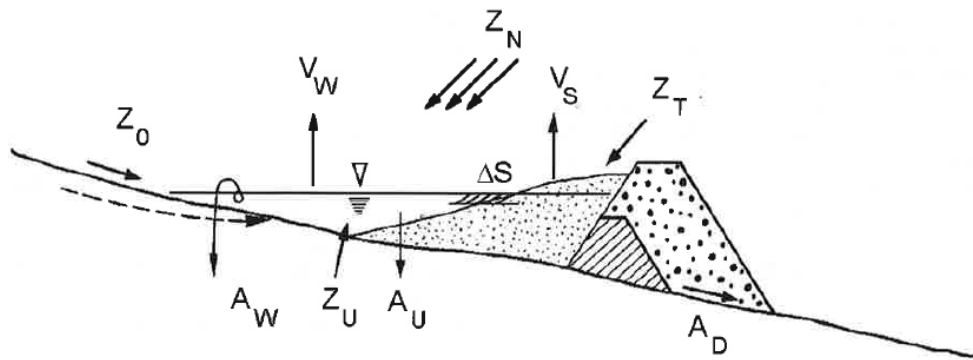


Abb. 17 Schematischer Wasserhaushalt eines Schlammteiches (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- Z_O Zufluss von der Oberfläche
- Z_U Zufluss aus dem Untergrund
- Z_N Zufluss aus Niederschlag auf die Fläche des Schlammteiches
- Z_T Zufluss aus Trübeeinspülung
- ΔS Veränderung der Wasserspeicherung im Schlammteich (freies Wasser und Porenwasser)
- A_D Ausfluss infolge Sickerung durch den Absperrdamm
- A_W Ausfluss infolge Klarwasserabzug
- A_U Ausfluss infolge Sickerung in den Beckenuntergrund
- V_W Verdunstung von der freien Wasseroberfläche
- V_S Verdunstung von der Oberfläche des Spülstrandes

Für die Bemessung der Hochwasserentlastungsanlage ist das Gefahrenpotential, die Bauweise des Absperrbauwerkes und ein mögliches Gefahrenpotential der Unterlieger zu beachten. (DIN 19700-15,2004) Für Schlammteiche mit einem erhöhten Gefahrenpotential sollte neben der Ermittlung der extremen Hochwasserzuflüsse auch eine Abschätzung für die im Gebiet des Schlammteiches maximalen Niederschläge durchgeführt werden. Für die in der Schemaskizze dargestellten Zu- und Abflüsse muss je nach örtlichen und technischen Gegebenheiten und der Zustandsphase des Schlammteiches eine Bilanzberechnung des Wasserhaushaltes durchgeführt werden. Die verschiedenen Komponenten können wie folgt als Bilanz geschrieben werden.

$$Z_T + Z_O + Z_N + Z_U = A_W + A_U + A_D + V_W + V_S \pm \Delta S \quad (1)$$

Damit muss sichergestellt werden, dass unter vorhersehbaren Einflüssen die Tragsicherheit des Absperrbauwerkes nicht beeinträchtigt wird. Bei Schlammteichen mit einem Spülstrand darf kein außerplanmäßiger Überstau des Spülstrandes erfolgen. Auf den Anstieg von Sickerlinien und Porenwasserüberdrücken ist auch zu achten.

„Der Freiwasserabzug darf beim Nachweis der Hochwasserentlastung nicht berücksichtigt werden.“⁶,

In der DIN 19700-15 Stauanlagen - Sedimentationsbecken wird in folgende drei Fälle unterschieden:

- Schlammteiche ohne natürliche Zuflüsse
- Schlammteiche mit Vorbeileitung natürlicher Zuflüsse
- Schlammteiche mit natürlichen Zuflüssen

2.5.1 Zuflüsse in Betrieb befindlicher Schlammteiche

In der Abb. 18, Abb. 19 und Abb. 20 sind die Hauptkomponenten des Wasserhaushaltes bezogen auf die drei Beckentypen Schlammteich im Tal (Talabriegelung), Schlammteich am Hang (Hufeisendamm), Schlammteich im ebenen Gelände (Ringdamm) für in Betrieb befindliche Anlagen dargestellt. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

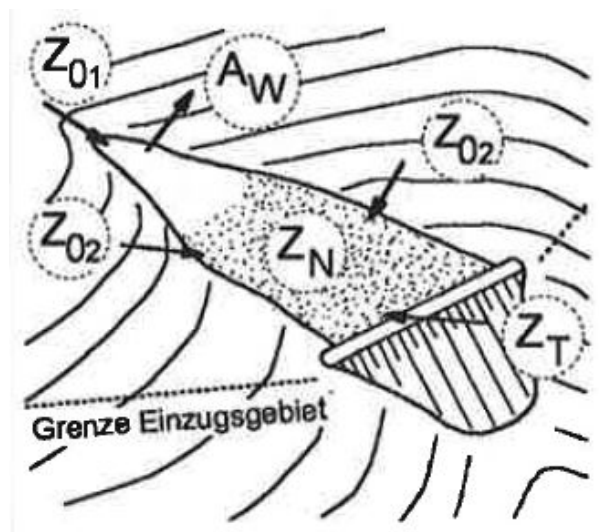


Abb. 18 Talabriegelung (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- Z_O Zufluss von der Oberfläche
- Z_N Zufluss aus Niederschlag auf die Fläche des Schlammteiches
- Z_T Zufluss aus Trübeeinspülung
- A_W Ausfluss infolge Klarwasserabzug

⁶ (DIN 19700-15, Sedimentationsbecken, 2004); S.6

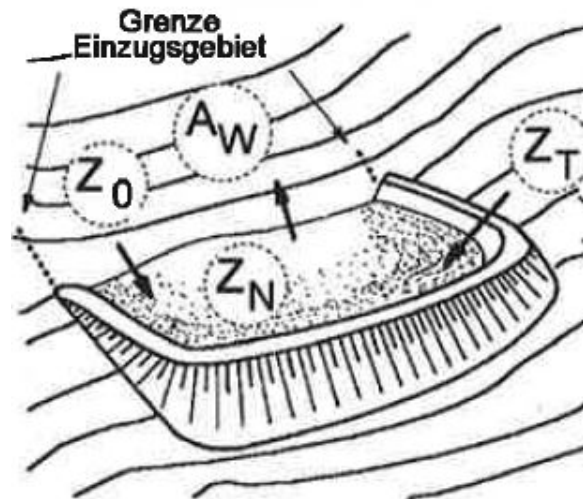


Abb. 19 Hufeisendamm (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- Z_0 Zufluss von der Oberfläche
- Z_N Zufluss aus Niederschlag auf die Fläche des Schlammteiches
- Z_T Zufluss aus Trübeeinspülung
- A_W Ausfluss infolge Klarwasserabzug

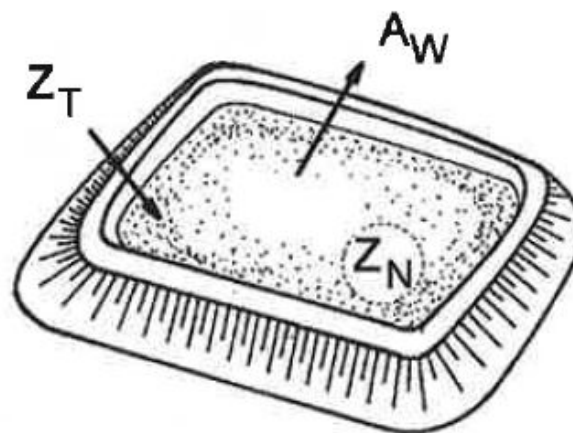


Abb. 20 Ringdamm (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- Z_N Zufluss aus Niederschlag auf die Fläche des Schlammteiches
- Z_T Zufluss aus Trübeeinspülung
- A_W Ausfluss infolge Klarwasserabzug

2.5.2 Zuflüsse außer Betrieb befindlicher Schlammteiche

Werden Schlammteiche außer Betrieb genommen, müssen sie je nach Erfordernissen in einen Zustand versetzt werden in dem sie sich auf Dauer selbst überlassen werden können. Der übliche Zweck der Trübeinspülung und des Freiwasserabzugs entfallen, jedoch die natürlichen Zuflüsse aus Niederschlag und Oberflächenwässern (z.B. Bächen) bleiben erhalten und müssen gefahrlos abgeleitet werden. Die erforderlichen Wasserableitungseinrichtungen für Schlammteiche außer Betrieb sollten wartungsfrei und dauerhaft sein, sodass auch diese Bauwerke weitestgehend sich selbst überlassen werden können. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.6 Zusammensetzung der Spültrübe

Die durch die Spültrübe eingeleiteten Feststoffe können nach chemischen und mineralogischen Gesichtspunkten betrachtet werden. Je nach Art der Spültrübe können die wichtigsten zu erwartenden Stoffgruppen in nicht lösliche mineralische Feststoffe, chemisch lösliche Inhaltsstoffe und radioaktiv und toxische Inhaltsstoffe eingeteilt werden. Maßgebend für das Gefährdungspotenzial der Spültrübe und darin enthaltenen Feststoffen ist die chemische Zusammensetzung. Für eine genaue chemische Bewertung der Spültrübe muss eine detaillierte chemische Analyse durchgeführt werden, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird. In den meisten Fällen liegt ein Ausgangsmaterial mit natürlichen mineralischen Feststoffen in der Form von Gesteinsaufbereitungsrückständen vor. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Die Korngrößenverteilung der Feststoffe in der Spültrübe ist ein wichtiger physikalischer Faktor, der das Sedimentationsverhalten sehr stark beeinflusst. Je nach Ausgangsmaterial und Betriebsweise variiert die Korngrößenverteilung in der Spültrübe und kann sich auch mit der Zeit ändern. Ein entscheidender Punkt, der den Sedimentationsvorgang beeinflusst, ist die Einspültechnik der Spültrübe. Die Mehrheit der Feststoffe in der Spültrübe bewegt sich überwiegend in einem Korngrößenbereich von Ton, Schluff, bis Sand. Aus Bodenmechanischer Sicht weisen die ungünstigsten Eigenschaften hinsichtlich Scherfestigkeit und Tragfähigkeit erwartungsgemäß tonige Sedimente geringer Konsistenz auf. Infolge ihrer feinkörnigen Fraktionen konsolidieren sie signifikant langsamer. Die nachfolgende Aufzählung zeigt eine generelle Charakterisierung der Eigenschaften von Aufbereitungsrückständen in der Spültrübe. (ICOLD/CIGB Bulletin 106, 1996)

- hoher Wassergehalt
- geringe bis mäßige Durchlässigkeit
- geringe Plastizität
- geringe bis mäßige Scherfestigkeit

Die folgende Abb. 21 zeigt ein tendenzielles Verhalten wichtiger Bodenphysikalischer Parameter des Sedimentkörpers in Relation zur Entfernung vom Ort der Einspülstelle. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

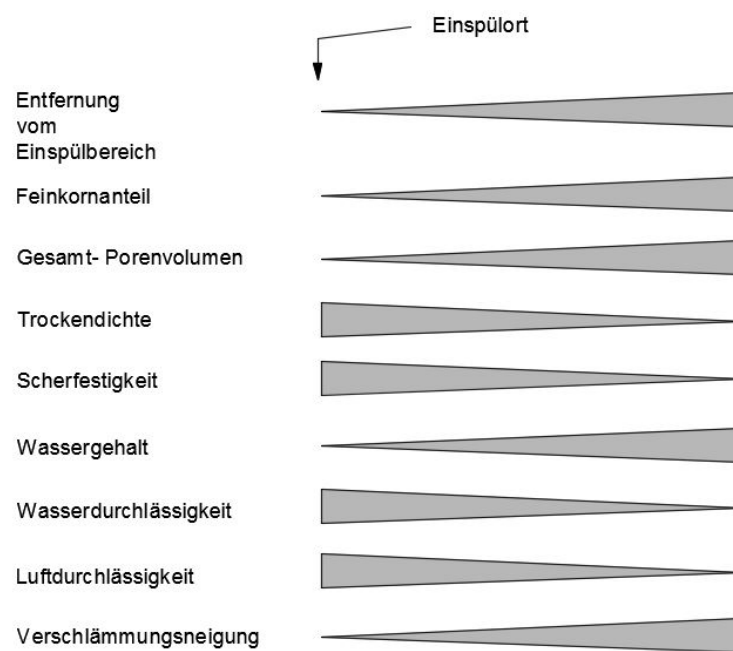


Abb. 21 Tendenzielles Verhalten bodenphysikalischer Parameter der Spültrübe (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.7 Betriebseinrichtungen

Die notwendigen Betriebseinrichtungen für Schlammteiche können in vier Gruppen eingeteilt werden.

1. Spüleinrichtungen für Spültrübe

- Mehrbeckenbetriebsweise
- Einzelbeckenbetriebsweise
- Kontinuierliche Einspülung
- Diskontinuierliche Einspülung
- Örtlich konzentrierte Einspülung (single point discharge,)
- Linienhafte Einspülung (spigotting)

Die Wahl der Spüleinrichtung hat einen beachtlichen Einfluss auf die Standsicherheit des Absperrbauwerkes. Eine linienhafte Einspülung von der Dammkrone aus, beeinflusst den Aufbau des Spülstrandes im Vergleich zu einer örtlich konzentrierten Einspülung in positiver Hinsicht. Das vorrangige Ziel liegt darin, dass ein möglichst breiter und grobkörniger Spülstrand entsteht (siehe dafür Kapitel 2.4.2 Praxisnahe Bauweisen für Absperrbauwerke). (U.S. Environmental Protection Agency, Technical Report, 1994)



Abb. 22 Beispiel für eine örtlich konzentrierte Einspülung (single point discharge)

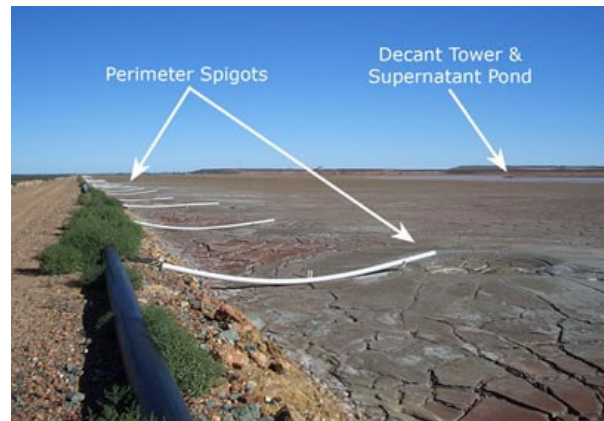


Abb. 23 Beispiel für eine Linienhafte Einspülung (spigotting)

2. Entnahmeanlagen (Wasserabzug) für Freiwasser (Klarwasser)

Die Abführung des Freiwassers ist gemäß DIN 19700-15 Stauanlagen - Sedimentationsbecken so zu gestalten dass die Sicherheit des Schlammteiches unter vorhersehbaren Bedingungen gewährleistet ist. Das Bauwerk für die Entnahmeanlagen besteht in der Regel aus einer Grundleitung und Schacht- oder Mönchbauwerken die den Wasserabzug übernehmen. Die Entnahmeanlagen sind bei im Betrieb befindlichen Anlagen vor Verklausung und sonstigem Ausfall zu schützen. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

3. Entlastungsanlagen für Fremdwässer

Unter Entlastungsanlagen für Fremdwässer sind Umleitungen von natürlichen Gewässern, die mit dem Bau der Anlage in ihrem natürlichen Verlauf gestört wurden sowie Um- oder Ableitungen von Hangwässern gemeint.

Je nach Erfordernis werden die Fremdwasserzuflüsse wie Niederschlag auf die Beckenoberfläche und oberflächliche Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet mit der Entnahmestelle für das Freiwasser abgeführt. Für den Zufluss von Oberflächenwasser aus Niederschlag und eventuellen Zuflüssen aus Bächen im unmittelbaren Einzugsgebiet wird die Ausbildung von Umleitungssystemen im freien Gelände empfohlen um Verdolungen⁷ möglichst zu vermeiden. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

⁷ Als Dole bezeichnet man einen Durchlass zur Durchführung kleiner Wasserläufe durch Dämme.

4. Sonstige Betriebseinrichtungen

Unter sonstige Betriebseinrichtungen fallen z.B. Zykclone zum Aufbereiten der Spültrübe und chemische und physikalische Aufbereitungsanlagen für das Freiwasser (Klarwasser).

2.8 Mögliche Versagensarten bei Schlammteichen

Unter möglichen Versagensarten von Schlammteichen versteht man in erster Linie unkontrolliertes Austreten von Wasser oder Spültrübe aus oder über das Absperrbauwerk. Einen großen Einfluss auf mögliche Versagensarten hat die jeweilige Betriebsphase in der sich der Schlammteich befindet. Die Randbedingungen ändern sich sehr stark wenn Schlammteiche stillgelegt, außer Betrieb genommen oder später dann endgültig zur Langzeitverwahrung im Idealfall wieder in die Natur eingegliedert werden. Während der Betriebsphase sind Schlammteiche jedoch im Normalfall als Stauanlagen zu betrachten und hinsichtlich ihrer Standsicherheit auch so auszulegen und zu berechnen. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Für die rechnerische Standsicherheit wichtige Punkte sind die geometrische Abgrenzung und Identifikation der vorhandenen Zonen von Sediment und eingebauten Fremdmaterial im Dammbauwerk. Geotechnische Kennwerte für die einzelnen Materialien sind in den meisten Fällen schwer festzulegen und müssen entweder aus Laborversuchen, in situ Versuchen oder oftmals notgedrungen mit ausreichender Sicherheit versehenen Annahmen bestimmt werden.

Die möglichen Versagensarten von Schlammteichen werden im Folgenden in zwei Bereiche unterteilt. Das erste sind festigkeitsbedingte Versagensarten (Scherfestigkeitsüberschreitung) und das andere sind hydraulisch bedingte Versagensarten. (EN 1997-2)

2.8.1 Festigkeitsbedingte Versagensarten (Scherfestigkeitsüberschreitung)

Für die Nachweisführung der Standsicherheit von Schlammteichen sind, wie bei herkömmlichen Staudämmen, die zum Aufstauen von Wasser dienen, alle denkbaren erdstatischen Versagensmechanismen zu überprüfen. Dies umfasst die in den folgenden Abbildungen dargestellten Versagensmechanismen.

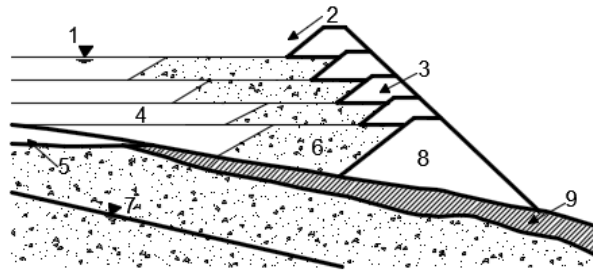


Abb. 24 Übersichtsschnitt Dammaufbau Beispielhaft (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- 1 Freiwasser (Klarwasser)
- 2 Einspülung
- 3 Stufenweise Erhöhung (Randdämme)
- 4 Schlamm (Feinsediment)
- 5 Aushub
- 6 Sand (Grobsediment)
- 7 Grund-/ Bergwasserspiegel
- 8 Grunddamm
- 9 Decklehm

Gleiten in der Aufstandsebene (Gleitfläche im Auflager)

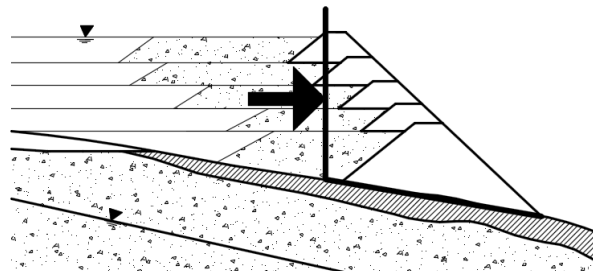


Abb. 25 Gleiten in der Aufstandsfläche (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Böschungsbruch (Gleitfläche im Absperrbauwerk)

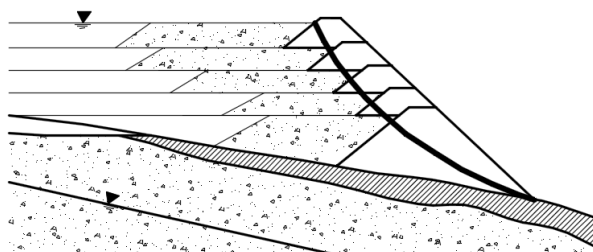


Abb. 26 Böschungsbruch (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Grundbruch (Gleitfläche mit Erfassung des Untergrundes)

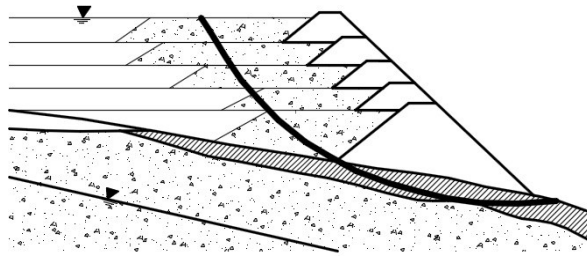


Abb. 27 Grundbruch (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Gleiten parallel zur Böschung (Gleitfläche parallel zur luftseitigen Böschung)

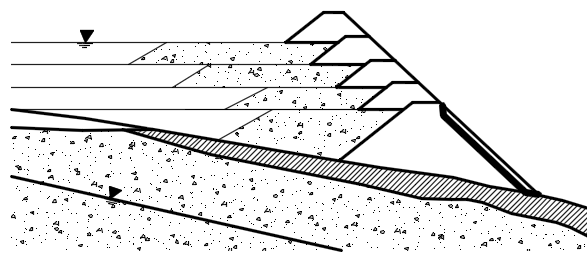


Abb. 28 Gleiten parallel zur Böschung (Dammbau, Bodenmechanik und Grundbau VA, WS 2014/15)

Spreizen in der Aufstandsfläche (örtliche Standsicherheit am Böschungsfuß)

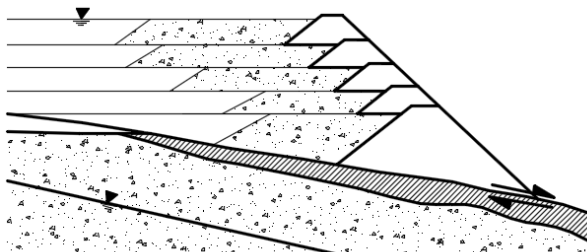


Abb. 29 Spreizen in der Aufstandsfläche (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Eine Besonderheit für Schlammteiche liegt im Nachweis der Standsicherheit der Erhöhungsstufen (Randdämme), sofern die Bauweise so gewählt wurde, dass die Randdämme auf den jungen Sedimenten des Spülstrandes aufgesetzt werden. Dieser Nachweis der Standsicherheit spielt während der Betriebsphase und Bauphase des Schlammteichs eine Rolle. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Standicherheit der Randdämme

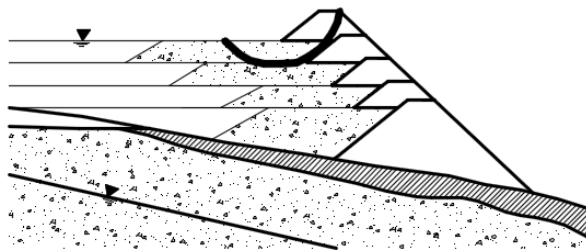


Abb. 30 Standicherheit der Randdämme (ATV-DVWK-M 503, 2001)

2.8.2 Hydraulisch bedingte Versagensarten

Hydraulisch bedingte Versagensarten für Dämme von Schlammteichen können grob in drei Bereiche eingeteilt werden:

- Aufschwimmen
- Hydraulischer Grundbruch
- Erosion

In den folgenden Seiten werden die einzelnen Versagensarten genauer beschrieben.

Aufschwimmen

Aufschwimmen ist eine sehr stark von den Untergrundverhältnissen und hydrologischen Gegebenheiten abhängige Versagensart. Durch Wasserinfiltration aus dem Schlammteich selbst und dem jahreszeitlich wechselnden Grund- und Bergwasserspiegel kann es zu gespannten Grundwasserverhältnissen unterhalb der Dammaufstandsfläche kommen. Daraus kann ein Gleichgewichtsverlust des Bauwerks oder Baugrunds infolge von Auftrieb durch Wasserdruck resultieren.

„Aufschwimmen tritt ein, wenn der Porenwasserdruck unter einem Bauwerk oder einer wenig durchlässigen Bodenschicht größer ist als der mittlere Auflastdruck (durch das Bauwerk und/oder die darüber liegende Bodenschicht).“⁸

⁸ (ÖNORM EN 1997-1, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln, 2014-11-15); S.117

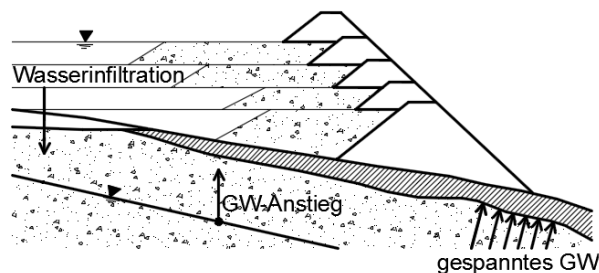


Abb. 31 Gespanntes Grundwasser (Aufschwimmen) (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Hydraulischer Grundbruch

„Ein hydraulischer Grundbruch tritt ein, wenn aufwärts gerichtete Strömungskräfte gegen das Eigengewicht des Bodens wirken, so dass die vertikale wirksame Spannung null wird. Die Bodenteilchen werden dann von der Vertikalströmung angehoben, so dass der Boden versagt.“⁹

Erosion

Unter Erosion versteht man im Allgemeinen eine Bewegung von Bodenpartikeln unter der Einwirkung einer Strömungskraft. Eine Erosion kann an der Oberfläche, an Kontaktebenen zweier Bodenschichten und innerhalb eines homogenen Bodenbereichs auftreten. Primär wird unterschieden in innere Erosion (Kontakt Erosion, Piping), Suffosion (Gegenteil von Kolmation), äußere Erosion und Oberflächenerosion (Überströmen).

Innere Erosion – Kontakterosion

Man unterscheidet in eine Auf- oder Abwärtsgerichtete- und eine Schichtparallele Kontakterosion. Eine Auf- oder Abwärtsgerichtete Kontakterosion entsteht bei einer nahezu orthogonal zu den Bodenschichten verlaufenden Strömung. Dabei werden feinkörnige Bodenteilchen in den Porenraum des unteren oder oberen gröberen Bodens getragen. Dadurch besteht die Gefahr der Hohlrumbildung und es kann zu einer anschließenden Sackung kommen. Eine schichtparallele Kontakterosion entsteht bei einer nahezu parallel zu den Bodenschichten verlaufenden Strömung. Dadurch werden feinkörnige Bodenteilchen im Bereich der Schichtgrenzen in den freien Porenraum grobkörniger Bodenschichten getragen. Demzufolge besteht auch bei der

⁹ (ÖNORM EN 1997-1, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln, 2014-11-15); S.117

schichtparallelen Kontaktrosion die Gefahr von Hohlraumbildung und damit verbundener anschließender Sackung.

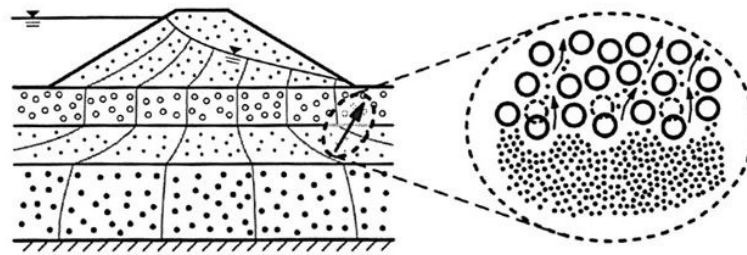


Abb. 32 Auf- oder Abwärtsgerichtete Kontaktrosion (Wittmann, 1980)

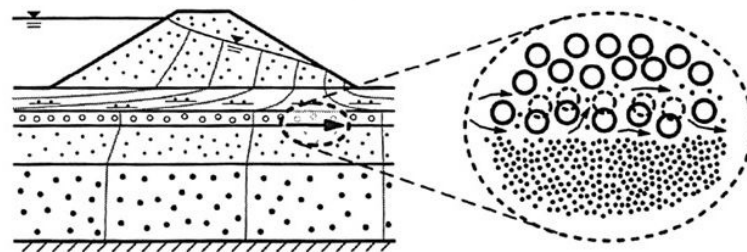


Abb. 33 Schichtparallele Kontaktrosion (Wittmann, 1980)

Innere Erosion - Piping (Erosionsgrundbruch, Fugenerosion)

Infolge von Piping entstehen röhrenartige Kanäle in oder unter Dammbauwerken. Am Anfang entspricht es einem hydraulischen Grundbruch (es entsteht eine Leckstelle an der Luftseite des Damms) und durch einen ausreichend hohen hydraulischen Gradienten werden zusätzlich Bodenpartikel ausgetragen. Durch das immer weiter strömende Wasser werden immer mehr Bodenpartikel ausgetragen und es bilden sich über die Zeit Röhren bis zur Wasserseite des Damms. Diese Röhrenbildung kann zum kompletten Versagen des Absperrbauwerks führen. Durch den Vorgang der Röhrenbildung von der Luftseite des Damms bis zur Wasserseite wird das Piping auch noch als rückschreitende Erosion bezeichnet.

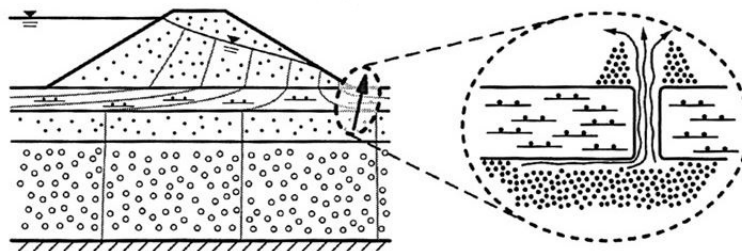


Abb. 34 Piping (Wittmann, 1980)

Innere Erosion – Suffosion

Eine Suffosion findet bei Böden mit fehlenden Zwischenkorngrößen bzw. bei ungleichförmiger Korngrößenverteilung statt. Dabei werden die feinkörnigen Partikel durch die Strömung des Wassers ausgetragen bis ein tragendes grobkörniges Korngerüst übrig bleibt und somit die Gefahr eines Kollapses der Bodenschicht gegeben ist. Das Gegenteil zu einer Suffosion ist die Kolmation. Dabei werden feine Bodenteilchen z.B. Schwebstoffe durch die Strömung von Wasser in eine angrenzende Bodenschicht eingetragen.

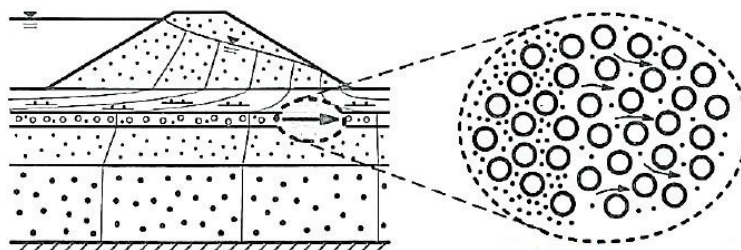


Abb. 35 Suffosion (Wittmann, 1980)

Speziell bei Schlammteichen kann es durch das Versickern des Wassers an der Oberfläche zu inneren Erosionserscheinungen des Materials kommen. Das kann auftreten, wenn das Drainage System zum Entwässern des Schlammteiches nicht ausreichend dimensioniert wurde oder durch z.B. unvorhergesehene Setzungen beschädigt wurde. Die Gefährdung hinsichtlich Innerer Erosion bei bestehenden Schlammteichen ist nur sehr schwer zu Erkunden. Die wohl einfachste und gängigste Methode ist es den Abfluss der Drainagen zu beobachten und in definierten Zeitabständen zu messen. Stark verfärbtes und schlammiges Sickerwasser können Anzeichen für Innere Erosion sein. Ein starker Anstieg in der Menge des

Sickerwassers ohne vorherige starke Niederschlagsereignisse kann auch ein Signal für Innere Erosion sein. Die meisten bestehenden Schlammteiche haben keine Messeinrichtungen um das Sickerwasser zu messen und zu kontrollieren. Daher sollten Vorkehrungen getroffen werden, um Sickerwasser in Kanälen, Rohren oder Schächten zu sammeln, um dort die Farbe und Abflussmenge kontrollieren zu können. (ICOLD/CIGB Bulletin 103, 1996), (ICOLD/CIGB Bulletin 106, 1996)

Äußere Erosion

Äußere Erosion kann durch die Einwirkung von Wind und Wasser entstehen und kann die Stabilität von Absperrbauwerken erheblich beeinträchtigen. Es kann dadurch entweder direkt die Geometrie des Dammes verändert werden oder das erodierte Material kann beispielsweise Drainagen blockieren und somit den Abfluss von Sickerwasser verhindern. Äußere Erosion durch Wind kann bei Schlammteichen eine große Rolle spielen. Durch die großen freien Flächen mit feinkörnigem Material an der Luftseite des Dammes oder auch im Spülstrandbereich ist es möglich, dass Wind die Geometrie eines Schlammteiches erheblich verändert. Äußere Erosion durch Wasser kann durch unvorhersehbare starke Niederschlagsereignisse entstehen. Dabei können tiefe Erosionsrinnen an der Luftseite des Dammkörpers entstehen. Wird ein Schlammteich ohne Spülstrand gebaut (siehe 2.4.2 Praxisnahe Bauweisen für Absperrbauwerke) ist darauf zu achten, dass die wasserseitige Dammböschung gegen Erosion durch Wellenschlag ausreichend gesichert ist. (ICOLD/CIGB Bulletin 103, 1996), (ICOLD/CIGB Bulletin 106, 1996)

Oberflächenerosion (Überströmen)

Eine der häufigsten Versagensart von Schlammteichen ist das Überströmen des Absperrbauwerkes und das damit verbundene Abfließen des überströmten Wassers an der luftseitigen Dammböschung. Durch unzureichende Dimensionierung der hydraulischen Einrichtungen (Hochwasserentlastung, Klarwasserabzug) oder unvorhergesehene Niederschlagsereignisse kann es zum Verlust des Freiboards kommen. Die im Kapitel 2.4 Absperrbauwerke beschriebenen Bauweisen für Schlammteiche weisen daraufhin, dass die meisten Dämme aus stark erosionsgefährdeten Materialien gebaut werden. Kommt es dabei zu einem Überströmen der Dammkrone können bei ungesicherten, luftseitigen Dammböschungen innerhalb kürzester Zeit enorme Erosionsrinnen entstehen, die zum Versagen des Bauwerkes innerhalb von Minuten führen können. (ICOLD/CIGB Bulletin 106, 1996)

3 Standsicherheitsuntersuchungen

3.1 Vorgehensweise bei der Standsicherheitsbeurteilung von Schlammteichen

Das folgende Kapitel soll als grober Leitfaden dienen, wie bei einer Standsicherheitsbeurteilung von bestehenden Schlammteichen vorgegangen werden kann. Methodisch sollte man sich schrittweise an die Standsicherheitsbeurteilung heranarbeiten. Die Abb. 36 zeigt ein Ablaufschema wie eine Sicherheitsbeurteilung durchgeführt werden kann.

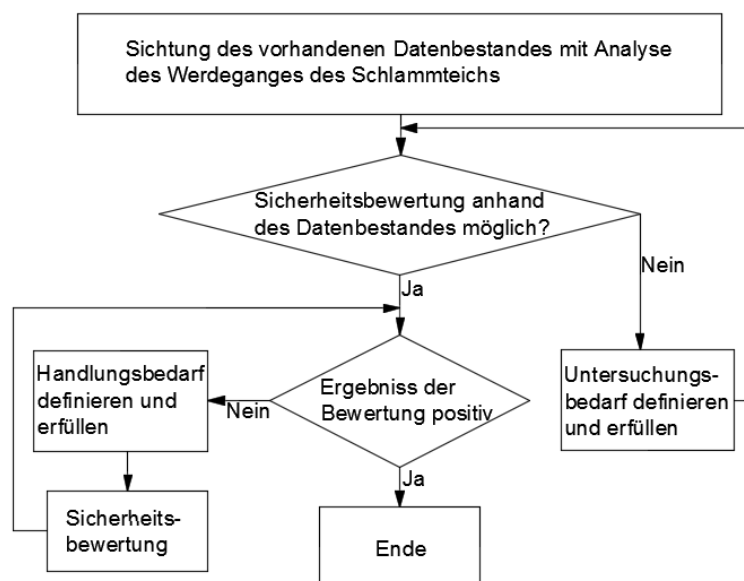


Abb. 36 Methodik für die Standsicherheitsbeurteilung eines Schlammteichs (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Nach ausführlicher Sichtung des vorhandenen Datenbestandes mit einer Analyse des Werdeganges der Anlage steht man vor der Entscheidung, ob eine Standsicherheitsbewertung anhand des Datenbestandes möglich ist oder nicht. Ist dies nicht möglich, müssen daraufhin weitere erforderliche Untersuchungen definiert werden. Ist nach Abschluss der zusätzlichen Untersuchungen eine ausreichende Bewertungsgrundlage vorhanden, hängt die weitere Vorgehensweise vom Ergebnis der Standsicherheitsbeurteilung ab. Fällt die Standsicherheitsbeurteilung positiv aus, kann das Projekt abgeschlossen werden. Fällt die Beurteilung jedoch negativ aus, muss aus den durchgeführten Untersuchungen der Handlungsbedarf für die Ertüchtigung der Anlage abgeleitet und definiert werden. Sanierungsmaßnahmen können je nach Ausmaß mehr oder weniger dringend sein. Es ist sehr stark davon

abhängig, ob Gefahr im Verzug ist oder ob Zeit für eine ausführliche Planung der Sanierungsmaßnahmen bleibt. Die entsprechenden Maßnahmen die ausgearbeitet wurden sind durchzuführen und anschließend ist die Standsicherheit erneut zu bewerten. Dabei ist zu überprüfen ob womöglich noch weitere Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind oder ob die Anlage nun als standsicher beurteilt werden kann. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Zu den wichtigsten Eingangsgrößen zur Standsicherheitsbeurteilung von Schlammteichen zählen folgende Punkte.

- der Porenwasserdruck infolge nicht abgeschlossener Konsolidierung im abgesetzten Schlammteichmaterial
- die Lage der Sickerlinie im Schlammteichmaterial und im Absperrbauwerk sowie die Porenwasserdruckverteilung unterhalb der Sickerlinie (hydrostatischer Porenwasserdruckverlauf oder nicht)
- das Verflüssigungspotential des Schlammteichmaterials bei dynamischer Beanspruchung

Diese drei Punkte sind bei einer Standsicherheitsbeurteilung von Schlammteichen hinreichend zu untersuchen und mit auf der sicheren Seite liegenden Annahmen in Ansatz zu bringen. (DIN 19700-15, 2004)

3.2 Bodenverflüssigungspotential (Erdbeben)

Die Ermittlung der Stabilität von Schlammteichen und deren Absperrbauwerken gegen Erdbebenbelastungen ist in seismisch aktiven Zonen von entscheidender Bedeutung. Während der Lebensdauer eines Schlammteichs können einige grundlegende Probleme infolge von Erdbebenbelastungen auftreten. Die durch die Aufbereitungsrückstände entstandene Spültrübe umfasst im Normalfall Korngrößenfraktionen von Ton, Schluff bis Sand. Der lose Schlamm kann je nach Kornzusammensetzung zur Verflüssigung aufgrund von dynamischen Belastungen neigen. Bodenverflüssigung tritt dann auf, wenn der Scherwiderstand eines Bodens so weit verringert wird, dass der Boden anfängt sich wie eine Flüssigkeit zu verhalten. Das geschieht beispielsweise bei gesättigten locker gelagerten Bodenteilchen, die durch eine äußere dynamische Belastung (z.B. Erdbeben) belastet werden. Dabei tendiert der Boden dazu, sein Volumen zu verringern. Zwischen den Bodenpartikeln besteht im Ausgangszustand ein Korn zu Korn Kontakt. Durch eine äußere Erregung (z.B.

Erdbeben) werden die Bodenpartikel angeregt ihre bestehende Lagerung zu verändern. Ist der Boden vollständig gesättigt, sind alle freien Porenräume mit Wasser gefüllt. Kann durch die Umlagerung der Bodenteilchen das Porenwasser durch unzureichende Drainagemöglichkeiten nicht schnell genug entweichen, entstehen Porenwasserüberdrücke und die effektive Korn zu Korn Spannung geht verloren. Dies kann soweit führen das nahezu alle Bodenpartikel ihren Korn zu Korn Kontakt verlieren und der Scherwiderstand des Bodens gegen null geht. Dieses Phänomen wird als Bodenverflüssigung bezeichnet.

Um das Verflüssigungspotential von Böden überprüfen zu können gibt es im ersten Schritt einige einfache Ausschlussverfahren. Für genauere Betrachtungsweisen gibt es analytische Berechnungsmethoden, auf die in dieser Arbeit aber nicht näher eingegangen wird. (Siehe dafür beispielsweise Masterarbeit Lisa Plank BSc. „Ein Vergleich von analytischen Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Bodenverflüssigungspotentials“ TU Graz 2015, Institut für Bodenmechanik und Grundbau). Im Folgenden werden drei einfache Ausschlussverfahren um das Verflüssigungspotential von Böden feststellen zu können angeführt.

Das Bodenverflüssigungspotential kann in einem ersten Schritt anhand der Korngrößenverteilung abgeschätzt werden. Dafür sind im Sieblijendiagramm zwei verflüssigungsempfindliche Bereiche eingetragen. (KTA 2201.2,2012) Unterschieden wird in Z1 verflüssigungsempfindlich und Z2 stark verflüssigungsempfindlich. Die Bereiche links und rechts der markierten Flächen gelten als nicht verflüssigungsempfindlich. Kommt der wesentliche Teil einer Korngrößenverteilungslinie innerhalb der markierten Bereiche zu liegen gilt der Boden als verflüssigungsempfindlich.

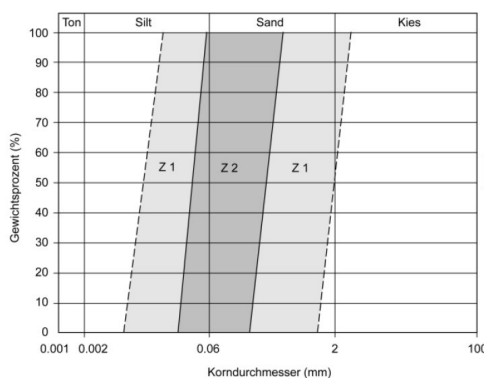


Abb. 37 Sieblijendiagramm mit eingezeichneten verflüssigungsempfindlichen Bereichen (KTA 2201.2,2012)

Ein weiteres Verfahren um das Verflüssigungspotential feststellen zu können ist das Modified Chinese Criteria. Es teilt das Verflüssigungspotential nach dem Tongehalt ($d < 0,002$ mm) und der Fließgrenze w_L des vorhandenen Bodens ein.

Tab. 1 Verflüssigungsanfälligkeit feinkörniger Böden nach Andrews und Martin (2000)

Tongehalt [%]	Fließgrenze $w_L < 32,0\%$	Fließgrenze $w_L > 32,0\%$
< 10,0	Verflüssigungsgefährdet	weitere Studien benötigt
$\geq 10,0$	weitere Studien benötigt	nicht Verflüssigungsgefährdet

Ein anderes Ausschlussverfahren basiert auf der Einteilung nach der Fließgrenze w_L und der Plastizitätszahl I_p des vorhandenen Bodens.

Tab. 2 Verflüssigungsempfindlichkeit nach Polito und Martin (2001)

Fließgrenze w_L [%]	Plastizitätszahl I_p [-]	Verflüssigungspotential
< 25,0	< 7,0	Verflüssigungsanfällig
$25,0 < w_L < 35,0$	$7,0 < I_p < 10,0$	eventuell Verflüssigungsanfällig
$35,0 < w_L < 55,0$	$10,0 < I_p < 15,0$	Anfällig für zyklische Mobilität

Um eine ausreichende Standsicherheit gegen Einwirkungen aus Erdbebenbelastungen zu gewährleisten, sind folgende drei Punkte über die Lebensdauer eines Schlammeichs ständig zu kontrollieren. Die Lagerungsdichte des Materials das zum Bau des Dammkörpers verwendet wurde. Der wohl wichtigste Punkt für die generelle Standsicherheit von Schlammeichen, nicht nur in Hinsicht auf Erdbeben, ist die Erkundung der Lage der Sickerlinie und eventuell der Porenwasserdruckverteilung über die Tiefe und somit der mit Wasser gesättigten Zone im Schlammeich. Durch regelmäßige Begehungen des Bauwerks soll auch immer wieder die luftseitige Böschung auf Wasseraustritte und Austrag von Schlammeichmaterial untersucht werden. Auch wenn alle genannten Überwachungsmaßnahmen eingehalten werden, sollte speziell in Gebieten mit höherer seismischer Aktivität darauf geachtet werden, dass das Klarwasser (Freiwasser) des Schlammeichs soweit wie möglich vom Dammbauwerk entfernt liegt und auf ein Minimum reduziert wird. (ICOLD/CIGB Bulletin 74, 1989)

Im Kapitel 6 Fallstudie wird das Verflüssigungspotential des vorhandenen Schlammeichmaterials anhand der oben angeführten Verfahren untersucht. Des Weiteren wird der in der Fallstudie betrachtete Schlammeich mittels der pseudostatischen Methode hinsichtlich seiner Erdbebenstandsicherheit berechnet.

4 Langzeitverwahrung außer Betrieb genommener Schlammteiche

Schlammteiche durchlaufen in ihrer Entstehung und Entwicklung unterschiedliche Phasen, die grob in folgende fünf eingeteilt werden können.

- Planung und Design
- Bau
- Betrieb
- Außerbetriebnahme (Stand sicherheitsüberprüfung, Sanierung)
- Langzeitverwahrung

Die ersten drei Phasen sind durch den meist über Jahre andauernden schrittweisen Aufbau der Anlagen zeitlich sehr schwer voneinander zu trennen. Sie überschneiden sich immer wieder während des Betriebs eines Schlammteichs. Nach Außerbetriebnahme (es wird keine Spültrübe mehr eingeleitet) dient die Anlage ihrem ursprünglichen Zweck nicht mehr und muss in einen angemessenen Zustand für die Langzeitverwahrung übergeführt werden. Das abschließende Ziel nach der Außerbetriebnahme einer Anlage muss es sein, den Schlammteich soweit zu sanieren und zu ertüchtigen, dass er weitestgehend sich selbst überlassen werden kann. Bei der Art der Langzeitverwahrung muss grob unterschieden werden, in abgelagertes Schlammteichmaterial mit toxischem oder sonst schadstoffbelastetem Inhalt oder abgelagertes Schlammteichmaterial mit inerten¹⁰ unbedenklichen Inhaltsstoffen. (ICOLD/CIGB Bulletin 106, 1996),

Die Langzeitverwahrung von Schlammteichen kann grob in zwei unterschiedliche Arten eingeteilt werden.

- trockene Verwahrung
- nasse Verwahrung

Bei der trockenen Verwahrung wird das Klarwasser gänzlich oder bis auf einen kleinen Restsee aus dem Schlammteich entfernt. Nachfolgend wird in den meisten Fällen die trocken gelegte Schlammteichoberfläche mit Material überdeckt und ist somit gegen Wind- und Wassererosion geschützt. Eine abschließende Humusschicht soll das

¹⁰ Als inert bezeichnet man Substanzen, die unter den jeweilig gegebenen Bedingungen mit potentiellen Reaktionspartnern wie z.B. Luft, Wasser, Edukte und Produkte einer Reaktion nicht oder nur in verschwindend geringem Maße reagieren.

Entstehen einer Vegetation ermöglichen. Aus bautechnischer Sicht können Probleme bei der Herstellung der Überdeckung des Schlammteichmaterials speziell in Bereichen des ehemaligen Klarwassers entstehen. Die Bereiche in denen das Klarwasser vorhanden war sind die Bereiche des Schlammteichs mit den feinsten Fraktionen der Spültrübe und daher ist die Befahrbarkeit der Schlammteichoberfläche ohne besondere Bauhilfsmaßnahmen im Normalfall nicht gegeben. In diesen Bereichen ist ein schonendes, schrittweises Vorgehen mit entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen für Personal und Gerät von besonderer Bedeutung.

Die Langzeitverwahrung außer Betrieb genommener Anlagen mittels nasser Verwahrung kommt nur in sehr seltenen Fällen zur Anwendung. Dabei wird die gesamte Schlammteichoberfläche dauerhaft mit Wasser überdeckt, um den Kontakt des Schlammteichmaterials mit Luftsauerstoff zu unterbinden. Das bietet einen Vorteil bei Schlammteichmaterialien die Inhaltsstoffe enthalten, die bei Oxidation Säuren bilden. Die ständige Überdeckung des Schlammteichmaterials mit Wasser kann einige Probleme in Hinblick auf die Langzeitverwahrung mit sich bringen (kein Spülstrand mehr vorhanden, Gefahr des Überströmens, Standsicherheit). Somit kommt die nasse Verwahrung für die oft vorherrschenden Verhältnisse so gut wie nie zum Einsatz.

Damit ist das Sicherungskonzept der trockenen Verwahrung gegenüber der nassen Verwahrung vorzuziehen und es werden im Folgenden zwei schematische Verwahrungskonzepte für Schlammteiche gezeigt.

Der wohl größte Einflussfaktor auf die Sicherheit eines Schlammteichs und somit auch für die Langzeitverwahrung ist das Gefahrenpotential der aufgestauten Spültrübe und des darin enthaltenen Wassers. Natürliche Zuflüsse auf die Schlammteichoberfläche müssen für die Langzeitverwahrung entweder am Schlammteich vorbeigeführt werden oder mittels Überwachungs- und Instandhaltungsarmen Anlagen abgeleitet werden. Die natürlichen Zuflüsse auf eine Schlammteichoberfläche sollten weitestgehend unterbunden werden. (ICOLD/CIGB Bulletin 103, 1996)

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen schematischen Schnitt für die Langzeitverwahrung eines Schlammteichs im Tal (Talabriegelung) oder am Hang (Hufeisendamm) mit nicht toxischen oder nicht schadstoffbelasteten Inhalten im Schlammteichmaterial.

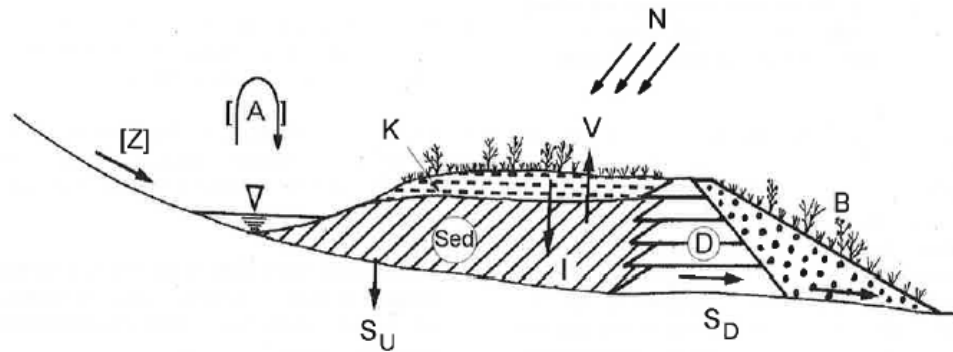


Abb. 38 schematischer Schnitt für die Langzeitverwahrung mit nicht schadstoffbelastetem Schlammteichmaterial (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Z	Zufluss, sofern nicht vorbeigeleitet
A	Ableitung der Zuflüsse, sofern nicht vorbeigeleitet
N	Niederschlag
V	Verdunstung
I	verbleibende Infiltration
Sed	Sediment
D	Damm
S_U, S_D	Absickerungen durch Untergrund
K	kulturfähiges Substrat (Überdeckung)
B	Bewuchs

Das zweite Konzept für die Langzeitverwahrung bezieht sich auf einen Schlammteich im ebenen Gelände mit einem Ringdamm. Der schematische Schnitt zeigt die Langzeitverwahrung eines Schlammteichs mit toxischen oder sonst bedenklichen lösungsfähigen Inhaltsstoffen im Schlammteichmaterial.

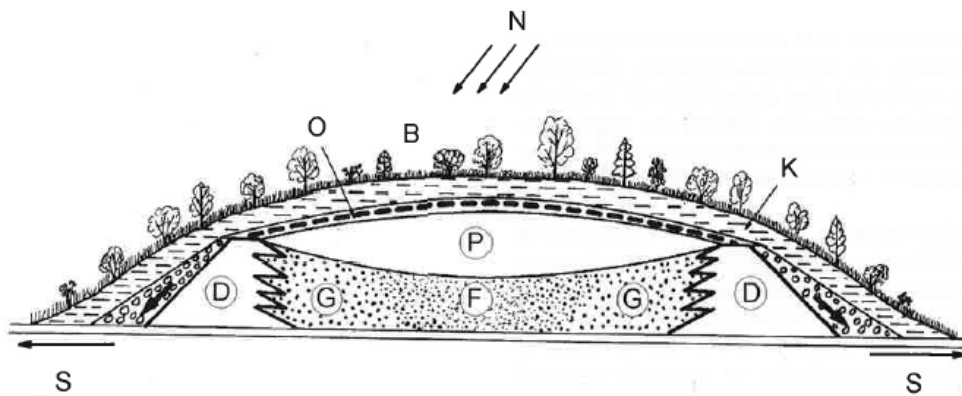


Abb. 39 schematischer Schnitt für die Langzeitverwahrung mit lösungsfähigen Inhaltsstoffen im Schlammteichmaterial (ATV-DVWK-M 503, 2001)

- D* Absperrbauwerke
- G* Grobsedimente
- F* Feinsedimente
- P* Profilierungsauftrag
- N* Niederschlag
- O* Oberflächenabdichtungssystem mit Flächen-Drän
- K* kulturfähiges Substrat
- S* Sickerwasserableitung
- B* Bewuchs

Für beide Darstellungen gilt die vorerst vollständige Entfernung des Klarwassers (Freiwasser) von der Schlammteichoberfläche. Die Entwässerung und Konsolidierung des Schlammteichmaterials muss soweit fortgeschritten sein, dass Überschüttungsarbeiten überhaupt möglich sind und sich die Setzungen der Überdeckung in Grenzen halten. Durchgeführte Standsicherheitsuntersuchungen des Absperrbauwerks nach Außerbetriebnahme der Anlage müssen positiv verlaufen sein um mit den Maßnahmen für die Langzeitverwahrung beginnen zu können. Oftmals kann es erforderlich sein, vor den Maßnahmen für die Langzeitverwahrung Konsolidierungshilfen einzubauen (z.B. Vertikaldränagen). Die Standsicherheitsnachweise der Anlage für die Bauzustände und nach Abschluss der Arbeiten (Endzustand) sind zu erbringen. (ATV-DVWK-M 503, 2001)

Ziel ist es Schlammteiche nach Außerbetriebnahme so umweltverträglich wie möglich wieder in die Umgebung einzugliedern, dass sie womöglich nach Jahren der Verwahrung in Vergessenheit geraten.

4.1 Monitoring von Schlammteichen

Die folgende Liste soll als Hilfe dienen, welche Faktoren erheblichen Einfluss auf die Standsicherheit von Schlammteichen haben. Die Punkte sollten im Laufe des Betriebs und für die im Normalfall nach Außerbetriebnahme anstehende Standsicherheitsbeurteilung überwacht und geprüft werden.

- Spülstrandbreite (sollte so groß wie möglich sein)
- Dammkrone muss immer höher liegen als der Freiwasserspiegel (ausreichendes Freibord - Überströmen)
- Position der Sickerlinie im Schlammteichmaterial und Absperrbauwerk sollte immer bekannt sein (tritt Sickerwasser irgendwo an der luftseitigen Dammböschung aus, wenn ja transportiert es Schlammteichmaterial mit)
- Porenwasserdrücke im Schlammteichmaterial
- Horizontale und vertikale Bewegungen des Absperrbauwerks (Inklinometer, geodätische Messpunkte)
- Regelmäßige Überprüfung der Verteilung und Schichtenbildung der abgesetzten Spültrübe (Korngrößenverteilungen, Zustandsgrenzen)
- Ermittlung der Scherparameter des Schlammteichmaterials für die verschiedenen Zonen der Spültrübe (Entfernung zu den Einspülstellen) um das Absetzverhalten zu überprüfen
- Erdbebensicherheit (dynamische Eigenschaften des Schlammteichmaterials – Verflüssigungspotential), (ICOLD/CIGB Bulletin 104, 1996)

Wird diese Liste grob eingehalten stehen nach Außerbetriebnahme eines Schlammteichs in Normalfall genügend Daten zur Verfügung um eine zutreffende Standsicherheitsbeurteilung durchführen zu können.

5 Baugrunderkundung

5.1 Allgemeines

Nach der im Kapitel 3 Standsicherheitsuntersuchungen beschriebenen groben Vorgehensweise bei Schlammteichen, soll in diesem Kapitel die Planung der dafür notwendigen Baugrunderkundung genauer beschrieben werden.

Unter Baugrunderkundung wird das Beschaffen von Information über den vorhandenen Baugrund und das Grundwasser verstanden. Am Anfang jeder Erkundung steht eine Vorstudie (Sichtung des vorhandenen Datenbestandes). Eine Vorstudie beinhaltet das Beschaffen und Auswerten von Unterlagen, Plänen, topografischen und geologischen Karten sowie eine Begehung des zu untersuchenden Projektgebiets vor Ort. Aufbauend auf die Grundlagenermittlung wird ein Erkundungsprogramm erstellt, welches die Art und den Umfang der durchzuführenden Erkundungsmethoden beschreibt. (Boley, 2012)

Die Eigenschaften des Untergrunds und der Grundwasserverhältnisse können nur stichprobenartig überprüft und erkundet werden. Ziel einer jeden Erkundung muss sein, alle relevanten Baugrundeigenschaften für die geplanten Baumaßnahmen zu erfassen, um daraus ein plausibles, überprüfbares und räumliches Baugrundmodell erstellen zu können. (Schmidt, 2006)

Die Aufschlussverfahren von Baugrunderkundungen können im Wesentlichen in zwei Gruppen eingeteilt werden. Es wird in direkte- und indirekte Aufschlüsse unterschieden. Der Vorteil von direkten Aufschlüssen liegt darin, dass der vorhandene Boden durch den Aufschluss direkt visuell besichtigt werden kann. Somit ist es möglich Art, Zusammensetzung, Zustand und Wasserverhältnisse der einzelnen Schichten aufzunehmen und direkt Proben für z.B. Laborversuche zu entnehmen. Bei indirekten Aufschlüssen handelt es sich vorwiegend um Sondierungen und geophysikalische Verfahren. Es können dann durch Korrelationen Rückschlüsse auf die vorherrschenden Baugrundbedingungen und das Grundwasser gemacht werden. In der Tab. 3 sind die gängigsten Aufschlussverfahren zusammengefasst. (Schmidt, 2006)

Tab. 3 Aufschlussverfahren (Schmidt, 2006)

Aufschlussverfahren	direkte Verfahren	indirekte Verfahren
	<ul style="list-style-type: none"> • Kartierung freier Oberflächen • Schürfe • Bohrungen • Untersuchungsstollen • Untersuchungsschächte 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftbildaufnahmen • Sondierungen (Ramm-, Druck-, Flügelsondierungen) • Geophysikalische Verfahren (Seismische, geoelektrische, radiometrische, magnetische Verfahren)

5.2 Regelwerke

Im Allgemeinen stehen zur Ausarbeitung von Baugrunderkundungsprogrammen Normen, Richtlinien und Fachliteratur zur Verfügung. Die folgende Aufzählung soll einen Überblick über die relevanten Normen geben.

- EN 1997-2: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds
- DIN 4020: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke
- EN ISO 22476: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen (Teil 1-12)
- DIN 4094: Baugrund Felduntersuchungen (Teil 1-5)

5.3 Planung von Baugrunderkundungen

Baugrunduntersuchungen erfolgen im Normalfall etappenweise. Nach Abschluss der Vorstudie mit durchgeführter Ortsbegehung kann die Baugrunderkundung in folgende drei Etappen eingeteilt werden.

Voruntersuchung

Im Zuge der Voruntersuchung soll festgestellt werden, ob die geplante Baumaßnahme im Hinblick auf die Baugrundverhältnisse an der vorgesehenen Stelle überhaupt mit vertretbarem Aufwand durchzuführen ist. Der Umfang einer Vorerkundung hängt von den verfügbaren Informationen aus der Vorstudie ab. Im Normalfall umfasst die Vorerkundung ein weitmaschiges Untersuchungsnetz sowie stichprobenartige Bestimmungen von Bodeneigenschaften. (Witt, 2008), (Kolymbas, 1998)

Hauptuntersuchung

Die Hauptuntersuchung umfasst die Durchführung von Schürfen, Bohrungen, Sondierungen zur Ermittlung des Schichtenverlaufs und aller geotechnisch und geologisch relevanten Eigenschaften des Bodens. Im Zuge von Schürfen, Bohrungen und Sondierungen können auch Bodenproben für Laborversuche entnommen werden, die zur Bestimmung von geotechnischen Kenngrößen dienen. Aufgrund der Ergebnisse aus den Hauptuntersuchungen muss ein nachvollziehbares Baugrundmodell entwickelt werden können. (Witt, 2008), (Kolymbas, 1998)

Kontrollmessungen und baubegleitende Messungen

Durch Kontrollmessungen und baubegleitende Messungen soll die Übereinstimmung mit den getroffenen Vorhersagen aus der Voruntersuchung und Hauptuntersuchung überprüft werden. Die zeitliche Entwicklung von Baugrundverhältnissen während der Baumaßnahme spielt dabei oft eine wesentliche Rolle. (Witt, 2008), (Kolymbas, 1998)

Nach Abschluss der Vorstudie und vor dem Beginn der eigentlichen Planung der Baugrunderkundung sollte das Bauwerk bereits einer der drei geotechnischen Kategorien vorläufig zugeordnet werden. Aufgrund der Zuordnung werden die Mindestanforderungen an Umfang und Qualität der durchzuführenden geotechnischen Untersuchungen bestimmt. Die vorläufige Einstufung in eine der drei Kategorien ist während der Etappen der Baugrunderkundung zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren.

Geotechnische Kategorie 1 (GK1):

„Die geotechnische Kategorie 1 sollte nur kleine und relativ einfache Bauwerke umfassen, bei denen die grundsätzlichen Anforderungen auf Grund von Erfahrung und qualitativen geotechnischen Untersuchungen erfüllbar sind und ein vernachlässigbares Risiko besteht“¹¹

Geotechnische Kategorie 2 (GK2):

„Die geotechnische Kategorie 2 gilt für konventionelle Gründungen und Bauwerke ohne ungewöhnliches Risiko oder schwierige Baugrund- und Belastungsverhältnisse“¹¹

¹¹ (EN 1997-1, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil1: Allgemeine Regeln, 2014); S.26

Geotechnische Kategorie 3 (GK3):

„Die geotechnische Kategorie 3 sollte alle Bauwerke oder Bauwerksteile umfassen, die nicht zu den geotechnischen Kategorien 1 und 2 gehören. Die geotechnische Kategorie 3 sollte im Allgemeinen nach anspruchsvolleren Vorgaben und Regeln als den in dieser Norm genannten untersucht werden.“¹²

Beispiele für die geotechnische Kategorie 3:

- sehr große und ungewöhnliche Bauwerke
- Bauwerke mit außergewöhnlichen Risiken oder ungewöhnlichen oder ungewöhnlich schwierigen Baugrund- oder Belastungsverhältnissen
- Bauwerke ins seismisch stark betroffenen Gebieten
- Bauwerke in Gebieten, in denen mit instabilen Baugrundverhältnisse oder mit andauernden Bewegungen im Untergrund zu rechnen ist, so dass ergänzende Untersuchungen oder Sondermaßnahmen erforderlich sind.¹²

5.3.1 Umfang von Baugrunderkundungen

Die Abstände und Tiefen von Aufschlüssen sind je nach geologischen Gegebenheiten, den Abmessungen des Bauwerks und der bautechnischen Fragestellung von Projekt zu Projekt unterschiedlich und anzupassen. In der DIN 4020 und im EN 1997-2 sind Empfehlungen für die Abstände, Tiefen und die Anzahl von Aufschlüssen angeführt.

Tab. 4 Empfehlungen für Abstände und Anzahl von Aufschlüssen (Schmidt, 2006)

Rasterabstand	20 – 40 m	bei Hoch- und Industriebauten
Rasterabstand	< 60 m	bei großflächigen Bauwerken
Abstand	50 – 200 m	bei Linienbauwerken (Verkehrswege, Leitungen, Tunnel, Deiche)
je Fundament	2 - 4	bei Sonderbauwerken (Brücken, Schornsteine)
Abstand	25 – 75 m	bei Staumauern, Staudämmen und Wehren
Abstand	25 – 50 m	bei langgestreckten Schlitzwänden und Dichtwänden

Mit der gewählten Erkundungstiefe z_a müssen alle durch das Bauwerk beanspruchten Bodenschichten erfasst werden. Spielt dabei das Grundwasser auch eine Rolle sind

¹² (EN 1997-1, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil1: Allgemeine Regeln, 2014); S.27

die Aufschlusstiefen auch auf die hydrologischen Verhältnisse abzustimmen. (Schmidt, 2006)

5.3.2 Geotechnischer Bericht

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Baugrunderkundung, ihre Bewertungen, das geotechnische Modell, die Versuchsergebnisse aus dem Labor und die daraus entwickelten geotechnischen Folgerungen werden in einem geotechnischen Bericht zusammengefasst und schriftlich dargestellt. Ein geotechnischer Bericht sollte grob die nachfolgenden Teile enthalten. (Schmidt, 2006)

- *Anlass, Aufgabe, Daten der Baumaßnahme*
- *Aufstellung aller verwendeten Unterlagen*
- *Darstellung der Art und des Umfangs der Erkundungen*
- *Baugrundmodell: Baugrundbeschreibung mit Schichtenverlauf und mit Aussagen zum Grundwasser*
- *Geotechnische Baugrundbewertung: bodenmechanische Labor- und Feldversuche, abgeleitete charakteristische Kennwerte*
- *Bautechnische Folgerungen: Gründung, Baugrube, usw.*
- *Anlagen mit Versuchsprotokollen und Berechnungen*¹³

¹³ (Schmidt, Grundlagen der Geotechnik, 2006); S.41

6 Fallstudie

6.1 Lage und Geologie der Fallstudie

Um die Komplexität von Schlammteichen besser darstellen zu können dient die Standsicherheitsbeurteilung eines bestehenden Schlammteichs, als Fallstudie. Der Schlammteich befindet sich im Bundesland Salzburg in der Marktgemeinde Thalgau (Flachgau) 18 km östlich der Stadt Salzburg. Das dort ansässige Sand- und Kieswerk ist der Betreiber des Schlammteichs. Gefüllt wurde der Schlammteich mit der entstandenen Spültrübe aus der Sand- und Kieswäsche des vor Ort abgebauten Materials.

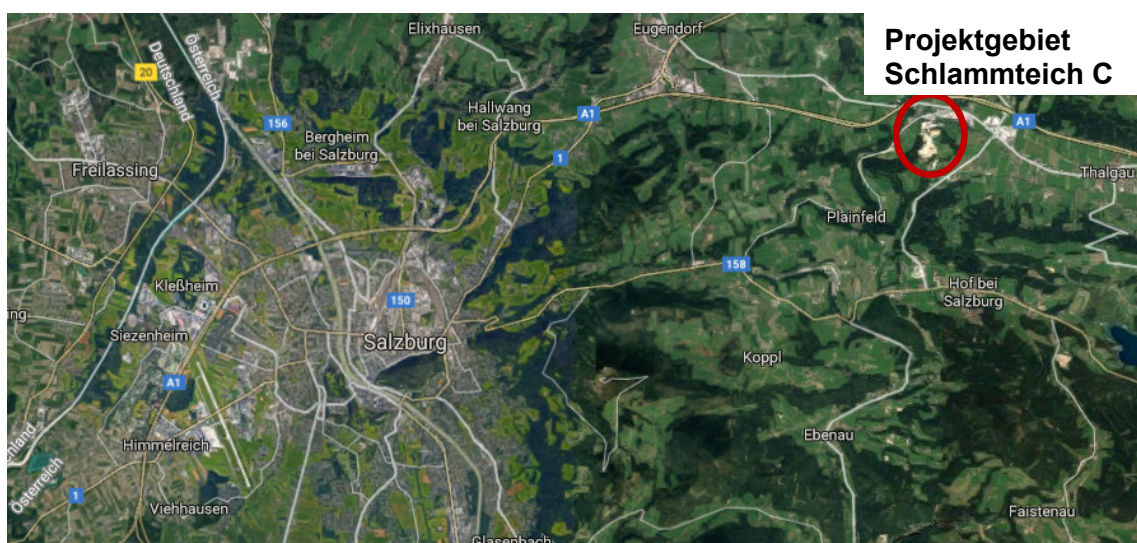


Abb. 40 Projektgebiet Schlammteich C Thalgau

Der zum Sand- und Kiesabbau verwendete Schotterrücken bei Enzersberg Wasenegg wird aus würmeiszeitlichen Lockergesteinen, die hier zwischen den beiden zusammenstoßenden Endzungen des Salzach- bzw. Traungletschers abgelagert wurden, aufgebaut. Der gesamte vorhandene Schotterrücken im Bereich des Abbaubereichs ist als Vorstoßschotter ausgewiesen. Die Vorstoßschotter werden im Hangenden zum Teil von einer Grundmoräne überlagert. Der Vorstoßschotter liegt als ein schwach schluffiges Sand-Kies-Stein Gemisch vor.

Den Felsuntergrund bilden im Projektgebiet Gesteine der Flyschzone. Die Gesteine der Flyschzone sind in Form von Sandstein, Tonstein und Mergel als Wasserstauer wirksam.

6.2 Baugrunderkundung Schlammteich C

Die Baugrunderkundung für die vorliegende Fallstudie wurde, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, aufgebaut. Nach einer umfangreichen Vorstudie wurde ein Konzept für eine Voruntersuchung entwickelt. Aus den gewonnen Erkenntnissen der Voruntersuchungen wurde das Erkundungsprogramm verdichtet und daraus eine Hauptuntersuchung geplant. Mit den durchgeführten Schritten der Erkundung war es abschließend möglich, ein geotechnisches Modell für die Standsicherheitsbeurteilung des Schlammteichs C zu entwickeln.

In den nachfolgenden Kapiteln sollen die einzelnen Schritte der Baugrunderkundung näher beschrieben werden und der Leser Schritt für Schritt an das abschließende geotechnische Modell herangeführt werden.

6.2.1 Ist Zustand des Schlammteichs C - Vorstudie

Der zu betrachtende Schlammteich C am Projektgebiet wurde Mitte 2016 außer Betrieb genommen, seit diesem Zeitpunkt wird keine Spültrübe mehr eingeleitet. Er diente über einen Zeitraum von ca. 30 Jahren als Absetzbecken der angefallenen Spültrübe durch die Kieswäsche. Die Dammkrone befindet sich durchgehend auf einer Höhe von ca. 629 m.ü.A. und ist mit einer durchschnittlichen Breite von ca. 4,0 m befahrbar ausgebildet. Die luftseitige Böschungsneigung des Dammes beträgt durchschnittlich 30°. Lokal sind steilere aber auch flachere Abschnitte vorhanden. Die oberen ca. 4,0 m der luftseitigen Dammböschung sind frei von größerem Bewuchs, der Rest der Böschung ist vollständig bewachsen und zu Fuß nur schwer zugänglich.

Die Oberfläche des Schlammteichs beträgt ca. 26500 m², die sich in einen Spülstrandbereich und einen Klarwasserbereich (Freiwasser) unterteilt. Durch die Außerbetriebnahme des Schlammteichs wird die Menge des Freiwassers nur noch durch Niederschläge und Oberflächenzuflüsse beeinflusst. Beobachtungen über die Zeit seit der Stilllegung des Schlammteichs zeigten, dass sich der Klarwasserbereich durch das langsame Versickern des Wassers immer mehr verkleinert. Im Klarwasserbereich ist derzeit kein Klarwasserabzug vorhanden, jedoch befindet sich im vorderen Bereich des Spülstrands ein Überlaufrohr um einen unzulässigen Aufstau des Klarwassers bis zur Dammkrone zu verhindern.

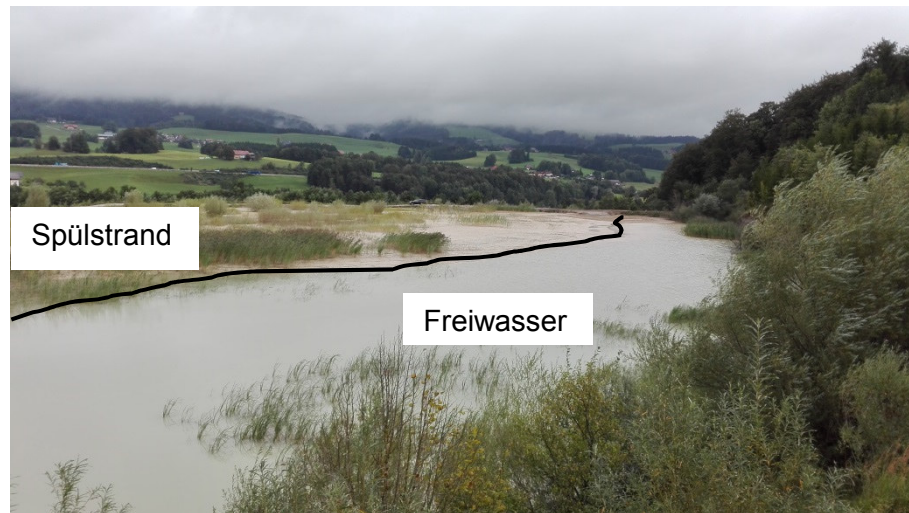


Abb. 41 Schlammteich C Übersichtsfoto – Blick von bergwärts Richtung Damm



Abb. 42 Schlammteich C Übergang von Spülstrand auf Freiwasserbereich – Blick vom Damm bergwärts

Die Einleitung der Spültrübe erfolgte über die Jahre an zwei örtlich konzentrierten Einspülstellen in der Nähe der Dammkrone. Durch die schrittweisen Erhöhungen des Dammes über die Zeit wurden auch die Einspülstellen immer wieder verändert und der neuen Geometrie angepasst. Es kann jedoch grundsätzlich gesagt werden, dass sich in der Nähe der Einspülstellen die gröberen Fraktionen der Spültrübe abgesetzt haben und mit der Entfernung hin zum Freiwasserbereich immer feinkörniger werden. Dies wurde mit rd. 20 durchgeführten Schlämmanalysen belegt.

Anhand einer Begehung des Schlammteichs C konnte festgestellt werden, dass an der nordöstlichen Seite des Dammbauwerkes das Klarwasser bis zum Dammkörper reicht und somit in diesem Bereich kein Spülstrand vorhanden ist. In diesem Bereich konnten

im Zuge einer ersten Begehung deutlich ausgeprägte Feuchtstellen in der luftseitigen Böschung festgestellt werden. Der Bewuchs im obersten Teil des Damms unter anderem bestehend aus Schilf weist ebenfalls auf einen feuchten Untergrund hin. Die restliche luftseitige Dammböschung war bei der Begehung unauffällig und trocken.

Um die bauliche Entwicklung des Schlammteichs C besser nachvollziehen zu können wurde im Verlauf der Vorstudie eine Luftbildauswertung des Projektgebiets durchgeführt. Bei SAGISonline (Salzburger geographisches Informationssystem) und beim Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien wurden sämtliche verfügbare Luftbilder von 1953 – 2015 erhoben. Durch die Auswertung konnte festgestellt werden, dass mit dem Bau des Schlammteichs C ca. 1985 begonnen wurde.

Für die Entwicklung des geotechnischen Modells konnten Dammkronenbreiten und Dammkronenhöhen aus den Luftbildern abgeschätzt werden. Dadurch war es möglich die einzelnen Schritte des Dammaufbaus über die Jahre besser nachvollziehen zu können. Die Bauweise des Dammkörpers konnte somit in einem ersten Schritt der upstream method (Dammachse zur Wasserseite verschoben) zugeordnet werden.

Anhand der Luftbildauswertung wurden auch die für die Standsicherheitsbeurteilung notwendigen Schnitte definiert. Im nordwestlichen Teil des Dammkörpers verfügt der Damm über eine zwischen 40,0 – 50,0 m breite Aufstandsfläche. Der Dammkörper ist in diesem Bereich so massiv, dass er rechnerisch nicht betrachtet wurde. Im nordöstlichen Teil des Dammkörpers wurden drei Schnitte für die Standsicherheitsbeurteilung festgelegt.

Im Kapitel 9 Anhang A. ist die detaillierte Luftbildauswertung von 1987 – 2016 zu finden.

Im Zuge der durchgeführten Vorstudie wurde der Schlammteich C der geotechnischen Kategorie 3 (GK 3) zugeordnet.

6.2.2 Voruntersuchung

Aufbauend auf die ausführlich durchgeführte Vorstudie wurde ein Konzept für eine Voruntersuchung entwickelt. Die nachfolgenden zwei Tabellen zeigen die durchgeführten Erkundungen In-Situ und im Labor.

Im Kapitel 9 Anhang B. befindet sich der Lageplan des Schlammteichs C mit den eingezeichneten Erkundungen.

Tab. 5 Durchgeführte Voruntersuchungen – In-Situ

In-Situ	Anzahl	Bemerkungen
Kernbohrung	3	KB 1/15 Tiefe = 32,0m KB 2/15 Tiefe = 27,0m KB 3/15 Tiefe = 20,0m
Inklinometer	3	Die Kernbohrungen wurden anschließend zu Inklinometern ausgebaut, der Ringraum wurde mit Zement-Bentonit Suspension verfüllt.
Drucksondierung (CPTU)	4	Der dynamische Porenwasserdruck u_2 wurde während der gesamten Sondierung mitgemessen. In ausgewählten Tiefenstufen wurden Dissipationstests durchgeführt. Mittels eines Probenentnahmegeräts wurden Proben aus definierten Tiefen für das Labor entnommen.
Rammsondierung (DPH)	8	Die Rammsondierungen wurden vorwiegend an der luftseitigen Dammböschung durchgeführt und hatten Aufsitzer in einer Tiefe von 2,0 – 3,0 m im Dammbaumaterial. Für die Auswertung der Rammsondierungen siehe Anhang F Rammsondierungen.

Tab. 6 Durchgeführte Voruntersuchungen - Labor

Labor	Anzahl	Bemerkungen
Korngrößenverteilung	3	Es wurde eine Kombinierte Sieb-Schlämmanalyse (ÖNORM B 4412) des gewonnenen Schlammteichmaterials aus der Drucksondierung durchgeführt. Im Zuge dieses Versuches wurde auch der Wassergehalt (ÖNORM EN ISO 17892-1) der Proben bestimmt.
Zustandsgrenzen	3	Es wurden die Zustandsgrenzen, (ÖNORM B 4411) Fließ- und Ausrollgrenze des gewonnenen Schlammteichmaterials bestimmt.

Kernbohrungen (KB)

Anhand der durchgeführten Kernbohrungen KB 1/15 und KB 2/15 konnte die Bauweise des Dammkörpers (upstream method) gegenüber der Luftbildauswertung bestätigt werden. Die KB 3/15 befindet sich am unteren Ende des Schlammteichs B und ist für die Standsicherheitsbeurteilung des Schlammteichs C von untergeordneter Bedeutung.

Im Anhang D Kernbohrungen sind die Bohrkernaufnahmen inklusive Fotos der Bohrkern zu finden.

Inklinometer

Die drei Kernbohrungen im Zuge der Voruntersuchung wurden anschließend zu Inklinometern ausgebaut, der Ringraum wurde mit Zement-Bentonit Suspension verfüllt. Seit der Errichtung wurden sechs Folgemessungen durchgeführt. Der Messzeitraum beträgt ca. 2 Jahre.

Inklinometer KB 1/15 und KB 2/15, welche sich auf der Krone und in der Böschung des Schlammteichs C befinden, zeigen keine diskreten Verformungen bzw. Scherbahnen. Der Verlauf der Messkurven in den letzten 1,5 Jahren wird auf die Konsolidierung des Schlammteichmaterials zurückgeführt. Die Auswertungen der Inklinometermessungen KB 1/15 und KB 2/15 sind im Anhang E Inklinometer zu finden.

Der Inklinometer KB 3/15 befindet sich am unteren Schlammteich B. Er ist für die Standsicherheitsbeurteilung des Schlammteichs C nicht von Bedeutung und wird deshalb auch nicht angeführt.

Drucksondierungen (CPTU)

Für die Erkundung des bindigen Schlammteichmaterials wurde vor allem mit Drucksondierungen (CPT) gearbeitet. Die Drucksondierungen CPTU 1/15 bis CPTU 3/15 wurden im Zuge der Voruntersuchung am Schlammteich C durchgeführt. CPTU 4/15 wurde im Bereich des Schlammteichs B durchgeführt und ist für die Standsicherheitsbeurteilung des Schlammteichs C von untergeordneter Bedeutung.

Es wird in dieser Arbeit nicht näher auf die Versuchsdurchführung von Drucksondierungen eingegangen. Dies kann in der EN ISO 22476 – 1 oder in der Fachliteratur nachgelesen werden. Es werden ausschließlich die Ergebnisse der Drucksondierungen diskutiert.

Mittels der durchgeführten Drucksondierungen am Schlammteichmaterial bestätigte sich die Annahme aus der Vorstudie, dass die abgelagerten Schlammteichsedimente mit zunehmendem Abstand zur Einspülstelle immer feinkörniger werden. So zeigt z.B. die Drucksondierung CPTU 3/15, die sich in der Nähe einer der ehemaligen Einspülstellen befindet, das Schlammteichmaterial als schluffigen Sand. Die Drucksondierung CPTU 2/15 befindet sich in der Voruntersuchung am weitesten von der ehemaligen Einspülstelle entfernt und zeigt das Schlammteichmaterial als gering sandigen, stark tonigen Schluff. Innerhalb des Schlammteichmaterials konnten jedoch anhand der Drucksondierungen keine unterschiedlichen Schichten definiert werden.

Das Schlammteichmaterial wird in den drei Schnitten für die Standsicherheitsbeurteilung immer als ein Schichtpaket angesehen. Die Unterschiede in der Kornzusammensetzung und Konsistenz wurden in der Berechnung entsprechend der Erkundung berücksichtigt. Mit jeder der drei Drucksondierungen konnte der Übergang vom Schlammteichmaterial auf den gewachsenen Boden aufgeschlossen werden. Die Mächtigkeiten des Schlammteichmaterials liegen je nach Lage der Drucksondierung zwischen 13,5 – 20,0 m. Die Ergebnisse der durchgeführten Drucksondierungen aus der Voruntersuchung sind im Anhang G Drucksondierungen enthalten.

Drucksondierungen – Dissipationstests

Bei der Erkundung mittels Drucksonden wurden nicht nur der Spitzendruck und die Mantelreibung gemessen, sondern auch der dynamische Porenwasserdruck u_2 über die gesamte Tiefe. In definierten Tiefenstufen im Schlammteichmaterial wurden Dissipationstests durchgeführt. Bei einem Dissipationstest wird der kontinuierliche Vortrieb der Drucksondierung in einer gewünschten Tiefe gestoppt und die Abnahme des dynamischen Porenwasserdruckes über die Zeit gemessen. Dissipationstests werden durchgeführt um den In-Situ Wert des statischen Porenwasserdrucks zu ermitteln. Mithilfe von Dissipationstest können zudem die Entwässerungseigenschaften eines Bodens bewerten werden.

Durch die geringe Durchlässigkeit des Schlammteichmaterials und den damit verbundenen enormen Zeitaufwand, bis der dynamische Porenwasserdruck auf den statischen abnimmt, konnten nicht alle Dissipationstests bis zum Ende durchgeführt werden. Aus den durchgeführten Dissipationstests ist jedoch erkennbar, dass im Schlammteichmaterial keine hydrostatische Porenwasserdruckverteilung vorhanden ist. Daraus konnte abgeleitet werden, dass das Schlammteichmaterial zu einem gewissen Grad nach unten in den gewachsenen Boden entwässert. Die Ergebnisse der durchgeführten Dissipationstests sind im Anhang G Drucksondierungen enthalten.

Drucksondierung – Probenentnahme

Ein Probenentnahmeggerät für Drucksondierungen ermöglichte das Entnehmen von mehr oder weniger ungestörten Bodenproben aus definierten Tiefen im Schlammteichmaterial. Es konnten dabei Proben mit einem Durchmesser von 66,0 mm und einer Länge von 0,5 m gewonnen werden. Der Ablauf der Probenentnahme soll im folgenden Absatz kurz erläutert werden.

Das verwendete Probenentnahmegerät besteht aus einem ca. 1,0 m langen Probenentnahmerohr, das am unteren Ende mit einer Schneide ausgebildet ist. In der Öffnung der Schneide ist ein Kegel eingesetzt der zum Eindrücken des Probenentnahmerohrs in den Boden dient. Das obere Ende des Probenentnahmerohrs ist so ausgebildet, dass das standardmäßige CPT Gestänge befestigt werden kann. In das Innere des Probenentnahmerohrs kommt ein PVC - Rohr mit einem Durchmesser von 66,0 mm und einer Länge von 0,5 m. Am Ende der Probenentnahme befindet sich in diesem PVC - Rohr die Bodenprobe. Anschließend wird das Probenentnahmerohr mit Hilfe des CPT Gestänges auf die gewünschte Tiefe der Probenentnahme gedrückt. Ist die gewünschte Tiefe erreicht wird ein Draht mit einem Haken am Ende durch das hohle CPT Gestänge bis zum Kegel des Probenentnahmerohrs abgesenkt. Der Haken rastet beim Kegel ein und somit kann der Kegel entriegelt werden. Anschließend wird er durch das im inneren des Probenentnahmerohrs aufgesetzte PVC Rohr nach oben gezogen. Durch diesen Vorgang wird die Schneide am Ende des Probenentnahmerohrs freigelegt. Das Probenentnahmerohr wird danach weiter in den Boden gedrückt und füllt sich mit der Bodenprobe. Anschließend wird das gesamte CPT Gestänge plus Probenentnahmerohr wieder gezogen und das mit der Bodenprobe gefüllte PVC Rohr kann entnommen werden. Das PVC Rohr muss beidseitig luftdicht verschlossen werden. Anschließend wird es noch beschriftet, aus welcher Tiefenstufe die Probe entnommen wurde und wo sich bei der Probe oben und unten befindet.

Ein großer Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Bodenproben hoher Güte aus ausgewählten Tiefen entnommen werden können. Die Proben verfügen mit diesem Entnahmeverfahren lt. EN ISO 22475-1 der Güteklasse 2. Nach der Entnahme einer Bodenprobe wird das Probenentnahmerohr gereinigt und die nächste Probe kann gezogen werden.

Unter Verwendung des Probenentnahmegeräts wurden im Zuge der Voruntersuchung zwei Proben bei der CPTU 2/15 für das Labor entnommen. Die Laborergebnisse zeigen das Schlammteichmaterial als einen sehr tonigen Schluff mit einer Konsistenz von weich – steif. Die einzelnen Ergebnisse der durchgeführten Korngrößenverteilungen und Zustandsgrenzen siehe Anhang H Korngrößenverteilung, enthalten.

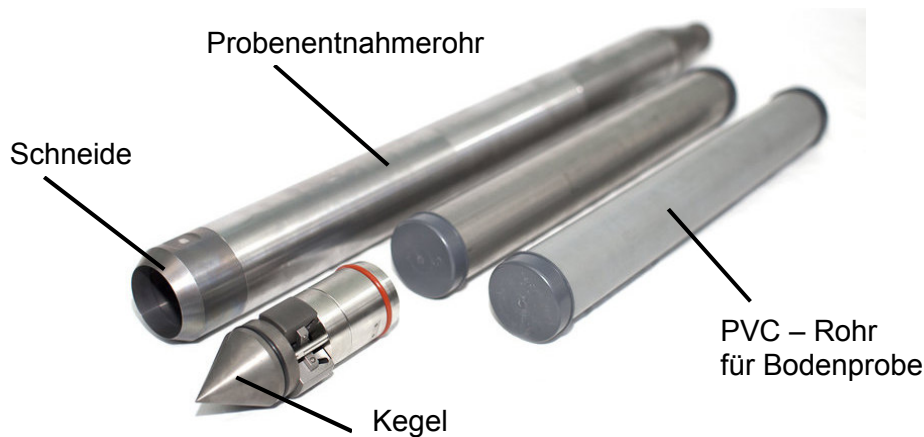


Abb. 43 Probenentnahmerohr für Drucksondierung (<http://www.blackinsitutesting.com.au/soil-sampling/>, abgerufen am 13.02.2017)

6.2.3 Hauptuntersuchung

Aufbauend auf die Ergebnisse aus der Vorstudie und der durchgeführten Voruntersuchungen wurden die für eine Standsicherheitsbeurteilung noch notwendigen Erkundungsmaßnahmen ausgearbeitet und durchgeführt. Die nachfolgenden zwei Tabellen zeigen eine Zusammenfassung über die durchgeführten Feld- und Laborversuche im Rahmen der Hauptuntersuchung.

Im Kapitel 9 Anhang B. befindet sich der Lageplan des Schlammteichs C mit den eingezeichneten Erkundungen.

Tab. 7 Durchgeführte Hauptuntersuchungen – In-Situ

In-Situ	Anzahl	Bemerkungen
Drucksondierung (CPTU)	3	Der dynamische Porenwasserdruck u_2 wurde während der gesamten Sondierung mitgemessen. Mittels eines Probenentnahmerohrs wurden Proben aus definierten Tiefen für das Labor entnommen.
Rammsondierung (RS)	2	Die Rammsondierungen wurden an der luftseitigen Dammböschung durchgeführt.
Rammkernsondierungen (RKS)	2	RKS 1/16 Tiefe = 11,5 m RKS 2/16 Tiefe = 10,5 m
Pegel	7	Die Pegel wurden zur Ermittlung der Sickerlinie im Schlammteichmaterial und im Dammkörper eingebaut.
Porenwasserdruckgeber	6	Die Porenwasserdruckgeber wurden zur Ermittlung der Sickerlinie und der Porenwasserdruckverhältnisse im Schlammteichmaterial eingebaut.

Tab. 8 Durchgeführte Hauptuntersuchungen - Labor

Labor	Anzahl	Bemerkungen
Korngrößenverteilung	6	Es wurde eine Kombinierte Sieb-Schlammanalyse (ÖNORM B 4412) des gewonnenen Schlammteichmaterials aus der Drucksondierung durchgeführt. Im Zuge dieses Versuches wurde auch der Wassergehalt (ÖNORM EN ISO 17892-1) der Proben bestimmt.
CU - Triaxialversuch	3	Anhand eines CU Triaxialversuchs (ÖNORM B 4416) wurden die Scherparameter des Schlammteichmaterials bestimmt.
Korndichte	2	-

Drucksondierungen (CPTU)

Die drei zusätzlichen Drucksondierungen am Schlammteich CPTU 5/16 – CPTU 7/16 wurden an den für die Standsicherheitsbetrachtung definierten Schnitten 1-1, 2-2, 3-3 durchgeführt. Bei der CPTU 5/16 und 6/16 wurden jeweils zwei Proben für das Labor aus der Tiefe entnommen. Damit konnten CU Triaxialversuche durchgeführt, und die Scherparameter des Schlammteichmaterials stichprobenartig bestimmt werden.

CPTU 5/16 wurde beim Schnitt 3-3 durchgeführt und zeigt aufgrund der Entfernung zur ehemaligen Einspülstelle das Schlammteichmaterial in seiner feinsten Zusammensetzung. Die Auswertung der Drucksondierung und die beiden im Labor durchgeführten Korngrößenverteilungen zeigen das Schlammteichmaterial als Schluff / Ton in einem Massenverhältnis der Gesamtmenge von ca. 50 zu 50. CPTU 6/16 und CPTU 7/16 zeigen das Schlammteichmaterial ähnlich wie CPTU 1/15 und CPTU 2/15 aus der Voruntersuchung als ein gering sandiger, stark toniger Schluff.

Die Ergebnisse der durchgeführten Drucksondierungen während der Hauptuntersuchung sind im Anhang G Drucksondierungen enthalten.

CU – Triaxialversuch (konsolidierter undrännierter Versuch)

Mittels der entnommen Bodenproben aus der Tiefe wurden drei CU – Triaxialversuche (konsolidierter, undrännierter Versuch) durchgeführt. Die vierte Probe konnte aufgrund von größeren Fraktionen (Kies) nicht ungestört in die Triaxzelle eingebaut werden.

Bei einem CU – Versuch wird die Probe zunächst im offenen System belastet und konsolidiert. Nach Abschluss der Konsolidierung wird das System geschlossen und mit dem Abscheren begonnen. Die Belastung wird gesteigert und zusätzlich der

Porenwasserdruck gemessen. Der Versuch liefert am Ende die totalen Spannungen σ und den Porenwasserdruck u . Daraus können dann die effektiven Spannungen $\sigma' = \sigma - u$ und die effektiven Parameter c' und φ' bestimmt werden. Die Ergebnisse aus den Versuchen sind im Anhang I Bodenkennwerte aus Versuchsauswertung enthalten. (Schmidt, 2006)

Porenwasserdruckgeber und Pegel

Primäres Ziel der Hauptuntersuchung war es, die tatsächliche Sättigungslinie des Schlammteichs C und die Porenwasserdruckverteilung zu erkunden. Dafür wurden in den Drucksondierungspunkten CPTU 5/16 bis CPTU 7/16 jeweils zwei Porenwasserdruckgeber übereinander in verschiedenen Tiefen eingebaut. Der Porenwasserdruckgeber der Firma Geokon (Model 4500DP) ist dafür gebaut, dass er in weichen Böden direkt in den Boden auf die gewünschte Tiefe eingedrückt werden kann. Die verwendeten Porenwasserdruckgeber wurden im konkreten Fall mit Hilfe des CPT Gestänges auf die gewünschte Tiefe abgeteuft. Durch eine spezielle Vorrichtung am Kopf des Porenwasserdruckgebers konnte das CPT Gestänge in der Endteufe wieder gelöst und gezogen werden. Infolge dieser Art des Einbaus kann der Porenwasserdruckgeber nicht wiedergewonnen werden und verbleibt nach Abschluss der Messungen im Boden. Eine zweite Möglichkeit wäre, dass das CPT Gestänge während der Messdauer im Boden verbleibt und nach Abschluss der Messungen inklusive dem Porenwasserdruckgeber wieder rückgewonnen wird. Ein Nachteil dieser Methode liegt jedoch darin, dass eine große Anzahl an CPT Gestänge benötigt wird und dafür während der Messdauer Miete bezahlt werden muss. Daher ist im Vorhinein schon zu überlegen wie lange die Messungen dauern und ob es wirtschaftlich ist über den Zeitraum Miete für das CPT Gestänge zu bezahlen. Die nachfolgende Abbildung zeigt den in der Fallstudie verwendeten Porenwasserdruckgeber.



Abb. 44 Porenwasserdruckgeber Firma Geokon

Die jeweils zwei übereinanderliegenden Porenwasserdruckgeber sind an der Oberfläche an einen wetterfesten Datenlogger angeschlossen. Das Aufzeichnungsintervall der vorherrschenden Porenwasserdrücke beträgt 12 Stunden (06:00 und 18:00).



Abb. 45 Datenlogger mit angeschlossenen Porenwasserdruckgebern

Die folgende Tab. 9 zeigt eine Zusammenfassung der Messungen der Porenwasserdruckgeber über den Beobachtungszeitraum von vier Monaten für die beiden bei der CPTU 5/16 und viereinhalb Monate für die jeweils beiden bei der CPTU 6/16 und CPTU 7/16. Der gemessene Verlauf der Porenwasserdruckgeber über die Zeit ist im Anhang G Drucksondierungen grafisch dargestellt.

Tab. 9 Zusammenfassung Messungen Porenwasserruckgeber

Porenwasserdruckgeber	Tiefe von GOK Dammkrone [m]	Messzeitraum [Monat]	Gesamtabfall [mWS]	Abfall / Monat [mWS]
CPTU 5/16	6,0	4,0	1,90	0,48
CPTU 5/16	10,2	4,0	0,66	0,17
CPTU 6/16	10,2	4,5	0,73	0,16
CPTU 6/16	15,0	4,5	0,33	0,07
CPTU 7/16	10,2	4,5	0,44	0,10
CPTU 7/16	15,0	4,5	0,30	0,07

Zusätzlich zu den Porenwasserdruckgebern wurden fünf Pegel im Verlauf des Schnitts 1-1 im Spülstrandbereich und zwei Pegel an der luftseitigen Dammböschung errichtet.

Die Interpretation der Messergebnisse für die Porenwasserdruckgeber und die Pegel ist im nächsten Kapitel 6.3 Geotechnisches Modell näher beschrieben.

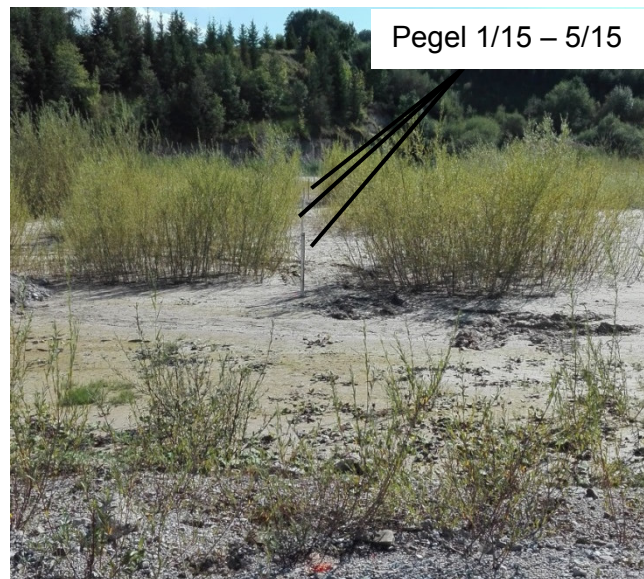


Abb. 46 Pegel im Verlauf des Schnitts 1-1

Rammsondierungen / Rammkernsondierungen

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Hauptuntersuchung war es, die Stärke des Dammkörpers noch einmal nachzuprüfen um den Übergang vom Dammbaumaterial auf das Schlammteichmaterial definieren zu können. Dafür wurden im Bereich des Schnitts 2-2 und 3-3 jeweils eine Rammsondierung bzw. Rammkernsondierung an der luftseitigen Dammböschung durchgeführt. Die Rammsondierung RS 9/16 welche im Bereich des Schnitts 2-2 durchgeführt wurde, zeigt das mitteldicht gelagerte Dammbaumaterial in einer Stärke von ca. 4,5 – 5,0 m. Der Übergang vom Dammbaumaterial auf das Schlammteichmaterial konnte aufgrund der Schlagzahlen bei der Rammsondierung und der visuellen Beurteilung der Rammkernsondierung (RKS 1/16) nicht exakt definiert werden. Die Konsequenz aus dieser Erkenntnis wird im nächsten Kapitel 6.3 Geotechnisches Modell beschrieben.

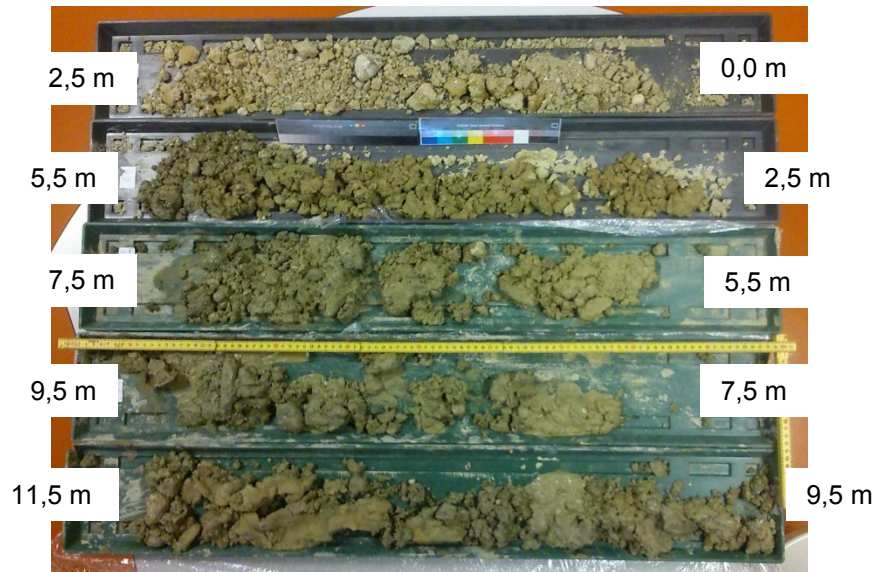


Abb. 47 Rammkernsondierung (RKS 1/16)

Die Rammsondierung RS 12/16, welche im Bereich des Schnitts 3-3 durchgeführt wurde, zeigt das mitteldicht gelagerte Dammbaumaterial in einer Stärke von ca. 3,5 m. Der Übergang vom Dammbaumaterial auf das Schlammteichmaterial konnte aufgrund der Schlagzahlen bei der Rammsondierung und der visuellen Beurteilung der Rammkernsondierung (RKS 2/16) wieder nicht exakt definiert werden. Die Konsequenz aus dieser Erkenntnis wird wiederum im nächsten Kapitel 6.3 Geotechnisches Modell beschrieben. Eine Besonderheit dieser Rammsondierung bzw. Rammkernsondierung liegt darin, dass sie um 15° geneigt zur Vertikalen von der Dammkrone aus hergestellt wurde. Aufgrund der nicht zugänglichen luftseitigen Böschung in diesem Bereich wurde mit dem schrägen Sondieren Material aus dem Böschungsfuß gewonnen. Ein weiterer Vorteil lag darin, dass der anschließend in das Sondierloch eingebaute Pegel P 7/16 im Fußbereich der luftseitigen Böschung zu liegen kam.

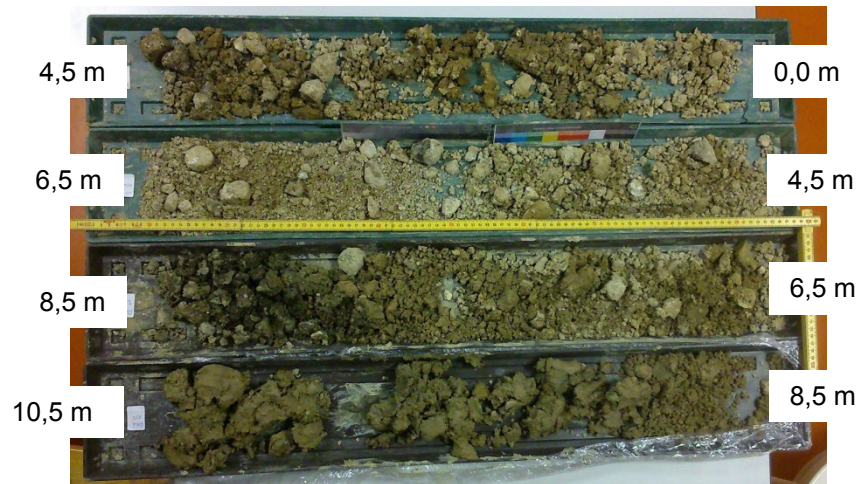


Abb. 48 Rammkernsondierung (RKS 2/16)

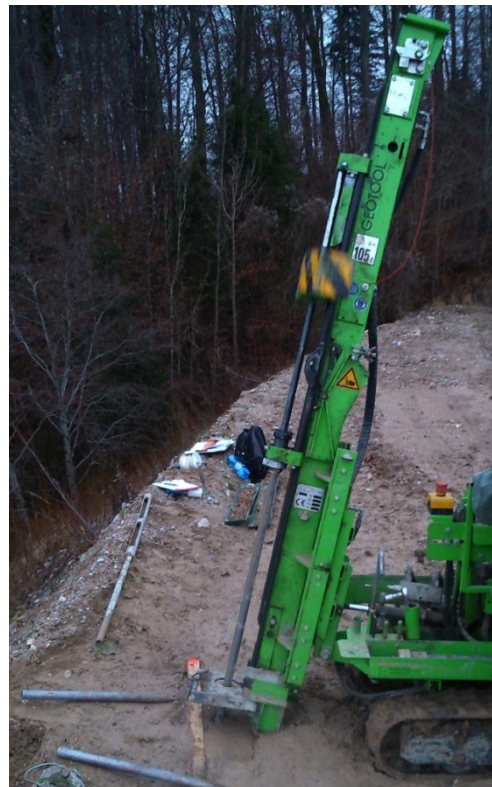


Abb. 49 Rammsondierung 15° zur vertikalen geneigt mit anschließendem Einbau des Pegels P 7/16

6.2.4 Zusätzliche In-Situ Versuche

Taschenflügelsonde und Taschenpenetrometer:

Die Taschenflügelsonde und der Taschenpenetrometer dienen zur schnellen, überschlägigen Ermittlung der In-Situ Scherfestigkeit einer bindigen Bodenprobe unter der Auflast null. Durch die kompakte Bauweise der beiden Geräte eignen sie sich besonders gut für Versuche im Gelände oder auf Baustellen, wie z.B. überschlägige Ermittlung der Kohäsion und Reibungswinkel an aktiven oder potentiellen Gleit- und Rutschflächen, Untersuchungen an Kluffüllungen oder der Prüfung der Bodenfestigkeit und des Verdichtungsgrades.

Die Taschenflügelsonde besteht aus einem Drehkopf mit einer Skala von 0 bis 9 und einem Schleppanzeiger, sowie einer kurzen Stange mit umhüllender Feder und einem fest montierten Scherflügel. Beim Versuch misst die Flügelsonde über die Torsion der Feder die Kraft, welche zum Abscheren des Bodens nötig ist. Für die Versuchsdurchführung ist in dem zu untersuchenden bindigen Boden eine ebene Oberfläche herzustellen. Anschließend drückt man die Lamellen der Flügelsonde sorgfältig in den Boden. Dann wird der Griffknopf mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Abscheren des Bodens gedreht. Dieser Abschervorgang sollte ca. zwischen 5 bis 10 Sekunden dauern. Der normale Scherflügel ist an der Taschenflügelsonde fix montiert. Zusätzlich gibt es noch einen kleinen und einen großen Scherflügel, die direkt auf den fix montierten normalen Scherflügel aufgesetzt werden können und mit einem Sechskantschlüssel festgezogen werden. Im vorliegenden Fall wurde nur der kleine Scherflügel verwendet. Um statistisch gesehen einen aussagekräftigen Mittelwert zu erhalten müssen mindestens 10 Einzelmessungen durchgeführt werden.



Abb. 50 Taschenflügelsonde (www.geotechnik-shop.de, abgerufen am 13.02.2017)

Der Taschenpenetrometer besteht aus einem Griff mit aufgedruckter Messskala, einem Schleppanzeiger und einem Druckstempel mit versteckter, kalibrierter Feder. Am Anfang des Versuchs muss die Schleppmarke auf den Nullpunkt an den unteren Rand des Griffes geschoben werden. Anschließend nimmt man den Griff in die Hand und drückt den Kolben mit konstantem Druck bis zur Markierung (eingravierte Rille) in den Boden. Die ermittelte Festigkeit des Bodens kann dann auf der geeichten Skala an der Schleppmarke direkt abgelesen werden. Um statistisch gesehen einen aussagekräftigen Mittelwert zu erhalten müssen mindestens 10 Einzelmessungen durchgeführt werden. (Kurosh Thuro & Marion Nickmann', Technische Universität München, 2008)



Abb. 51 Taschenpenetrometer (www.geotechnik-shop.de, abgerufen am 13.02.2017)

Ergebnisse der Taschenflügelsonde und Taschenpenetrometer

Tab. 10 Versuchsergebnisse Taschenflügelsonde klein und Taschenpenetrometer

Taschenflügel-sonde	Mess-werte	Flügelsonde klein S	Taschenpenetro-meter	Mess-werte	Penetrometer P
		[kN /m ²]			[kN /m ²]
Versuch 1	0,50	12,50	Versuch 1	0,50	50,00
Versuch 2	1,50	37,50	Versuch 2	1,00	100,00
Versuch 3	1,00	25,00	Versuch 3	0,50	50,00
Versuch 4	1,00	25,00	Versuch 4	0,75	75,00
Versuch 5	1,00	25,00	Versuch 5	0,75	75,00
Versuch 6	0,75	18,75	Versuch 6	1,00	100,00
Versuch 7	0,75	18,75	Versuch 7	1,00	100,00
Versuch 8	1,00	25,00	Versuch 8	1,00	100,00
Versuch 9	1,00	25,00	Versuch 9	0,75	75,00
Versuch 10	0,75	18,75	Versuch 10	1,00	100,00
Mittelwert		23,13	Mittelwert		82,50

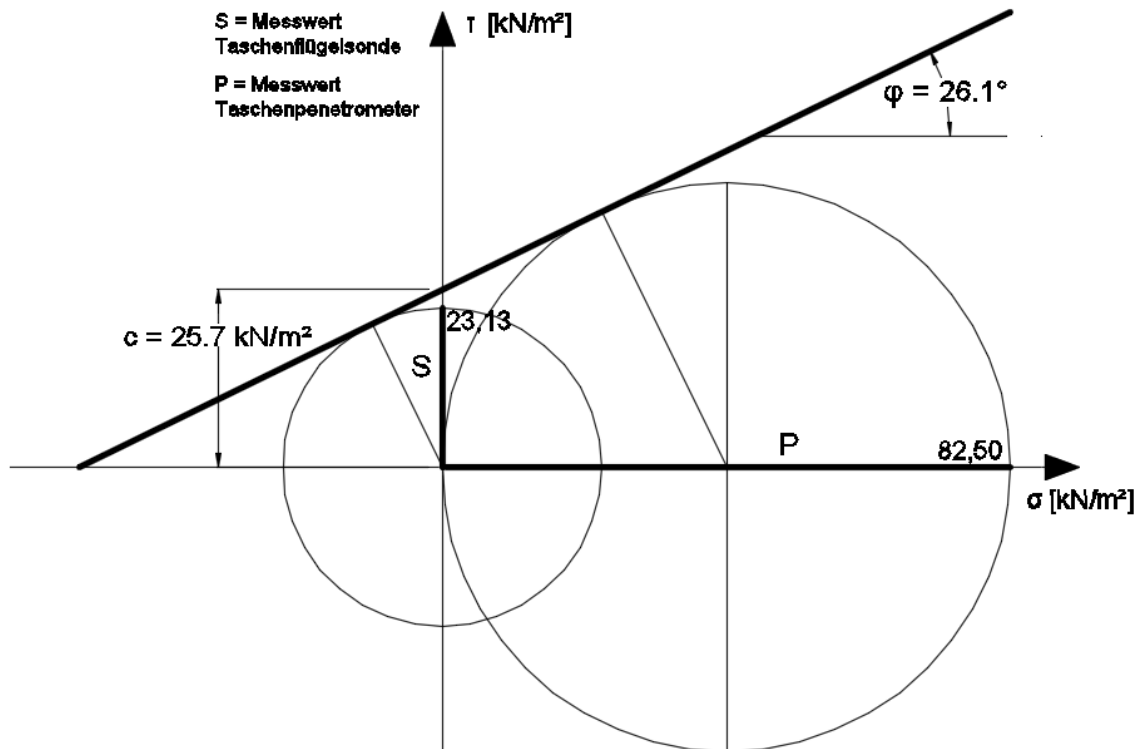


Abb. 52 Auswertung Taschenflügelsonde klein und Taschenpenetrometer (Kurosh Thuro & Marion Nickmann', Technische Universität München, 2008)

Die daraus abgeleiteten Scherparameter für die Schlammteichoberfläche werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 11 Ermittelte Scherparameter mit Taschenflügelsonde klein und Taschenpenetrometer

Scherparameter		
φ	[°]	26,1
c	[kN/m ²]	25,7

Feld-Rahmenschergerät

Im Zuge der Doktorarbeit „Zur Statik der Bodenvernagelung“ von Daniel Renk an der Universität Innsbruck (2011) wurde ein Feld-Rahmenschergerät zur Bestimmung der ungestörten Scherfestigkeit In-Situ entwickelt. Im Zuge der Entwicklung des Geräts lag das Hauptaugenmerk auf folgenden Punkten.

- leichter Transport
- weites Einsatzspektrum in Bezug auf verschiedene Bodenarten
- unkomplizierte Handhabung, Versuche sollten einfach und schnell durchführbar sein

In Bezug auf die angeführten Punkte wurde ein Feld-Rahmenschergerät mit folgenden vier Komponenten entwickelt.

- zwei Scherrahmen (Höhe * Breite * Tiefe = 10 * 20 * 20 cm)
- ein Hydraulikzylinder
- eine handbetriebene Hydraulikpumpe
- ein Überwurrahmen (Widerlager für den Druckzylinder)

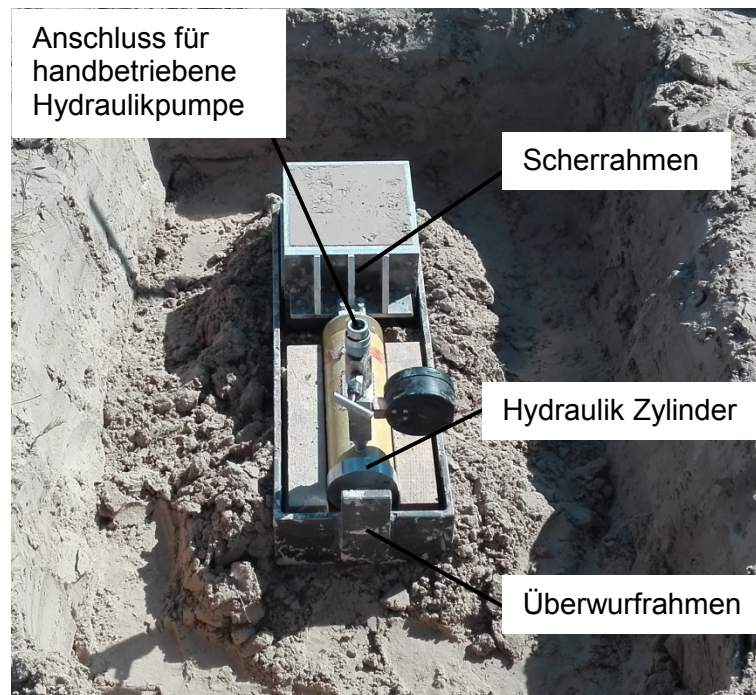


Abb. 53 Feld-Rahmenschergerät

Im Zuge der Baugrunderkundungen am Schlammteich C wurde das Feld-Rahmenschergerät an der Schlammteichoberfläche mit insgesamt sechs Versuchen ausprobiert. Die Normalspannung σ_N wurde mittels Betonplatten (eine Platte 20,0 kg) aufgebracht. Für die Aufzeichnungen (Verschiebung, Weg) während des Versuchs wurden ein Wegaufnehmer und eine Kraftmessdose verbunden mit einem Datenlogger verwendet.

Die folgenden Abbildungen zeigen schrittweise den Versuchsaufbau.



Abb. 54 Ausarbeitung des Probekörpers



Abb. 55 Scherrahmen + Überwurfrahmen

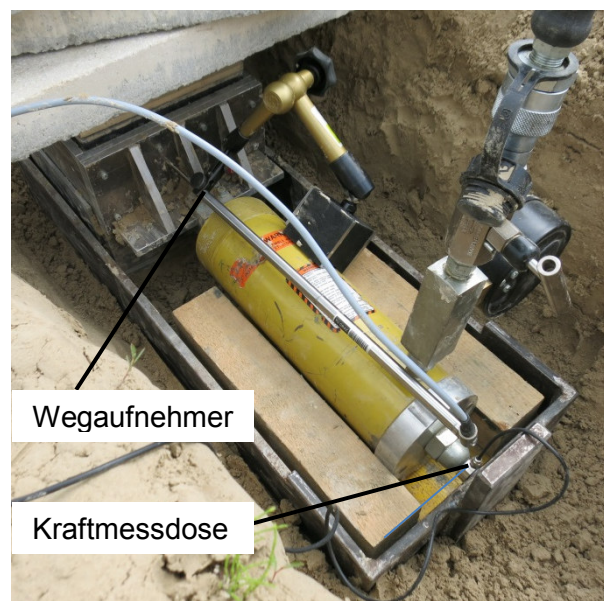


Abb. 56 Wegaufnehmer und Kraftmessdose

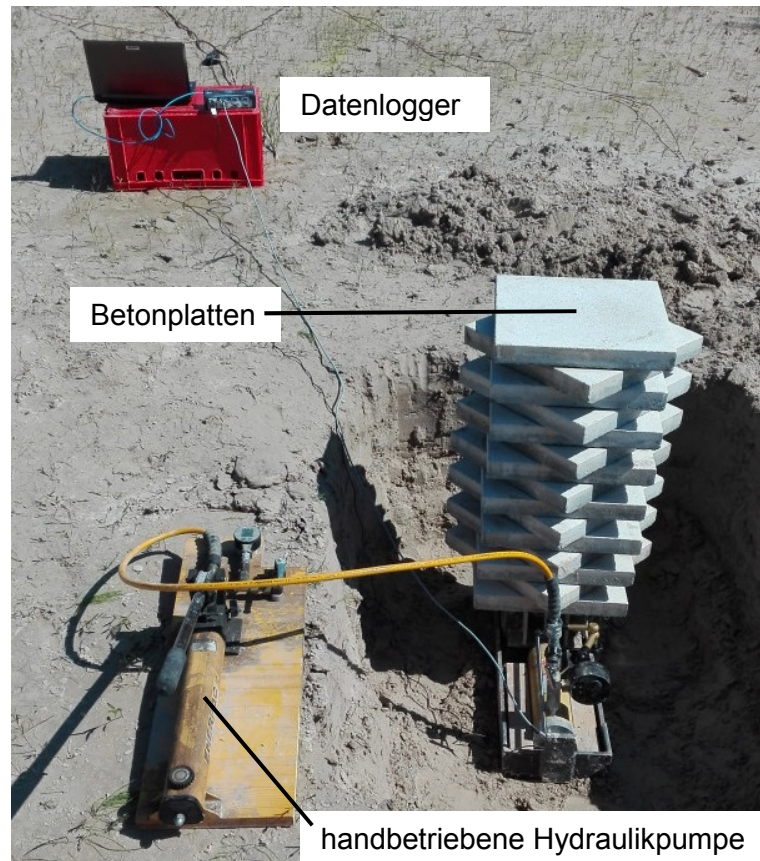
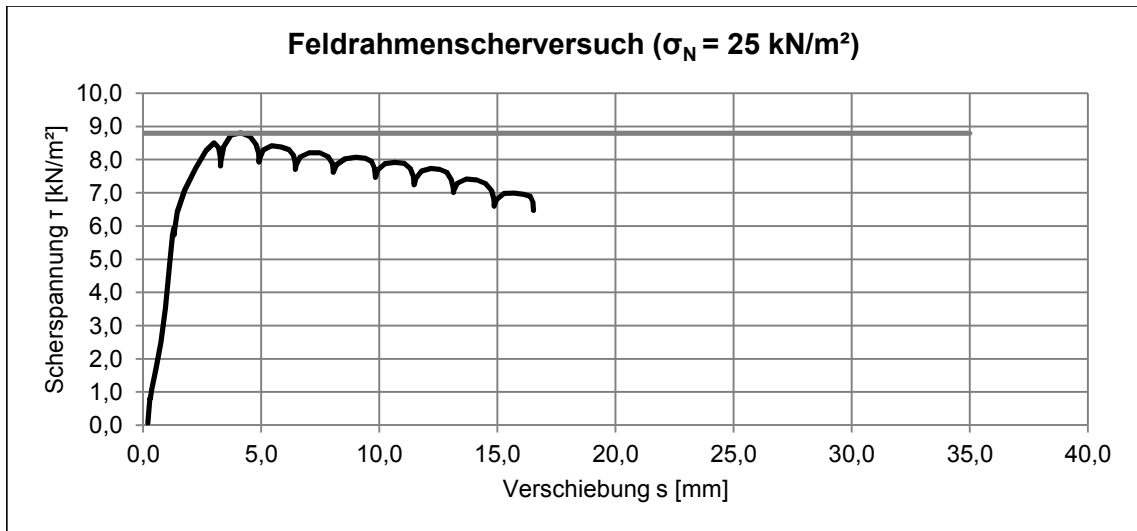
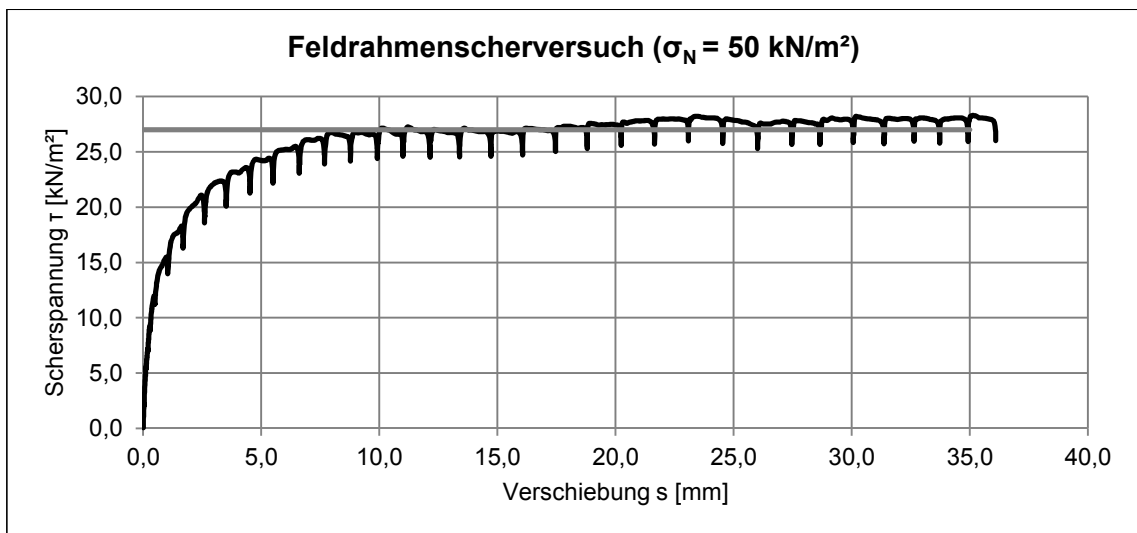
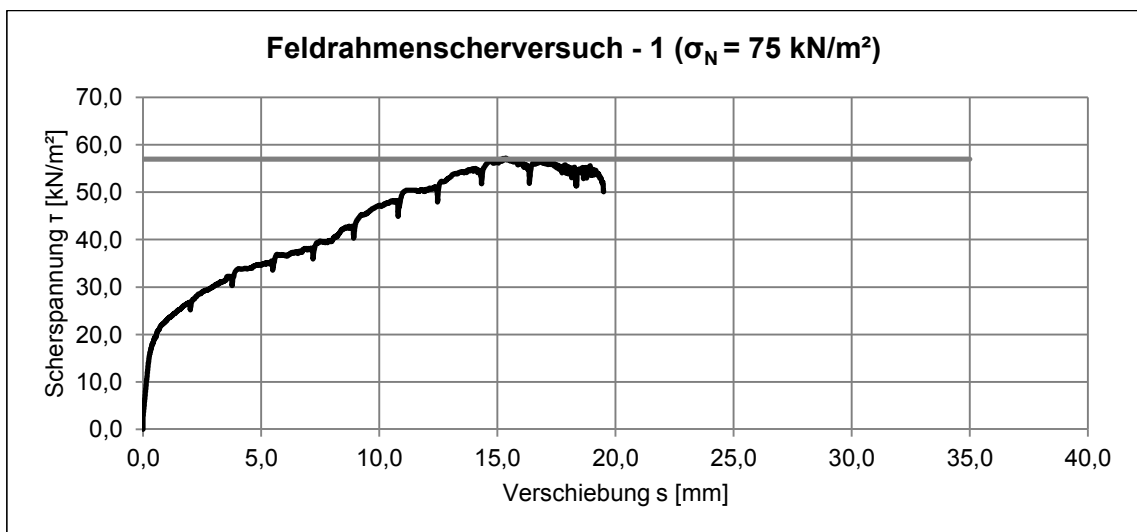
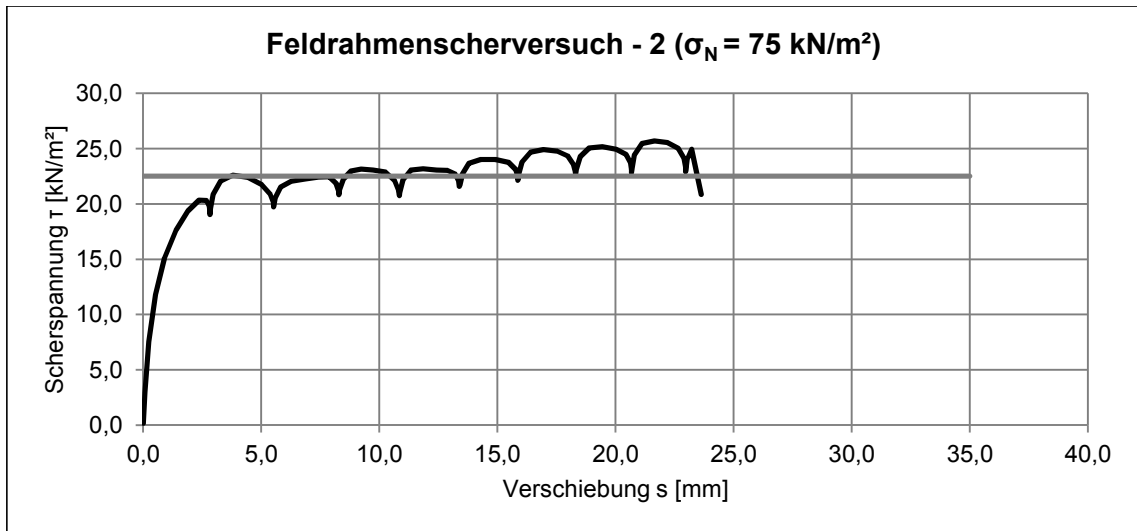
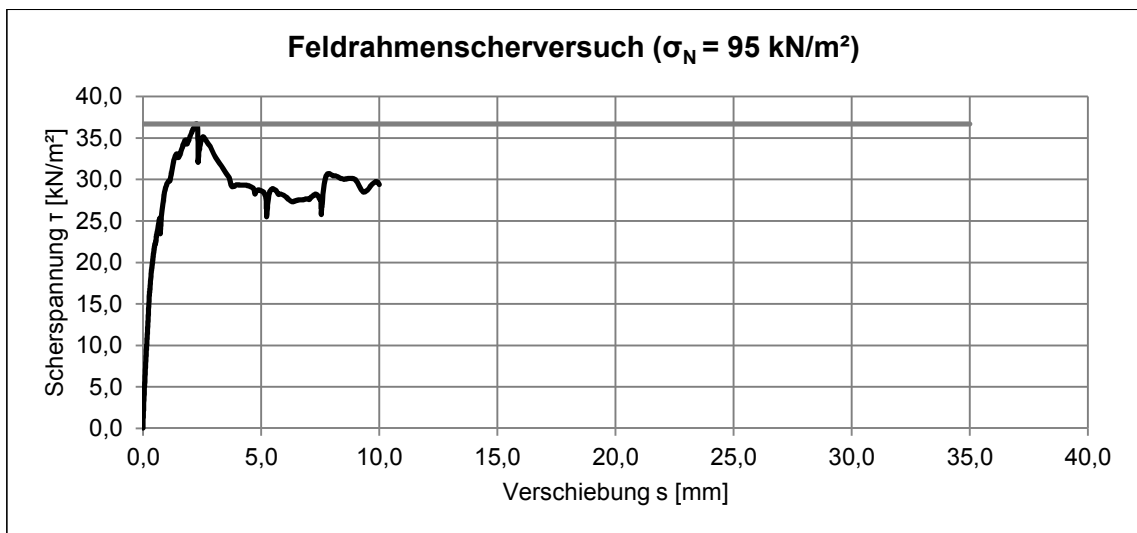
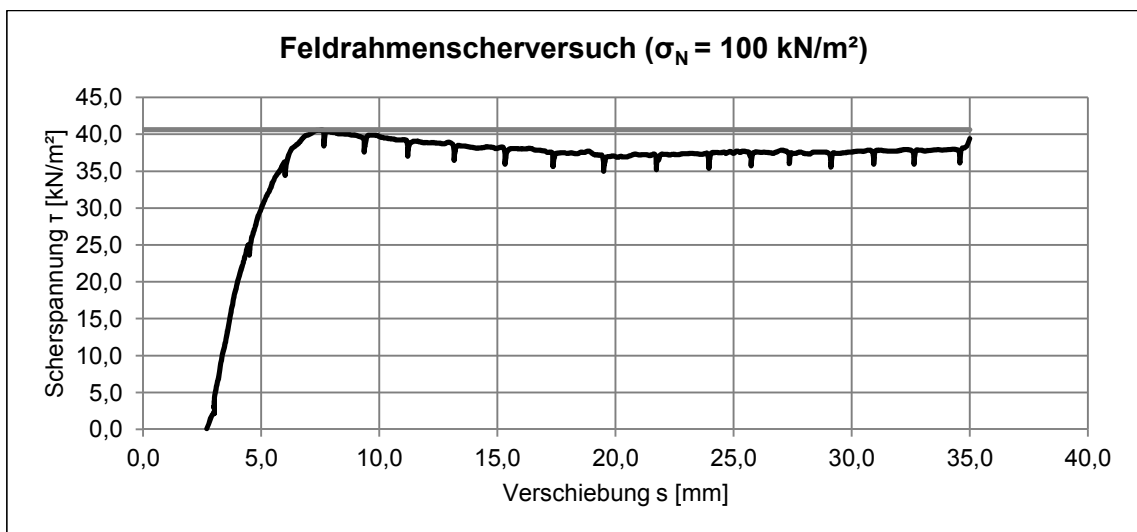


Abb. 57 fertiger Versuchsaufbau

Ergebnisse der Feld-Rahmenscherversuche:

Die folgenden sechs Abbildungen zeigen jeweils das Spannungs- Wegdiagramm für die einzelnen Versuche, bei verschiedenen Normalspannungen.

Abb. 58 Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 25,0 \text{ kN/m}^2$ Abb. 59 Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 50,0 \text{ kN/m}^2$ Abb. 60 Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 75,0 \text{ kN/m}^2$

Abb. 61 Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 75,0 \text{ kN/m}^2$ Abb. 62 Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 95,0 \text{ kN/m}^2$ Abb. 63 Spannungs- Wegdiagramm $\sigma_N = 100,0 \text{ kN/m}^2$

Die Auswertung der Spannungs- Wegdiagramme ergibt für die aufgebrachtten Normalspannungen folgende maximale Scherspannungen.

Tab. 12 maximale Scherspannungen τ_{\max}

Datum	Normalspannung σ_N [kN/m ²]	Scherspannung τ_{\max} [kN/m ²]
05.09.2016	50,00	27,00
08.09.2016	75,00	57,00
08.09.2016	95,00	36,70
08.09.2016	100,00	40,60
02.11.2016	25,00	8,80
02.11.2016	75,00	22,50

Der durchgeführte Versuch am 08.09.2016 mit einer Normalspannung von 75 kN/m² wurde als Ausreißer eingestuft und im folgenden σ - τ Diagramm nicht berücksichtigt.

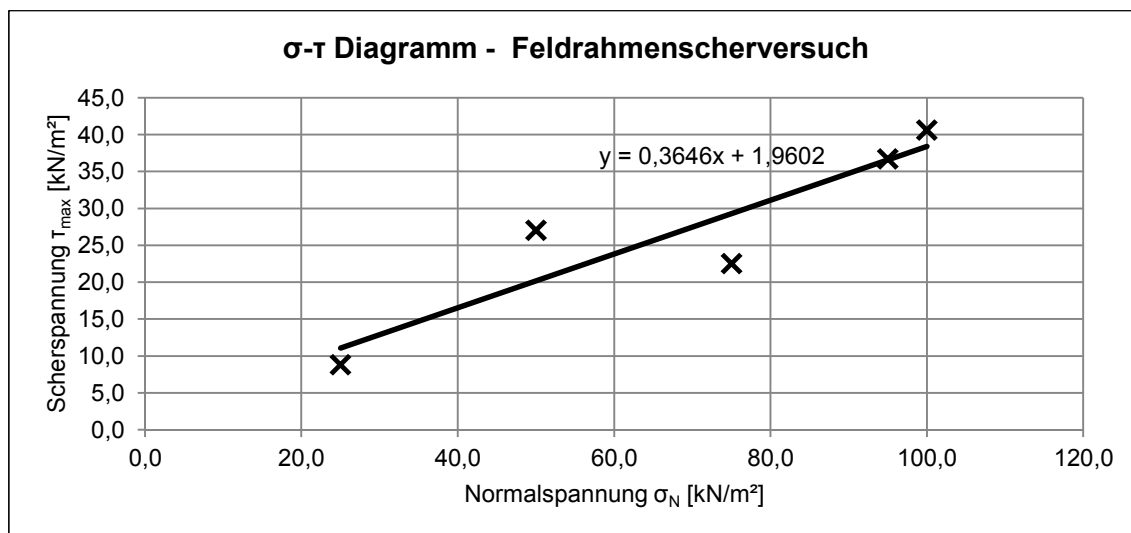


Abb. 64 σ - τ Diagramm

Die daraus abgeleiteten Scherparameter für die Schlammteichoberfläche werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 13 Ermittelte Scherparameter mit Feld-Rahmenschergerät

Scherparameter		
φ	[°]	20,0
c	[kN/m ²]	2,0

Fazit der zusätzlichen In-Situ Versuche

Die Taschenflügelsonde und der Taschenpenetrometer eignen sich durch die schnelle und relativ einfache Versuchsdurchführung sehr gut für eine schnelle Abschätzung des Reibungswinkels und der Kohäsion In-Situ.

Die Versuche mit dem Feld-Rahmenschergerät haben wiederum sehr viel Zeit in Anspruch genommen und waren sehr aufwendig. Das größte Problem bei der Versuchsdurchführung ist darin gelegen, die Normalkraft auf die Probe aufzubringen. Mithilfe der verwendeten Betonplatten war es maximal möglich eine Normalspannung von 100 kN/m^2 (400 kg) aufzubringen. Bei dem Versuch noch höhere Normalspannungen aufzubringen wurde der Turm aus Betonplatten zu instabil und kippte während des Aufbaus oder Versuchsdurchführung um.

Im Vergleich mit dem Feld-Rahmenschergerät liegt der Reibungswinkel für die durchgeführten Versuche an der Schlammteichoberfläche mit $20,0^\circ$ um einiges niedriger als die $26,1^\circ$ bei der Taschenflügelsonde und dem Taschenpenetrometer. Die Schwankung bei der Kohäsion zwischen den beiden Versuchen ist sehr hoch. Die $25,7 \text{ kN/m}^2$ von der Taschenflügelsonde und dem Taschenpenetrometer sind mit Sicherheit viel zu hoch. Die $2,0 \text{ kN/m}^2$ aus dem Feld-Rahmenscherversuch sind eher gering, würden aber für eine Standsicherheitsbeurteilung auf der konservativen Seite liegen. Die aus den CU-Triaxialversuch (CPTU 6/16 Entnahmetiefe 8,2 – 8,7 m) ermittelten Scherparameter liegen in der Nähe der durchgeführten Feld-Rahmenscherversuche und den Versuchen mit der Taschenflügelsonde und dem Taschenpenetrometer. Der Reibungswinkel des durchgeführten Triaxialversuchs liegt im Vergleich zu den In-Situ Versuchen bei $29,0^\circ$ und die Kohäsion bei $7,0 \text{ kN/m}^2$.

Die Bandbreite der Ergebnisse der zusätzlichen In-Situ Versuche ist auf die grobe Streuung der Zusammensetzung des Schlammteichmaterials an der Oberfläche und die verschiedenen Fehlerquellen bei den Versuchsdurchführungen zurückzuführen.

6.3 Geotechnisches Modell

Für die Standsicherheitsbeurteilung des Schlammteichs C wurden aufgrund der Baugrunderkundungen drei Schnitte gewählt und dafür ein geotechnische Modell entwickelt. Nach Auswertung der im vorherigen Kapitel beschriebenen Baugrunderkundungen konnte folgendes grundsätzliches geotechnisches Modell für

alle drei zu betrachtenden Dammquerschnitte entwickelt werden. Der Aufbau des Schlammteichs wurde in drei Bodenschichten unterteilt.

- Dammbaumaterial
- Übergangszone
- Schlammteichmaterial

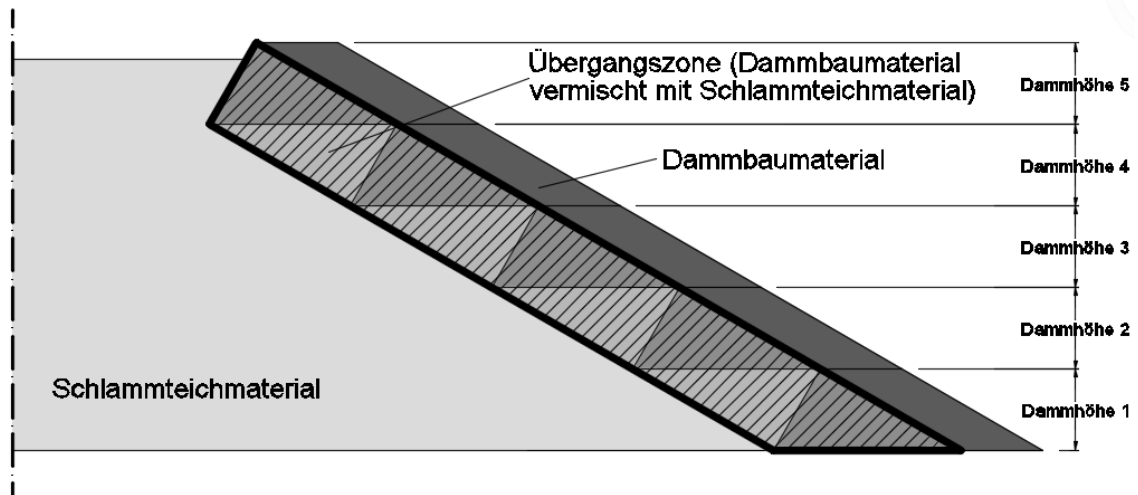


Abb. 65 Schemaskizze Konstruktionsprinzip upstream method (Dammachse zur Wasserseite verschoben)

Die eingeführte Übergangszone ist auf das Konstruktionsprinzip des Schlammteichs zurückzuführen. Der vorliegende Schlammteich C wurde wie aus der Luftbilddauswertung und der Baugrunderkundung hervorgeht nach der upstream Method über ca. 30 Jahre errichtet. Durch den schrittweisen Aufbau des Dammkörpers entstand eine Übergangszone in welcher sich das verwendete Dammbaumaterial mit dem eingespülten Schlammteichmaterial vermischt hat. Diese Übergangszone konnte anhand der durchgeführten Kernbohrungen und der Rammkernsondierungen erkundet und geometrisch definiert werden.

Für die exakte Beschreibung des geotechnischen Modells werden die drei Schnitte im Folgenden einzeln betrachtet.

6.3.1 Schnitt 1-1

Schnitt 1-1 hat eine Dammhöhe von 18,0 m bei einer durchschnittlichen luftseitigen Böschungsneigung von $35,0^\circ$, was lokal in diesem Bereich die steilste Böschungsneigung des gesamten Absperrbauwerks darstellt.

Für die Ermittlung des zeitlichen und räumlichen Verlaufs der vorhandenen Sickerlinie wurden im Schnitt 1-1 zwei Porenwasserdruckgeber und fünf Pegelrohre eingebaut. Somit sind sieben gemessene Wasserspiegelhöhen bekannt. Im Schlammteichmaterial wurden in der Hauptuntersuchung zwei Porenwasserdruckgeber in einer Tiefe von 10,2 m und 15,0 m unter GOK Dammkrone eingebaut (CPTU 7/16, siehe Anhang B. Lageplan). Der Porenwasserdruckgeber in 10,2 m Tiefe hat bei der letzten Auslesung der Daten (24.01.2017) einen Druck von 11,3 kPa gemessen. Das entspricht 1,13 mWS und zeigt somit den Beginn der gesättigten Zone im Schlammteichmaterial, in einer Tiefe von ca. 8,0 m unter der Schlammteichoberfläche. Der Porenwasserdruckgeber in 15,0 m Tiefe hat bei der letzten Auslesung der Daten (24.01.2017) einen Druck von 28,5 kPa gemessen. Dies entspricht 2,85 mWS. Die beiden übereinanderliegenden Porenwasserdruckgeber messen somit keinen hydrostatischen Porenwasserdruck. Das lässt auf eine Entwässerung des Schlammteichmaterials nach unten in den gewachsenen Boden und nach vorne in die Übergangszone schließen. Die gesamten Messungen der Porenwasserdruckgeber CPTU 7/16 bis zur letzten Auslesung (07.09.2016 - 24.01.2017) sind im Anhang G Drucksondierungen grafisch dargestellt.

Um den Verlauf der Sickerlinie im hinteren Abschnitt des Schlammteichs zu ermitteln, sind im Bereich des Schnittes 1-1 fünf Pegel errichtet worden (P 1/16 – P 5/16, siehe Anhang B Lageplan). Die Messungen über die Zeit zeigen, dass die Sickerlinie in dem Bereich, der für die Standsicherheitsbeurteilung des Dammkörpers maßgebend ist annähernd horizontal in einer Tiefe von ca. 8,0 m unter GOK Schlammteichmaterial nach hinten verläuft. Der Pegel P1/15 und der Porenwasserdruckgeber CPTU 7/16 in einer Tiefe von 10,2 m messen den Beginn der gesättigten Zone im Schlammteichmaterial annähernd in der gleichen Tiefe. Damit korrelieren die beiden Systeme miteinander und es kann davon ausgegangen werden, dass sie repräsentative Ergebnisse liefern.

Durch die oben beschriebenen Messpunkte ist die Sickerlinie im Schnitt 1-1 bis zu den Porenwasserdruckgebern (CPTU 7/16) bekannt. Im Schnitt 1-1 war aufgrund des Bewuchses an der luftseitigen Dammböschung der Einbau eines Pegels nicht möglich.

Aufgrund der Geometrie der luftseitigen Dammböschung kann jedoch der im nachfolgenden beschriebene Pegel 6/16 vom Schnitt 2-2 auch im Schnitt 1-1 angewendet werden. Somit ist die Sickerlinie bis in die Übergangszone bekannt.

6.3.2 Schnitt 2-2

Schnitt 2-2 hat eine Dammhöhe von ca. 25,3 m bei einer durchschnittlichen luftseitigen Böschungsneigung von $27,0^\circ$. Die Dammhöhe in diesem Bereich stellt die höchste des gesamten Absperrbauwerks dar.

Für die Ermittlung des zeitlichen und räumlichen Verlaufs der vorhandenen Sickerlinie wurden Porenwasserdruckgeber und Pegelrohe eingebaut. Im Schnitt 2-2 sind drei gemessene Wasserspiegelhöhen bekannt. Im Schlammteichmaterial durch die zwei in der Hauptuntersuchung eingebauten Porenwasserdruckgeber in einer Tiefe von 10,2 m und 15,0 m unter GOK Dammkrone (CPTU 6/16, siehe Anhang B Lageplan). Der Porenwasserdruckgeber in 10,2 m Tiefe hat bei der letzten Auslesung der Daten (24.01.2017) einen Druck von 10,8 kPa gemessen. Das entspricht 1,08 mWS und zeigt somit den Beginn der gesättigten Zone im Schlammteichmaterial, in einer Tiefe von ca. 8,0 m unter der Schlammteichoberfläche. Der Porenwasserdruckgeber in 15,0 m Tiefe hat bei der letzten Auslesung der Daten (24.01.2017) einen Druck von 20,0 kPa gemessen. Das entspricht 2,0 mWS. Die beiden übereinanderliegenden Porenwasserdruckgeber zeigen, dass keine hydrostatische Porenwasserdruckverteilung vorliegt. Das lässt auf eine Entwässerung des Schlammteichmaterials nach unten in den gewachsenen Boden und nach vorne in die Übergangszone schließen. Die gesamten Messungen der Porenwasserdruckgeber CPTU 6/16 bis zur letzten Auslesung (07.09.2016 - 24.01.2017) sind im Anhang G Drucksondierungen grafisch dargestellt.

Der dritte Messpunkt im Schnitt 2-2 liegt an der luftseitigen Böschung des Dammes (P 6/16, siehe Anhang B Lageplan) und ist ein 12,5 m tiefer Pegel mit einer 4,0 m langen Filterstrecke. Die Spitze des Pegels befindet sich in der vorhin beschriebenen Übergangszone vom Schlammteichmaterial auf das Dammbaumaterial. Der Pegel zeigt bei der letzten Messung (24.01.2017) das Wasser in einer Tiefe von 7,1 m unter Geländeoberkante.

Durch die oben beschriebenen Messpunkte und den annähernd horizontalen Verlauf im Schlammteichmaterial (siehe Schnitt 1-1) ist die Sickerlinie im Schnitt 2-2 bis zum Pegel P 6/16 bekannt.

6.3.3 Schnitt 3-3

Schnitt 3-3 hat eine Dammhöhe von ca. 14,5 m bei einer durchschnittlichen luftseitigen Böschungsneigung von 29°.

Für die Ermittlung des zeitlichen und räumlichen Verlaufs der Sickerlinie wurden im Schnitt 3-3 zwei Porenwasserdruckgeber und ein Pegelrohr eingebaut. Dadurch sind drei gemessene Wasserspiegellhöhen bekannt. Die Besonderheit im Schnitt 3-3 liegt, wie vorhin im Kapitel Ist Zustand des Schlammteichs C - Vorstudie beschrieben, dass das Klarwasser am Dammkörper ansteht. Eine weitere Besonderheit stellt die Entfernung zur Einspülstelle dar. Der Bereich des Schnittes 3-3 ist am weitesten davon entfernt und weißt somit anhand der durchgeführten Korngrößenverteilungen die feinsten Fraktionen der Spültrübe auf. Die Porenwasserdruckgeber wurden in einer Tiefe von 6,0 m und 10,2 m unter GOK Dammkrone eingebaut (CPTU 5/16, siehe Anhang B Lageplan). Der Porenwasserdruckgeber in 6,0 m Tiefe hat bei der letzten Auslesung der Daten (24.01.2017) einen Druck von 60,2 kPa gemessen. Das entspricht 6,02 mWS und zeigt, dass das gesamte Schlammteichmaterial in diesem Bereich bis an die Schlammteichoberfläche gesättigt ist. Der Porenwasserdruckgeber in 10,2 m Tiefe hat bei der letzten Auslesung der Daten (24.01.2017) einen Druck von 66,6 kPa gemessen. Das entspricht 6,66 mWS. Die beiden übereinanderliegenden Porenwasserdruckgeber messen somit wiederum keinen hydrostatischen Porenwasserdruck. Das lässt auf eine Entwässerung des Schlammteichmaterials nach unten in den gewachsenen Boden und nach vorne in die Übergangszone schließen. Die gesamten Messungen der Porenwasserdruckgeber CPTU 5/16 bis zur letzten Auslesung (21.09.2016 - 24.01.2017) sind im Anhang G Drucksondierungen grafisch dargestellt.

Der dritte Messpunkt im Schnitt 3-3 liegt an der luftseitigen Dammböschung und ist ein von der Dammkrone aus schräg (15° zur vertikalen geneigt) hineingeschlagener 11,0 m tiefer Pegel, (P 7/16, siehe Anhang B Lageplan) mit einer 4,0 m langen Filterstrecke. Die Spitze des Pegels befindet sich in der beschriebenen Übergangszone vom Schlammteichmaterial auf das Dammbaumaterial. Der Pegel zeigt bei der letzten Messung (24.01.2017) das Wasser in einer Tiefe von 8,85 m unter Geländeoberkante.

Durch die oben beschriebenen Messpunkte und der gesamten Sättigung des Schlammteichmaterials ist die Sickerlinie im Schnitt 3-3 bis zum Pegel P 7/16 bekannt.

6.4 Berechnung der Sickerlinie

Ein wichtiger Bestandteil für den Standsicherheitsnachweis, wie im Kapitel 6.2 Baugrunderkundung Schlammteich C beschrieben, war es die Sickerlinie im Bauwerk möglichst realitätsnah zu erfassen. In jedem der drei gewählten Schnitte für die Standsicherheitsberechnung wurden Wasserstände bzw. Porenwasserdrücke (siehe 6.3 Geotechnisches Modell) gemessen. Die Sickerlinie ist in allen drei Schnitten aufgrund der Baugrunderkundungsmaßnahmen vom Schlammteichmaterial bis in die jeweilige Übergangszone bekannt. Um den weiteren Verlauf der Sickerlinie in der Übergangszone, Dammbaumaterial und schlussendlich in den gewachsenen Boden zu ermitteln, wurden verschiedene Flow Berechnungen durchgeführt. Mittels zweier Varianten wurden verschiedene Verläufe der Sickerlinie mit dem FEM-Programm Plaxis 2D PlaxisFlow ermittelt.

Berechnungsvariante 1

In der Berechnungsvariante 1 wurde versucht, die Charakteristik der Sickerlinie in der Übergangszone und im Dammbaumaterial mit der Groundwater - Inflow zu berechnen. Dabei wurde das Einspülen der Spültrübe auf die Schlammteichoberfläche mit $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ simuliert. Diese Menge entspricht ca. der bewilligten Einspülmenge pro Arbeitstag umgerechnet auf einen m^2 der Gesamtoberfläche des Schlammteichs C (ca. 26500 m^2). Damit sollte der Betriebszustand des Schlammteichs wiedergespiegelt werden. Anhand einer steady state groundwater flow Berechnung wurde der Verlauf der Sickerlinie berechnet.

Die angesetzten Durchlässigkeitsbeiwerte der einzelnen Bodenschichten wurden aus den aufgeschlossenen Korngrößenverteilungen abgeschätzt und sind in Tab. 14. zusammengefasst.

Tab. 14 Durchlässigkeitsbeiwerte (Übergangszone $k_x = 10 \cdot k_y$)

Bodenschicht	Durchlässigkeitsbeiwert k_x [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert k_y [m/s]
Dammbaumaterial	$1,0 \cdot 10^{-4} = 8,64 \text{ m/d}$	$1,0 \cdot 10^{-4} = 8,64 \text{ m/d}$
Übergangszone	$1,5 \cdot 10^{-5} = 1,296 \text{ m/d}$	$1,5 \cdot 10^{-6} = 0,1296 \text{ m/d}$
Schlammteichmaterial	$1,0 \cdot 10^{-6} = 0,0864 \text{ m/d}$	$1,0 \cdot 10^{-7} = 0,00864 \text{ m/d}$
Urgelände	$1,0 \cdot 10^{-4} = 8,64 \text{ m/d}$	$1,0 \cdot 10^{-4} = 8,64 \text{ m/d}$

Für das Schlammteichmaterial wurde ein Verhältnis der Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_x = 10 \cdot k_y$ angesetzt. In der Übergangszone wurde die Durchlässigkeit für die erste Betrachtung auf $k_x = k_y$ gesetzt und in einer zweiten Betrachtung auf $k_x = 10 \cdot k_y$ geändert. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der anderen Bodenschichten sind alle $k_x = k_y$.

Das Simulieren des Einströmens der Spültrübe wurde an drei verschiedenen Höhen im Schlammteichmaterial durchgeführt. Die Absicht war es, mit den verschiedenen Einströmhöhen mögliche Veränderungen der Sickerlinie in der Übergangszone zu untersuchen. Das Schlammteichmaterial hat im Bereich der durchgeführten Flow Untersuchungen eine Mächtigkeit von ca. 20,0 m. Die Einströmhöhe 1 entspricht dem bei der letzten Auslesung (24.01.2017) gemessenen Wasserstand und liegt ca. 8,0 m unter GOK Schlammteichoberfläche. Die Einströmhöhe 2 liegt im unteren Drittel des Schlammteichmaterials und die Einströmhöhe 3 im oberen Drittel.

In den Abbildungen Abb. 66 bis Abb. 68 sind die drei verschiedenen Einströmhöhen und die dafür ermittelten Sickerlinien abgebildet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte für die Übergangszone sind auf $k_x = k_y$ gesetzt.

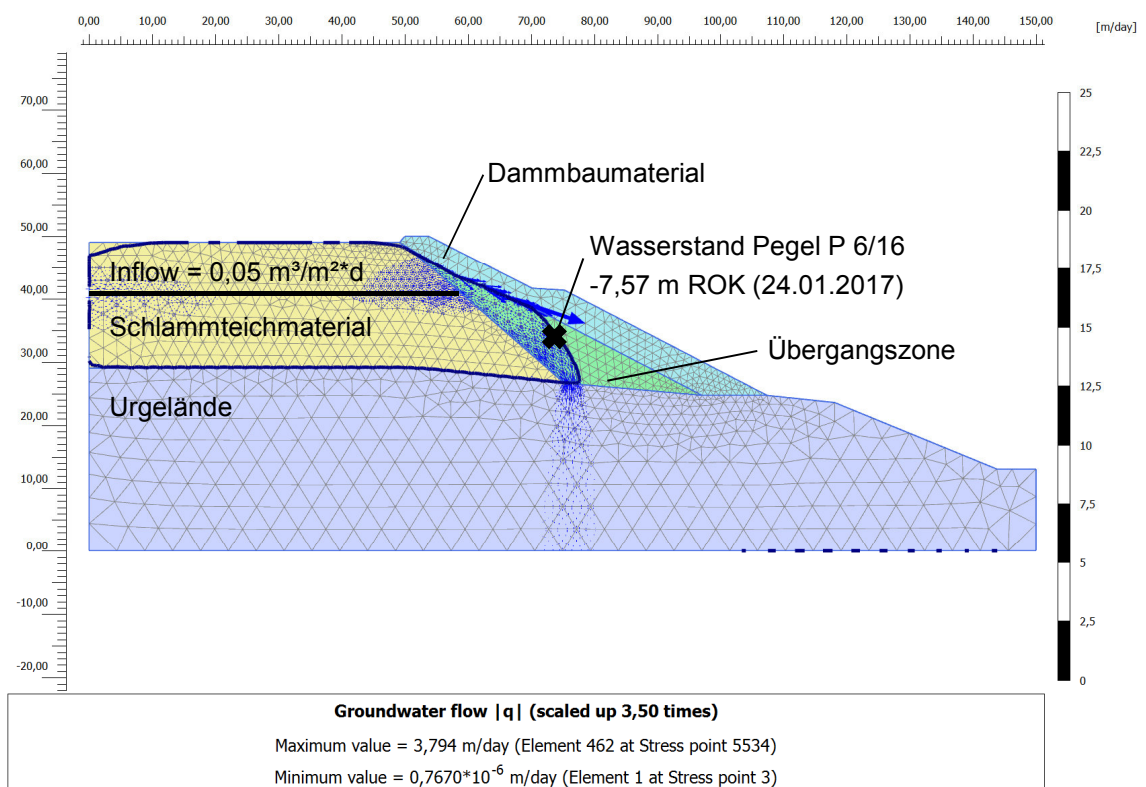


Abb. 66 Inflow - Einströmhöhe 1 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)

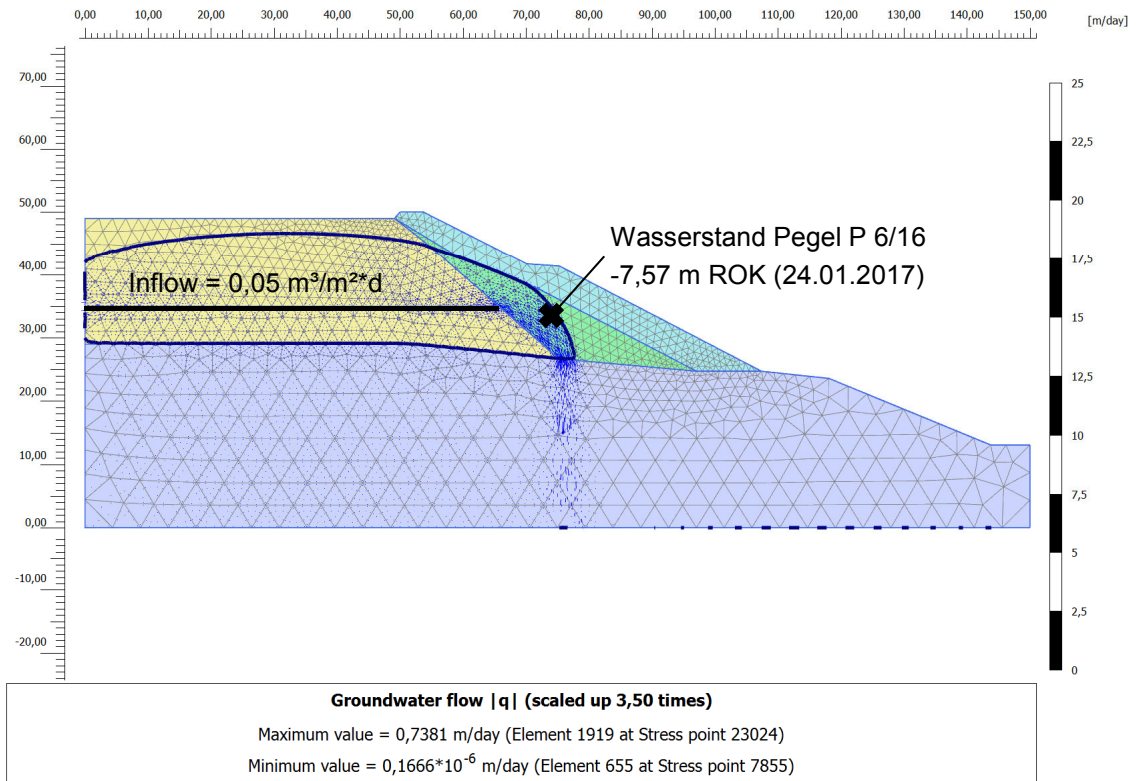


Abb. 67 Inflow - Einströmhöhe 2 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)

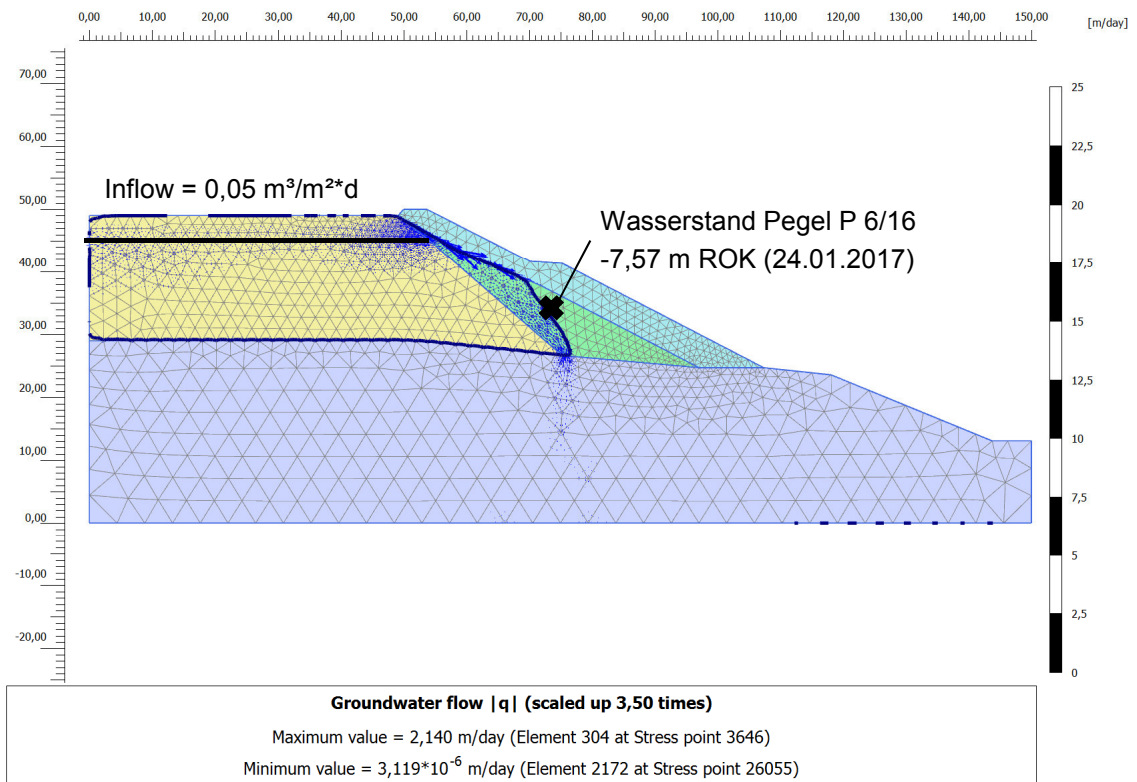


Abb. 68 Inflow - Einströmhöhe 3 (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)

Solange sich unter der Übergangzone das Schlammteichmaterial befindet, verläuft die Sickerlinie an der Schichtgrenze der Übergangzone zum Dammbaumaterial. Sobald sich unter der Übergangzone kein Schlammteichmaterial sondern der gewachsene Boden befindet, beginnt die Sickerlinie aufgrund der Änderung der hydraulischen Eigenschaften relativ steil abzufallen. Demzufolge ist die Übergangzone aufgrund ihrer hydraulischen Durchlässigkeit in der Lage, das Sickerwasser aus dem Schlammteichmaterial in den gewachsenen Boden abzuführen. Das Dammbaumaterial liegt somit in ungesättigter Form vor. Die drei verschiedenen Einströmhöhen haben bei einer steady state groundwater flow Betrachtung keinen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Sickerlinie in der Übergangzone.

In Abb. 69 wurde das Verhältnis des Durchlässigkeitsbeiwertes in der Übergangzone von $k_x = k_y$ auf $k_x = 10 \cdot k_y$ geändert und die Sickerlinie für die Einströmhöhe 1 ermittelt.

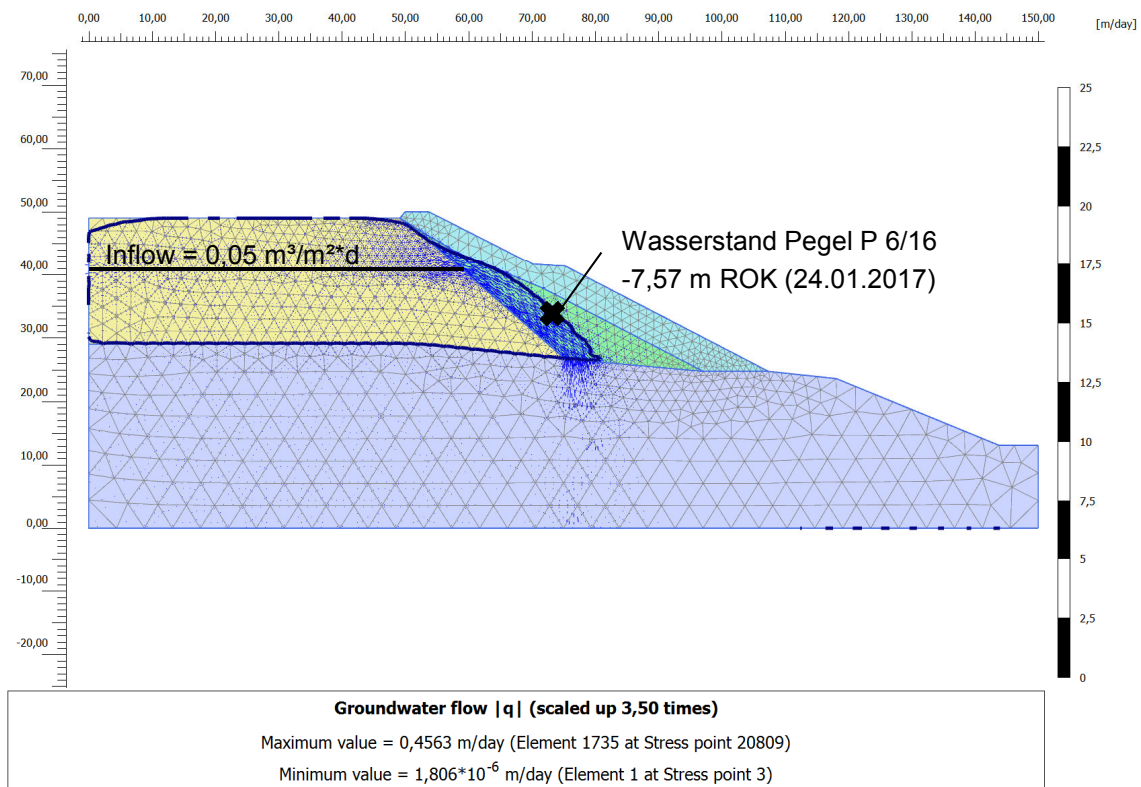


Abb. 69 Inflow - Einströmhöhe 1 (Durchlässigkeit Übergangzone $k_x = 10 \cdot k_y$)

Die berechnete Sickerlinie verläuft im oberen Teil wieder an der Schichtgrenze der Übergangzone zum Dammbaumaterial. Durch die Veränderung der Durchlässigkeitsbeiwerte in der Übergangzone auf $k_x = 10 \cdot k_y$ fällt die Sickerlinie nicht

mehr ganz so steil ab wie in den ersten Betrachtungen ($k_x = k_y$). Die Abführung des Sickerwassers aus dem Schlammteichmaterial in den gewachsenen Boden erfolgt über die Übergangszone, das Dammbaumaterial ist in keinem Bereich gesättigt.

In Abb. 66 bis Abb. 69 ist der gemessene Wasserstand im Pegel P 6/16 dargestellt. Vergleicht man die berechneten Verläufe der Sickerlinien in der Übergangszone mit dem gemessenen Wasserstand im Pegel P 6/16, ist eine gute Übereinstimmung gegeben.

Berechnungsvariante 2

In der Berechnungsvariante 2 wurden alle aus der Baugrunderkundung bekannten Wasserspiegelhöhen bzw. Porenwasserdrücke als Groundwater - Head in Plaxis 2D PlaxFlow eingegeben. Dadurch war die Sickerlinie bis in die Übergangszone definiert und der restliche Ast der Sickerlinie wurde mit einer steady state groundwater flow Berechnung ermittelt. Die Berechnungsvariante 2 wurde mit den gleichen Durchlässigkeitsverhältnissen für die Übergangszone wie in Berechnungsvariante 1 durchgeführt. In der ersten Betrachtung wurde $k_x = k_y$ gesetzt und in der zweiten $k_x = 10 \cdot k_y$.

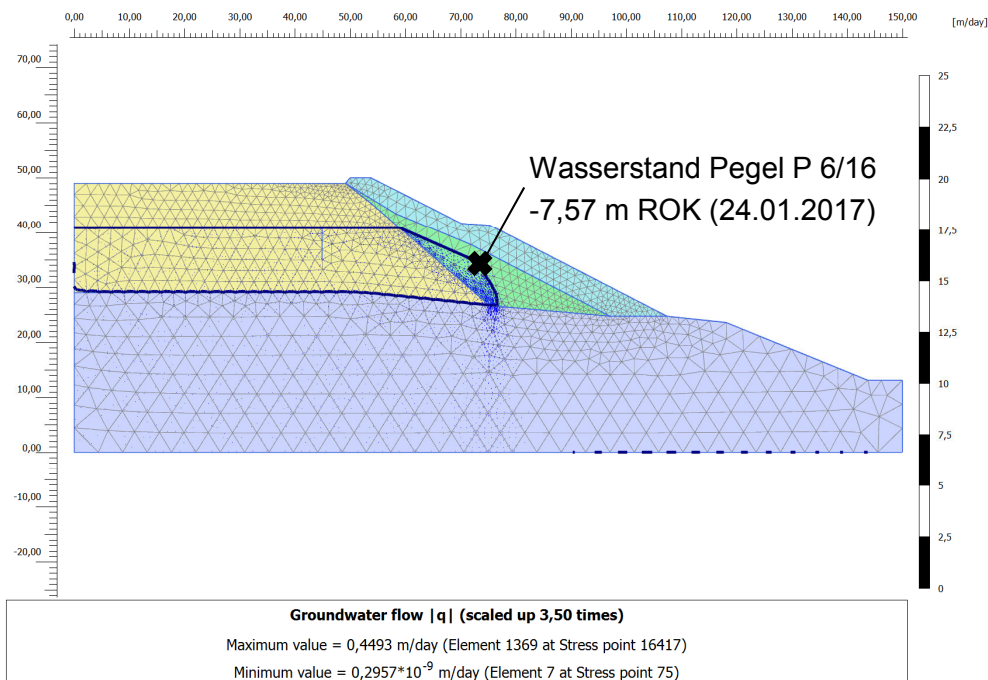


Abb. 70 Head (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = k_y$)

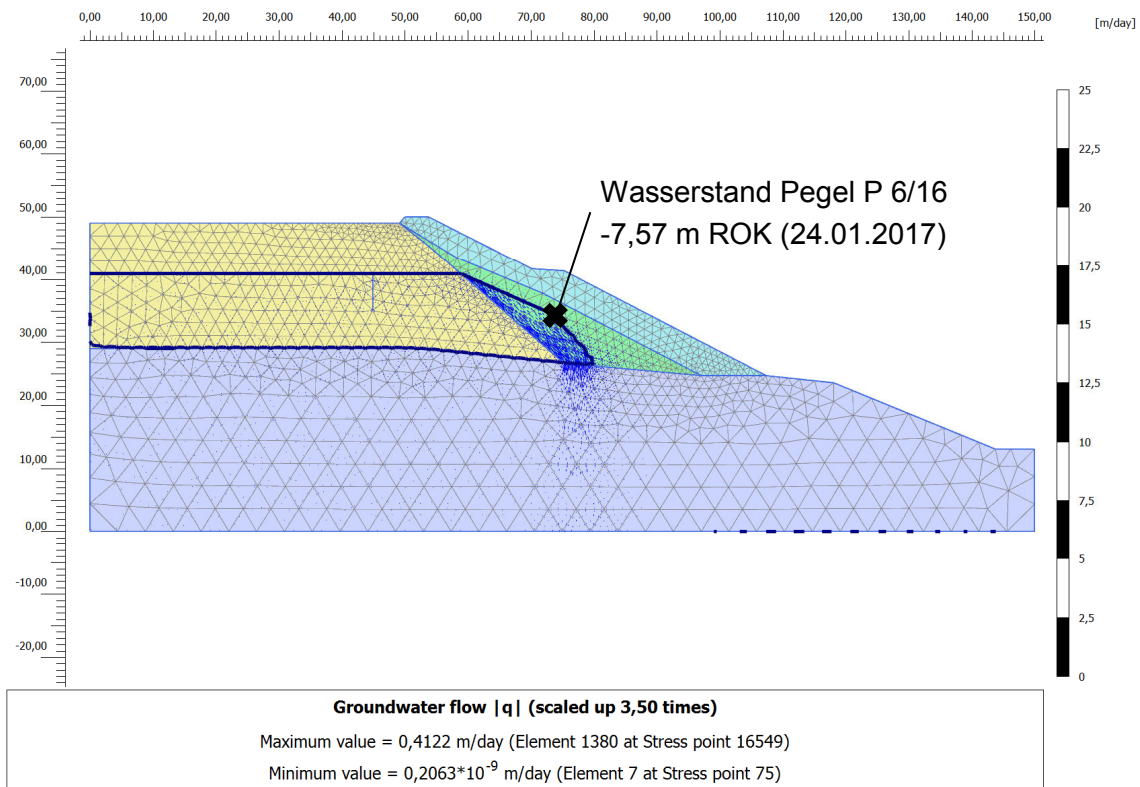


Abb. 71 Head (Durchlässigkeit Übergangszone $k_x = 10 \cdot k_y$)

Aufgrund der Eingabe der bekannten Wasserspiegelhöhen aus der Baugrunderkundung mit dem Befehl Head, ist der Verlauf der Sickerlinie in diesem Bereich vorgegeben und wird auch durch die Berechnung nicht verändert. Der durch die Flow Berechnung ermittelte Ast der Sickerlinie rechts von den vorgegebenen Punkten (Head) in der Übergangszone zeigt ein ähnliches Verhalten wie in der Berechnungsvariante 1. Demzufolge ist auch für dieses Modell die Übergangszone aufgrund ihrer hydraulischen Durchlässigkeit in der Lage, das Sickerwasser aus dem Schlammteichmaterial in den gewachsenen Boden abzuführen. Das Dammbaumaterial liegt in ungesättigter Form vor.

Fazit für die Berechnung der Sickerlinie

Durch eine Vielzahl an durchgeführten Groundwater Flow Berechnungen, welche zu vergleichbaren Ergebnissen geführt haben, konnte eine realitätsnahe Sättigungslinie ermittelt werden. Diese verläuft im Schlammteichmaterial annähernd horizontal und fällt dann in die durchlässigere Übergangszone ein. Die Neigung der Sickerlinie in der Übergangszone nimmt stetig zu und fällt am Ende steil Richtung Urgelände ab. Die

gewählte steady state groundwater Betrachtung vernachlässigt zeitliche Effekte. Bereits stattgefundenene Entwässerungen bzw. Konsolidierungen, vor allem im Bereich der Schichtgrenze zwischen Schlammteichmaterial und Urgelände werden dabei nicht erfasst. Für eine Standsicherheitsberechnung des Damms liegen die so berechneten Ergebnisse jedoch auf der sicheren Seite. Für die nachfolgenden Standsicherheitsnachweise erfolgt die Ermittlung der Sickerlinie mit der Berechnungsvariante 2.

6.5 Standsicherheitsberechnung

Die Berechnung der Standsicherheit für den Schlammteich C erfolgte gemäß dem Globalsicherheitskonzept aus der Richtlinie des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft und der Österreichischen Staubeckenkommission „Zum Nachweis der Standsicherheit von Staudämmen“. Für Dammbauwerke mit einer Höhe über Gründungssohle von mehr als 15,0 m und einem Stauinhalt von mehr als 500 000 m³ sind die Nachweise für die Lastfallklassen I, II und III zu führen.

Tab. 15 Mindestsicherheiten (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1996)

Lastfallklasse	Beispiele	Mindestsicherheiten η
I (Planmäßige Einwirkungen)	alle Einwirkungen die innerhalb der Bestandsdauer durch planmäßigen Betrieb zu erwarten sind	1,30
II (Außerplanmäßige Einwirkungen)	OBE Betriebserdbeben (Operating Basis Earthquake)	1,20
III (Extreme Einwirkungen)	MCE maximal denkbare Erdbeben (Maximum Credible Earthquake)	1,10

Der Nachweis für die Lastfallklasse I wurde an allen drei Schnitten geführt. Die Nachweise für die Lastfallklasse II (OBE) und Lastfallklasse III (MCE) wurden in dieser Arbeit für den Schnitt 2-2 geführt. Im Kapitel 6.7 Erdbeben, werden die Erdbebenlastfälle (OBE, MCE) gesondert angeführt.

Eine Beschreibung und Interpretation der Porenwasserdruckverteilung für die Standsicherheitsnachweise aufgrund der verwendeten Berechnungsvariante 2 ist im Kapitel 6.5.2 Standsicherheitsnachweis Schnitt 2-2 gegeben.

6.5.1 Standsicherheitsnachweis Schnitt 1-1

Die Ermittlung der Standsicherheit erfolgte mit der Finiten Element Methode, als Stoffgesetz wurde das Kriterium nach Mohr Coulomb verwendet. Die zugehörigen Materialparameter, abgeleitet aus den Erkundungen sind im Anhang I Bodenkennwerte aus Versuchsauswertung enthalten. Die Berechnung der Standsicherheit erfolgte durch zwei unterschiedliche Betrachtungen der Porenwasserdrücke.

- Modell 1.0 – Sickerlinie und Porenwasserdruckverteilung aus Flowberechnung
- Modell 1.1 – Sickerlinie Global Water Level (hydrostatischer Porenwasserdruck)

Modell 1.0 - Sickerlinie aus Flowberechnung (Head)

Im Modell 1.0 wurde die Sickerlinie durch eine ground water flow Berechnung (Berechnungsvariante 2) mit den bekannten Wasserständen bzw. Porenwasserdrücken aus der Baugrunderkundung ermittelt. Die durch eine Phi-c-Reduktion ermittelte Standsicherheit beträgt 1,30 und erfüllt somit die geforderte Sicherheit von 1,30. Abb. 72 bis Abb. 74 zeigen die Ergebnisse des Standsicherheitsnachweises.

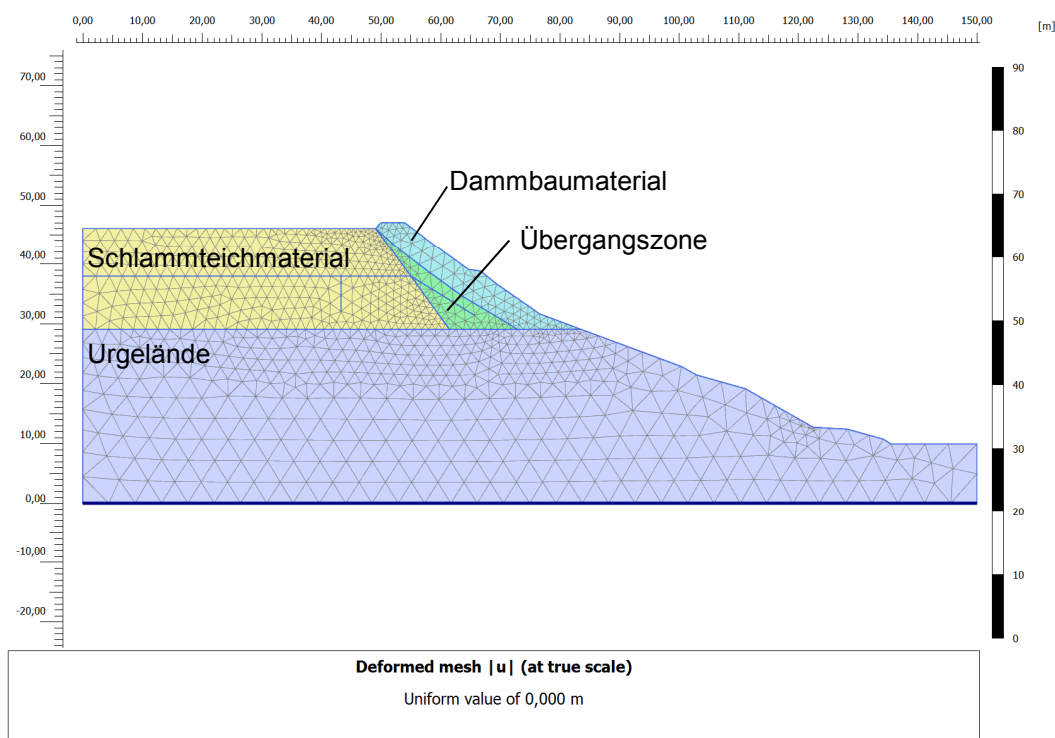


Abb. 72 Modell Initial Phase, Schnitt 1-1 - Modell 1.0

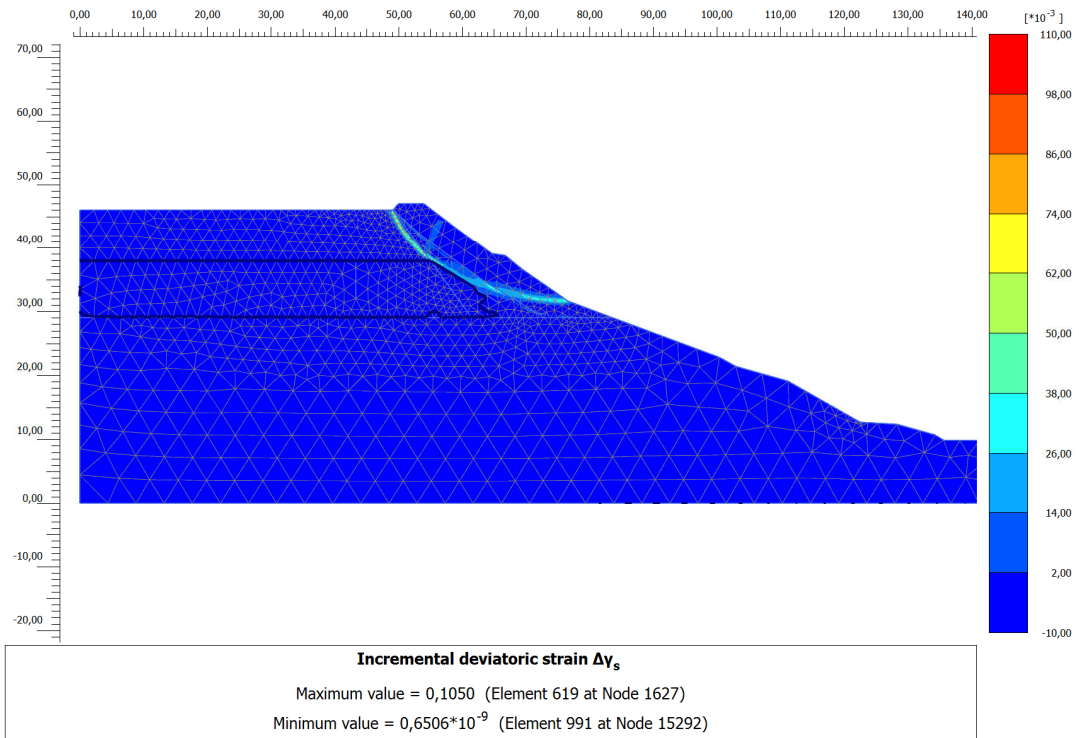


Abb. 73 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 1-1 - Modell 1.0

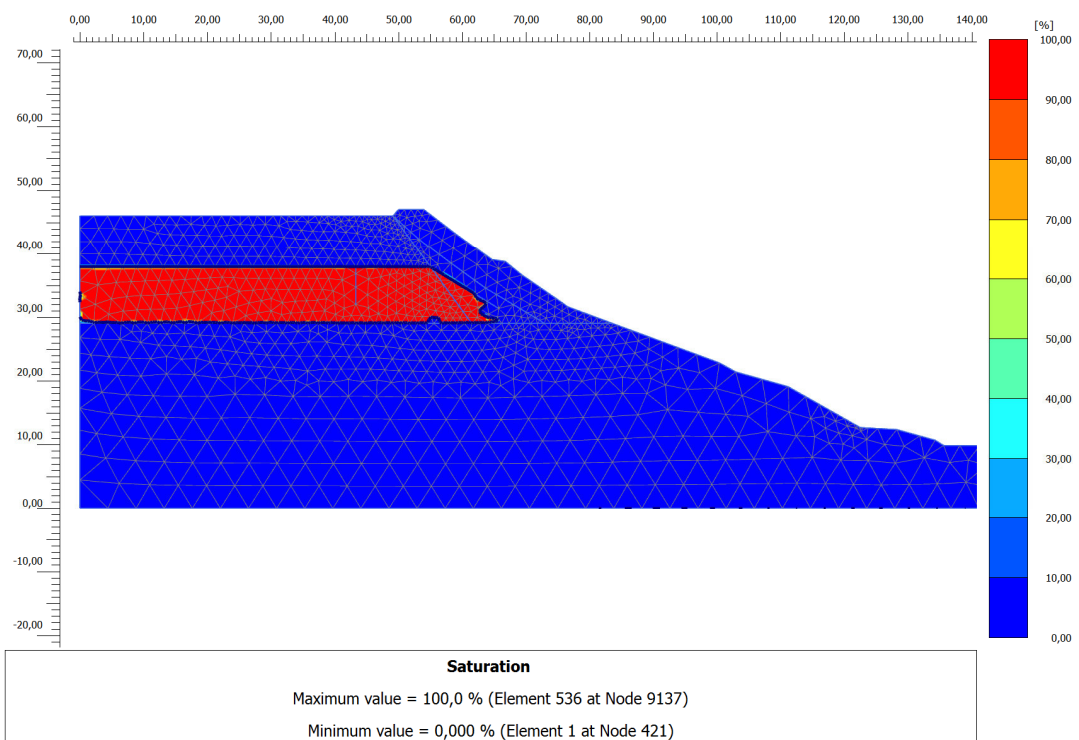


Abb. 74 Sättigung, Schnitt 1-1 – Modell 1.0

Modell 1.1 - Sickerlinie Global Water Level

Im Modell 1.1 wurde die Sickerlinie durch ein Global Water Level händisch definiert. Im Schlammteichmaterial und in der Übergangszone verläuft die Sickerlinie entlang den gemessenen Wasserständen aus der Baugrunderkundung. Der restliche aus der Baugrunderkundung nicht mehr bekannte Verlauf in der Übergangszone wurde für eine konservative Betrachtung in der gleichen Neigung bis zur Modellgrenze verlängert. Die durch eine Phi-c-Reduktion ermittelte Standsicherheit beträgt 1,29 und erfüllt somit die geforderte Sicherheit von 1,30 knapp nicht. Abb. 75 bis Abb. 77 zeigen die Ergebnisse des Standsicherheitsnachweises.

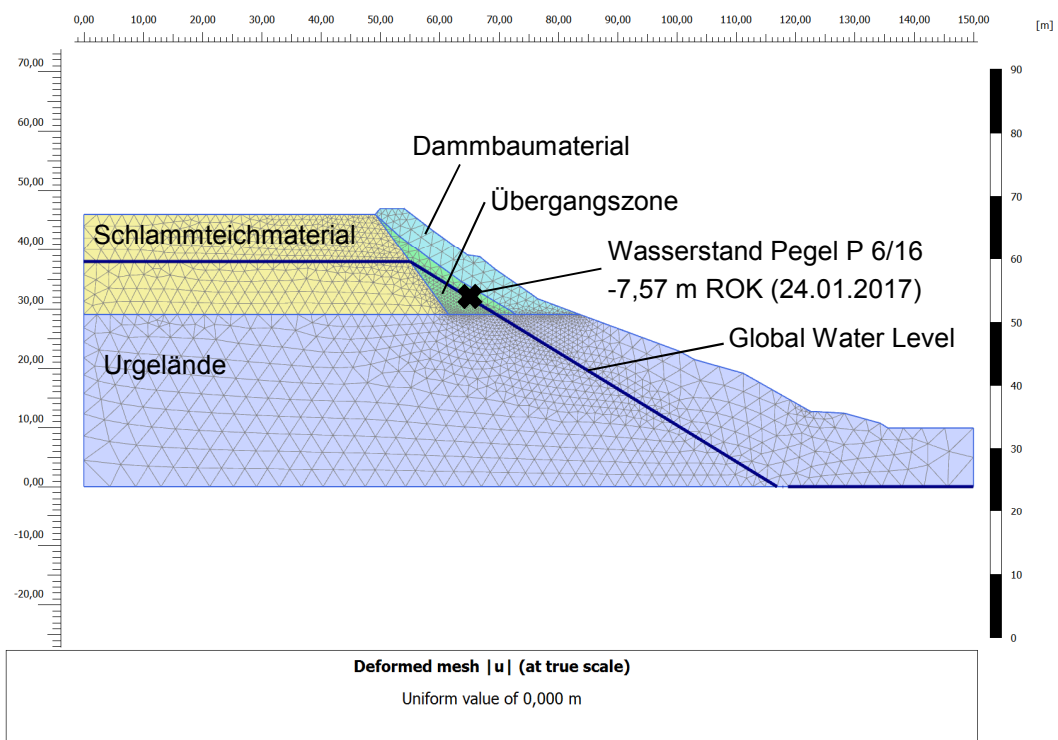


Abb. 75 Modell Initial Phase, Schnitt 1-1 – Modell 1.1

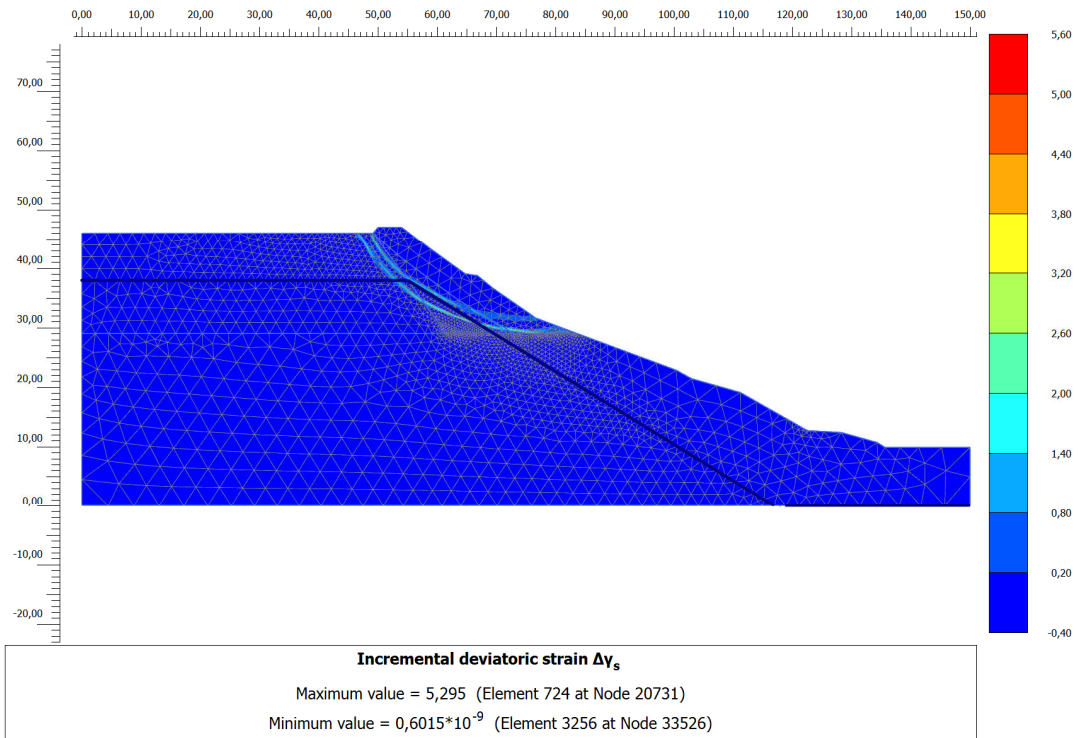


Abb. 76 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 1-1 – Modell 1.1

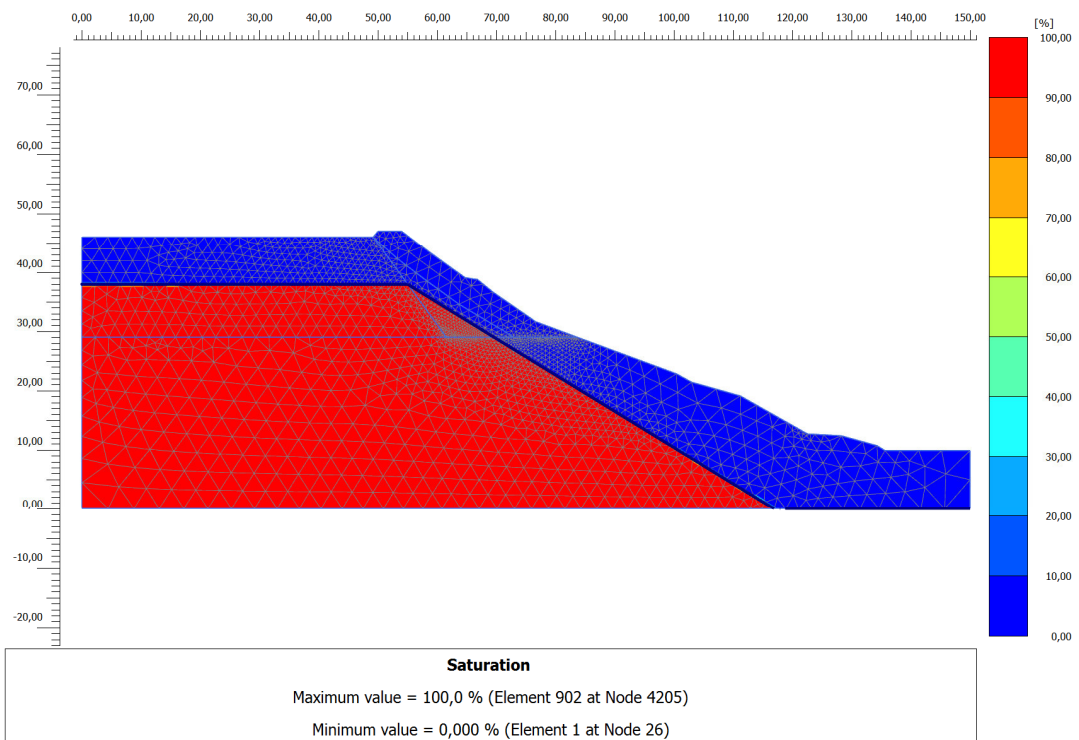


Abb. 77 Sättigung, Schnitt 1-1 – Modell 1.1

Vergleich Modell 1.0 und Modell 1.1

Die wesentlich schnellere Berechnung des Modells 1.1 wurde als Vergleich zur aufwendigeren Berechnung des Modells 1.0 gemacht. Dabei wurde untersucht, ob der erhebliche Aufwand der Baugrunderkundung (Porenwasserdruckgeber) und der verschiedenen Flowberechnungen die berechnete Standsicherheit des Modell 1.0 gegenüber dem Modell 1.1 wesentlich erhöht. Im konkreten Fall des Schnitts 1-1 ist der Unterschied von 0,01 der beiden berechneten Sicherheiten sehr gering. Das liegt aber daran, dass der Bereich des Schnitts 1-1 die steilste Böschungsneigung (ca. 35°) des gesamten Absperrbauwerks darstellt und somit die Sickerlinie einen relativ geringen Einfluss auf den berechneten Versagensmechanismus hat. Der ermittelte Versagensmechanismus für die beiden Modelle liegt relativ weit vorne in der Übergangszone und im Dammbaumaterial. Das Schlammteichmaterial spielt im Modell 1.1 eine geringe Rolle. Die berechnete Sicherheit von 1,29 für das Modell 1.1 würde dennoch nicht für eine positive Standsicherheitsbeurteilung ausreichen. In der Tab. 16 sind die berechneten Sicherheiten für die beiden Modelle noch einmal zusammengefasst.

Tab. 16 Zusammenfassung Standsicherheit Schnitt 1-1

Beschreibung	Lastfallklasse	Standsicherheit	
		berechnet	gefordert
Modell 1.0 - Sickerlinie aus Flowberechnung (Head)	I	1,30	≥ 1,30
Modell 1.1 - Sickerlinie Global Water Level	I	1,29	≥ 1,30

6.5.2 Standsicherheitsnachweis Schnitt 2-2

Die Ermittlung der Standsicherheit erfolgte mit der Finiten Element Methode, als Stoffgesetz wurde das Kriterium nach Mohr Coulomb verwendet. Die zugehörigen Materialparameter, abgeleitet aus den Erkundungen sind im Anhang I Bodenkennwerte aus Versuchsauswertung enthalten. Die Berechnung der Standsicherheit erfolgte durch zwei unterschiedliche Betrachtungen der Porenwasserdrücke.

- Modell 2.0 – Sickerlinie und Porenwasserdruckverteilung aus Flowberechnung
- Modell 2.1 – Sickerlinie Global Water Level (hydrostatischer Porenwasserdruck)

Modell 2.0 - Sickerlinie aus Flowberechnung (Head)

Im Modell 2.0 wurde die Sickerlinie durch eine ground water flow Berechnung (Berechnungsvariante 2) mit den bekannten Wasserständen bzw. Porenwasserdrücken aus der Baugrunderkundung ermittelt. Die durch eine Phi-c-Reduktion ermittelte Standsicherheit beträgt 1,49 und erfüllt somit die geforderte Sicherheit von 1,30. Abb. 78 bis Abb. 82 zeigen die Ergebnisse des Standsicherheitsnachweises.

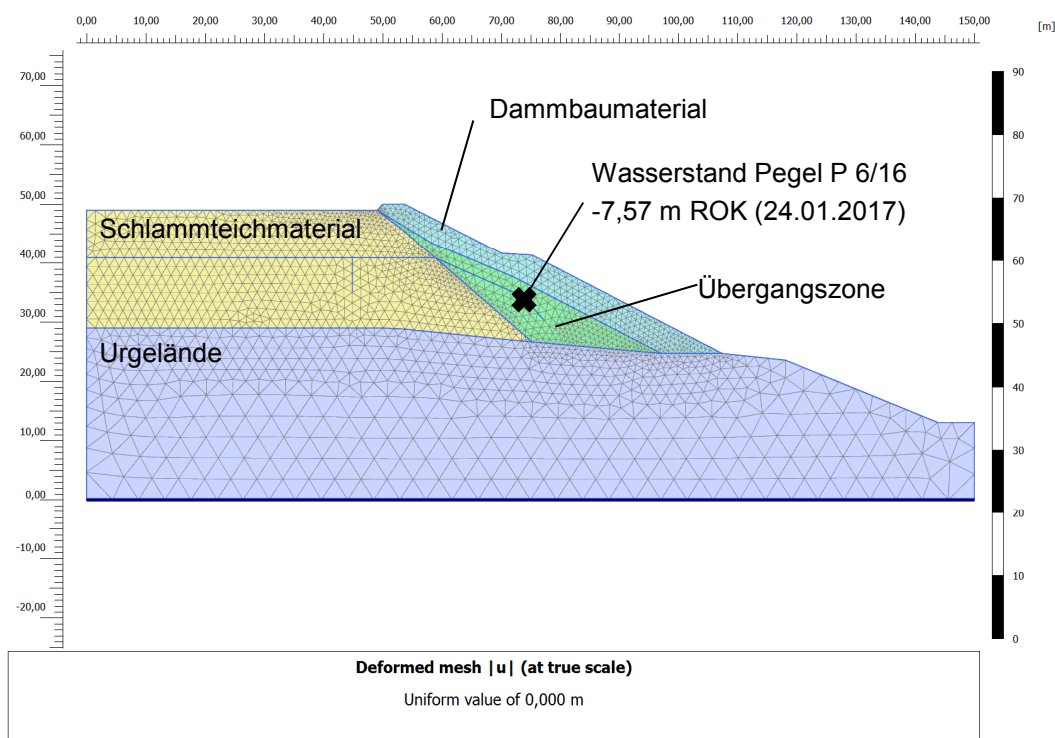


Abb. 78 Modell Initial Phase, Schnitt 2-2 – Modell 2.0

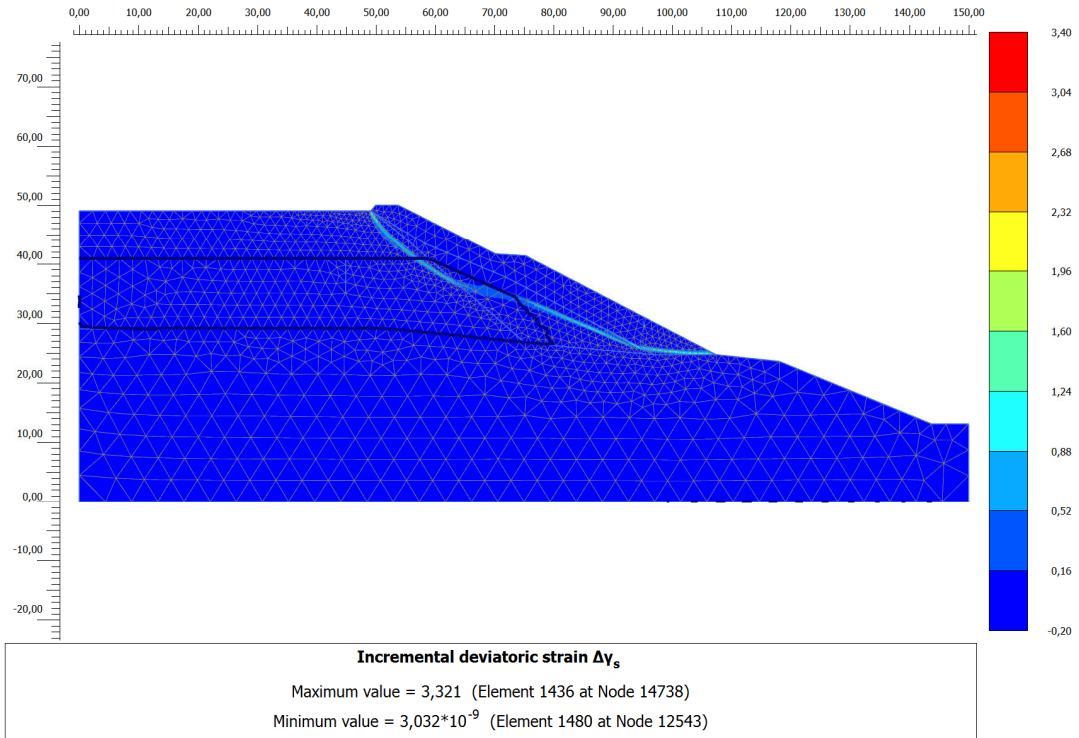


Abb. 79 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 – Modell 2.0

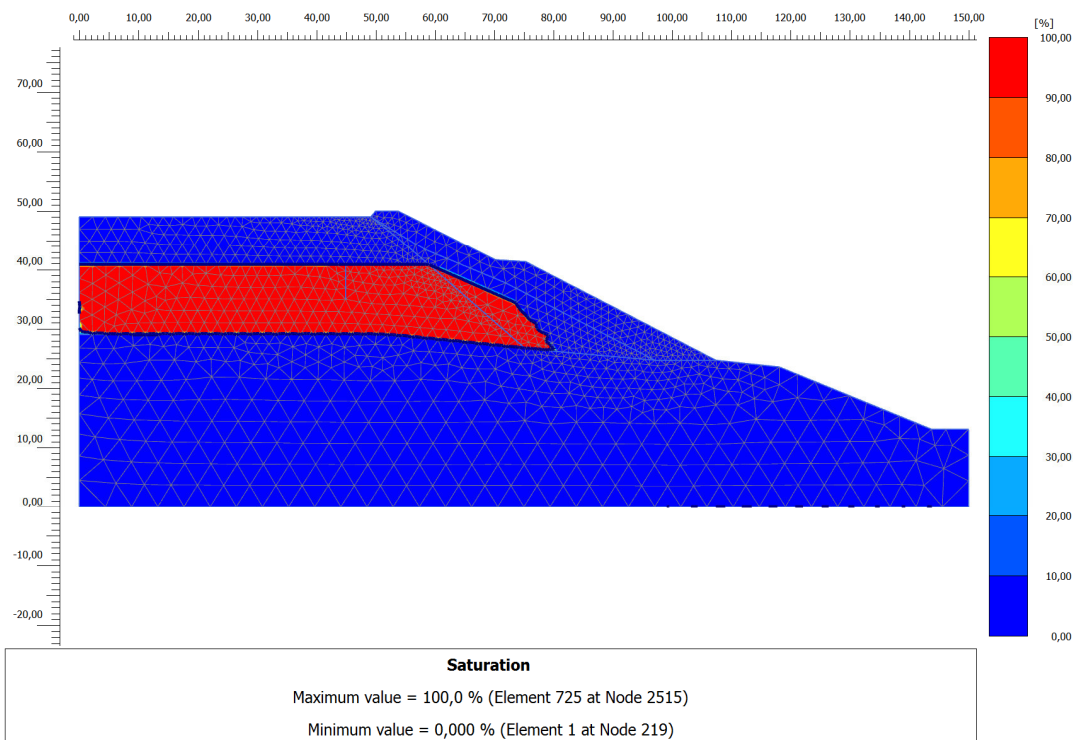


Abb. 80 Sättigung, Schnitt 2-2 – Modell 2.0

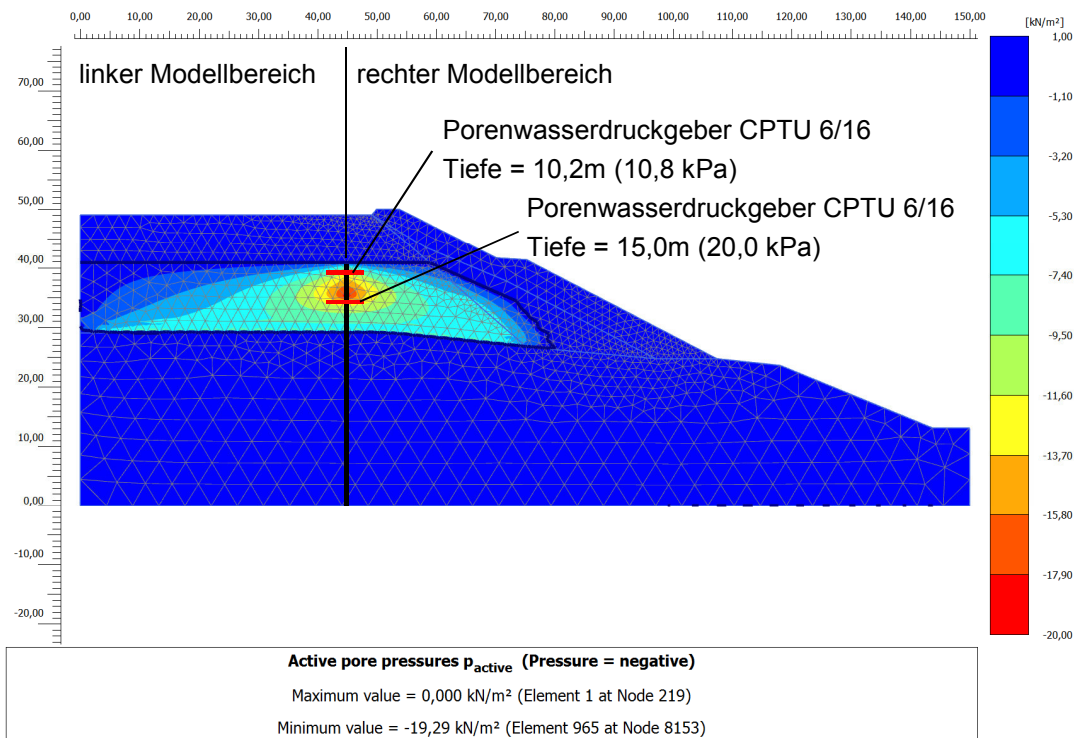


Abb. 81 Porenwasserdruckverteilung Schnitt 2-2 – Modell 2.0

Die berechnete Sickerlinie entspricht den Ergebnissen der Baugrunderkundung sowie den theoretischen Überlegungen gemäß Kapitel 6.4. Ebenso wurde durch die Modellierung eine Übereinstimmung der Porenwasserdrücke mit den ausgewerteten Messdaten erreicht. Der Verlauf der Porenwasserdrücke im Bereich zwischen den Messwerten aus den Porenwasserdruckgebern und der Übergangszone (rechter Modellbereich) zeigt die erwartete Abnahme. Im linken Modellbereich, zwischen Porenwasserdruckgeber und Modellrand zeigen die Ergebnisse ebenso eine Abnahme. Dies ist auf die Modellierung und die nicht vorhandenen Messdaten in diesem Bereich zurückzuführen, jedoch für die geforderte Standsicherheitsbetrachtung ohne Bedeutung. Die nachfolgende Abb. 82 und Abb. 83 zeigen einen Schnitt des Porenwasserdruckverlaufs im Bereich der Porenwasserdruckgeber. Der Verlauf entspricht den gemessenen Drücken aus den Porenwasserdruckgebern.

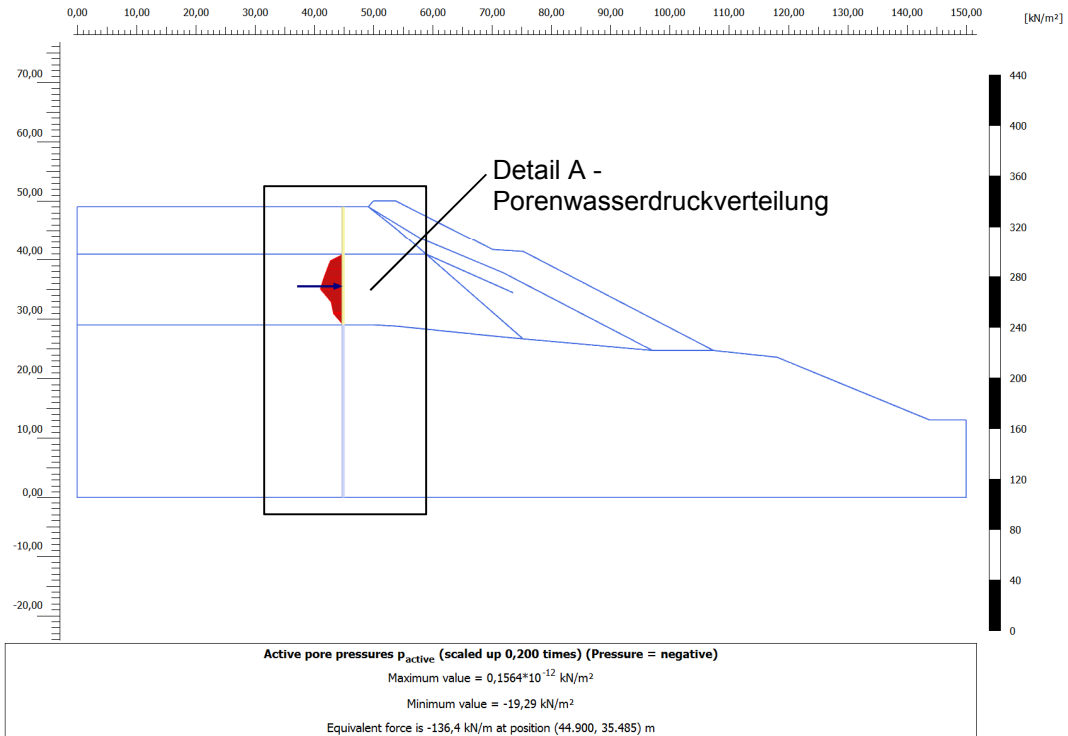


Abb. 82 Porenwasserdruckverteilung im Bereich der Porenwasserdruckgeber, Schnitt 2-2 – Modell 2.0

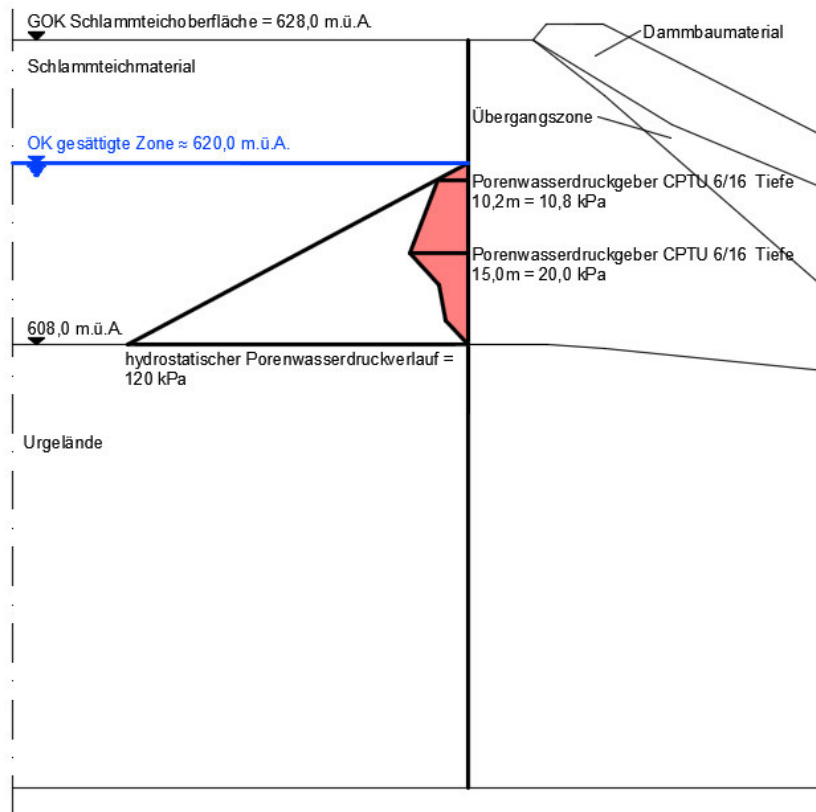


Abb. 83 Detail A - Porenwasserdruckverteilung

Modell 2.1 - Sickerlinie Global Water Level

Im Modell 2.1 wurde die Sickerlinie durch ein Global Water Level händisch definiert. Im Schlammteichmaterial und in der Übergangszone verläuft die Sickerlinie entlang den gemessenen Wasserständen aus der Baugrunderkundung. Der restliche, aus der Baugrunderkundung nicht mehr bekannte Verlauf in der Übergangszone wurde für eine konservative Betrachtung in der gleichen Neigung bis zur Modellgrenze verlängert. Die durchgeführte Phi-c-Reduktion ergibt eine Standsicherheit von 1,30, die somit gleich der geforderten Standsicherheit von 1,30 ist. Abb. 84 bis Abb. 88 zeigen die Ergebnisse des Standsicherheitsnachweises.

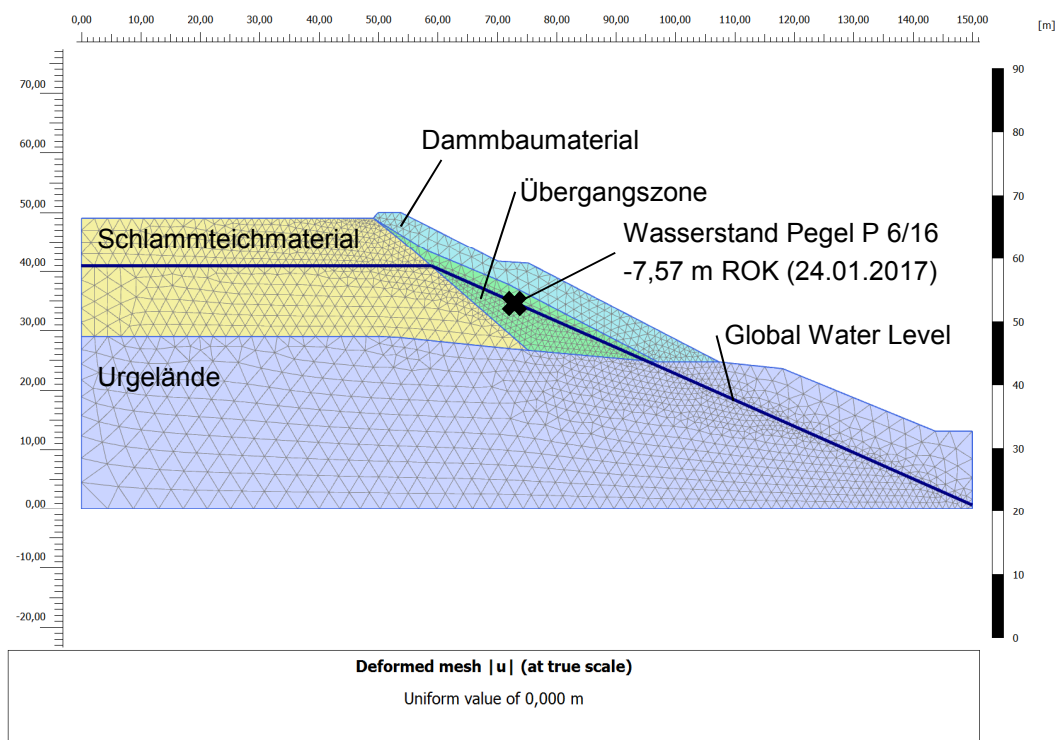


Abb. 84 Modell Initial Phase, Schnitt 2-2 – Modell 2.1

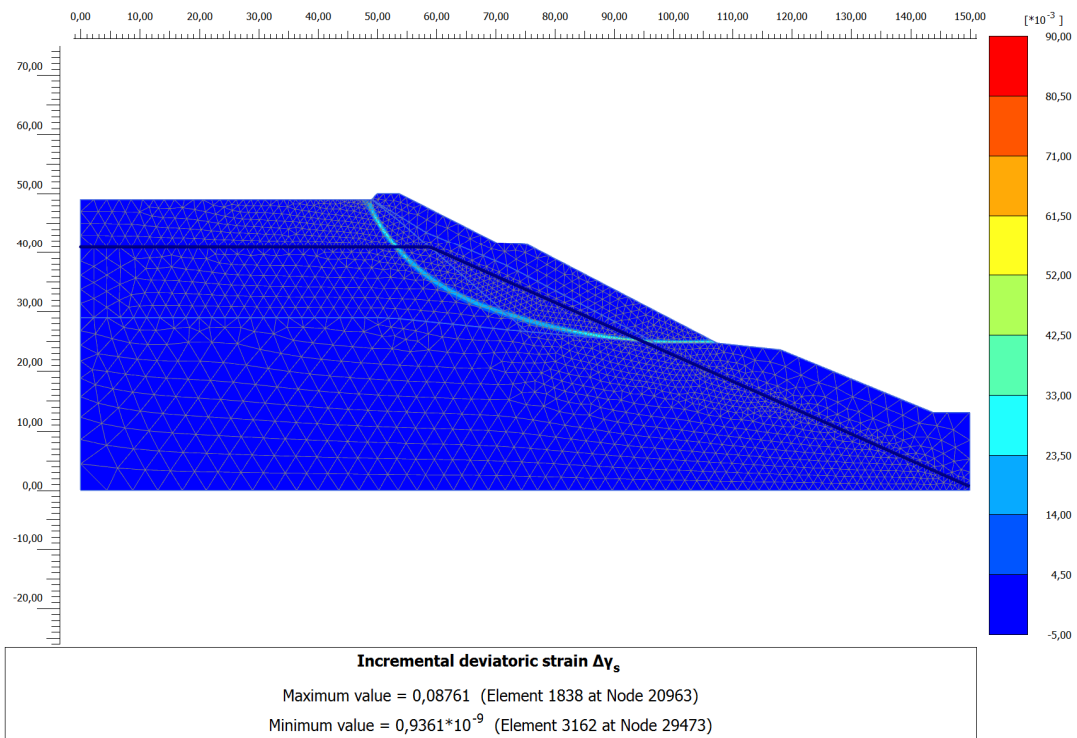


Abb. 85 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 – Modell 2.1

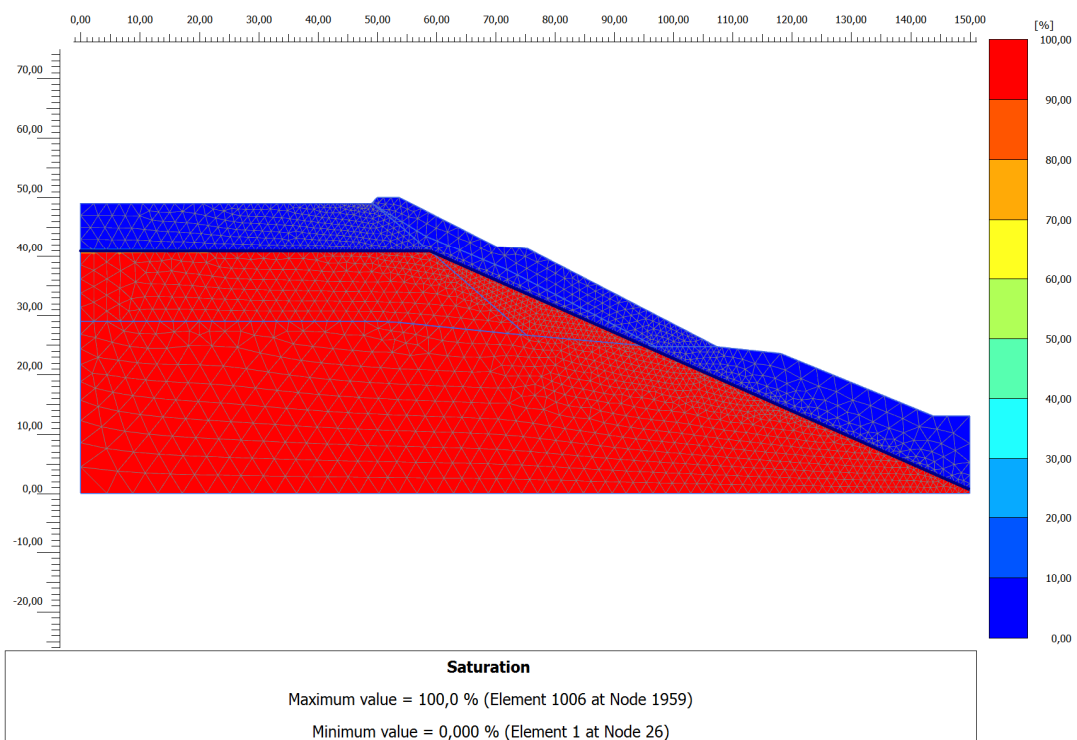


Abb. 86 Sättigung, Schnitt 2-2 – Modell 2.1

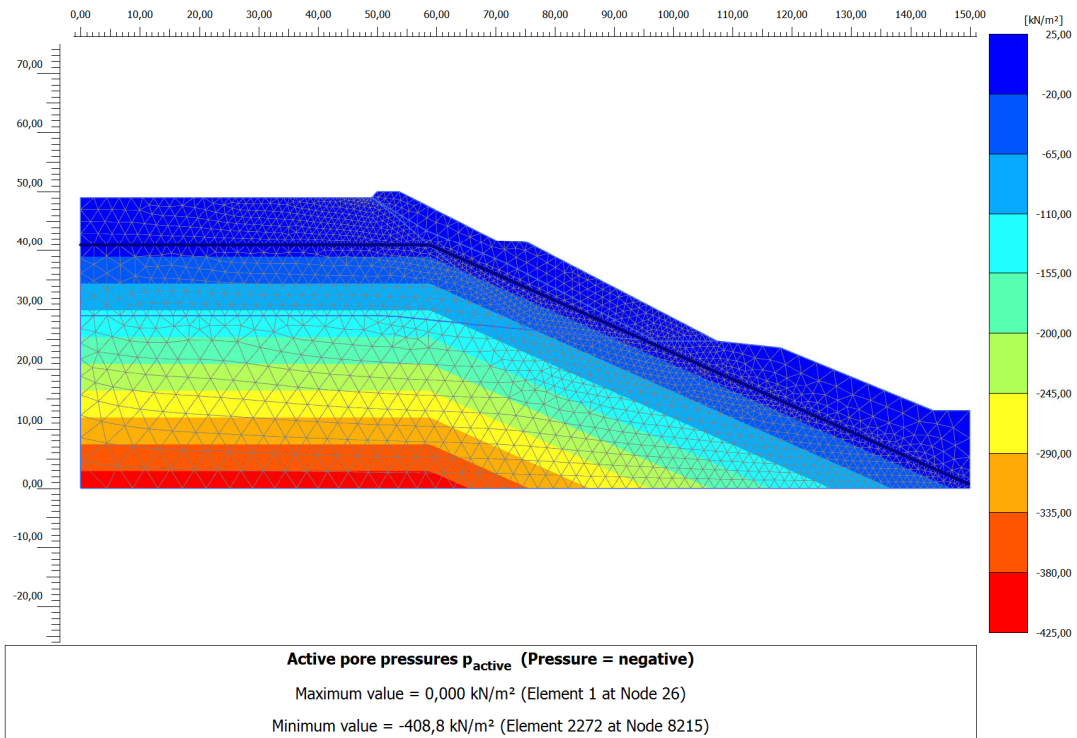


Abb. 87 Porenwasserdruckverteilung Schnitt 2-2 – Modell 2.1

Aufgrund der Eingabe eines Global Water Levels ist die Porenwasserdruckverteilung unter der Sättigungslinie hydrostatisch. Das gesamte Schlammeichmaterial und die Übergangszone unter der Sättigungslinie sowie das Urgelände sind in dieser Betrachtung gesättigt.

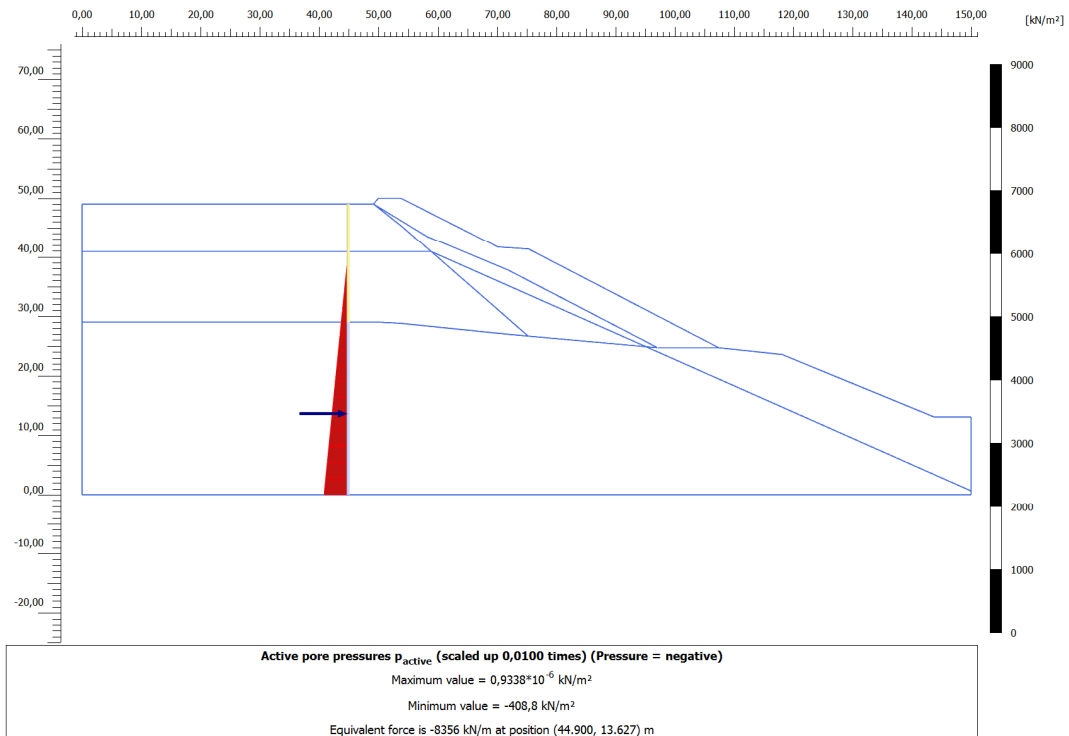


Abb. 88 Hydrostatische Porenwasserdruckverteilung, Schnitt 2-2 –Modell 2.1

Vergleich Modell 2.0 und Modell 2.1

Die wesentlich schnellere Berechnung des Modells 2.1 wurde als Vergleich zur aufwendigeren Berechnung des Modells 2.0 gemacht. Dabei wurde untersucht ob der erhebliche Aufwand der Baugrunderkundung (Porenwasserdruckgeber) und der verschiedenen Flowberechnungen die berechnete Standsicherheit des Modells 2.0 gegenüber dem Modell 2.1 wesentlich erhöht. Im konkreten Fall des Schnitts 2-2 beträgt der Unterschied zwischen den beiden berechneten Sicherheiten 0,19 was im Vergleich zum Schnitt 1-1 (0,01) sehr hoch ist. Vergleicht man die beiden Sickerlinien und die daraus berechneten, Versagenskörper miteinander ist ersichtlich, dass das mögliche Versagen im Model 2.1 viel tiefer in das Schlammteichmaterial hineingeht. Dadurch, dass die vorgegebene Sickerlinie im Modell 2.1 in der Übergangszone nicht abfällt, reduziert sich die berechnete Standsicherheit erheblich. Die für den Schnitt 2-2 berechneten Standsicherheiten der zwei Modelle liegen jedoch beide über den geforderten Wert von 1,30. In der Tab. 17 sind die berechneten Sicherheiten noch einmal zusammengefasst.

Tab. 17 Zusammenfassung Standsicherheit Schnitt 2-2

Beschreibung	Lastfallklasse	Standsicherheit	
		berechnet	gefordert
Modell 2.0 - Sickerlinie aus Flowberechnung (Head)	I	1,49	≥ 1,30
Modell 2.1 - Sickerlinie Global Water Level	I	1,30	≥ 1,30

6.5.3 Standsicherheitsnachweis Schnitt 3-3

Die Ermittlung der Standsicherheit erfolgte mit der Finiten Element Methode, als Stoffgesetz wurde das Kriterium nach Mohr Coulomb verwendet. Die zugehörigen Materialparameter, abgeleitet aus den Erkundungen sind im Anhang I Bodenkennwerte aus Versuchsauswertung enthalten. Die Berechnung der Standsicherheit erfolgte durch zwei unterschiedliche Betrachtungen der Porenwasserdrücke.

- Modell 3.0 – Sickerlinie und Porenwasserdruckverteilung aus Flowberechnung
- Modell 3.1 – Sickerlinie Global Water Level (hydrostatischer Porenwasserdruck)

Modell 3.0 - Sickerlinie aus Flowberechnung (Head)

Im Modell 3.0 wurde die Sickerlinie durch eine ground water flow Berechnung (Berechnungsvariante 2) mit den bekannten Wasserständen bzw. Porenwasserdrücken aus der Baugrunderkundung ermittelt. Die durch eine Phi-c-Reduktion ermittelte Standsicherheit beträgt 1,31 und erfüllt somit die geforderte Sicherheit von 1,30. Abb. 89 bis Abb. 91 zeigen die Ergebnisse des Standsicherheitsnachweises.

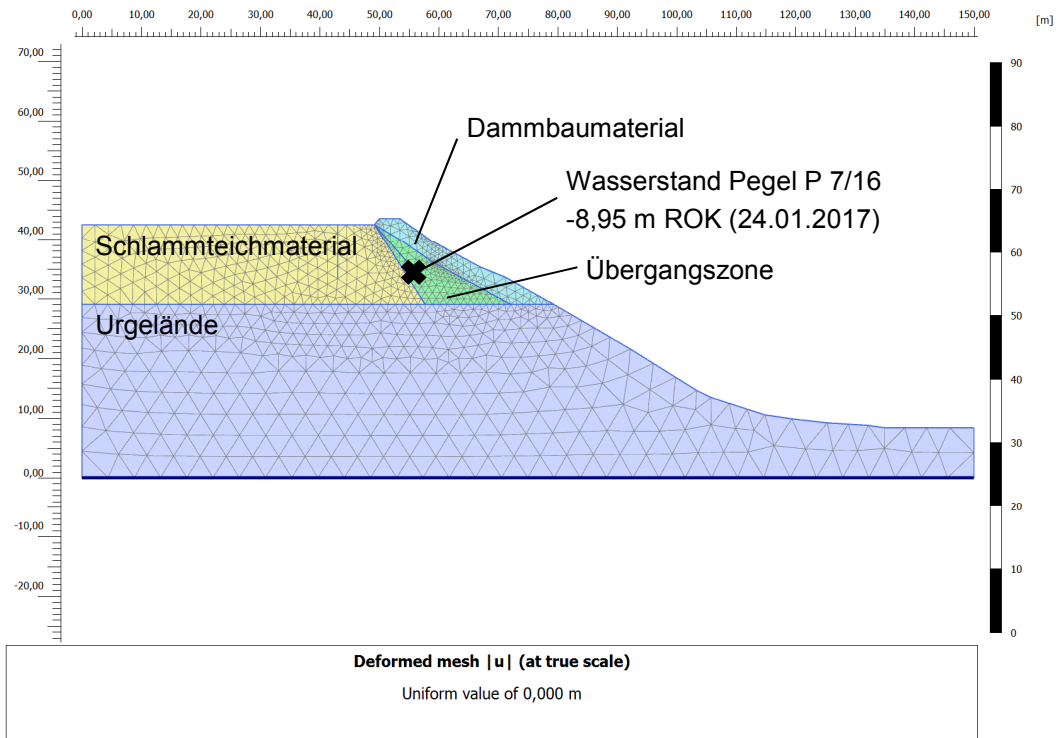


Abb. 89 Modell Initial Phase, Schnitt 3-3 – Modell 3.0

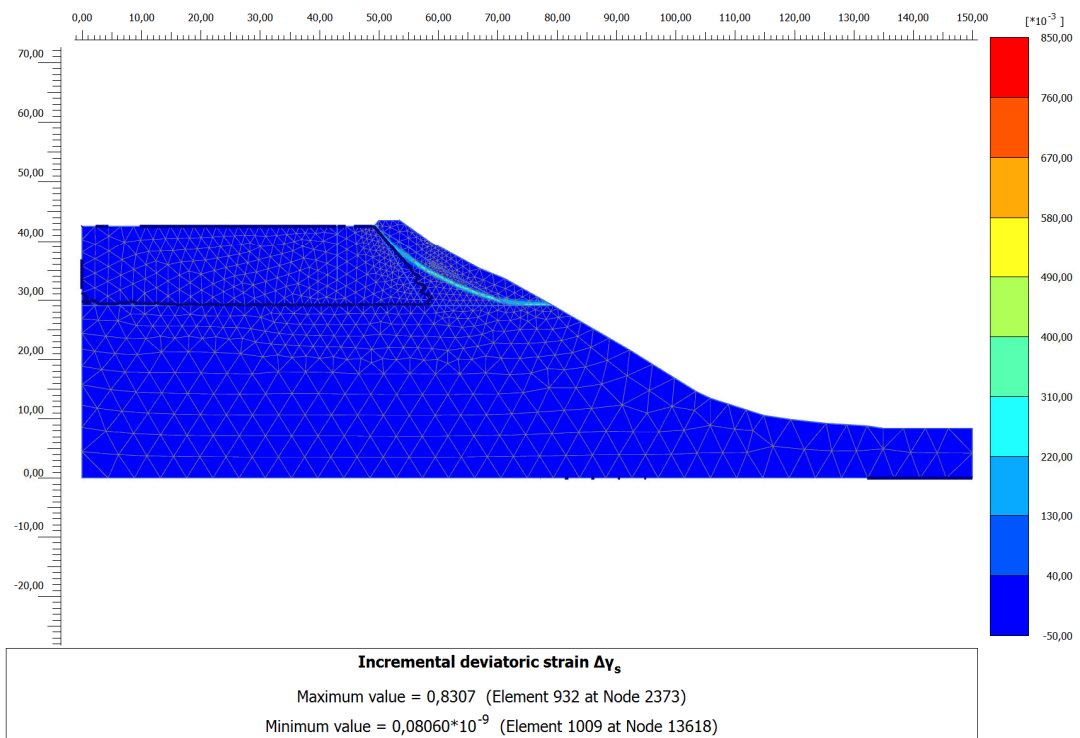


Abb. 90 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 3-3 – Modell 3.0

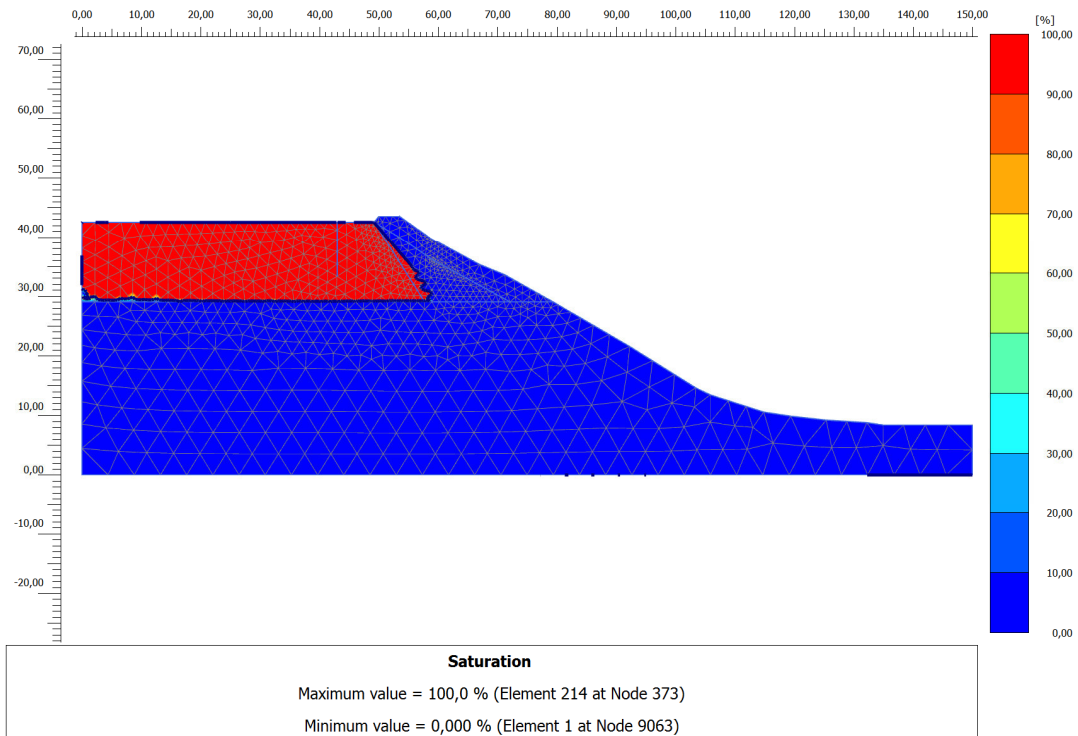


Abb. 91 Sättigung, Schnitt 3-3 – Modell 3.0

Modell 3.1 - Sickerlinie Global Water Level

Im Modell 3.1 wurde die Sickerlinie durch ein Global Water Level händisch definiert. Im Schlammteichmaterial und in der Übergangszone verläuft die Sickerlinie entlang den gemessenen Wasserständen aus der Baugrunderkundung. Der restliche aus der Baugrunderkundung nicht mehr bekannte Verlauf in der Übergangszone wurde in der gleichen Neigung bis zur Modellgrenze verlängert. Die durchgeführte Phi-c-Reduktion ergibt eine Standsicherheit von 1,30 und erfüllt somit die geforderte Sicherheit von 1,30. Abb. 92 bis Abb. 94 zeigen die Ergebnisse des Standsicherheitsnachweises.

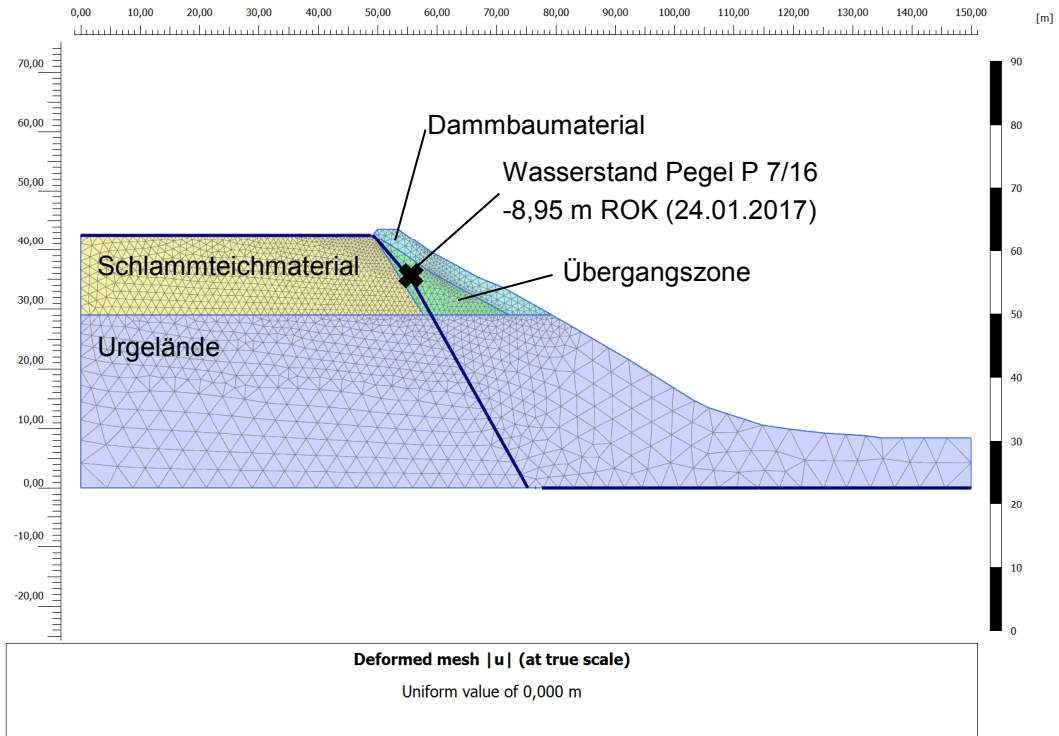


Abb. 92 Modell Initial Phase, Schnitt 3-3 – Modell 3.1

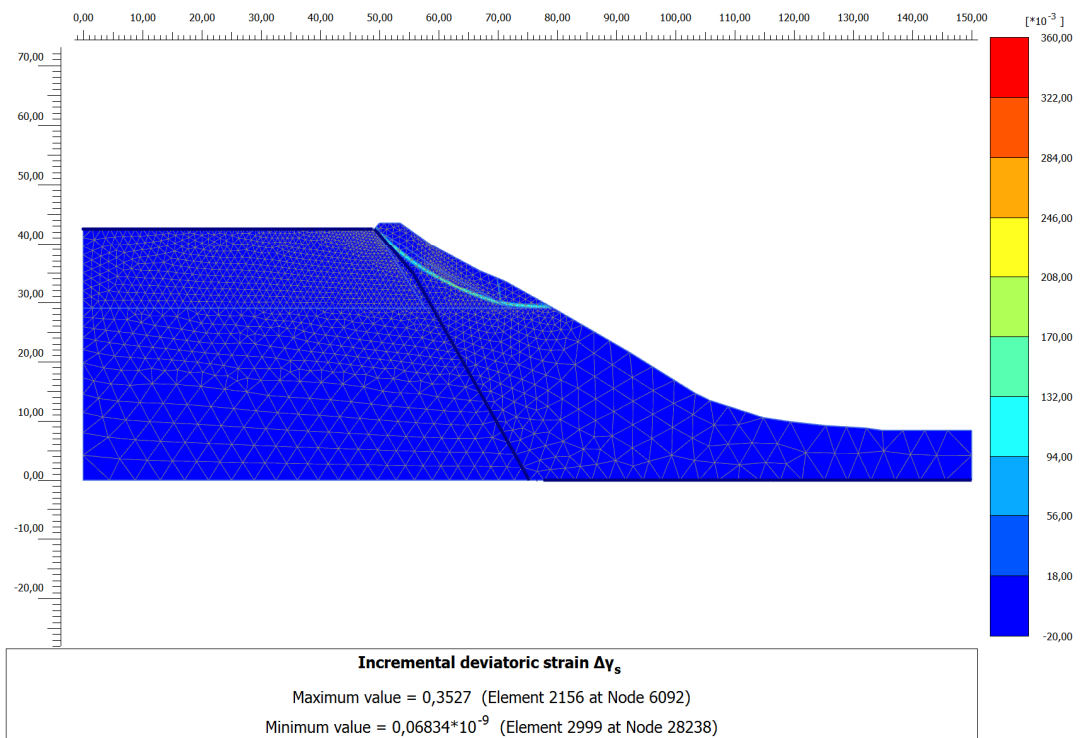


Abb. 93 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 3-3 – Modell 3.1

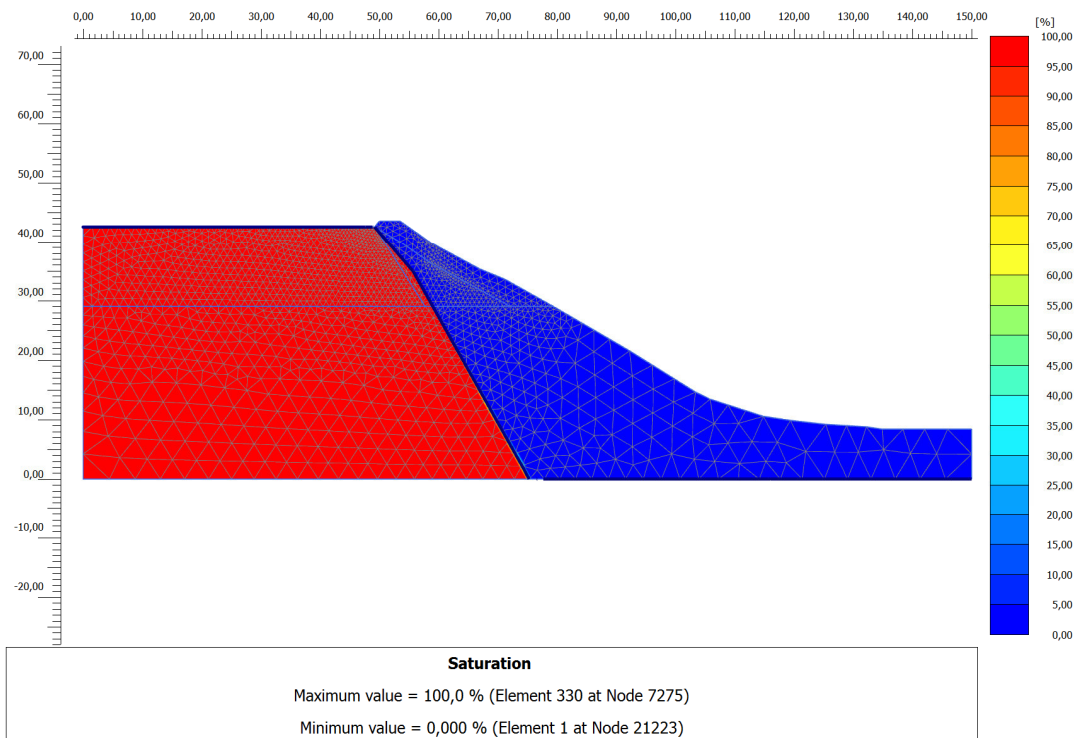


Abb. 94 Sättigung, Schnitt 3-3 – Modell 3.1

Vergleich Modell 3.0 und Modell 3.1

Die wesentlich schnellere Berechnung des Modells 3.1 wurde als Vergleich zur aufwendigeren Berechnung des Modells 3.0 gemacht. Dabei wurde untersucht ob der erhebliche Aufwand der Baugrunderkundung (Porenwasserdruckgeber) und der verschiedenen Flowberechnungen die berechnete Standsicherheit des Modells 3.0 gegenüber dem Modell 3.1 wesentlich erhöht. Im vorliegenden Fall des Schnitts 3-3 beträgt der Unterschied zwischen den beiden berechneten Sicherheiten 0,01, was im Vergleich mit Schnitt 2-2 (0,16) wenig ist. Vergleicht man die Sickerlinien der beiden Modelle ist ersichtlich, dass sie sehr ähnlich verlaufen. Aufgrund des gemessenen Wasserstands im Pegel P 7/16 fällt die Sickerlinie im Bereich des Schnitts 3-3 in der Übergangszone relativ steil ab. Dies kann damit in Verbindung gebracht werden, dass sich im Bereich des Schnitts 3-3 die feinsten Ablagerungen der Spültrübe befinden und das Schlammteichmaterial als Schluff / Ton vorliegt und somit relativ langsam in die Übergangszone entwässert. Vergleicht man die beiden berechneten Versagensmechanismen sieht man, dass im Modell 3.1 im oberen Bereich das mögliche Versagen weiter nach hinten in das Schlammteichmaterial. Die für den Schnitt 3-3 berechneten Standsicherheiten liegen jedoch beide über den geforderten

Wert von 1,30. In der Tab. 18 sind die berechneten Sicherheiten noch einmal zusammengefasst.

Tab. 18 Zusammenfassung Standsicherheit Schnitt 3-3

Beschreibung	Lastfallklasse	Standsicherheit	
		berechnet	gefordert
Modell 3.0 - Sickerlinie aus Flowberechnung (Head)	I	1,31	≥ 1,30
Modell 3.1 - Sickerlinie Global Water Level	I	1,30	≥ 1,30

6.6 Bodenverflüssigungspotential - Schlammteichmaterial

Das Verflüssigungspotential des Schlammteichmaterials wurde anhand der durchgeführten Laborversuche Wassergehalt, Korngrößenverteilung (kombinierte Sieb-Schlämmanalyse) und Zustandsgrenzen (Fließ- und Ausrollgrenze) überprüft. Dabei wurden die im Kapitel 3.2 Bodenverflüssigungspotential (Erdbeben) beschriebenen einfachen Ausschlussverfahren verwendet.

Modified Chinese Criteria:

Tab. 19 Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 11,0 -12,0 m)

Probe		CPTU 2/15		Modified Chinese Criteria	Ergebnis
Entnahmetiefe		11,0 – 12,0	[m]		nicht Verflüssigungsgefährdet
Tongehalt		31,9	[%]	> 10,0 %	
Fließgrenze	w_L	40,4	[%]	> 32,0 %	

Tab. 20 Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 17,5 -18,5 m)

Probe		CPTU 2/15		Modified Chinese Criteria	Ergebnis
Entnahmetiefe		17,5 – 18,5	[m]		nicht Verflüssigungsgefährdet
Tongehalt		33,5	[%]	> 10,0	
Fließgrenze	w_L	34,1	[%]	> 32,0	

Einteilung nach der Fließgrenze w_L und der Plastizitätszahl I_P :

Tab. 21 Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 11,0 -12,0 m)

Probe		CPTU 2/15		Einteilung nach w_L und I_P	Ergebnis
Entnahmetiefe		11,0 – 12,0	[m]		nicht Verflüssigungsgefährdet
Fließgrenze	w_L	40,4	[%]	$35 < 40,4 < 50$	
Plastizitätszahl	I_P	21,9	[-]	$> 15,0$	

Tab. 22 Verflüssigungspotential CPTU 2/15 (Entnahmetiefe 17,5 -18,5 m)

Probe		CPTU 2/15		Modified Chinese Criteria	Ergebnis
Entnahmetiefe		17,5 – 18,5	[m]		nicht Verflüssigungsgefährdet
Fließgrenze	w_L	34,1	[%]	$25 < 34,1 < 35$	
Plastizitätszahl	I_P	16,7	[-]	$> 15,0$	

Die Auswertungen für die beiden Proben aus der CPTU 2/15 zeigen das Schlammteichmaterial aufgrund des hohen Tonanteils als nicht verflüssigungsgefährdet.

Das Bodenverflüssigungspotential abgeschätzt über die durchgeführten Korngrößenverteilungen ist aus dem Anhang H Korngrößenverteilungen zu entnehmen. Die durchgeführten Korngrößenverteilungen von der Probenentnahme aus der CPTU 5/16 und CPTU 6/16 zeigen das Schlammteichmaterial aufgrund des hohen Tonanteils auch als nicht verflüssigungsempfindlich. Desweiteren wurden noch drei Korngrößenverteilungen mit Proben von der Schlammteichoberfläche gemacht die überwiegend in der Zone Z1 zu liegen kommen und somit als verflüssigungsempfindlich einzustufen sind. (KTA 2201.2,2012)

6.7 Erdbeben

Dämme von Schlammteichen, die zum Teil aus Fremdmaterial und nicht nur durch Zyklone abgesonderten Sand aus der Spültrübe (siehe 2.4.2 Praxisnahe Bauweisen für Absperrbauwerke) aufgebaut wurden, können hinsichtlich Ihrer Erdbebenstandsicherheit im Normalfall wie Talsperren betrachtet werden. (ICOLD/CIGB Bulletin 98, 1995) Der Leitfaden „Erdbebenberechnung von Talsperren“

vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, liegt in den folgenden fünf Bänden vor.

- Band 1: Erdbebenberechnung von Talsperren – Grundlagen (2001)
- Band 2: Erdbebenberechnung von Talsperren – Erdbebenkennwert (1996)
- Band 3: Erdbebenberechnung von Talsperren – Richtlinien (1996)
- Band 4: Erdbebenberechnung von Talsperren – Beispiel Gewichtsmauer großer Mühlendorfer See (1998)
- Band 5: Erdbebenberechnung von Talsperren – Beispiel Gewölbemauer Wiederschwing (1999)
- Band 6: Erdbebenberechnung von Talsperren – Beispiel Erddamm Durlaßboden (2001)

Im Band 3 – Richtlinien steht, dass der Leitfaden für den Nachweis der Erdbebensicherheit für folgende Stauanlagen gültig ist.

- Talsperren und Speicherbecken
- Flußstauwerke
- Retentionsbecken
- Hochwasserschutzbauten

Die Anwendung für verwandte Bauwerke wie z.B. Schlammteiche, Abraumhalden ist für jeden Einzelfall zu überprüfen und abzuwägen.

Aufgrund der Dammstärke und des Dammaufbaus aus ausreichend gut verdichtetem Fremdmaterial (Lagerungsdichte mitteldicht) wurde die Betrachtung der Erdbebensicherheit in der vorliegenden Fallstudie mittels des Leitfadens „Erdbebenberechnung von Talsperren“ durchgeführt. Für die Betrachtung wurde das vereinfachte Verfahren der pseudostatischen Berechnung gewählt.

Eine pseudostatische Berechnung stellt das einfachste anzuwendende Rechenverfahren für eine Erdbebenbeanspruchung dar. Dabei wird angenommen, dass die Massen des vorhandenen Bauwerks entsprechend der zugrundegelegten Erdbebenkoeffizienten über den gesamten Bereich gleich stark beschleunigt werden. Die daraus resultierenden Trägheitskräfte werden als statische Lasten auf das Bauwerk aufgebracht und damit die entsprechenden statischen Berechnungen durchgeführt. Bei pseudostatischen Berechnungen darf der Maximalwert der horizontalen Beschleunigung auf eine effektive Beschleunigung ($= 0,7 \cdot \text{maximale}$

horizontale Beschleunigung) abgemindert werden. Als effektive Beschleunigung in der vertikalen Richtung sind zwei Drittel der effektiven horizontalen Beschleunigung anzusetzen. Aufgrund der Vereinfachungen sind gegenüber dynamischen Berechnungen strengere Sicherheitsfaktoren einzuhalten. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band 1, 2001)

Entsprechend der Richtlinie sind für Stauanlagen grundsätzlich für zwei Erdbebenlastfälle Standsicherheitsnachweise zu führen.

- Betriebserdbeben (**O**perating **B**asis **E**arthquake, OBE)
- maximal denkbare Erdbeben (**M**aximum **C**redible **E**arthquake, MCE)

Bei einem OBE ist die Einwirkung durch ein 200 jährliches Ereignis anzusetzen. Dabei dürfen keine nennenswerten Schäden am Bauwerk auftreten und die Betriebssicherheit der gesamten Anlage muss gegeben sein. Die maximalen horizontalen Beschleunigungen [m/s^2] für das OBE sind für Österreich in einer Erdbebenkarte mit Isolinien angegeben. Zwischenwerte in der Karte dürfen linear interpoliert werden, es ist jedoch immer ein Mindestwert von $0,6 \text{ m/s}^2$ anzusetzen. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band, 1996)

Bei einem MCE ist die größte vernünftig denkbare Erdbebeneinwirkung anzusetzen und dabei darf kein Versagen der Anlage infolge eines unkontrollierten Wasserabflusses auftreten. Die maximalen horizontalen Beschleunigungen [m/s^2] für das MCE sind für Österreich in einer Erdbebenkarte mit einer Zoneneinteilung angegeben. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band, 1996)

Die nachfolgenden zwei Abbildungen zeigen die Erdbebenkarten von Österreich für das OBE und MCE, mit dem eingezeichneten Standort des Schlammteichs C.

Isolinien der maximalen horizontalen Beschleunigungen [m/s²] für das OBE

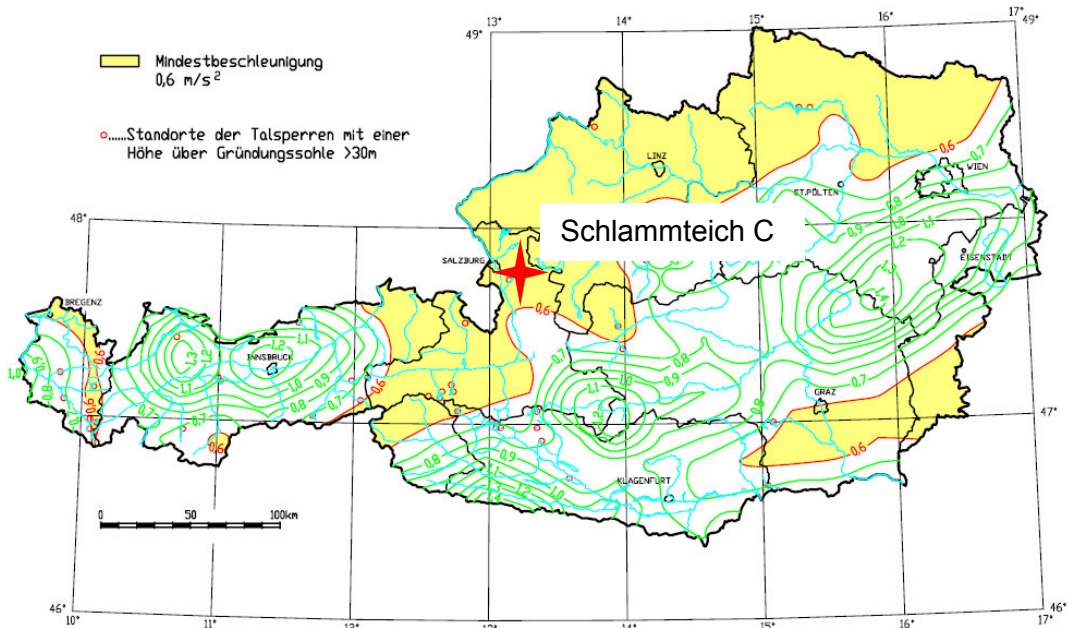


Abb. 95 Isolinien der maximalen horizontalen Beschleunigung [m/s²] für das OBE (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band, 1996)

Zoneneinteilung für das MCE

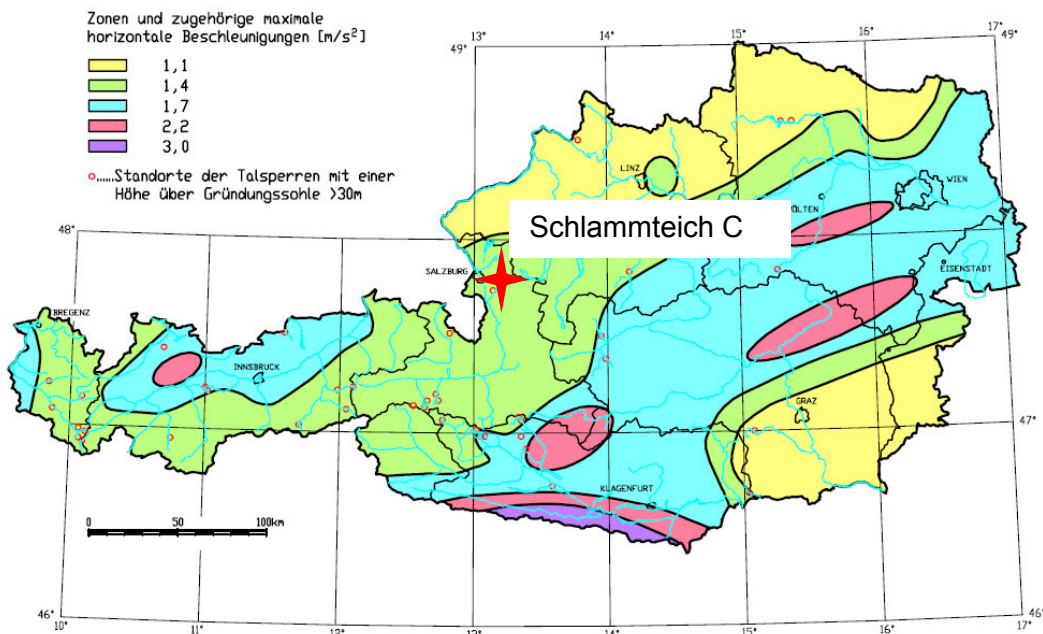


Abb. 96 Zoneneinteilung für das MCE (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Band, 1996)

Für die vorliegende Fallstudie ergeben sich somit folgende maximale und effektive Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen, für eine pseudostatische Betrachtung.

Tab. 23 Maximale und effektive Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen

Lastfall	Horizontalbeschleunigung [m/s ²]		Vertikalbeschleunigung [m/s ²]
	maximal	effektiv	effektiv
OBE	0,60 (0,0610g ¹⁴)	0,42 (0,0428g)	0,28 (0,0290g)
MCE	1,40 (0,1430g)	0,98 (0,1000g)	0,65 (0,0660g)

6.7.1 Ergebnisse pseudostatische Berechnung

Die pseudostatische Erdbebenberechnung wurde mittels des FEM-Programms Plaxis 2D anhand des Schnitts 2-2 mit dem Modell 2.0 durchgeführt. Abb. 97 und Abb. 98 zeigen die Ergebnisse der pseudostatischen Erdbebenberechnung.

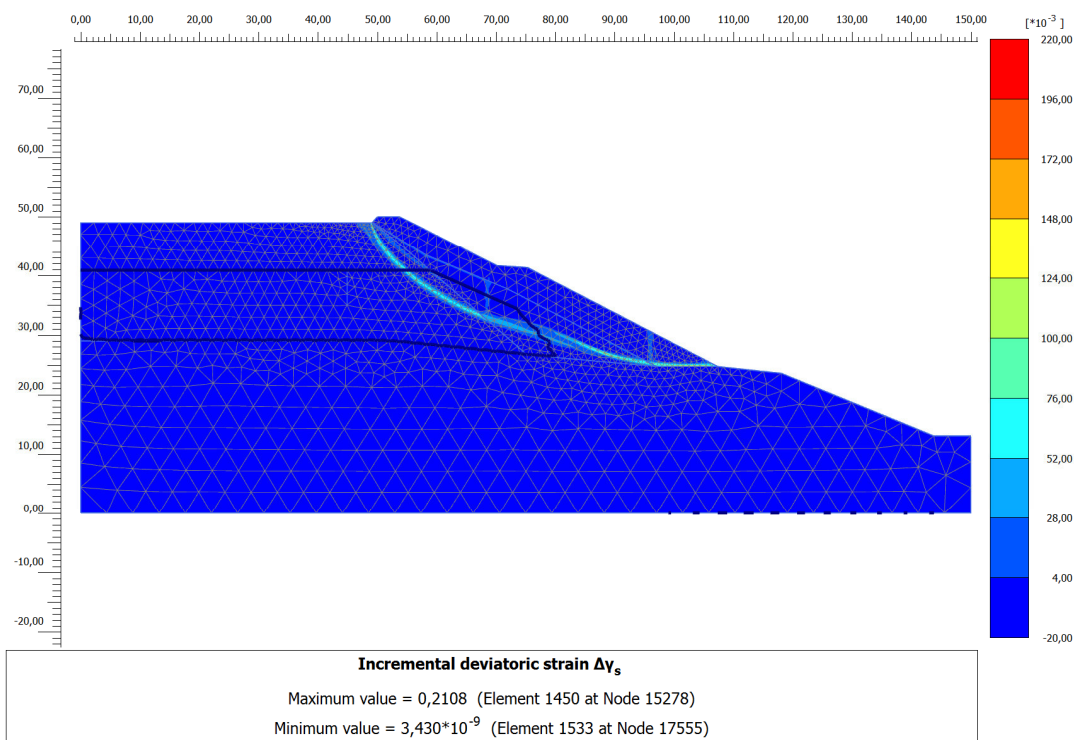


Abb. 97 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 OBE

¹⁴ g = 9,81 m/s² Erdbeschleunigung

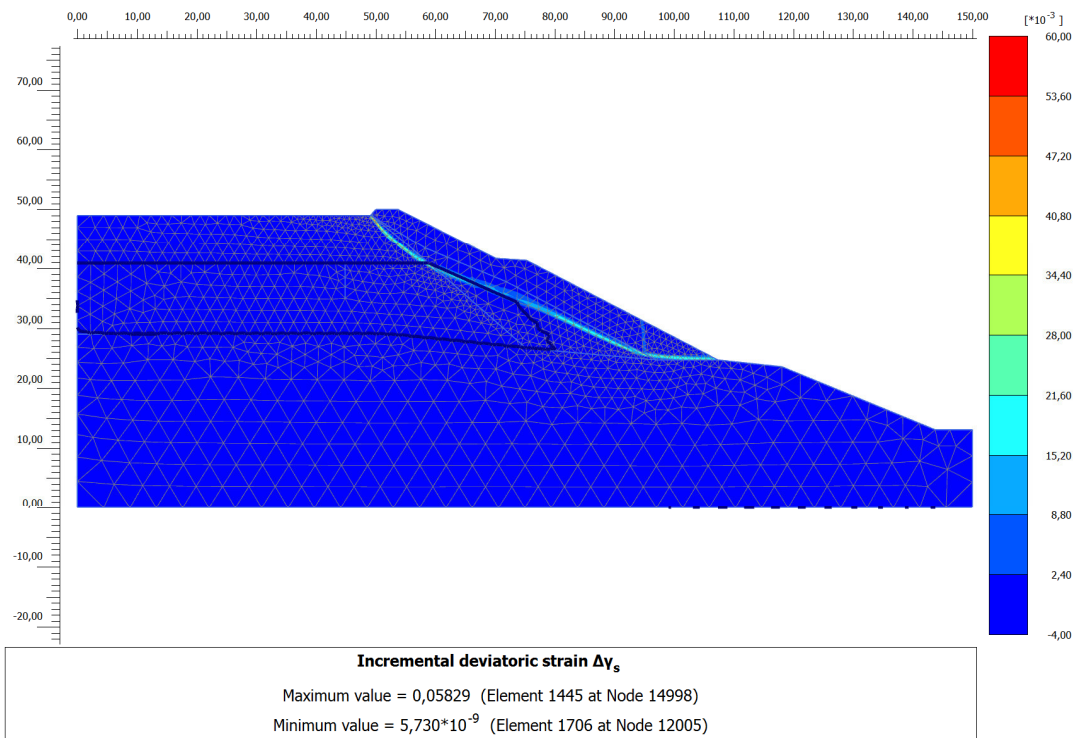


Abb. 98 Inkrementelle deviatorische Dehnung, Schnitt 2-2 MCE

Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten Standsicherheiten für die beiden Erdbebenlastfälle. Beide Lastfälle konnten die geforderten Sicherheiten einhalten.

Tab. 24 Zusammenfassung Standsicherheit Erdbebenlastfälle Schnitt 2-2 OBE und MCE

Beschreibung	Einwirkung	Lastfall-klasse	Standsicherheit	
			berechnet	gefordert
Schnitt 2-2 - Modell 2.0	OBE	II	1,33	$\geq 1,20$
Schnitt 2-2 - Modell 2.0	MCE	III	1,14	$\geq 1,10$

6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse und weiter Vorgehensweise

Die folgende Tab. 25 zeigt eine Zusammenfassung der durchgeführten Standsicherheitsberechnungen für den Schlammteich C. Der Schlammteich C kann in seinem aktuellen Zustand der durch die Standsicherheitsberechnungen abgebildet wurde als Standsicher bewertet werden. Nimmt man die zeitliche Komponente hinzu wird sich die Standsicherheit über die nächsten Jahre aufgrund der langsamen aber ständigen Entwässerung des Schlammteichmaterials erhöhen.

Tab. 25 Zusammenfassung Standsicherheit Schlammteich C

Beschreibung	Lastfallklasse	Standsicherheit	
		berechnet	gefordert
Schnitt 1-1 - Modell 1.0	I	1,30	≥ 1,30
Schnitt 1-1 - Modell 1.1	I	1,29	≥ 1,30
Schnitt 2-2 - Modell 2.0	I	1,49	≥ 1,30
Schnitt 2-2 - Modell 2.1	I	1,30	≥ 1,30
Schnitt 2-2 - Modell 2.0 OBE	II	1,33	≥ 1,20
Schnitt 2-2 - Modell 2.0 MCE	III	1,14	≥ 1,10
Schnitt 3-3 - Modell 3.0	I	1,31	≥ 1,30
Schnitt 3-3 - Modell 3.1	I	1,35	≥ 1,30

Weitere Vorgehensweise

Aufgrund der Einstufung des Schlammteichs C in die Geotechnische Kategorie 3 ist zusätzlich zur durchgeführten Standsicherheitsbeurteilung ein Überwachungs- und Kontrollmessprogramm erforderlich. Die Daten der bereits vorhandenen Porenwasserdruckgeber aus der Baugrunderkundung sind weiter in regelmäßigen Abständen auszulesen und auszuwerten. Damit kann der Abfall der Porenwasserdrücke und somit der Rückgang der Sickerlinie im Schlammteichmaterial über die Zeit verfolgt werden. Die vorhandenen Inklinometer sind in einem vorgegeben Intervall zu messen und auszuwerten. Weiters sind Geodätische Messpunkte an der Dammkrone anzubringen, die ebenso wie die Inklinometer in einem vorgegeben Intervall zu beobachten sind. Durch diese beiden Maßnahmen können mögliche Scherbahnen im Dammbauwerk und Verschiebungen an der Dammkrone festgestellt werden. Die angeführten Überwachungs- und Kontrollmessungen sind mindestens über einen Zeitraum von drei Jahre durchzuführen. Treten in diesem Zeitraum keine außergewöhnlichen Veränderungen oder Verschlechterungen der Messergebnisse auf kann das vorgeschrieben Monitoring ausgeweitet oder beendet werden.

Für die Langzeitverwahrung und die Wiedereingliederung in die Natur des Schlammteichs C ist die Schlammteichoberfläche mit einem geeigneten Material zu überdecken. Damit das Schlammteichmaterial gegen Wind- und Wassererosion geschützt ist. Eine abschließende Humusschicht soll das Entstehen einer Vegetation ermöglichen. Im Bereich des ehemaligen Klarwassers ist aus bautechnischer Sicht auf ein schonendes, schrittweises Vorgehen beim Aufbringen der Überdeckung zu achten. Die Entwässerung und Konsolidierung des Schlammteichmaterials muss in diesem Bereich soweit fortgeschritten sein, dass Überschüttungsarbeiten überhaupt möglich

sind und sich die Setzungen des Schlammteichmaterials in Grenzen halten. Im hinteren Südwestlichen Bereich des Schlammteichs kann auf Wunsch des Betreibers ein kleiner Restsee aus Klarwasser (ca. 2500 m²) bestehen bleiben. Mögliche größere Oberflächenzuflüsse sind schadlos abzuleiten.

7 Zusammenfassung

Im Zuge der vorliegenden Masterarbeit wird die Vorgehensweise für die Standsicherheitsuntersuchung außer Betrieb genommener Schlammteiche bearbeitet. Anfangs wurde eine ausführliche Literaturrecherche über das allgemeine Thema Schlammteiche durchgeführt. Im zweiten Teil der Arbeit wurde anhand eines konkreten Fallbeispiels die Standsicherheit eines außer Betrieb genommenen Schlammteichs in Salzburg – Thalgau untersucht und berechnet.

Das Kapitel 2 Planung und Ausführung von Schlammteichen zeigt das Grundprinzip von Schlammteichen hinsichtlich Beckentypen für Schlammteiche, grundsätzliche Bauweisen für Absperrbauwerke, Betriebseinrichtungen und mögliche Versagensarten. Dieses einführende Kapitel soll dem Leser die unterschiedlichen Phasen während des Betriebs eines Schlammteichs näher bringen und die Komplexität hinsichtlich Ihres Aufbaus aufzeigen und verständlicher machen.

Im Kapitel 3 Standsicherheitsuntersuchungen wird eine mögliche theoretische Vorgehensweise für die Standsicherheitsbeurteilung von Schlammteichen angeführt. Es wird dabei auch auf das mögliche Bodenverflüssigungspotential des Schlammteichmaterials durch Erdbebenbelastungen eingegangen. Um das Bodenverflüssigungspotential in einem ersten Schritt feststellen zu können werden drei einfache Verfahren beschrieben. Nach Abschluss der Standsicherheitsuntersuchungen sind Schlammteiche im Normalfall in einen Zustand überzuführen, in dem sie sich selbst überlassen werden können. Mögliche theoretische Vorschläge für die Langzeitverwahrung sind im Kapitel 4 beschrieben.

Kapitel 5 Baugrunderkundung gibt einen allgemeinen Überblick über die Planung, den Umfang und Ablauf von Baugrunderkundungen. Da Schlammteiche im Regelfall Bauwerke der Geotechnischen Kategorie 3 sind, spielt diese oft eine entscheidende Rolle in der Beurteilung solcher Anlagen.

Im Kapitel 6 Fallstudie wurden die im ersten Teil der Arbeit theoretisch beschriebenen Abläufe in die Praxis umgesetzt und die Standsicherheit eines außer Betrieb genommenen Schlammteichs untersucht und beurteilt. Mittels einer ausführlich, Schritt für Schritt durchgeführten Baugrunderkundung war es möglich, eins für die Standsicherheitsberechnung relevantes geotechnische Modell zu entwickeln. Mit dem FEM-Programm Plaxis 2D wurde anschließend die Standsicherheit für drei Schnitte berechnet.

Die Standsicherheit kann aufgrund der ausführlichen Berechnungen im Kapitel 6.5 Standsicherheitsberechnung als positiv bewertet werden. Mittels geeigneten Maßnahmen (Überdeckung der Schlammteichoberfläche, Durchführung des vorgeschriebenes Überwachungs- und Kontrollmessprogramm) kann der Schlammteich C in einen standsicheren Zustand für die Langzeitverwahrung übergeführt werden.

8 Literaturverzeichnis

- ATV-DVK-Regelwerk (2001)
Merkblatt ATV-DVWK-M 503 Grundlagen zur Überprüfung und Ertüchtigung von Sedimentationsbecken, ATV-DVWK-Regelwerk
- Boley Conrad (2012)
Handbuch Geotechnik, Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen, Vieweg+Teubner
- Bundesministerium für Lad- und Forstwirtschaft, Österreichische Staubeckenkommission (1996)
Richtlinie zum Nachweis der Standsicherheit von Staudämmen
- Bundesministerium für Lad- und Forstwirtschaft, Österreichische Staubeckenkommission (2001)
Erdbebenberechnung von Talsperren Band 1: Grundlagen
- Bundesministerium für Lad- und Forstwirtschaft, Österreichische Staubeckenkommission (1996)
Erdbebenberechnung von Talsperren Band 2: Erdbebenkennwerte
- Bundesministerium für Lad- und Forstwirtschaft, Österreichische Staubeckenkommission (1996)
Erdbebenberechnung von Talsperren Band 3: Richtlinien
- Bundesministerium für Lad- und Forstwirtschaft, Österreichische Staubeckenkommission (2001)
Erdbebenberechnung von Talsperren Band 6: Beispiel Erddamm Durlaßboden
- DIN 19700-10 (2004)
Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN
- DIN 19700-11 (2004)
Stauanlagen – Teil 11: Talsperren, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN
- DIN 19700-15 (2004)
Stauanlagen – Teil 15: Sedimentationsbecken, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN
- DIN 1055-2 (2003)
Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Bodenkenngrößen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4094-1 (2002)
Baugrund Felduntersuchungen Teil 1: Drucksondierungen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4094-1 (2002)
Baugrund Felduntersuchungen Teil 3: Rammsondierungen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

- DIN 4020 (2003)
Geotechnische Untersuchungen für Bautechnische Zwecke, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- EN 1997-1
Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil 1: Allgemeine Regeln, Wien: Austrian Standard Institute
- EN 1997-2
Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil 1: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds, Wien: Austrian Standard Institute
- EN ISO 22476-1 (2012)
Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- EN ISO 22476-1 (2012)
Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen Teil 2: Rammsondierungen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- ICOLD / CIGB (1989)
Bulletin 74 Tailings dam safety
- ICOLD / CIGB (1994)
Bulletin 97 Tailings dams design of drainage
- ICOLD / CIGB (1995)
Bulletin 98 Tailings dams and seismicity
- ICOLD / CIGB (1995)
Bulletin 101 Tailings dams. Transport placement and decantation
- ICOLD / CIGB (1996)
Bulletin 103 Tailings dams. and environment
- ICOLD / CIGB (1996)
Bulletin 104 Monitoring od tailings dams
- ICOLD / CIGB (1996)
Bulletin 106 A guide to tailings dams and impoundments
- Kerntechnischer Ausschuss (1990)
KTA 2201.2 Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil2: Baugrund Fassung 6/90, Tech. rept. Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) Deutschlands
- Kolymbas Dimitrios (1998)
Geotechnik – Bodenmechanik und Grundbau, Springer
- Kurosch Thuro & Marion Nickmann (2008)
Bodenmechanisches Geländepraktikum, Technische Universität München Lehrstuhl für Ingenieurgeologie

- Marte, (2014)
Bodenmechanik und Grundbau VA / WS 2014/15, Dammbau, Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz
- ÖNorm B 1997-1-1 (2013)
Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, Wien: Austrian Standard Institute
- ÖNorm B 1997-2 (2012)
Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds, Wien: Austrian Standard Institute
- ÖNorm B 4400-1 (2010)
Geotechnik Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden, Wien: Austrian Standard Institute
- P.K. Robertson and K.L. Cabal (6th Edition 2015)
Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Plank Lisa, BSc (2015)
Ein Vergleich von analytischen Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Bodenverflüssigungspotentials, Masterarbeit Technische Universität Graz Institut für Bodenmechanik und Grundbau
- Renk Daniel (2011)
Zur Statik der Bodenvernagelung, Dissertation University of Innsbruck, Division of Geotechnical and Tunnel Engineering
- Schmidt Hans-Henning (2006)
Grundlagen der Geotechnik, 3. Auflage, Teubner
- Schweiger Helmut F. (VA /WS 2014/15)
Correlations cone Penetration Test, Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz
- Supp, Marte (2013)
Hydraulische Versagensmechanismen (bei Dämmen), Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz
- T.Lunne, P.K. Robertson, J.J.M. Powell (1997)
Cone Penetration testing in geotechnical practice, Spon Press
- Türke Henner (1984)
Statik im Erdbau, Ernst & Söhne
- U.S. Environmental Protection Agency (August 1994)
Technical Report, Design and evaluation of tailings dams, Von <http://nepis.epa.gov/> abgerufen (12.04.2016)
- Witt Karl Josef (2008)
Grundbau – Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Ernst & Sohn

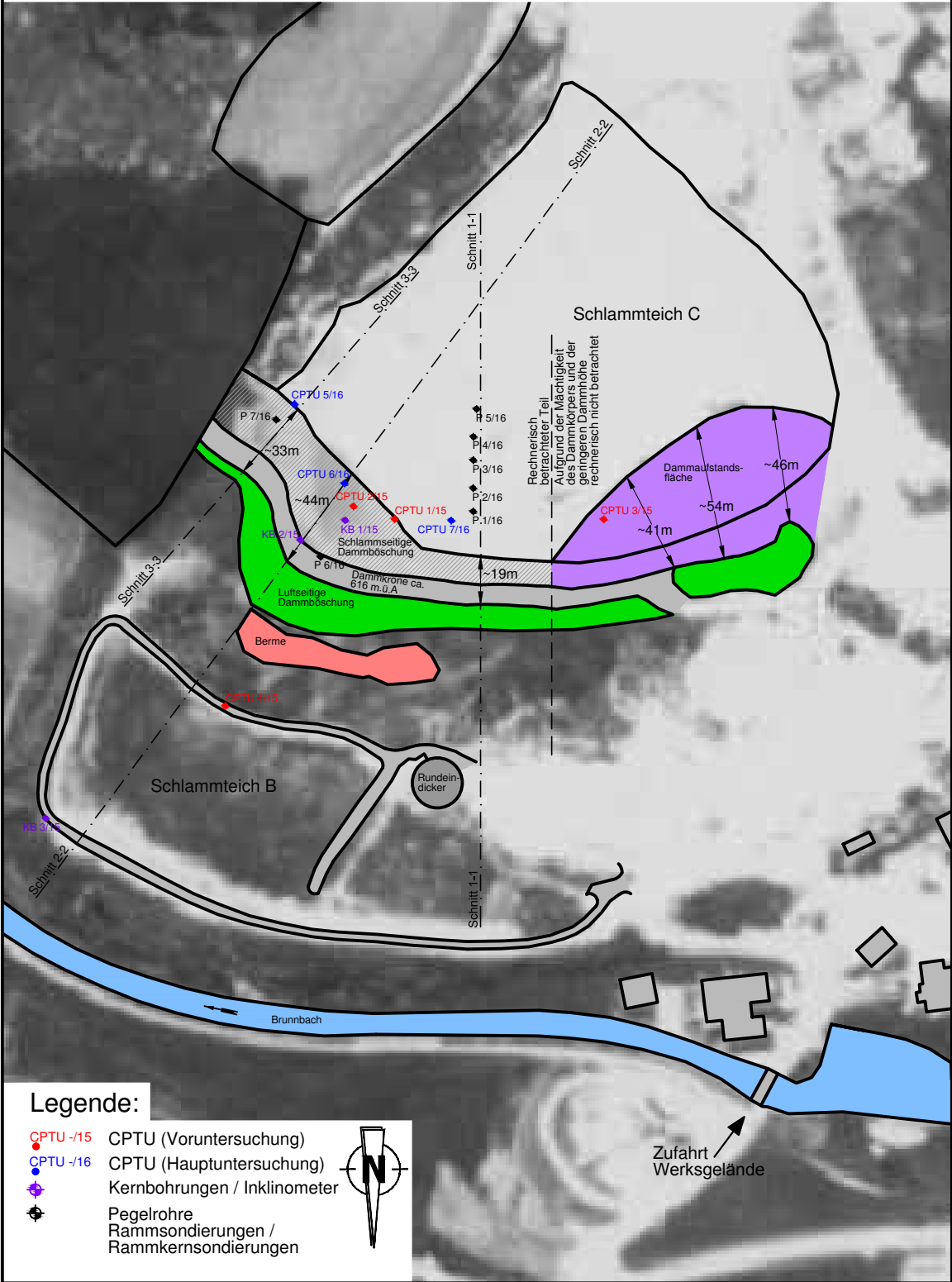
Wittmann L. (2008)

Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien, Karlsruhe: Institut für
Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana

9 Anhang

A. Luftbildauswertung

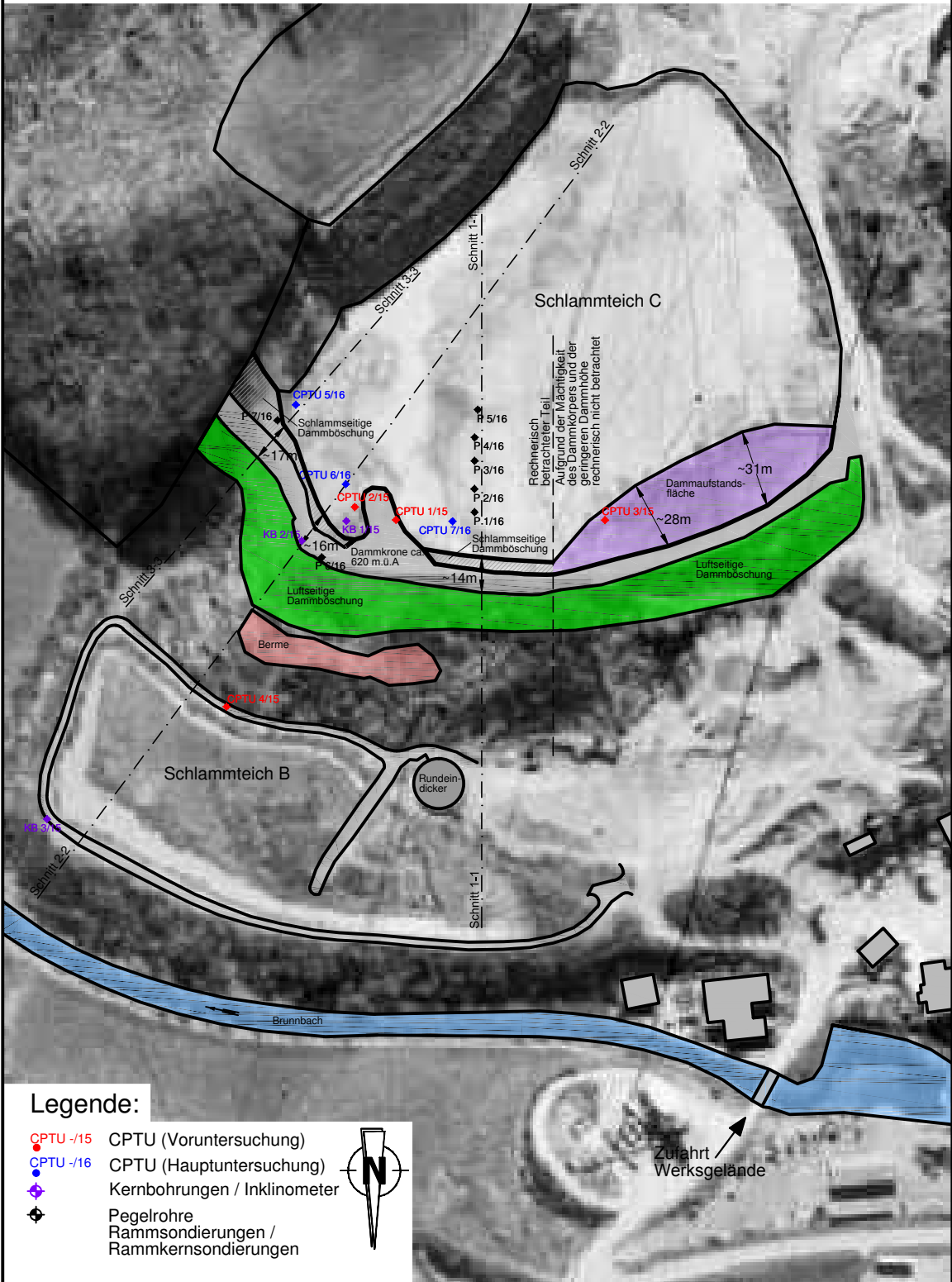
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 1987
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



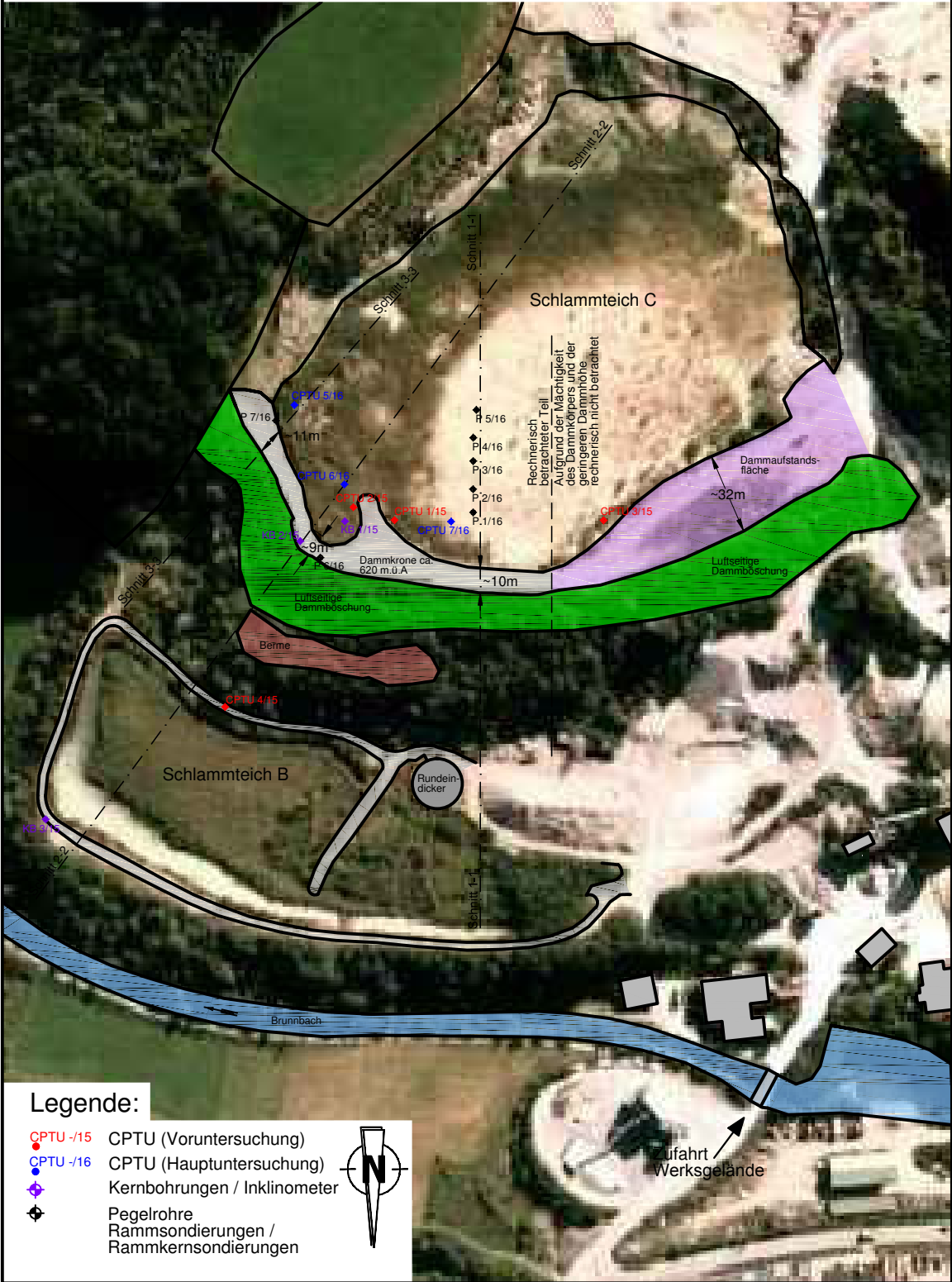
Legende:

- CPTU -/15 CPTU (Voruntersuchung)
- CPTU -/16 CPTU (Hauptuntersuchung)
- ◆ Kernbohrungen / Inklinometer
- ◆ Pegelrohre
Rammsondierungen /
Rammkernsondierungen

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlamnteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlamnteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 1994
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



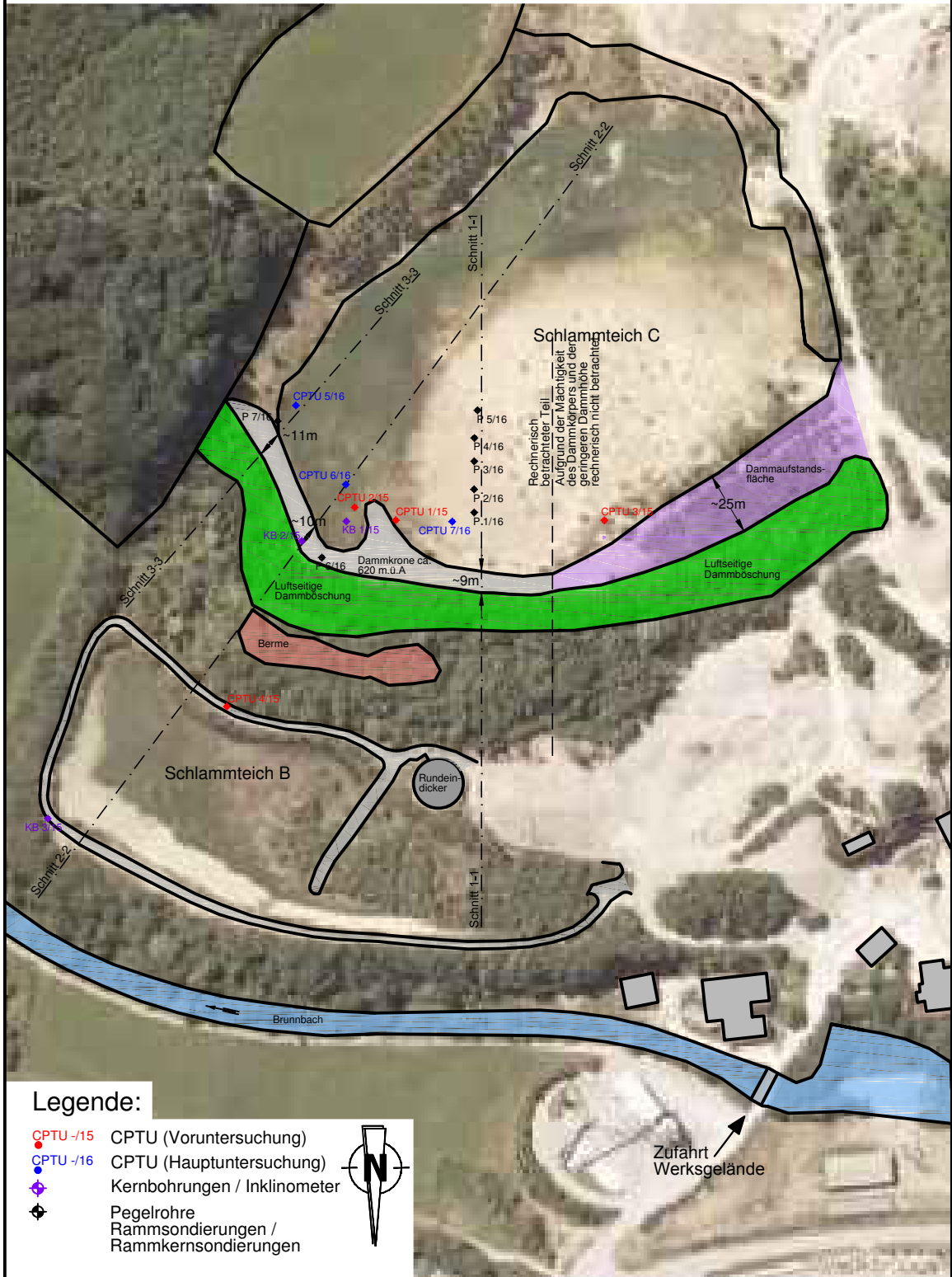
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 1997
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



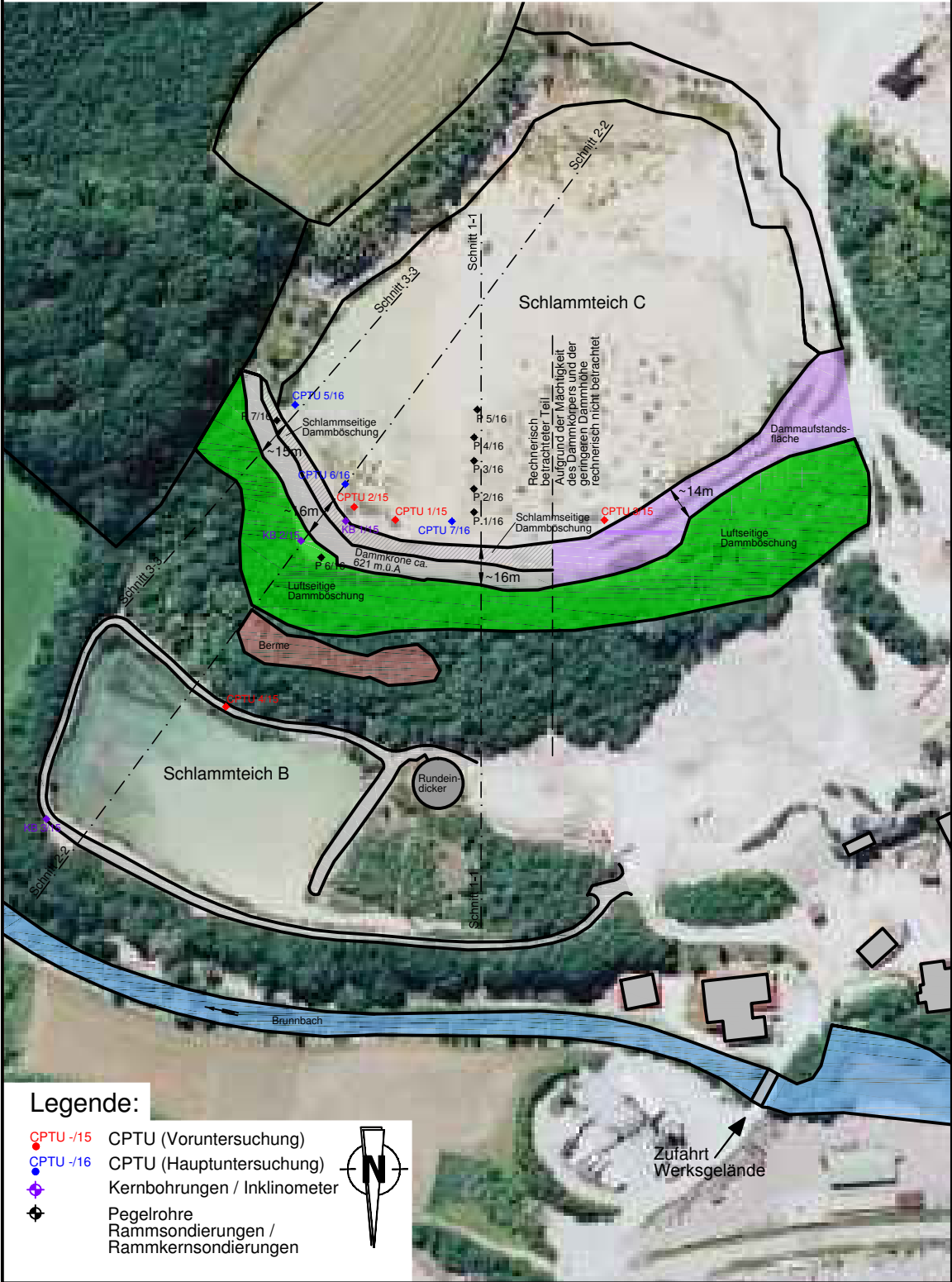
Legende:

- CPTU -/15 CPTU (Voruntersuchung)
- CPTU -/16 CPTU (Hauptuntersuchung)
- ◆ Kernbohrungen / Inklinometer
- ◆ Pegelrohre
Rammsondierungen /
Rammkernsondierungen

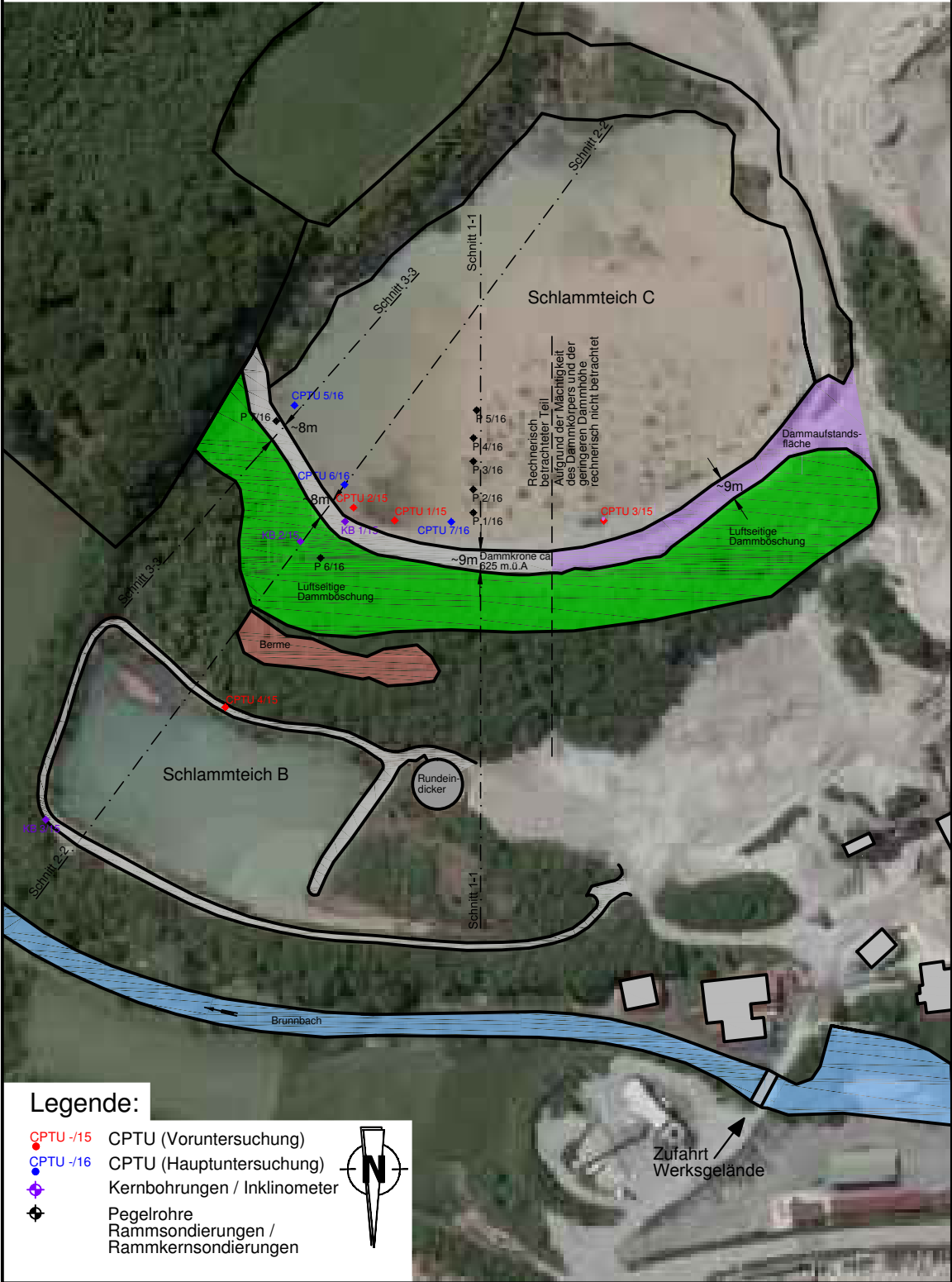
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 2002
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



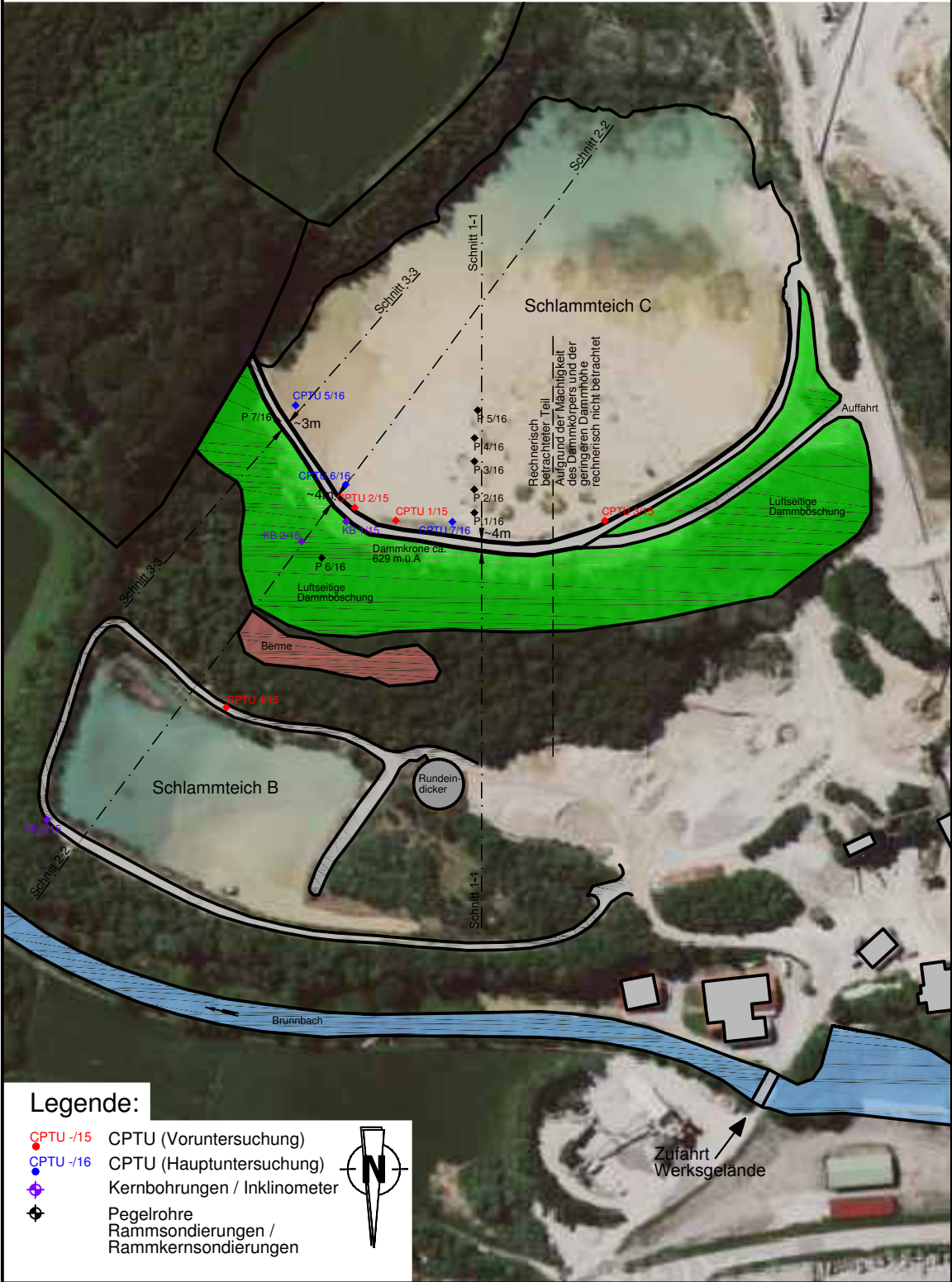
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 2007
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 2010
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang A. Luftbildauswertung	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:2500	Luftbildauswertung: Jahr 2016
		Datum: 09.02.2017	Quelle: SAGIS online Historische Orthofotos



B. Lageplan Schlammteich C

Masterarbeit:
 Untersuchungen zur Standsicherheit
 von Schlammteichen
 Anhang B. Lageplan

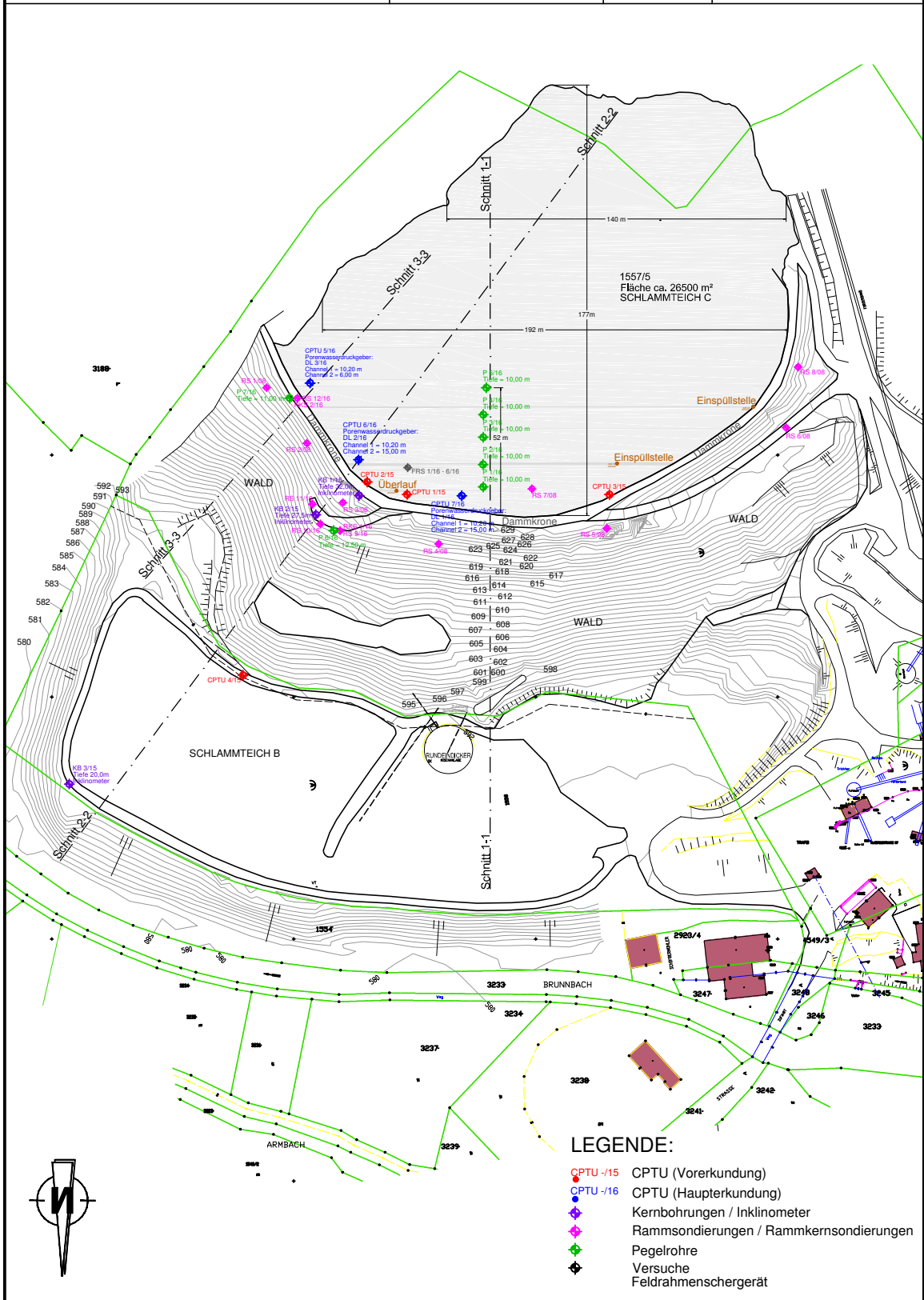
Projekt:
 Standsicherheitsbeurteilung
 Schlammteich C

Maßstab:
1:2500

Planinhalt:
 Lageplan

Datum:
 09.02.2017

Plangröße:
 A4



C. Schnitte

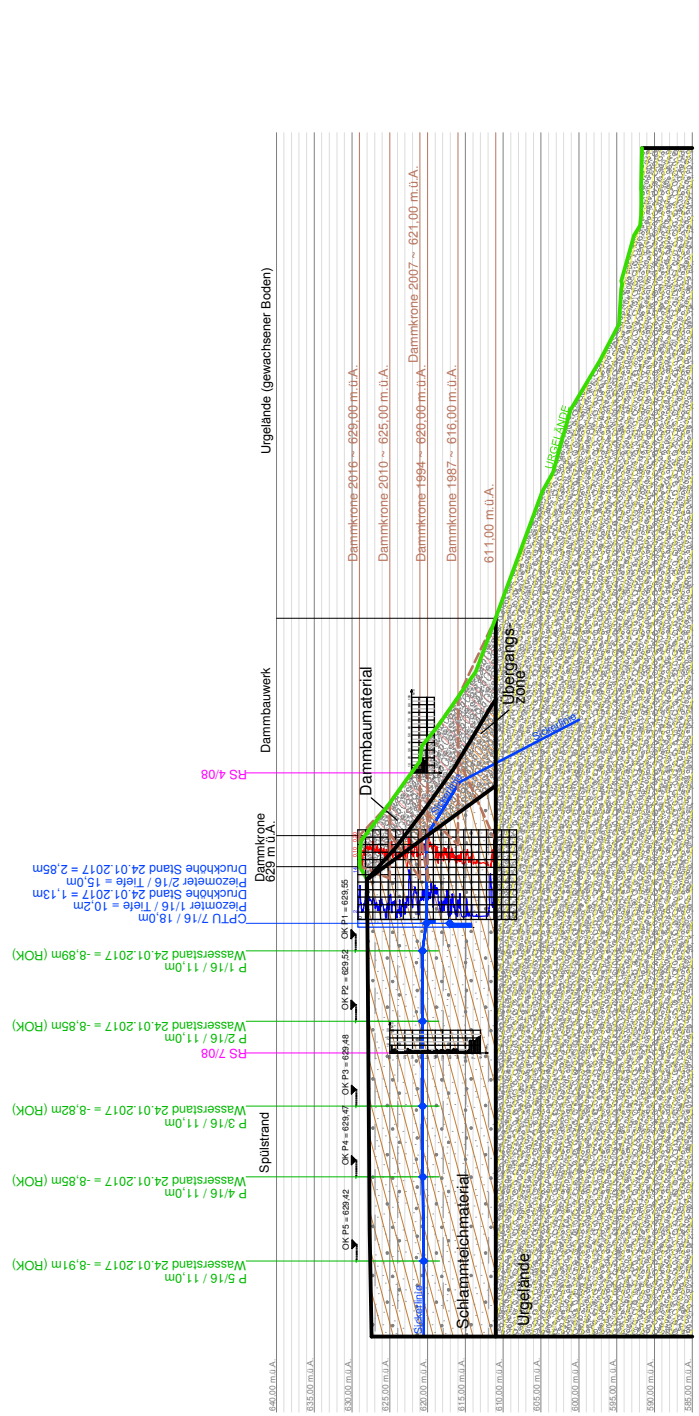
Schnitt 1-1

Schnitt 2-2

Schnitt 3-3

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang C. Schnitte	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:1000	Planinhalt: Schnitt 1-1
		Datum: 13.02.2017	Plangröße: A4

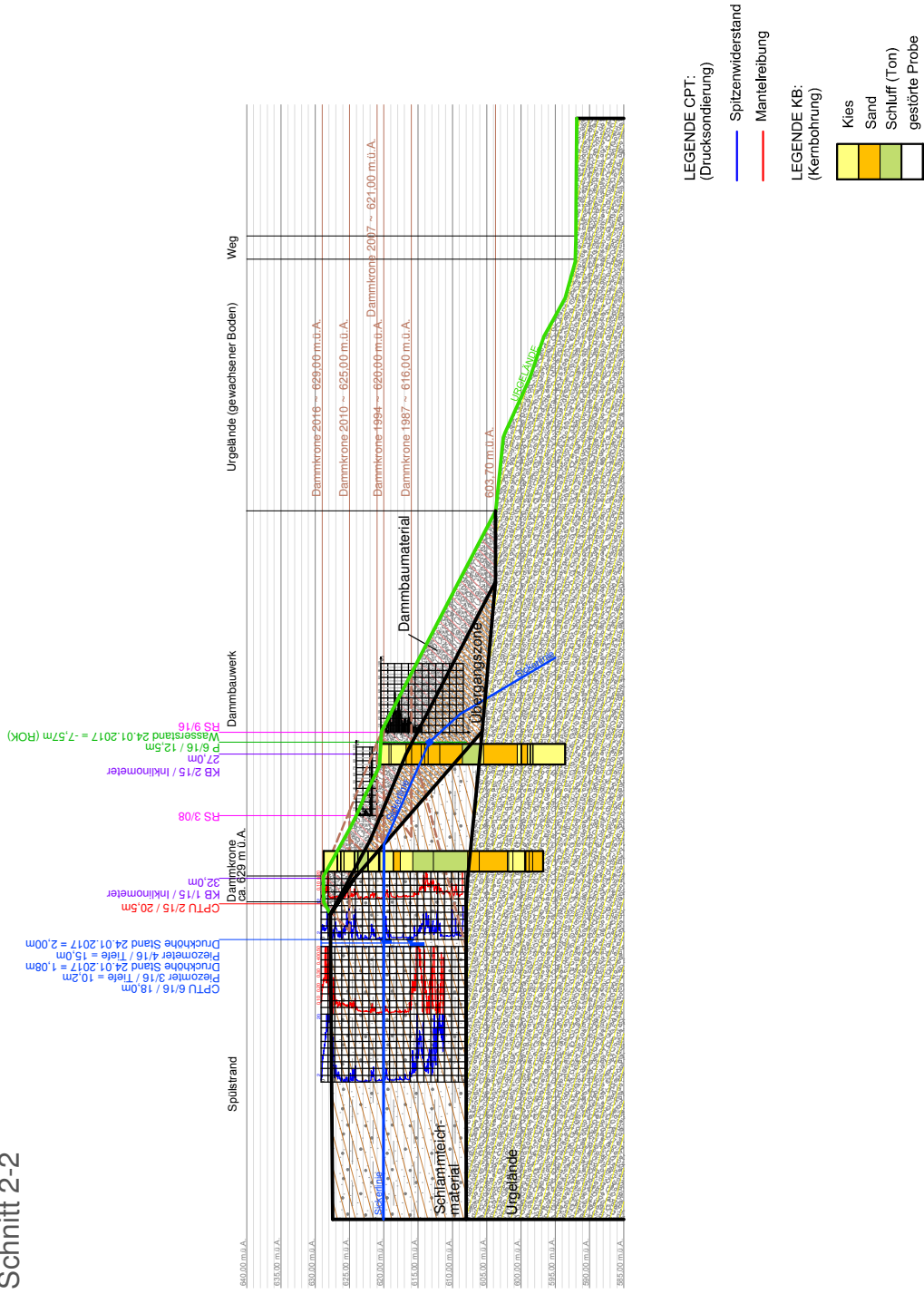
Schnitt 1-1



- LEGENDE CPT:
 (Drucksondierung)
 — Spitzenwiderstand
 — Mantelreibung
 LEGENDE KB:
 (Kernbohrung)
 ■ Kies
 ■ Sand
 ■ Schluff (Ton)
 ■ gestörte Probe

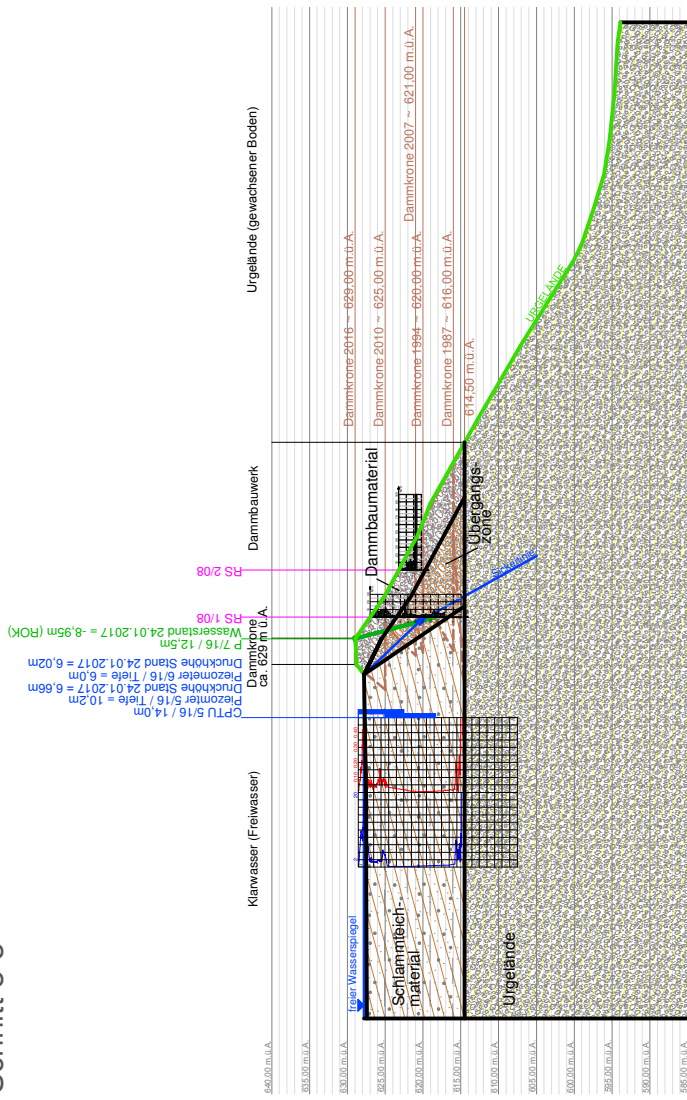
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang C. Schnitte	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:1000	Planinhalt: Schnitt 2-2
		Datum: 13.02.2017	Plangröße: A4

Schnitt 2-2



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang C. Schnitte	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:1000	Planinhalt: Schnitt 3-3
		Datum: 13.02.2017	Plangröße: A4

Schnitt 3-3



- LEGENDE CPT:**
(Drucksondierung)
- Spitzenwiderstand
 - Mantelreibung
- LEGENDE KB:**
(Kernbohrung)
- Kies
 - Sand
 - Schluff (Ton)
 - gestörte Probe

D. Kernbohrungen

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang D. Kernbohrungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: KB 1/15
		Datum: 26.01.2015	Bohrung: Kernbohrung

Tiefe ab C/Gesamts- Mess- beobachtung	Bemerkungen	[m]	Bohrkerne	[m]	Gesteins- arten	Benennung und Beschreibung der Gesteinsarten und des Gefüges (Symbol und/oder Langtext)	GOK [m.u.A.]
		0		1		G, s, u, Kies, sandig, schluffig, hellbraun, bergfeucht	
		1		2		X, Steine, zerbohrt	-2,00
-2,00		2		3		G, s, u, Kies, sandig, schluffig	-2,50
-3,00		3		4		G, s, u, Kies, sandig, schluffig, braun	-3,00
-4,50		4		5		U, fs+, g, Schluff, stark feinsandig, kiesig, breiig, feucht	-4,50
-5,00		5		6		U, fs, g-, Schluff, feinsandig, schwach kiesig, nass	-5,00
-6,50		6		7		G, u+, fs, Kies, stark schluffig, feinsandig, feucht	-6,50
-8,00		7		8		X, Steine	-8,00
-8,20		8		9		G, u+, s, Kies, stark schluffig, sandig, hellbraun, breiig, sehr feucht	-8,20
		9		10		IS, u-, Feinsand, gering schluffig, undeutlich laminiert	-10,20
-10,20		10		11		G, u+, s, Kies, stark schluffig, sandig, hellbraun, sehr feucht	-11,20
-11,20		11		12		U, L, s--, Schluff, tonig, sehr gering sandig, Hellgrau, 80% Matrix, strukturlos, weich, feucht	-13,00
-13,00		12		13		U, L, s--, Schluff, tonig, sehr gering sandig, Hellgrau, 80% Matrix, strukturlos, weich, feucht	-13,00
		13		14		U, L, s--, Schluff, tonig, sehr gering sandig, Hellgrau, 80% Matrix, strukturlos, weich, feucht	-16,00
-16,00		14		15		U, L, s--, Schluff, tonig, sehr gering sandig, Hellgrau, 80% Matrix, strukturlos, weich, feucht	-16,00
		15		16		U, L, s--, Schluff, tonig, sehr gering sandig, Hellgrau, 80% Matrix, strukturlos, weich, feucht	-16,00
		16		17		U, fs-, g, x-, Schluff, gering feinsandig, kiesig, schwach steinig, dunkelgrau, 15-20% Matrix, strukturlos, kantig bis gerundet, weich-stell, bergfeucht	-21,60
-21,60		17		18		U, fs-, g, x-, Schluff, gering feinsandig, kiesig, schwach steinig, dunkelgrau, 15-20% Matrix, strukturlos, kantig bis gerundet, weich-stell, bergfeucht	-21,60
		18		19		U, fs-, g, x-, Schluff, gering feinsandig, kiesig, schwach steinig, dunkelgrau, 15-20% Matrix, strukturlos, kantig bis gerundet, weich-stell, bergfeucht	-21,60
		19		20		U, fs-, g, x-, Schluff, gering feinsandig, kiesig, schwach steinig, dunkelgrau, 15-20% Matrix, strukturlos, kantig bis gerundet, weich-stell, bergfeucht	-21,60
		20		21		U, fs-, g, x-, Schluff, gering feinsandig, kiesig, schwach steinig, dunkelgrau, 15-20% Matrix, strukturlos, kantig bis gerundet, weich-stell, bergfeucht	-21,60
-21,60		21		22		IS, g, u, x-, Feinsand, kiesig, schluffig, schwach steinig, 10-15% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-22,70
-22,70		22		23		IS, ms-, fg, mg, gg-, u, x--, Feinsand, gering mittelsandig, feinkiesig, mittelkiesig, gering grobkiesig, schluffig, sehr schwach steinig, grau, 10-15% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-22,70
		23		24		IS, ms-, fg, mg, gg-, u, x--, Feinsand, gering mittelsandig, feinkiesig, mittelkiesig, gering grobkiesig, schluffig, sehr schwach steinig, grau, 10-15% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-22,70
		24		25		IS, ms-, fg, mg, gg-, u, x--, Feinsand, gering mittelsandig, feinkiesig, mittelkiesig, gering grobkiesig, schluffig, sehr schwach steinig, grau, 10-15% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-22,70
		25		26		IS, ms-, fg, mg, gg-, u, x--, Feinsand, gering mittelsandig, feinkiesig, mittelkiesig, gering grobkiesig, schluffig, sehr schwach steinig, grau, 10-15% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-22,70
		26		27		U, fs, fg, Schluff, feinsandig, gering feinkiesig, 60% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, steil, bergfeucht-leucht	-26,80
-26,80		27		28		U, fs, fg, Schluff, feinsandig, gering feinkiesig, 60% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, steil, bergfeucht-leucht	-27,60
-27,60		27		29		IG, mg, gg--, gs, ms, u-, Feinkies, mittelkiesig, sehr gering grobkiesig, grobsandig, mittelsandig, gering schluffig, grau, 5% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis angerundet, bergfeucht	-27,60
		28		30		IG, mg++, s+, u-, gg-, Feinkies, sehr stark mittelkiesig, stark sandig, gering schluffig, gering grobkiesig, bräunlich, 5% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis gerundet, trocken	-29,30
-29,30		29		31		IS, ms++, u-, g--, Feinsand, sehr stark mittelsandig, gering schluffig, sehr schwach kiesig, bräunlich, 5% Matrix, strukturlos, dicht, trocken	-29,50
-29,50		30		32		S, fs, mg-, gg-, u-, Sand, feinsandig, gering mittelkiesig, sehr gering grobkiesig, gering schluffig, rostbraun, 10% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis gerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-30,00
-30,00		30		32		S, fs, mg-, gg-, u-, Sand, feinsandig, gering mittelkiesig, sehr gering grobkiesig, gering schluffig, rostbraun, 10% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis gerundet, mitteldicht-dicht, bergfeucht	-30,50
-30,50		31		32		S, fs, mg-, gg-, x-, u-, Sand, feinkiesig, mittelkiesig, gering grobkiesig, schwach steinig, gering schluffig, grau, 5-10% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis gerundet, trocken	-32,00
-32,00		31		32		S, fs, mg-, gg-, x-, u-, Sand, feinkiesig, mittelkiesig, gering grobkiesig, schwach steinig, gering schluffig, grau, 5-10% Matrix, strukturlos, kantengerundet bis gerundet, trocken	-32,00

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang D. Kernbohrungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: KB 2/15
		Datum: 26.01.2015	Bohrung: Kernbohrung

Tiefe ab Wasser- beobachtung	Bemerkungen	[m]	Bohrkerne	[m]	Gesteins- arten	Benennung und Beschreibung der Gesteinsarten und des Gefüges (Symbol und/oder Langtext)	GOK m.i.A.
		0		1		mG, s, x, fs-, u--; fg, gg, Mittelkies, sandig, steinig, gering feinsandig, sehr gering schluffig, feinkiesig, grobkiesig, braun, 10% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	
-1.30		1		2		fg, mg, s+, fs-, u--; Feinkies, mittelkiesig, stark sandig, gering feinsandig, sehr gering schluffig, braun, 10% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-1.30
-1.60		2		3		G, fs+, s, u-, x-; Kies, stark feinsandig, sandig, gering schluffig, schwach steinig, braun, 20% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-1.60
		3		4			-3.80
-3.80		4		5		fs, ms, gs-, fg, mg-, u-, Feinsand, mittelsandig, gering grobsandig, feinkiesig, gering mittelkiesig, gering schluffig, hellbraun, 20% Matrix, strukturiertes, stark abgerundet, weich, feucht	-4.60
-4.60		5		6		fs, s, u-, mg-, Feinsand, sandig, gering schluffig, gering mittelkiesig, dunkelbraun, 15% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-6.00
-6.00		6		7		fs, u, s, fg-, Feinsand, schluffig, sandig, feinkiesig, braun, 35% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-6.50
-6.50		7		8		S, fg, u, mg-, gg-, Sand, feinkiesig, schluffig, gering mittelkiesig, sehr gering grobkiesig, dunkelbraun, 30% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-7.00
-7.00		8		9		fs, u+, s, fg-, Feinsand, stark schluffig, sandig, gering feinkiesig, braun, 40% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, weich, erdfeucht	-8.70
-8.70		9		10		S, u+, fg, mg-, Sand, stark schluffig, feinkiesig, gering mittelkiesig, dunkelbraun, 30% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, weich, erdfeucht	-12.00
		10		11			-12.00
-14.60		12		13		U, fs, s, fg-, Schluff, feinsandig, sandig, sehr gering feinkiesig, hellbraun, 80% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, steil, erdfeucht	-14.60
		13		14			
-12.00		14		15		Y, Blöcke, Kalkblock	-15.10
-15.10		15		16		fs, u+, s, fg-, mg-, Feinsand, stark schluffig, gering sandig, sehr gering feinkiesig, sehr gering mittelkiesig, hellbraun, 70% Matrix, undeutlich laminiert, buntes Spektrum, stark abgerundet, steil, erdfeucht	-20.00
-20.00		20		21		fg, s+, u-, Feinkies, stark sandig, gering schluffig, braun, 20% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-20.60
-20.60		21		22		fs, s+, fg, mg-, u, Feinsand, stark sandig, feinkiesig, gering mittelkiesig, schluffig, braun, 30% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-21.50
-21.50		22		23		fg, s+, mg, u, Feinkies, stark sandig, mittelkiesig, schluffig, braun, 10% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-21.90
-21.90		22		24		fg, s+, mg, u, Feinkies, stark sandig, mittelkiesig, schluffig, braun, 20% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, dicht, erdfeucht	-22.30
-22.30		23		25		G, s+, u-, x-, Kies, stark sandig, gering schluffig, schwach steinig, braun, 10% Matrix, strukturiertes, buntes Spektrum, stark abgerundet, mitteldicht, erdfeucht	-27.00
		24		26			
		25		27			
-27.00		26					-27.00

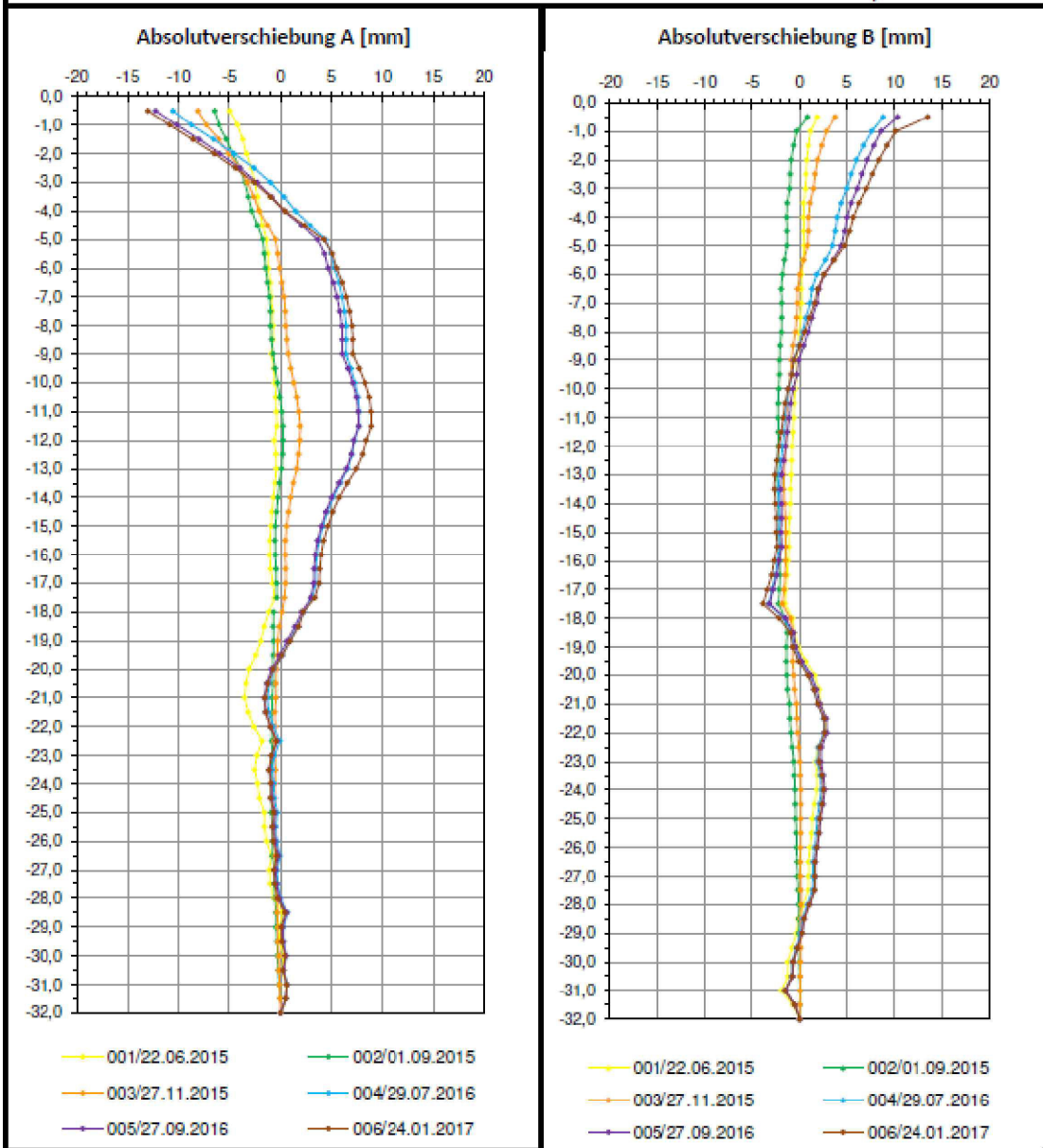
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang D. Kernbohrungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: KB 3/15
		Datum: 26.01.2015	Bohrung: Kernbohrung

Tiefe ab Wasser- beobachtung	Bemerkungen	[m]	Bohrkerne	[m]	Gesteins- arten	Benennung und Beschreibung der Gesteinsarten und des Gefüges (Symbol und/oder Langtext)	COK (m i. A.)
-0.60		0		1		G, s, x, u, Kies, sandig, steinig, gering schluffig, hellbraun, strukturlos, kantig-angerundet, bergfeucht	-0.60
		1		2		S, g, u, Sand, kiesig, schluffig, hellbraun, kantig-angerundet, bergfeucht	
		2		3		S, g, u, Sand, kiesig, schluffig, hellbraun, kantig-angerundet, bergfeucht	
		3		4		S, g, u, Sand, kiesig, schluffig, hellbraun, kantig-angerundet, bergfeucht	
-4.00		4		5		S, u, g, Sand, stark schluffig, kiesig, hellbraun, strukturlos, kantig-angerundet, feucht, Matrix gestützt	-4.00
-4.80		4		5		U, fs, t, g, Schluff, gering feinsandig, gering tonig, sehr schwach kiesig, hellbraun, weich, feucht, Schlammteichablagerungen	-4.80
		5		6		U, fs, t, g, Schluff, gering feinsandig, gering tonig, sehr schwach kiesig, hellbraun, weich, feucht, Schlammteichablagerungen	
-6.40		6		7		U, fs, t, g, Schluff, gering feinsandig, gering tonig, sehr schwach kiesig, hellbraun, strukturlos, weich-steif, bergfeucht-feucht, Schlammteichablagerungen, etwas weniger W-Gehalt als darüber	-6.40
-7.00		6		7		U, fs, t, g, Schluff, gering feinsandig, gering tonig, sehr schwach kiesig, hellbraun, strukturlos, weich-steif, bergfeucht-feucht, Schlammteichablagerungen, etwas weniger W-Gehalt als darüber	-7.00
-7.50		7		8		gestörte Probe	-7.50
-8.60		8		9		U, fs, t, g, Schluff, gering feinsandig, gering tonig, sehr schwach kiesig, hellbraun, weich-steif, bergfeucht-feucht, Schlammteichablagerungen	-8.60
-9.00		8		9		U, s, g, Schluff, sandig, hellbraun, weich-steif, bergfeucht-feucht	-9.00
		9		10		G, u, s, Kies, stark schluffig, sandig, hellbraun, steif, bergfeucht	
-10.00		9		10		G, u, s, x, Kies, schluffig, sandig, steinig, hellbraun, bergfeucht	-10.00
		10		11		G, u, s, x, Kies, schluffig, sandig, steinig, hellbraun, bergfeucht	
		11		12		G, u, s, x, Kies, schluffig, sandig, steinig, hellbraun, bergfeucht	
		12		13		G, u, s, x, Kies, schluffig, sandig, steinig, hellbraun, bergfeucht	
		13		14		G, u, s, x, Kies, schluffig, sandig, steinig, hellbraun, bergfeucht	
-14.40		14		15		U, g, Schluff, kiesig, hellbraun, weich-steif, bergfeucht-feucht	-14.40
-14.70		14		15		U, s, g, Schluff, sandig, kiesig, dunkelbraun, kantig, steif, bergfeucht, braun-graue relativ dichte Lage	-14.70
		15		16		U, s, g, Schluff, sandig, kiesig, dunkelbraun, kantig, steif, bergfeucht, braun-graue relativ dichte Lage	
-15.70		15		16		G, x, s, u, Kies, steinig, sandig, schluffig, hellbraun, gerundet, nass, Schotter, Wassergesättigt	-15.70
		16		17		G, x, s, u, Kies, steinig, sandig, schluffig, hellbraun, gerundet, nass, Schotter, Wassergesättigt	
		17		18		G, x, s, u, Kies, steinig, sandig, schluffig, hellbraun, gerundet, nass, Schotter, Wassergesättigt	
		18		19		G, x, s, u, Kies, steinig, sandig, schluffig, hellbraun, gerundet, nass, Schotter, Wassergesättigt	
		19		20		G, x, s, u, Kies, steinig, sandig, schluffig, hellbraun, gerundet, nass, Schotter, Wassergesättigt	
20.00		19		20		G, x, s, u, Kies, steinig, sandig, schluffig, hellbraun, gerundet, nass, Schotter, Wassergesättigt	20.00

E. Inklinometer

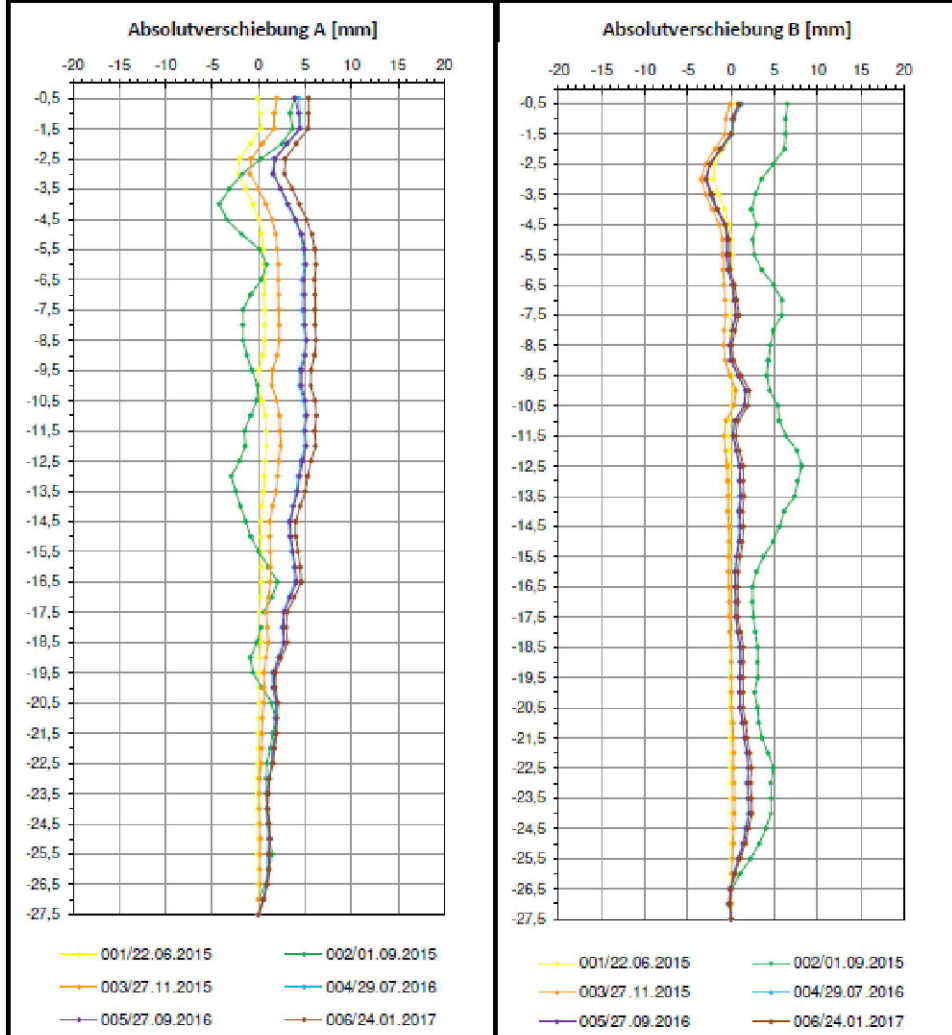
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang E. Inklinometer	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:250	Aufschluss: Inklinometer KB 1/15 Absolutverschiebung
		Datum: 25.02.2017	Tiefe: 32,0 m

Projekt	Stilllegung Schlammteich 2014	Bearbeiter	DT
Bez. Meßbohrung	KB 1/15	Referenzmessung	19.03.2015
Bohrlochtiefe	32 m	Orientierung Talnut	
Messung Nr./Datum	006/24.01.2017	Inklinometersonde	T-Rex (SISGEO)
Referenzniveau	m ü. GOK	Seite	3/5



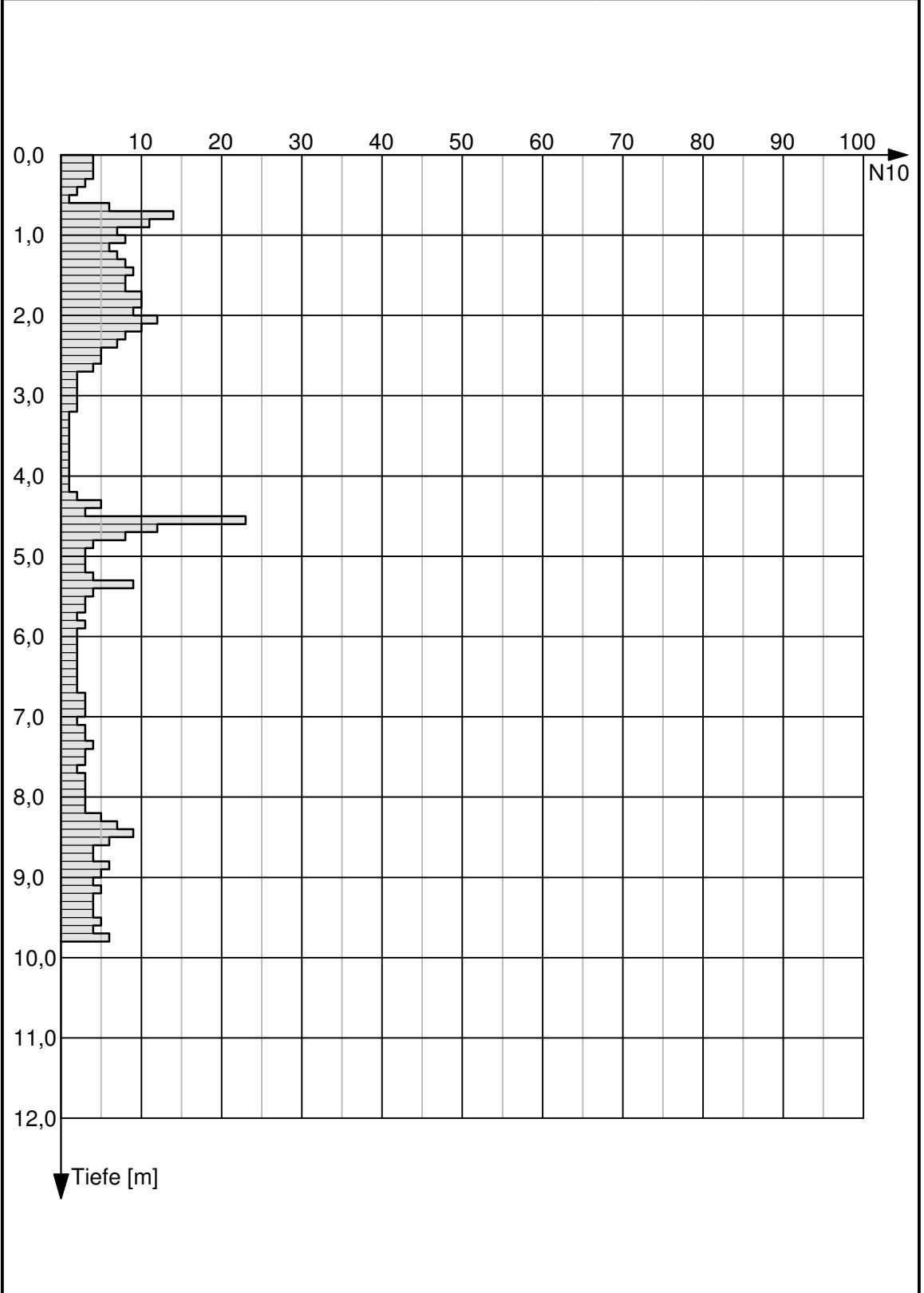
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang E. Inklinometer	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:250	Aufschluss: Inklinometer KB 2/15 Absolutverschiebung
		Datum: 25.02.2017	Tiefe: 27,5 m

Projekt	Stilllegung Schlammteich 2014	Bearbeiter	DT
Bez. Meßbohrung	KB 2/15	Referenzmessung	19.03.2015
Bohrlochtiefe	27,5 m	Orientierung Talnut	
Messung Nr./Datum	006/24.01.2017	Inklinometersonde	T-Rex (SISGEO)
Referenzniveau	m ü. GOK	Seite	3/5

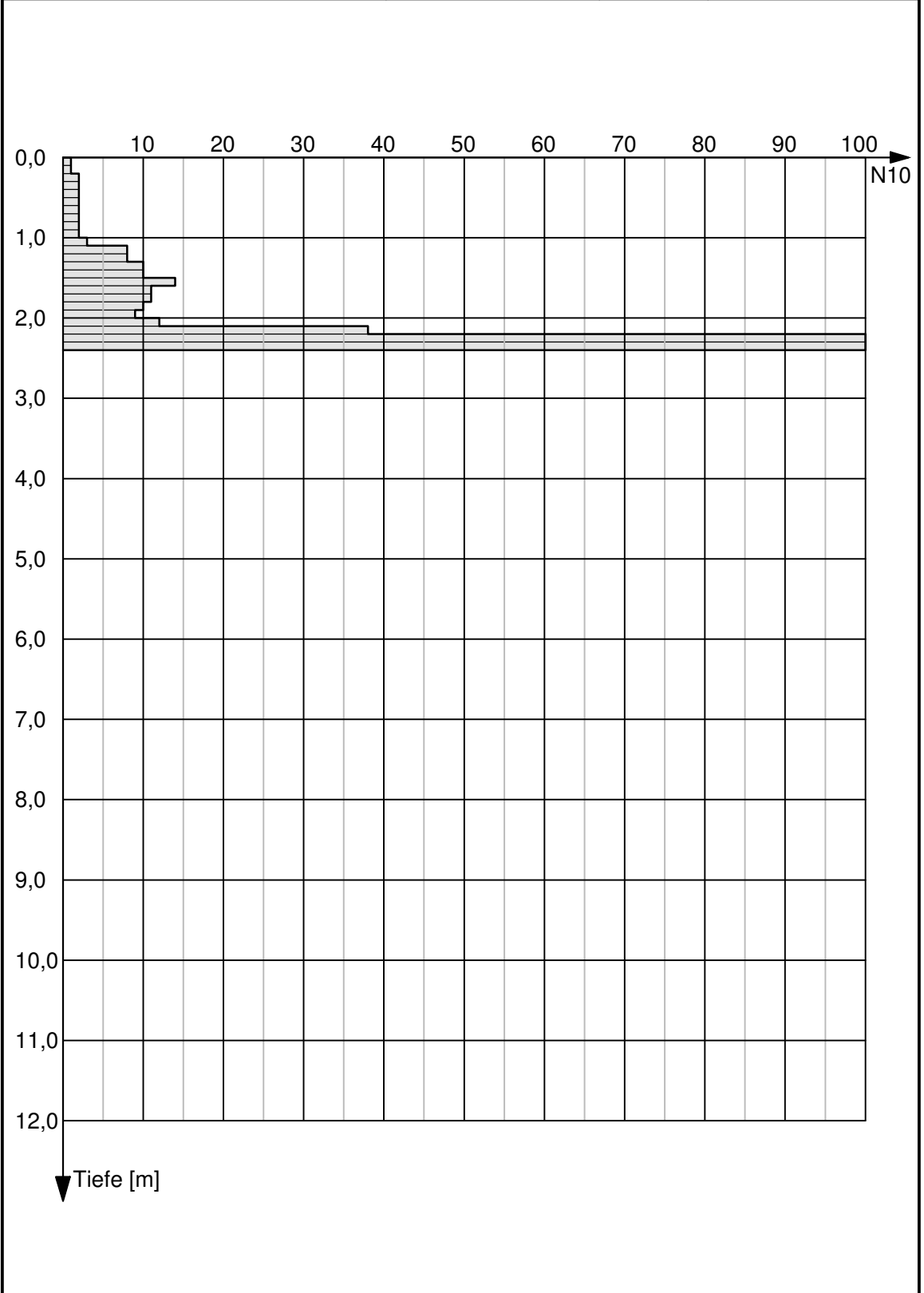


F. Rammsondierungen

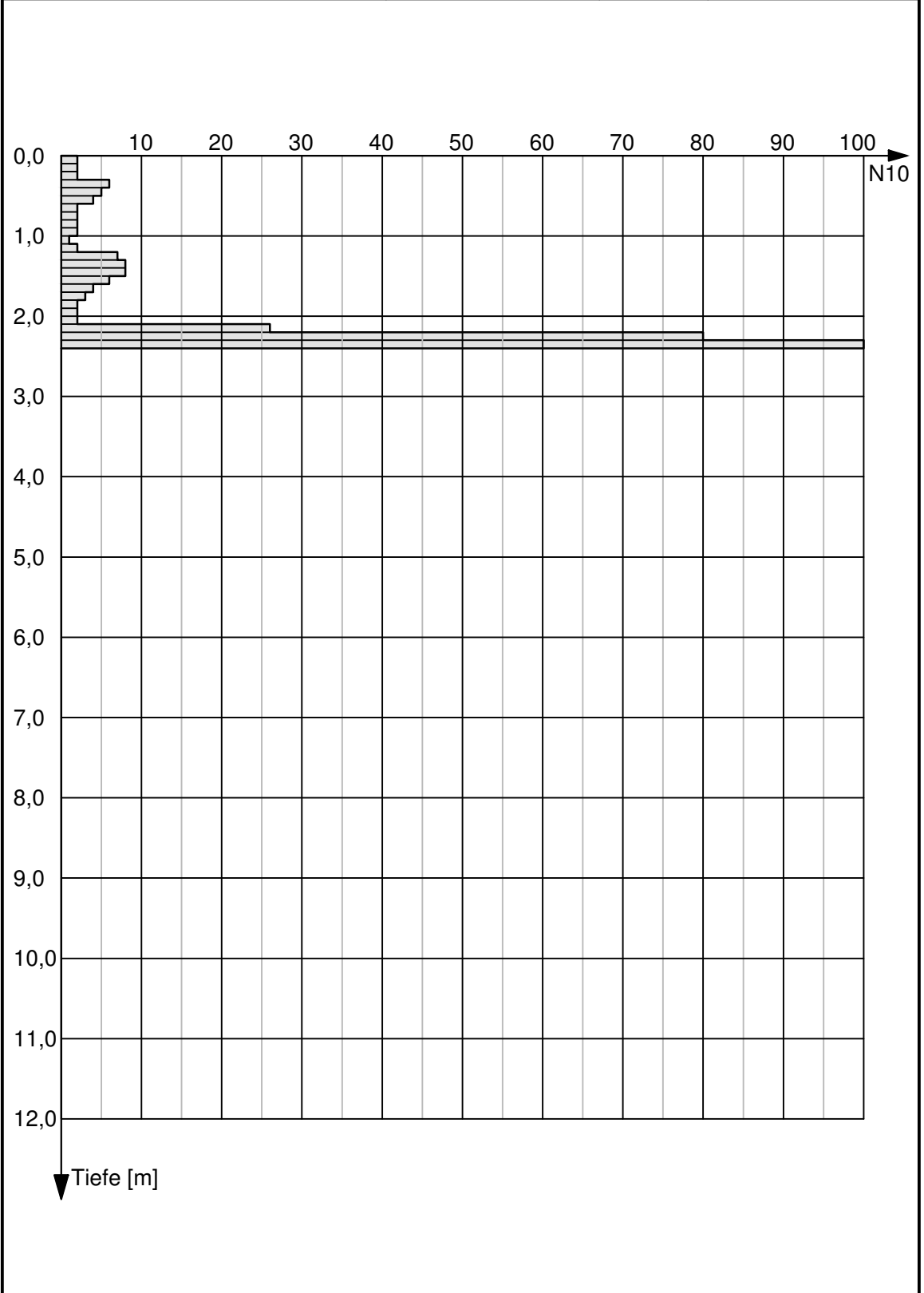
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 1/08
		Datum: 28.08.2008	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



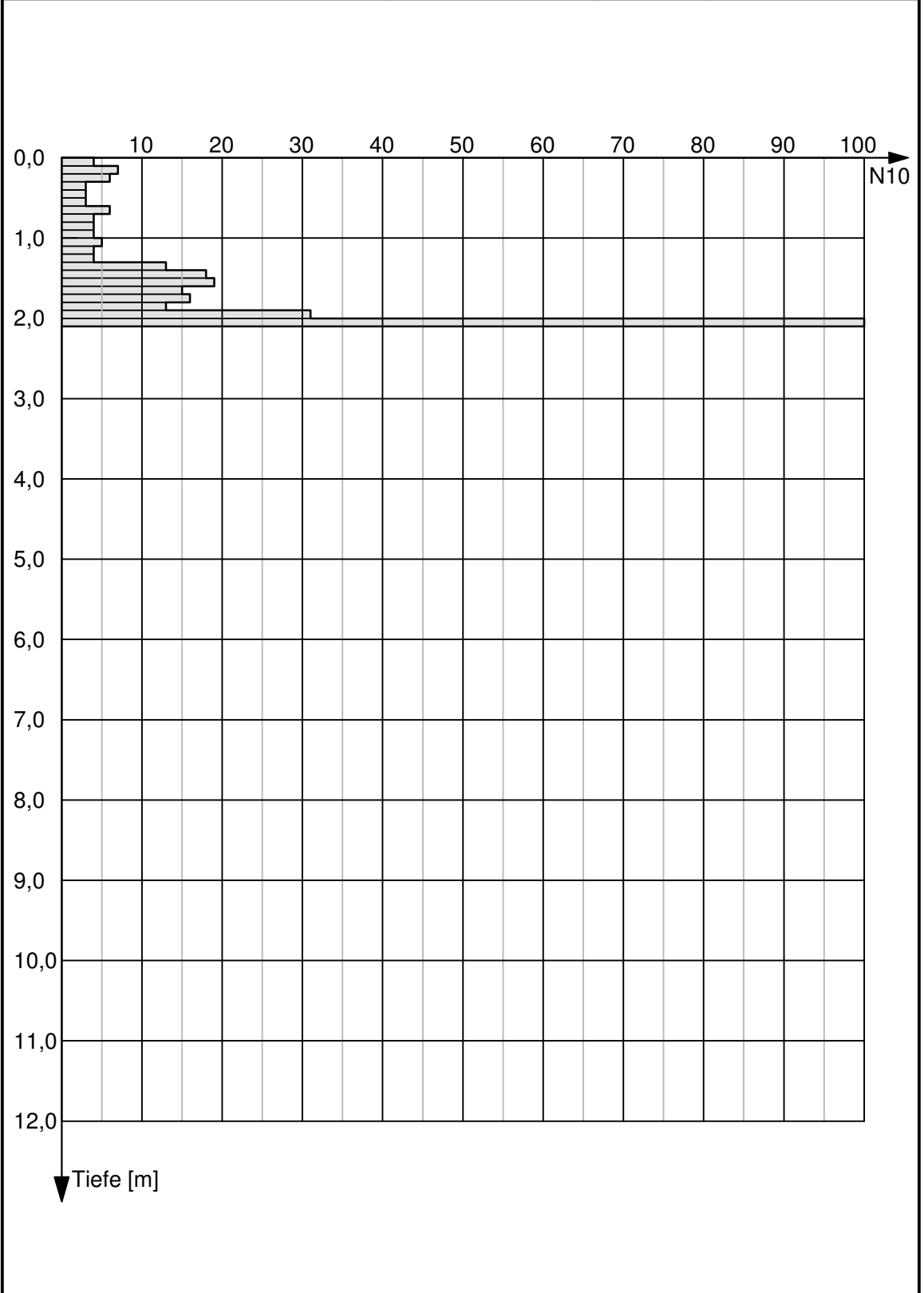
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 2/08
		Datum: 28.08.2008	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



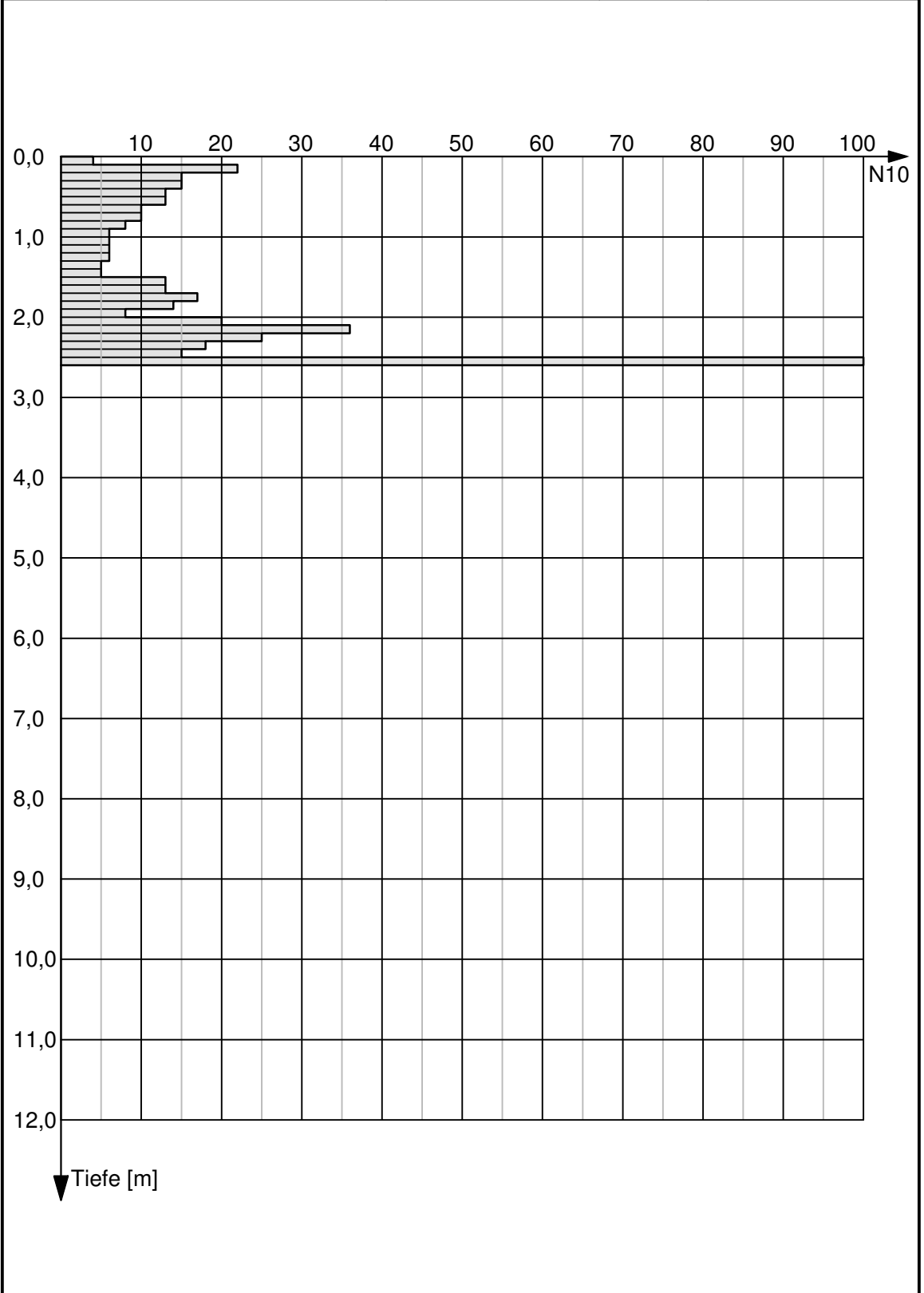
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 3/08
		Datum: 28.08.2008	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 4/08
		Datum: 28.08.2008	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 5/08
		Datum: 28.08.2008	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)

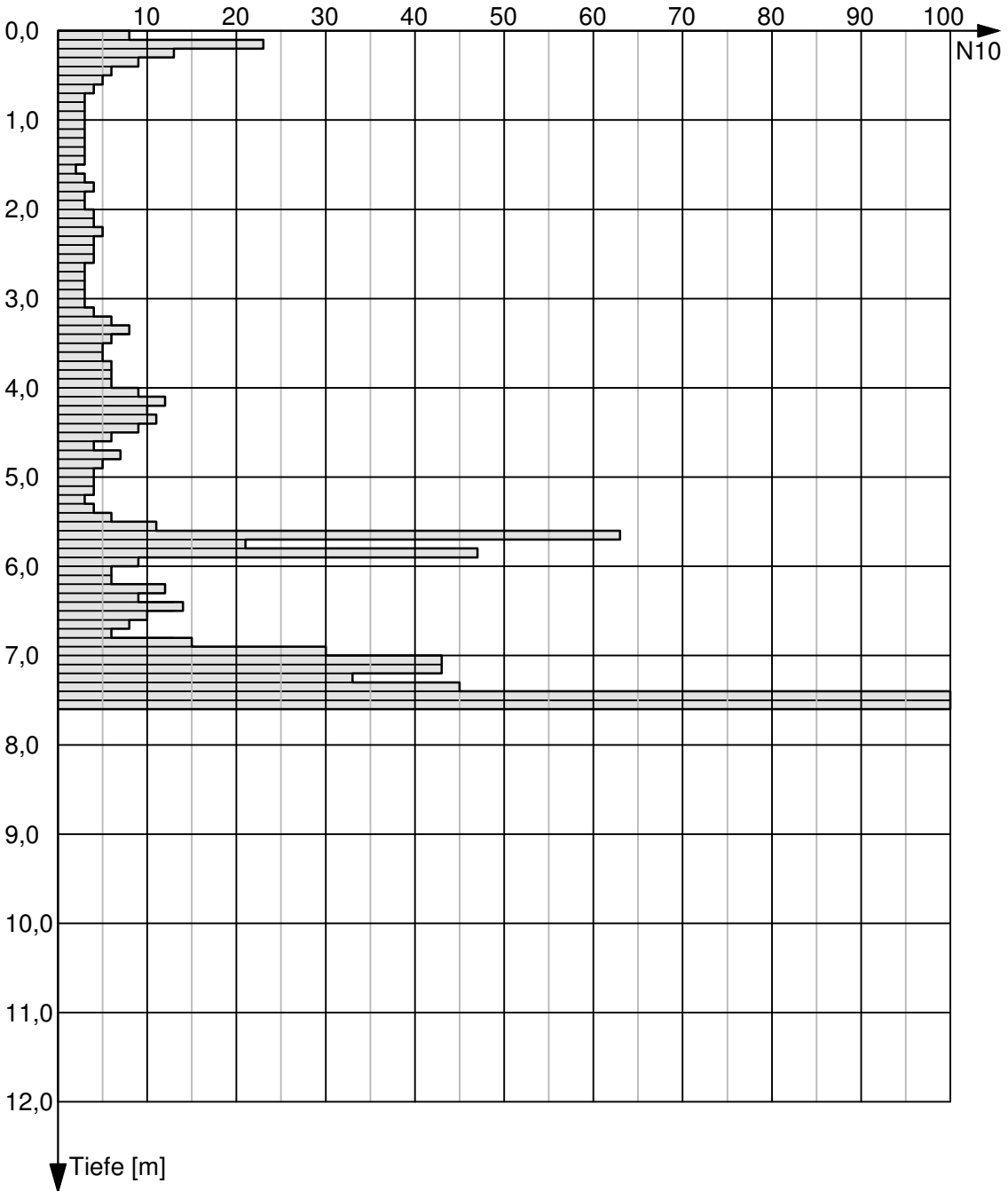


Masterarbeit:
Untersuchungen zur Standsicherheit
von Schlammteichen
Anhang F. Rammsondierungen

Projekt:
Standsicherheitsbeurteilung
Schlammteich C

Maßstab:
1:75
Datum:
28.08.2008

Aufschluss:
RS 6/08
Rammsonde:
Schwere Rammsonde (DPH)

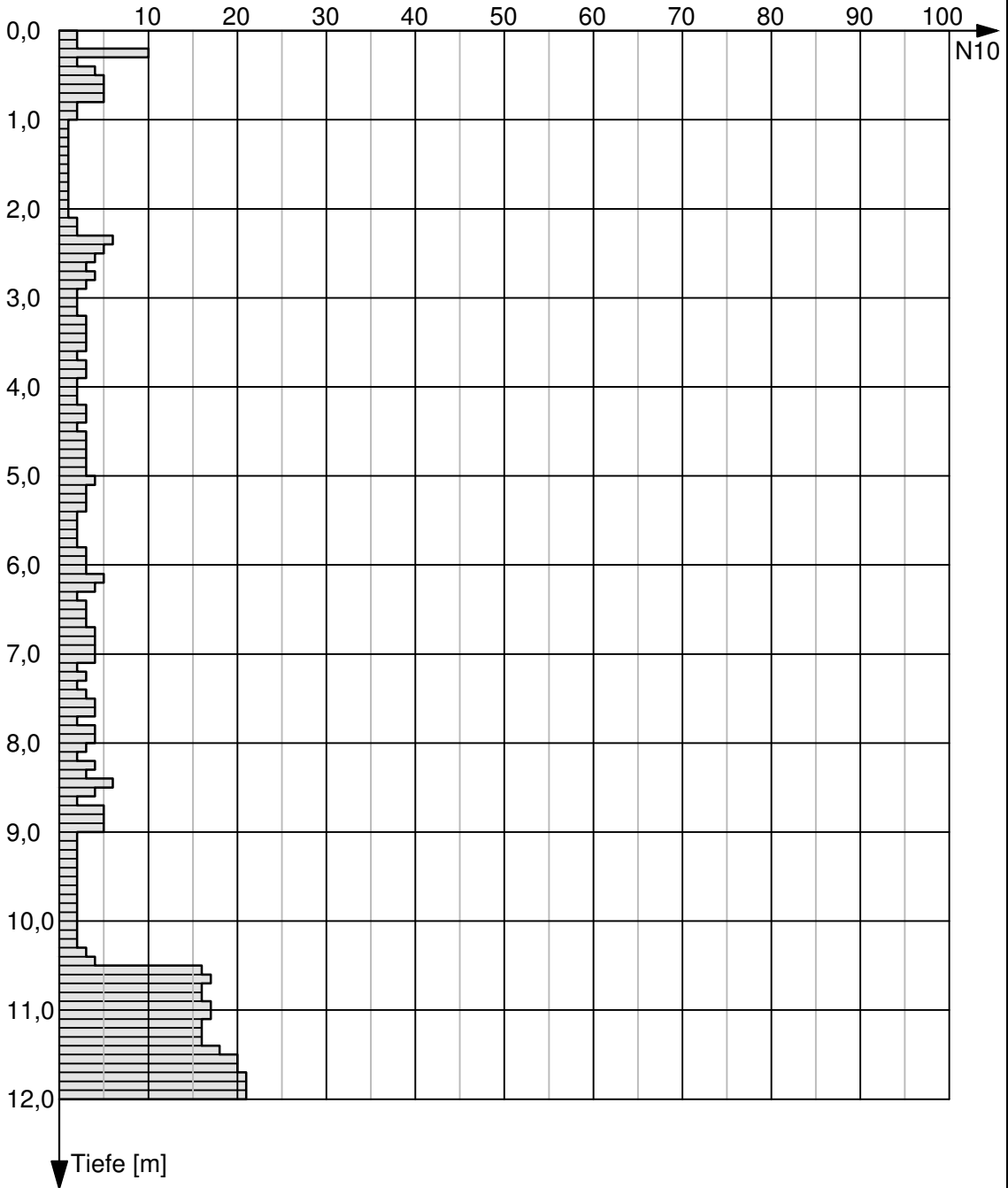


Masterarbeit:
Untersuchungen zur Standsicherheit
von Schlammteichen
Anhang F. Rammsondierungen

Projekt:
Standsicherheitsbeurteilung
Schlammteich C

Maßstab:
1:75
Datum:
28.08.2008

Aufschluss:
RS 7/08
Rammsonde:
Schwere Rammsonde (DPH)

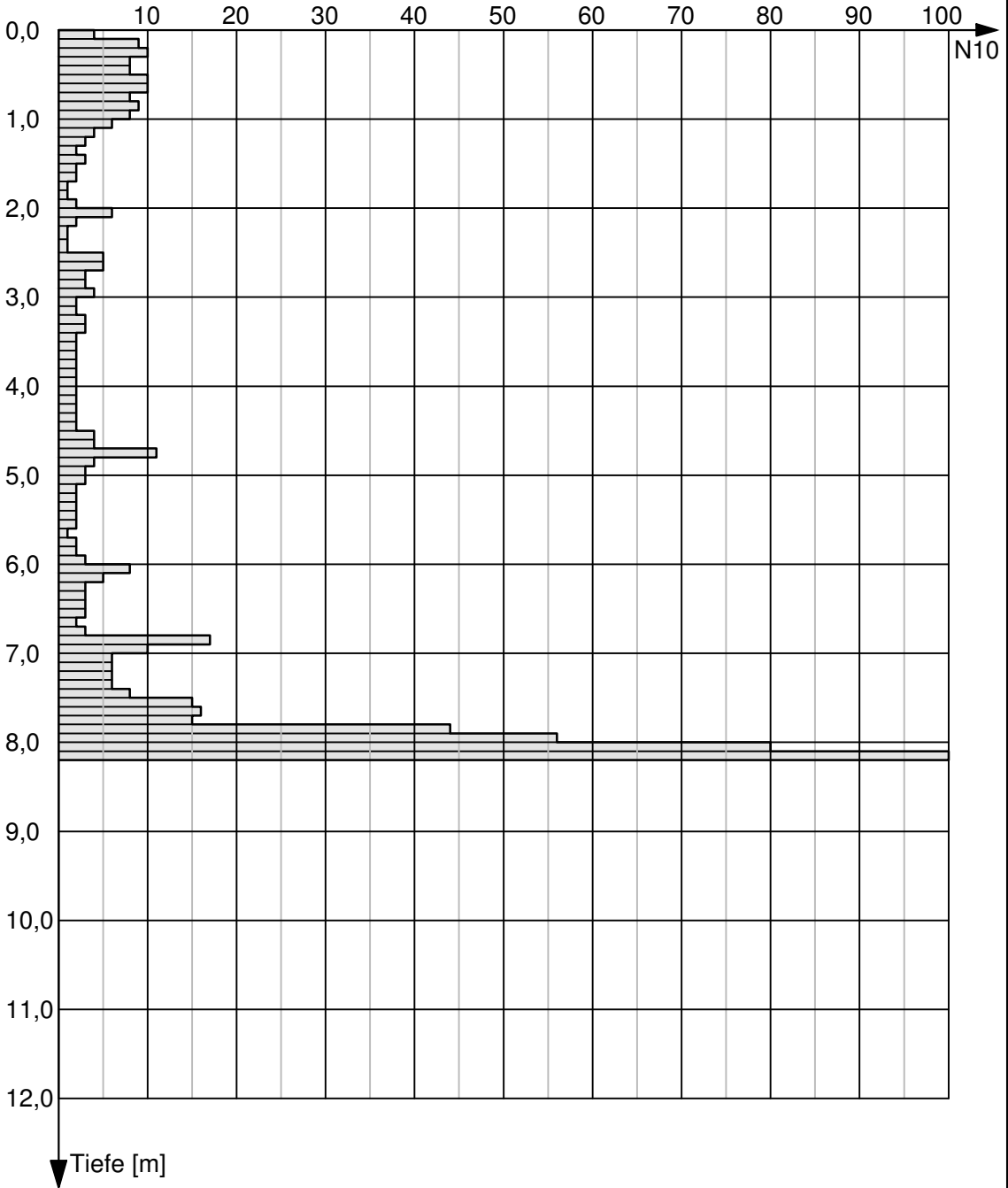


Masterarbeit:
Untersuchungen zur Standsicherheit
von Schlammteichen
Anhang F. Rammsondierungen

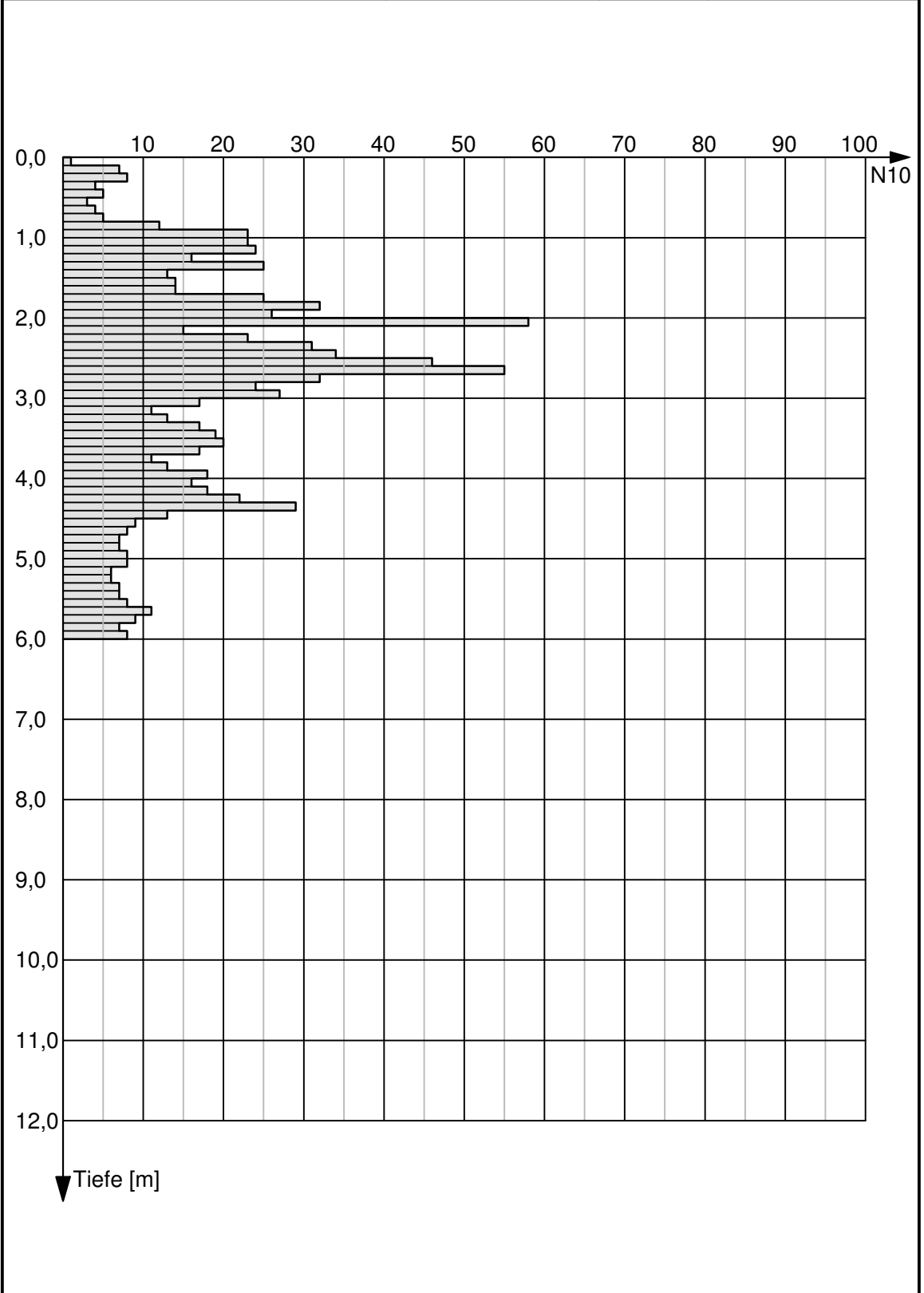
Projekt:
Standsicherheitsbeurteilung
Schlammteich C

Maßstab:
1:75
Datum:
28.08.2008

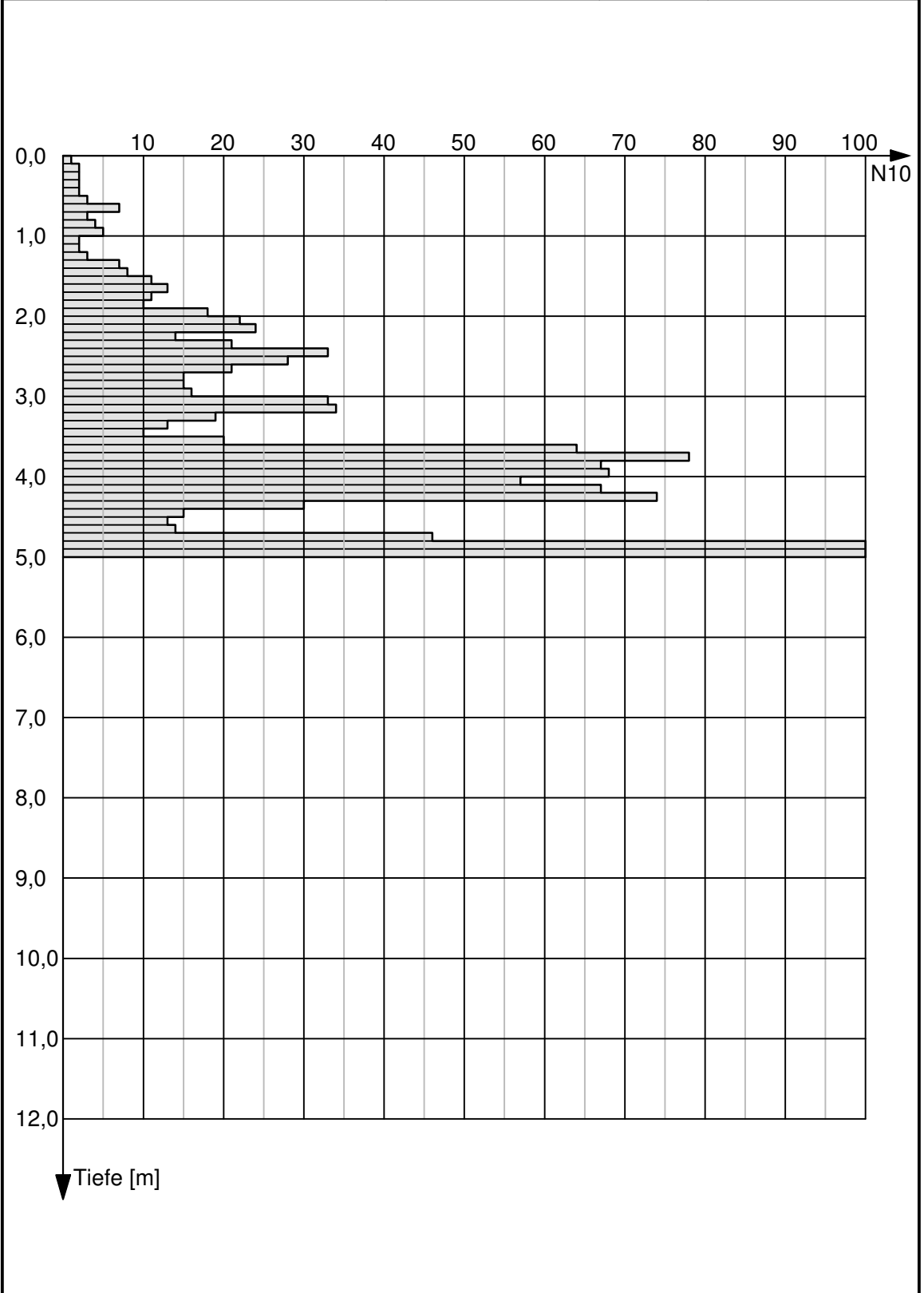
Aufschluss:
RS 8/08
Rammsonde:
Schwere Rammsonde (DPH)



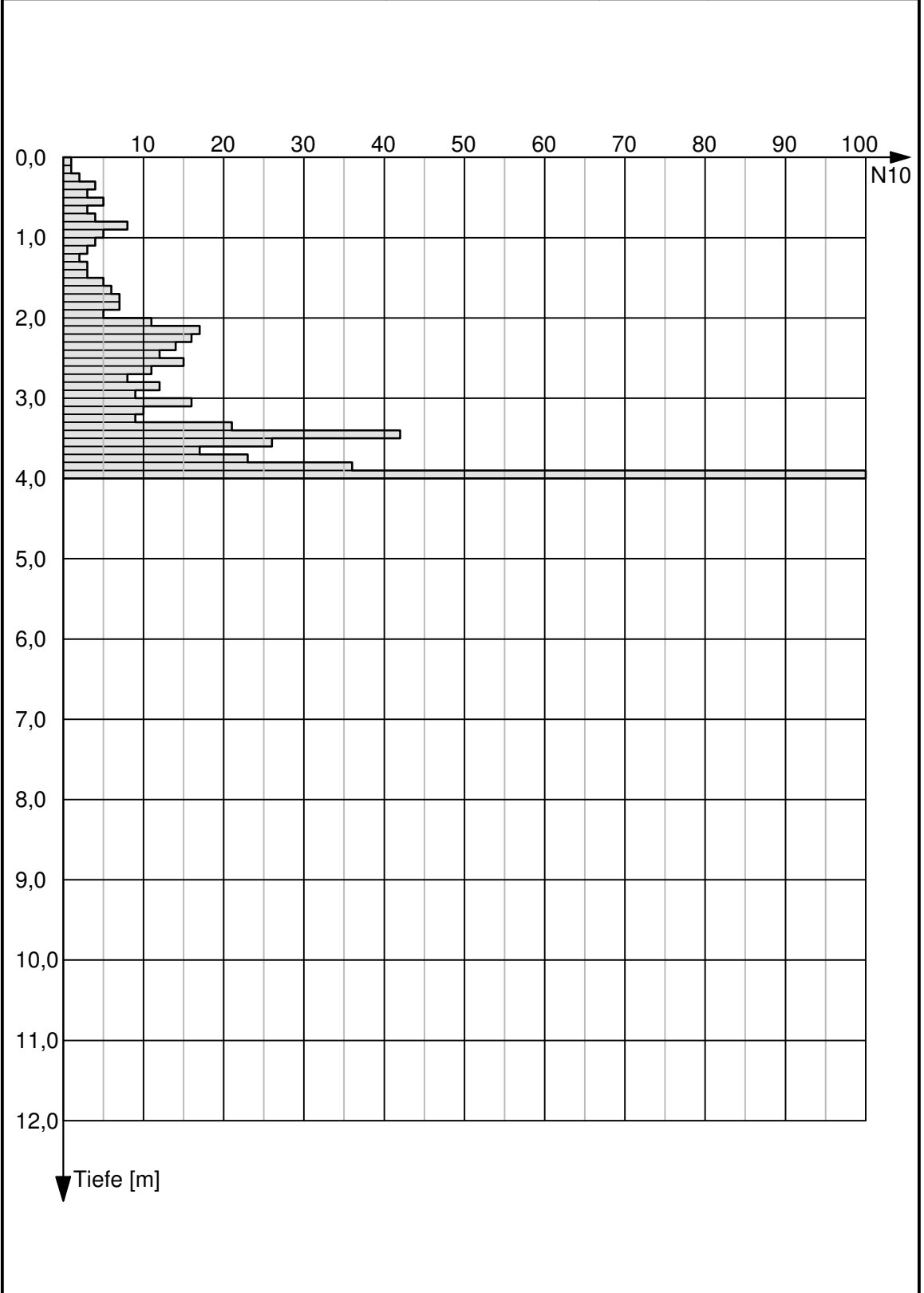
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 9/16
		Datum: 15.12.2016	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



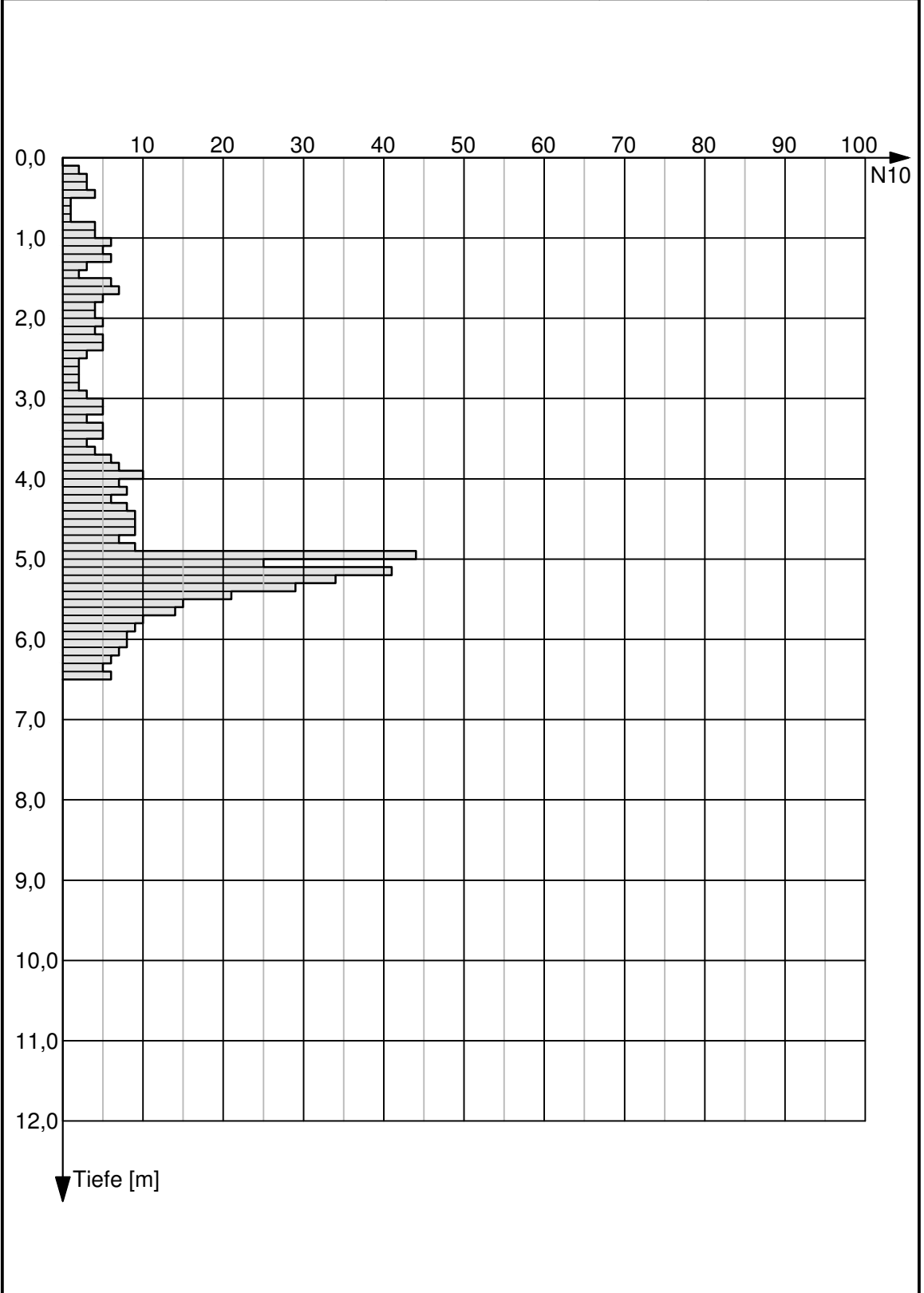
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 10/16
		Datum: 15.12.2016	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 11/16
		Datum: 15.12.2016	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang F. Rammsondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: 1:75	Aufschluss: RS 12/16 schräg sondiert 15° geneigt
		Datum: 15.12.2016	Rammsonde: Schwere Rammsonde (DPH)

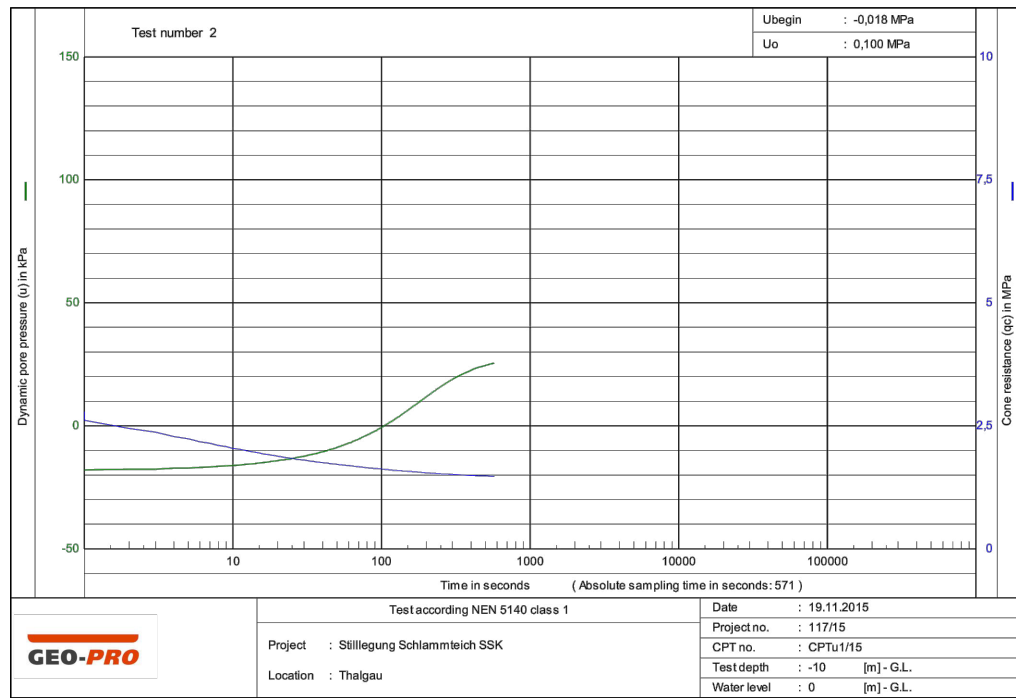
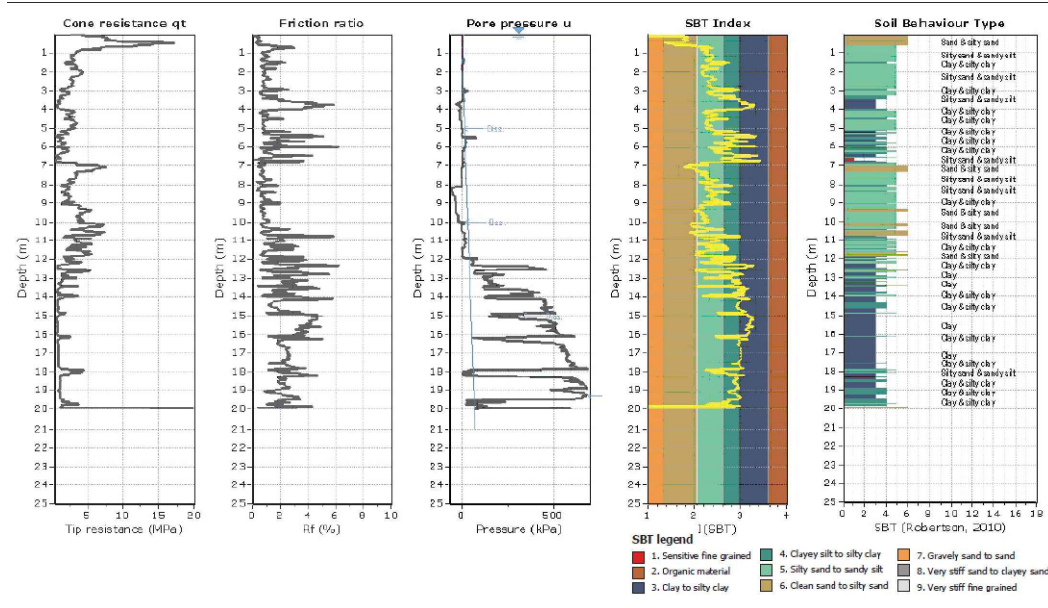


G. Drucksondierungen

Dissipationstests

Porenwasserdruckgeber

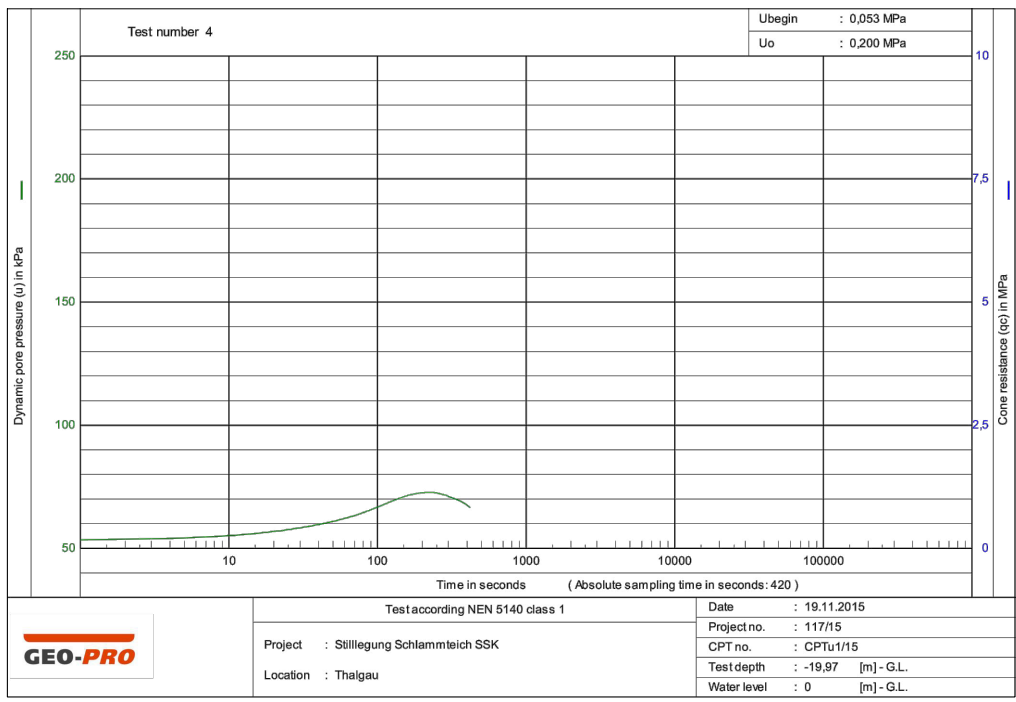
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 1/15
		Datum: 19.11.2015	Drucksonde: 



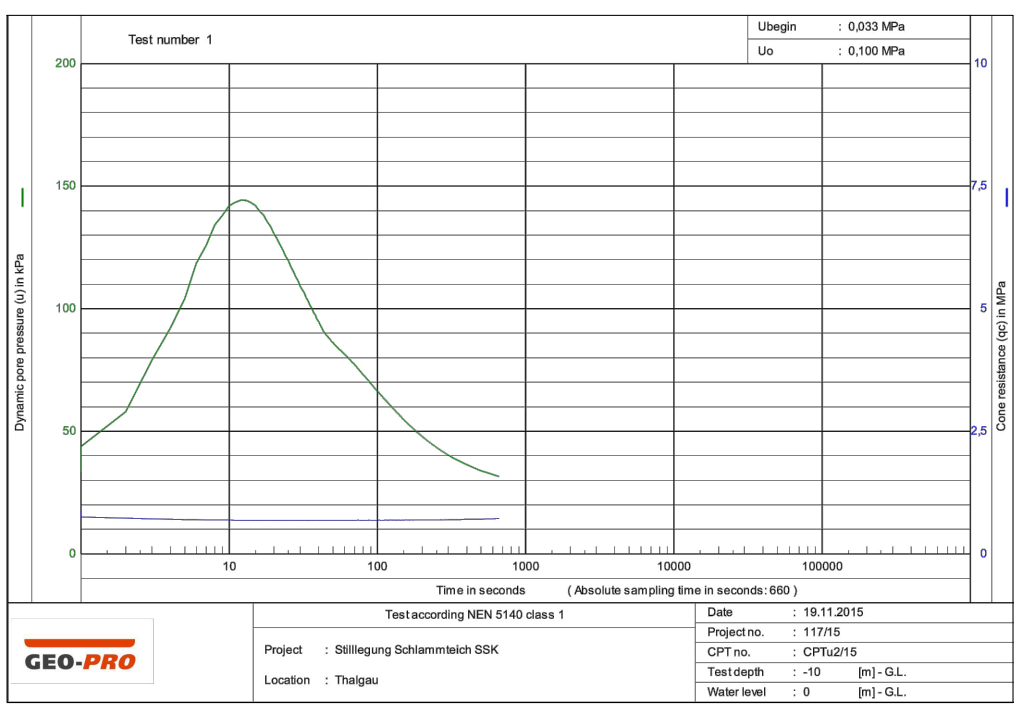
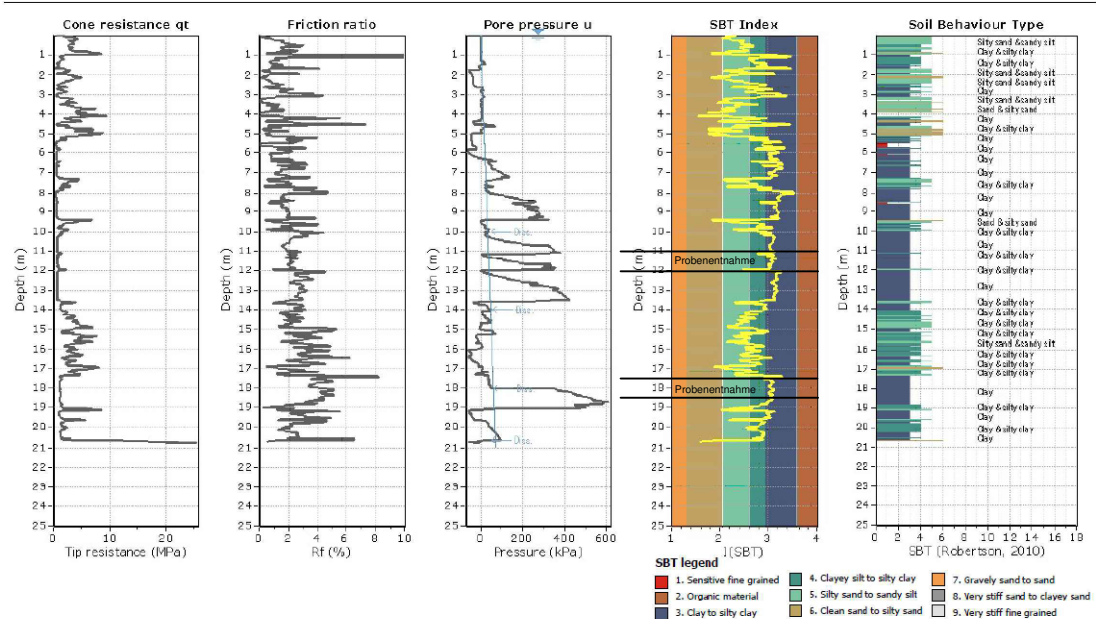
Project : Stilllegung Schlammteich SSK
 Location : Thalgau

Date : 19.11.2015
 Project no. : 117/15
 CPT no. : CPTU1/15
 Test depth : -10 [m] - G.L.
 Water level : 0 [m] - G.L.

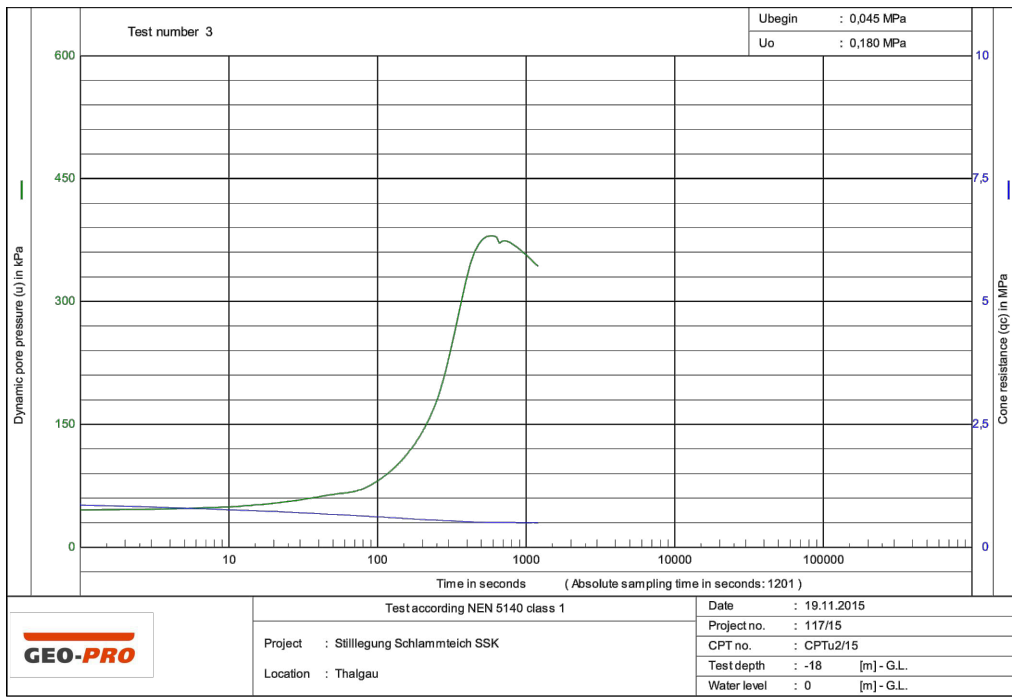
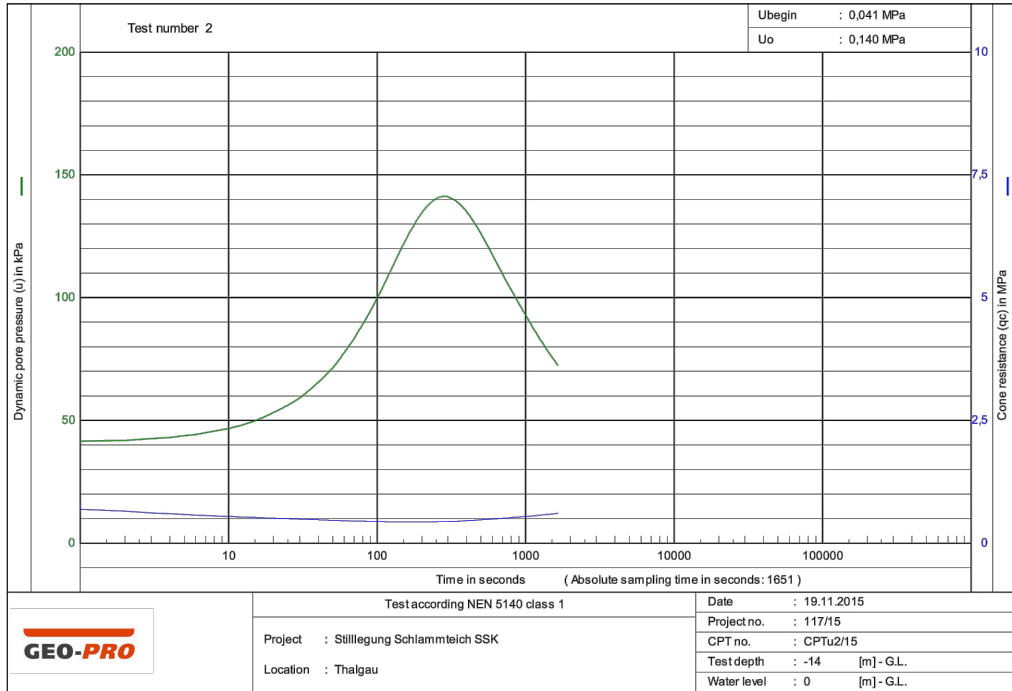
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 1/15
		Datum: 19.11.2015	Drucksonde: 



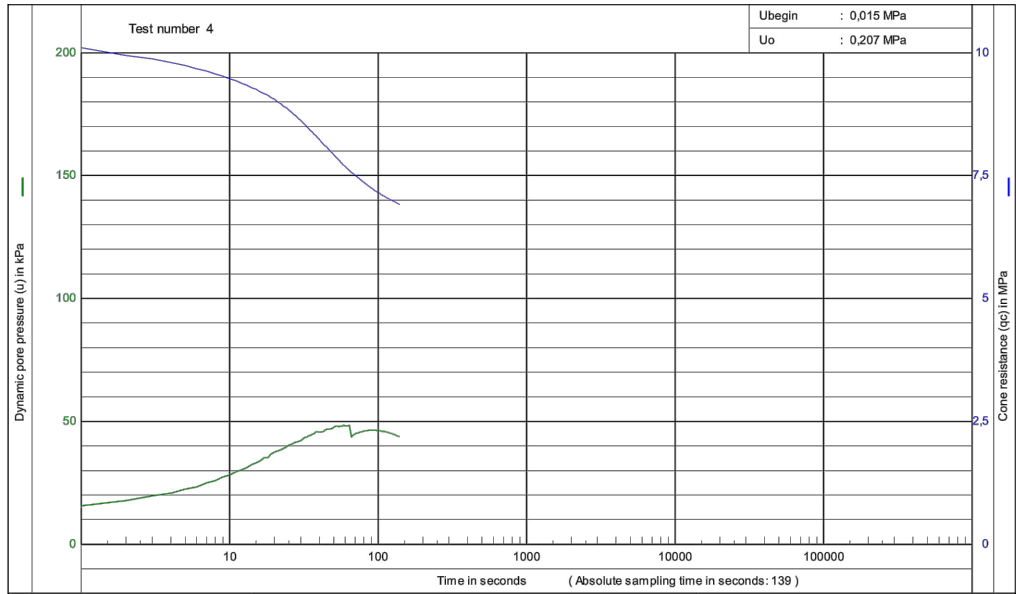
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 2/15
		Datum: 19.11.2015	Drucksonde: 




Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTu 2/15
		Datum: 19.11.2015	Drucksonde: 

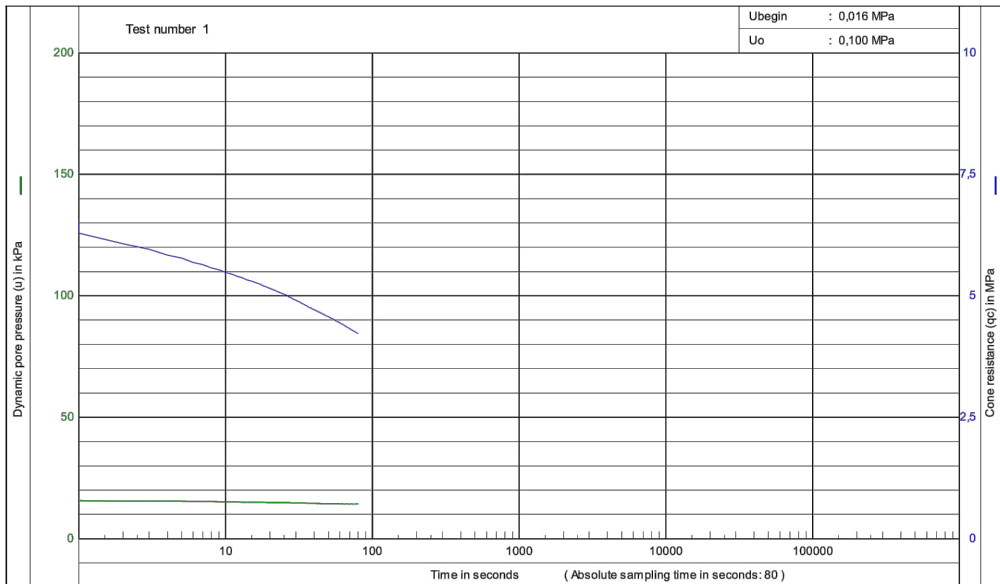
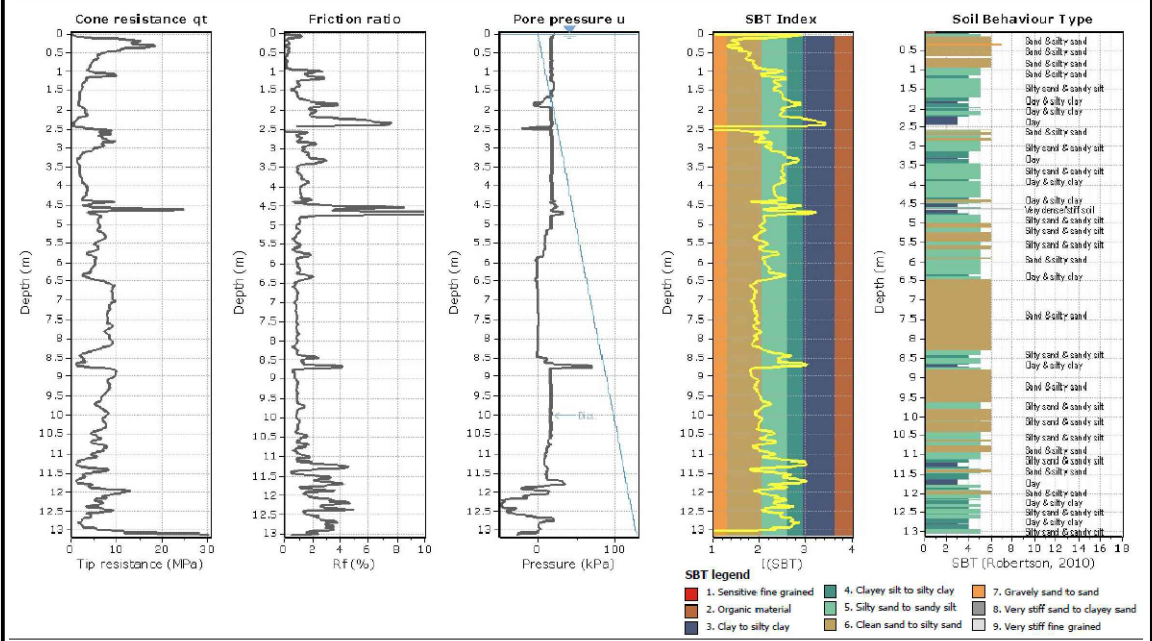



Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 2/15
		Datum: 19.11.2015	Drucksonde: 



	Test according NEN 5140 class 1	Date : 19.11.2015
	Project : Stilllegung Schlammteich SSK	Project no. : 117/15
	Location : Thalgau	CPT no. : CPTu2/15
		Test depth : -20,67 [m] - G.L.
		Water level : 0 [m] - G.L.

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 3/15
		Datum: 20.11.2015	Drucksonde: 



	Test according NEN 5140 class 1	Date : 20.11.2015
	Project : Stilllegung Schlammteich SSK	Project no. : 117/15
Location : Thalgau	CPT no. : CPTu3/15	Test depth : -10 [m] - G.L.
		Water level : 0 [m] - G.L.

Masterarbeit:

Untersuchungen zur Standsicherheit
von Schlammteichen

Anhang G. Drucksondierungen

Projekt:

Standsicherheitsbeurteilung
Schlammteich C

Maßstab:

-

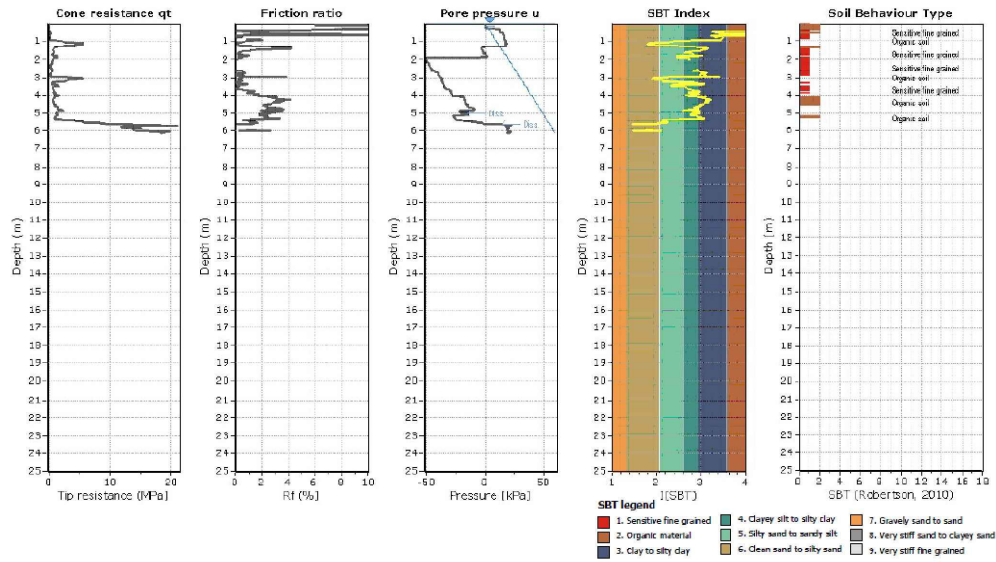
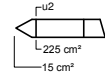
Aufschluss:

CPTU 4/15

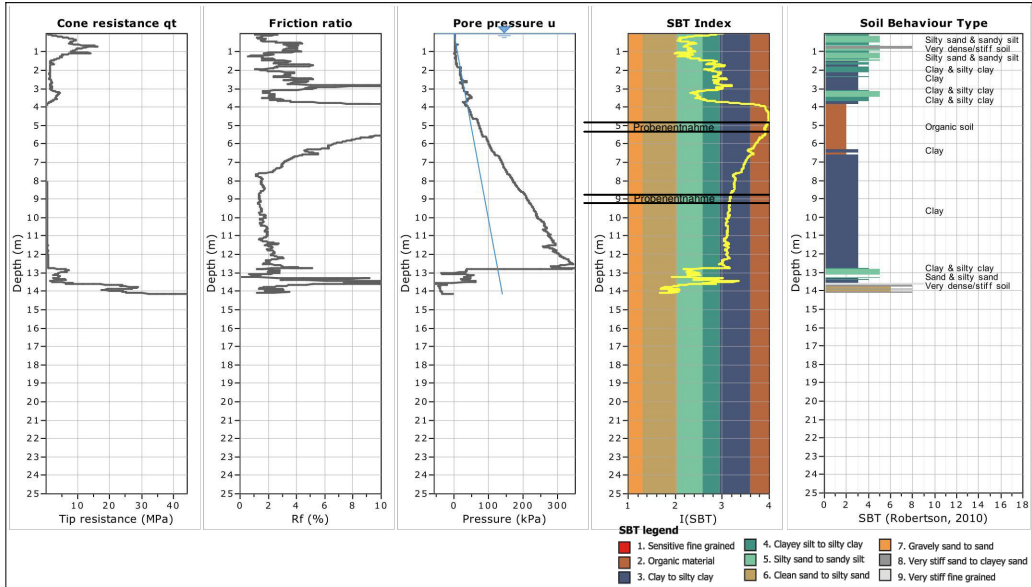
Datum:

20.11.2015

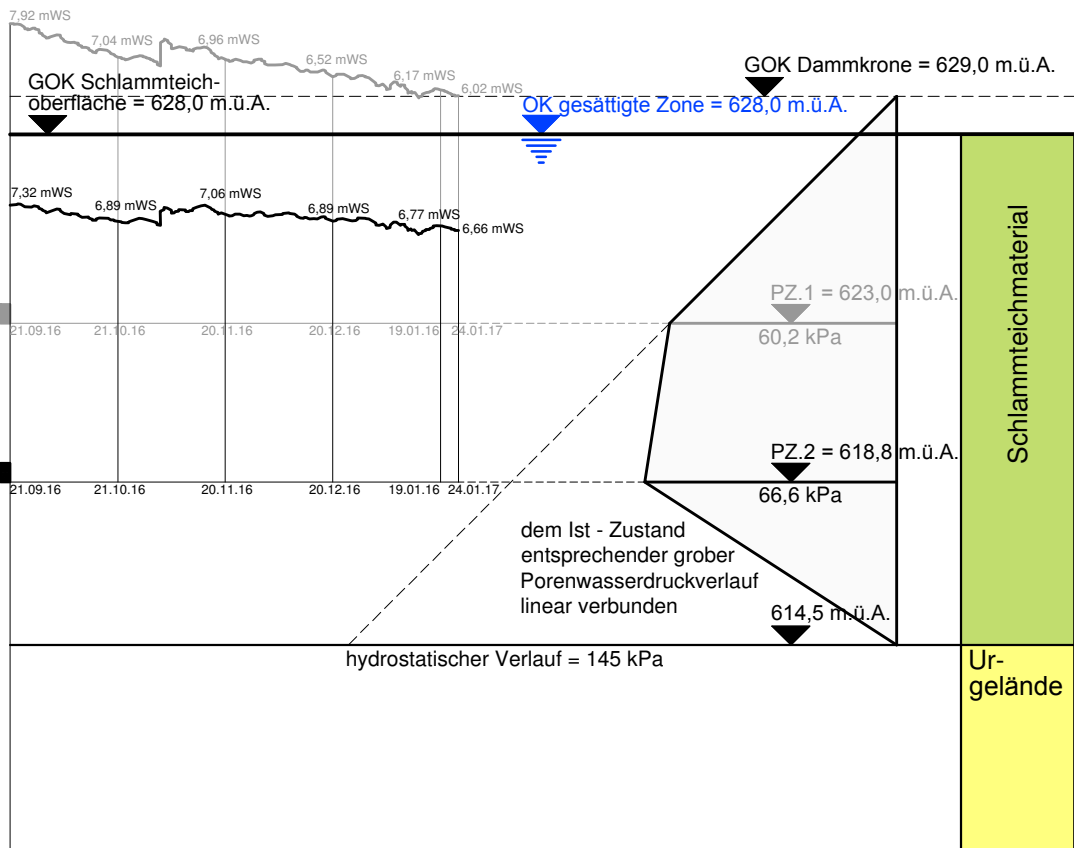
Drucksonde:



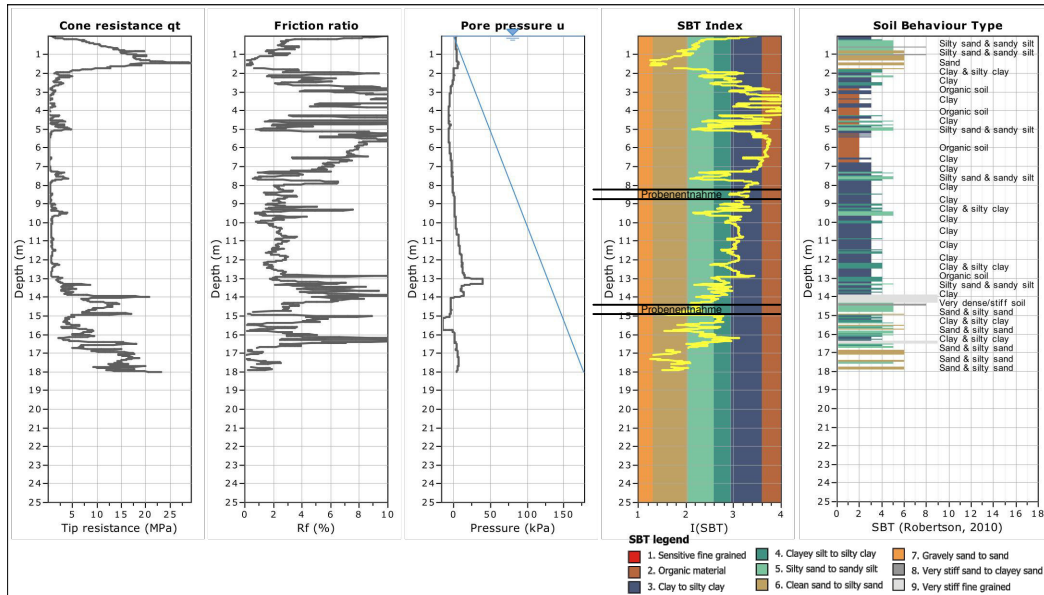
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 5/16
		Datum: 06.09.2016	Drucksonde: 



Porenwasserdruckgeber CPTU 5/16 / Schnitt 3-3 / M. 1:200



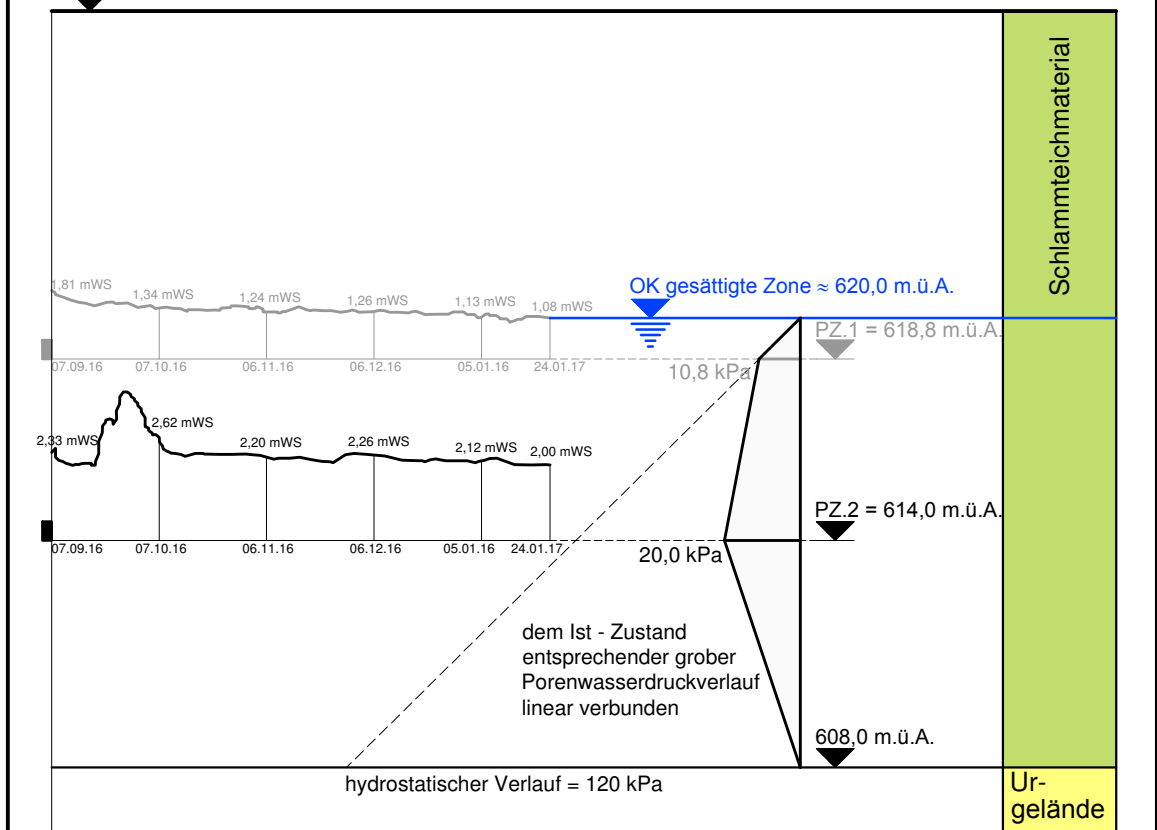
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 6/16
		Datum: 05.09.2016	Drucksonde: 



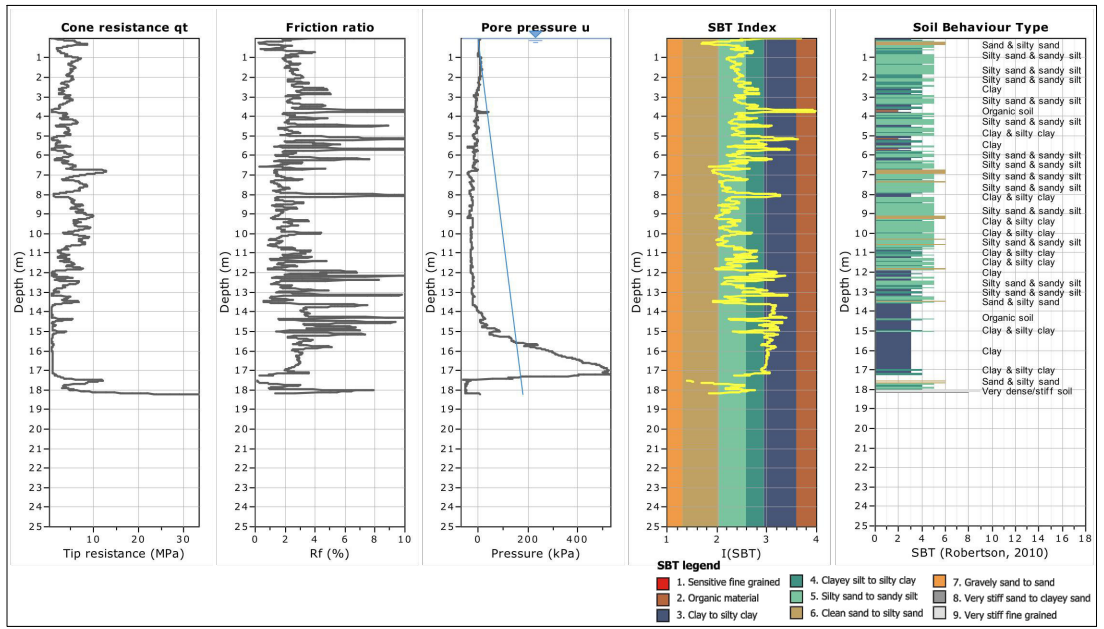
Porenwasserdruckgeber CPTU 6/16 / Schnitt 2-2 / M. 1:200

GOK Dammkrone = 629,0 m.ü.A.

GOK Schlammteichoberfläche = 628,0 m.ü.A.

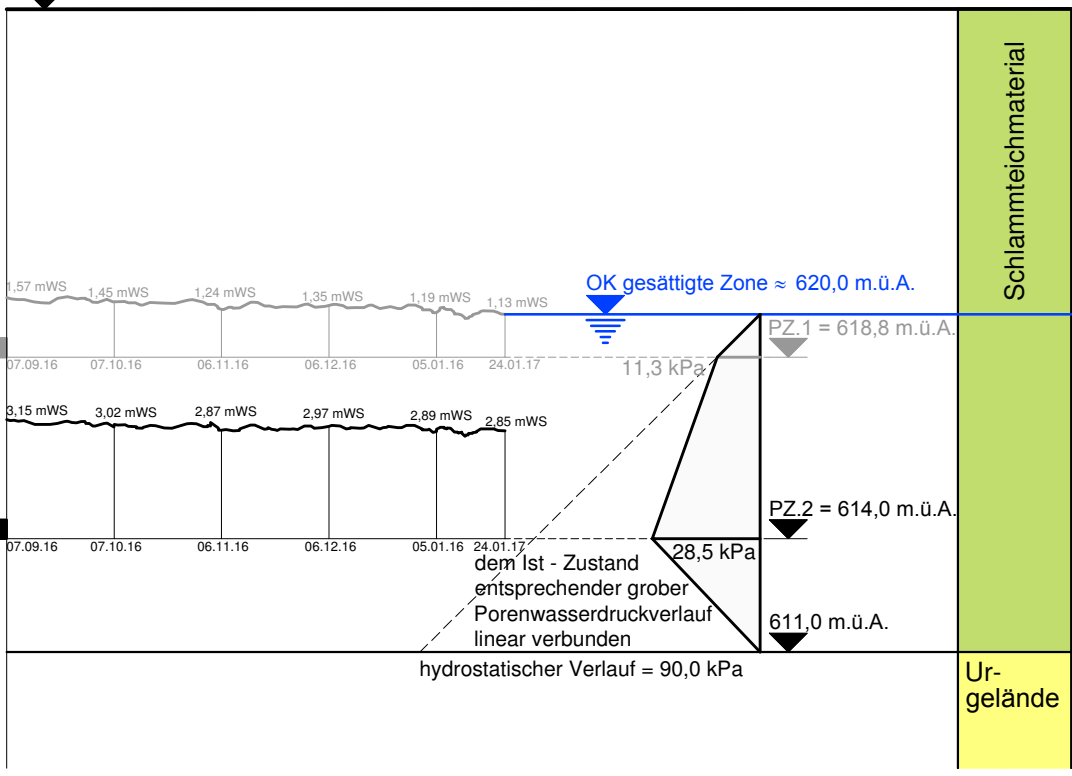


Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang G. Drucksondierungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 7/16
		Datum: 05.09.2016	Drucksonde: 



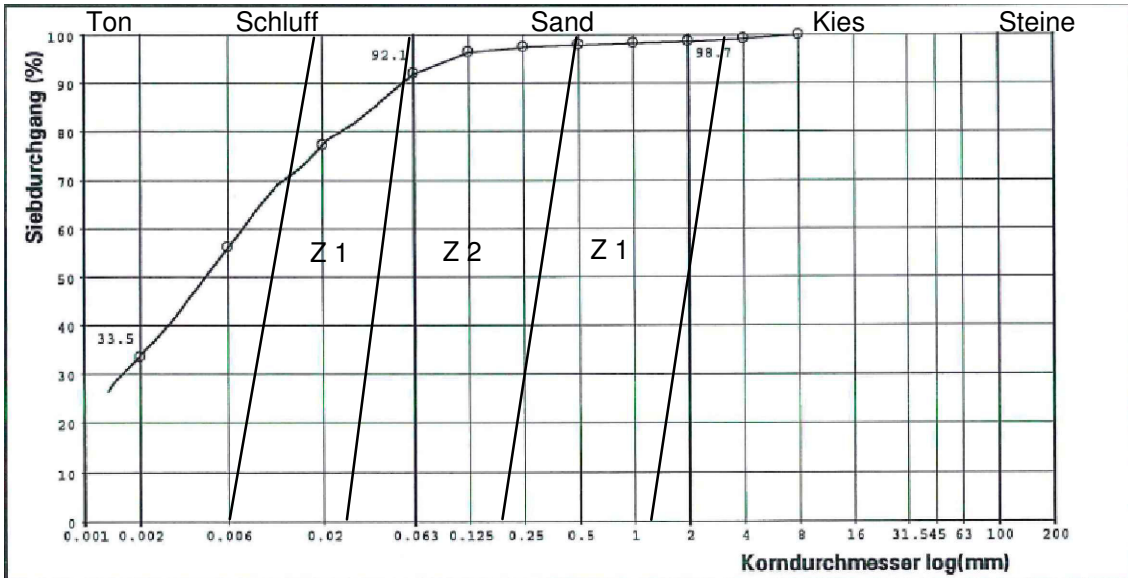
Porenwasserdruckgeber CPTU 7/16 / Schnitt 1-1 / M. 1:200
 GOK Dammkrone = 629,0 m.ü.A.

GOK Schlammteichoberfläche = 628,0 m.ü.A.

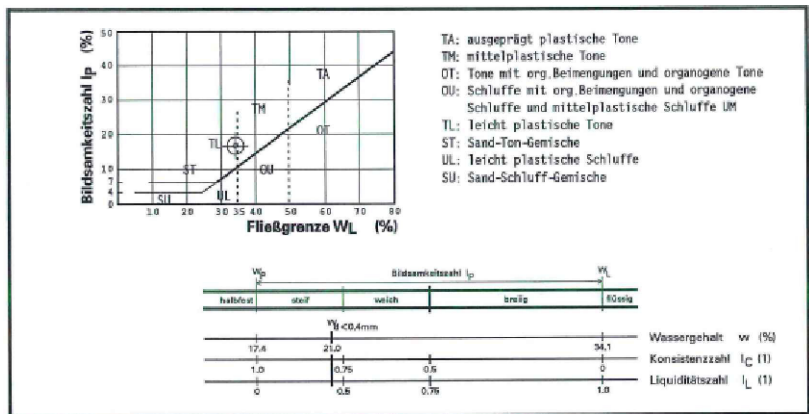


H. Korngrößenverteilungen

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang H. Korngrößenverteilungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 2/15
		Datum: 19.11.2015	Korngrößenverteilung: Tiefe 17,5 -18,5 m

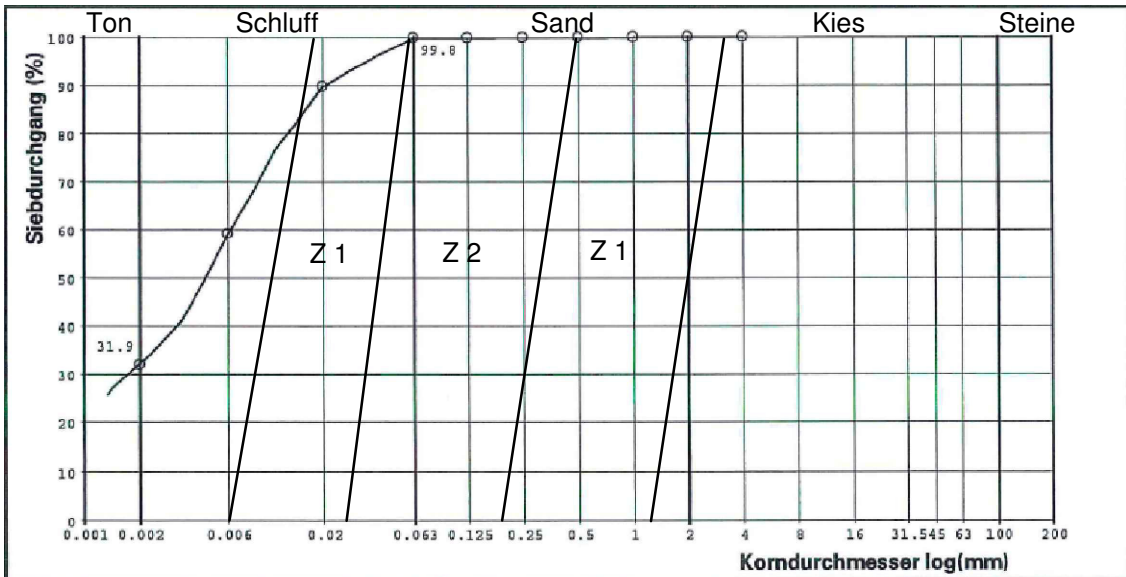


Z1 Verflüssigungsempfindlich
 Z2 stark Verflüssigungsempfindlich

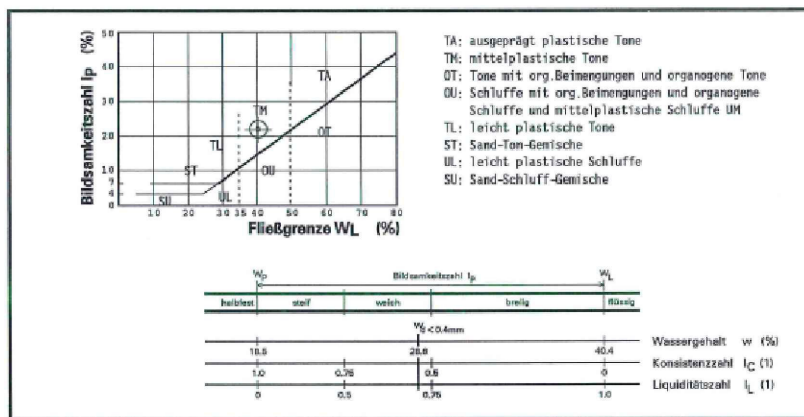


Größtkorn	(mm)	5	Aktivitätszahl	I _A (%)	49.9
Anteil Ton	[0 - 0.002 mm] (%)	33.5	BEMERKUNG/BEURTEILUNG: Zustand (Konsistenz): steif		
Anteil Schluff	[0.002 - 0.063 mm] (%)	58.6			
Anteil Sand	[0.063 - 2 mm] (%)	6.6			
Anteil Kies	[2 - 63 mm] (%)	1.3			
Anteil Steine	[63 - 200 mm] (%)	0			
Wassergehalt	w (%)	20.5			
Fließgrenze	W _L (%)	34.1			
Ausrollgrenze	W _p (%)	17.4			
Bildsamkeitszahl	I _p (%)	16.7			
Konsistenzzahl	I _c (%)	0.78			
Liquiditätszahl	I _L (%)	0.22			

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang H. Korngrößenverteilungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 2/15
		Datum: 19.11.2015	Korngrößenverteilung: Tiefe 11,0 -12,0 m

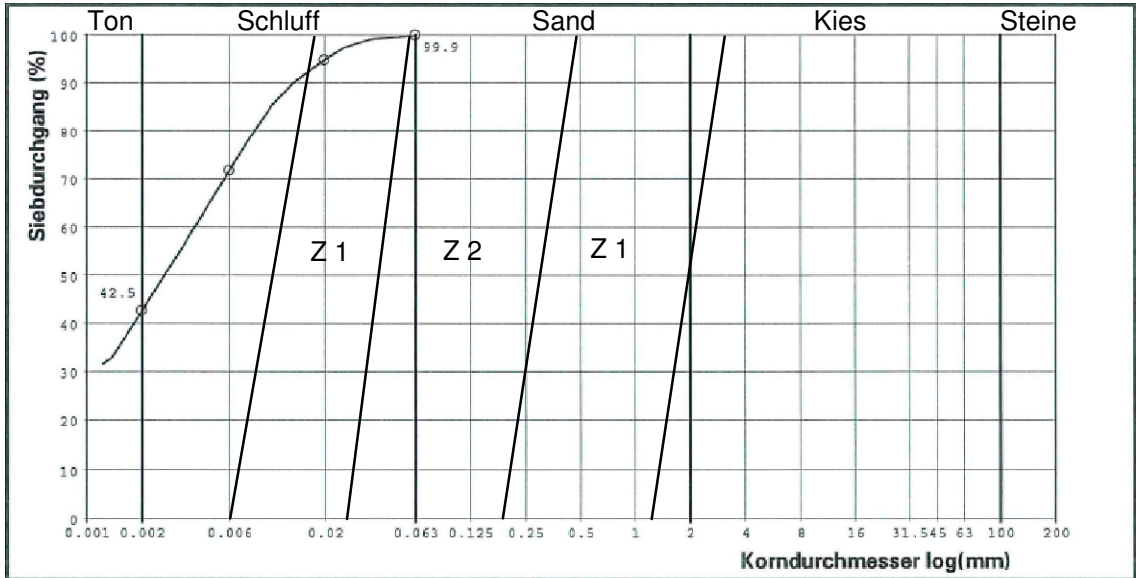


- Z1 Verflüssigungsempfindlich
- Z2 stark Verflüssigungsempfindlich

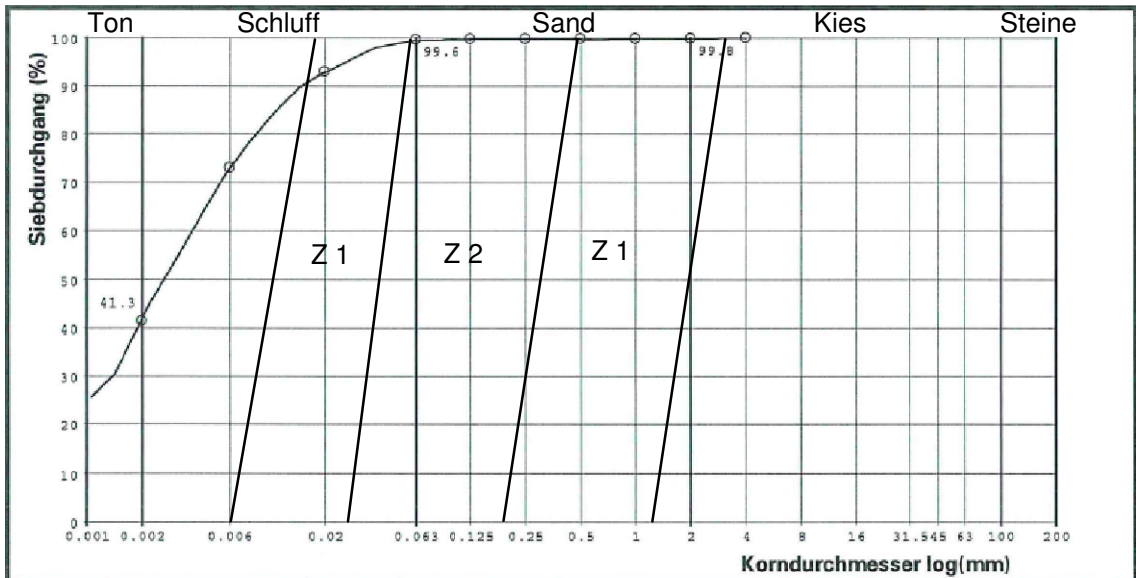


Größtkorn (mm)	2.5	Aktivitätszahl I_A (%)	68.7
Anteil Ton [0 - 0.002 mm] (%)	31.9	BEMERKUNG/BEURTEILUNG:	
Anteil Schluff [0.002 - 0.063 mm] (%)	67.9	Zustand (Konsistenz): weich	
Anteil Sand [0.063 - 2 mm] (%)	0.2		
Anteil Kies [2 - 63 mm] (%)	0		
Anteil Steine [63 - 200 mm] (%)	0		
Wassergehalt w (%)	28.6		
Fließgrenze W_L (%)	40.4		
Ausrollgrenze W_P (%)	18.5		
Bildsamkeitszahl I_p (1)	21.9		
Konsistenzzahl I_C (1)	0.54		
Liquiditätszahl I_L (1)	0.46		

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang H. Korngrößenverteilungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 5/16
		Datum: 07.09.2015	Korngrößenverteilung: Tiefe 4,80 - 5,30 m Tiefe 8,70 - 9,20 m

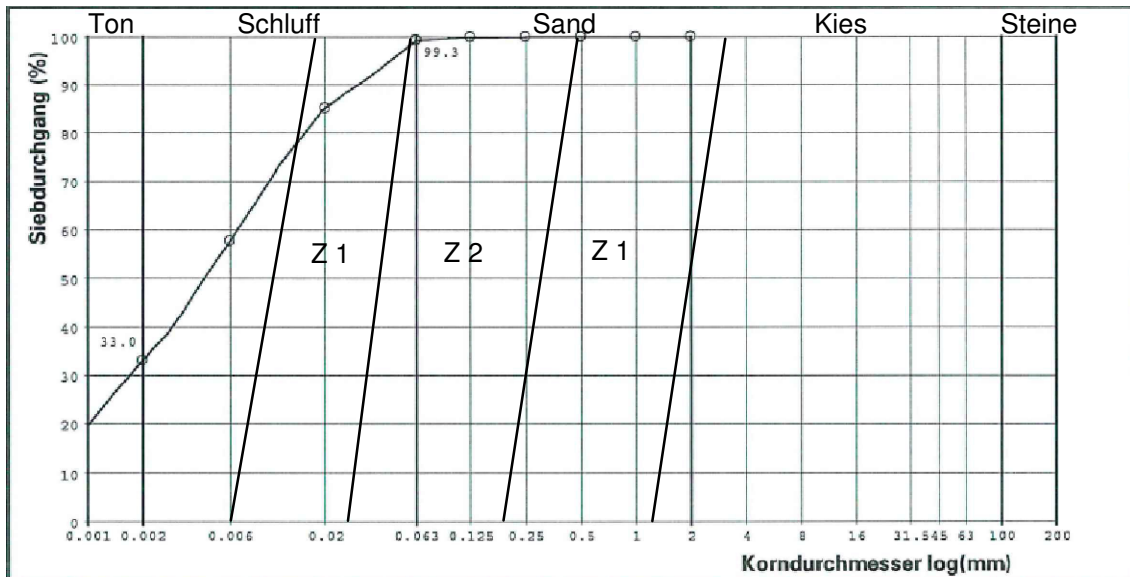


Z1 Verflüssigungsempfindlich
 Z2 stark Verflüssigungsempfindlich



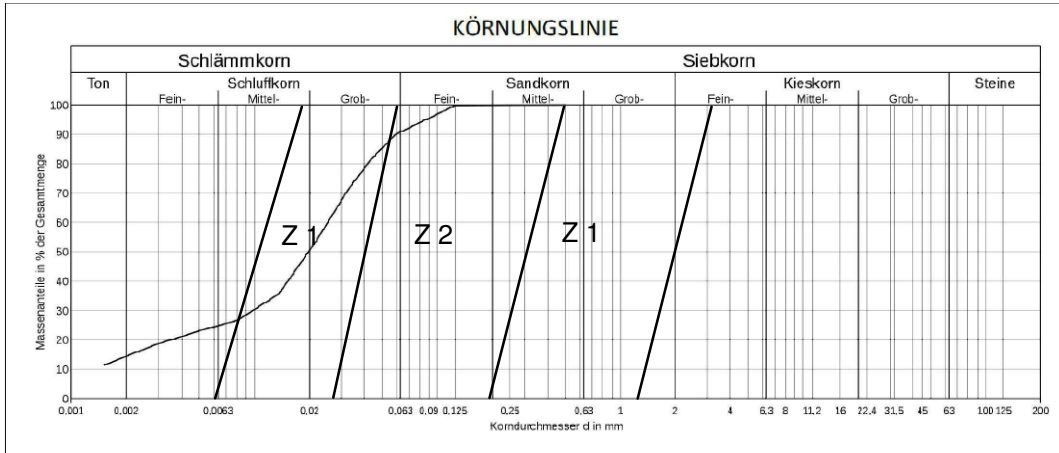
Z1 Verflüssigungsempfindlich
 Z2 stark Verflüssigungsempfindlich

Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang H. Korngrößenverteilungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: CPTU 6/16
		Datum: 06.09.2015	Korngrößenverteilung: Tiefe 8,20 -8,70 m

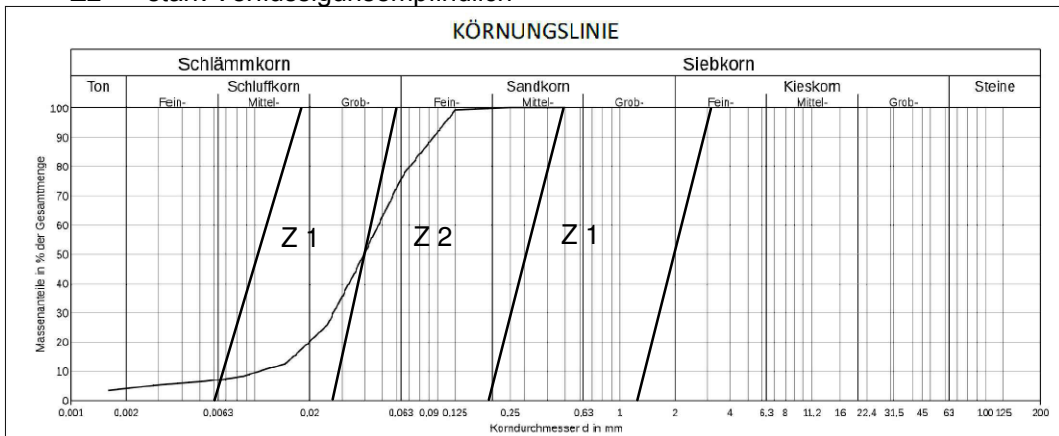


- Z1 Verflüssigungsempfindlich
- Z2 stark Verflüssigungsempfindlich

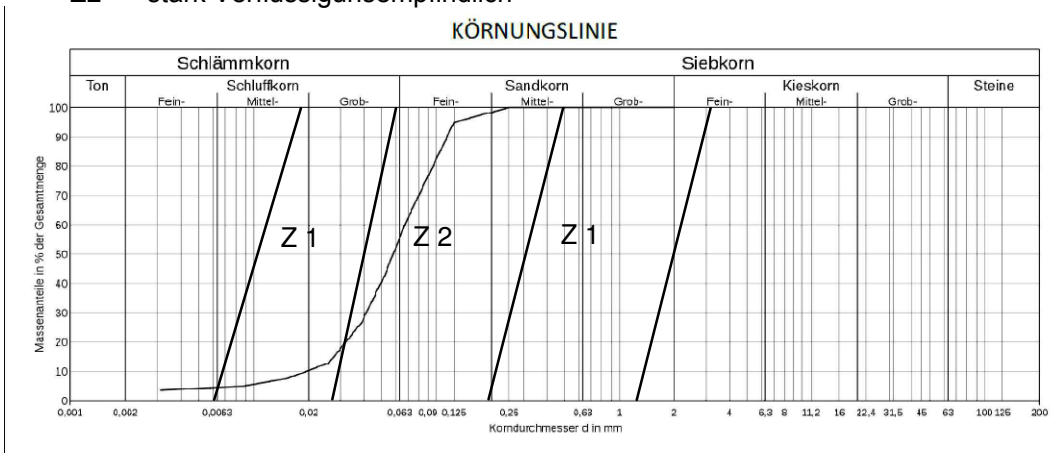
Masterarbeit: Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlammteichen Anhang H. Korngrößenverteilungen	Projekt: Standsicherheitsbeurteilung Schlammteich C	Maßstab: -	Aufschluss: Schlammteichoberfläche
		Datum: 10.11.2015	Korngrößenverteilung: Tiefe 0,70 - 1,00 m



Z1 Verflüssigungsempfindlich
 Z2 stark Verflüssigungsempfindlich



Z1 Verflüssigungsempfindlich
 Z2 stark Verflüssigungsempfindlich



I. Bodenkennwerte aus Versuchsauswertung

Tab. I 1 Ausgewertete Versuchsdaten Schlammteichmaterial – Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2

Schlammteichmaterial - Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2						
Bodenart	stark toniger Schluff					
Lithologie	sa' cl Si					
Kurzbeschreibung	Die abgelagerten Schlammteichsedimente entstanden durch die örtlich konzentrierte Einspülung, der durch die Kieswäsche entstandenen Spültrübe (Wasser – Feststoffgemisch), über die Lebensdauer des Schlammteichs (ca. 30 Jahre).					
Kornform	> 97% Schlammkorn ($\varnothing < 0,063$ mm)					
Weitere Bestandteile	An der Schlammteichoberfläche teils organische Beimengungen durch Bewuchs					
Beginn gesättigte Zone	8,00m unter GOK Schlammteichmaterial					
Bemerkungen	Konsistenz: weich - steif					
	Bez.	Dim.	charakteristischer Wert	Bemerkungen		
Kennwerte aus Laborversuchen						
Korngrößenverteilung	Ton	%	32,8	3* kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Schluff	%	64,3	3* kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Sand	%	2,9	3* kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Kies	%	0,0	3* kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Steine	%	0,0	3* kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
Wassergehalt	w	%	27,0	3 Versuche		
Kornwichte	γ_s	kN/m ³	28,0	2 Versuche (Pyknometer)		
Porenanteil	n	-	0,43	berechnet		
Trockenwichte	γ_d	kN/m ³	16,0	berechnet		
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	20,3	berechnet		
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	10,3	berechnet		
Reibungswinkel	φ'	Grad	29,0	1 Versuch CU Triaxialversuch		
Kohäsion	c'	kN/m ²	7,0	1 Versuch CU Triaxialversuch		
Anmerkung:						
Kennwerte aus In-situ Versuchen (CPT)						
Wichte	γ	kN/m ³	17,9	4 Versuche		
Reibungswinkel	φ'	Grad	26,7-29,6	4 Versuche		
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	4 Versuche		
Anmerkung:						
Kennwerte aus Literatur						
			Türke ¹ (UL)	GBT ² (UL)	GDG ³ (Si)	DIN 1055 ⁴ (UL)
Wichte	γ	kN/m ³	19,0-20,0	21,0	18,0	17,5-19,0
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	9,0-10,0	11,0	8,0	9,0
Reibungswinkel	φ'	Grad	27,5-30,0	28,0-35,0	27,5	27,5-32,5
Kohäsion	c'	kN/m ²	5,0-15,0	-	0-10,0	2,0
Steifemodul	E _s	MN/m ²	5,0-15,0	-	3,0-10,0	-
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8}$	-
Anmerkung:						
gewählte charakteristischer Werte für Standsicherheitsbetrachtung						
Wichte	γ	kN/m ³	20,0			
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	20,5			
Reibungswinkel	φ'	Grad	27,0			
Kohäsion	c'	kN/m ²	3,0			
Durchlässigkeitsbeiwert	k _x	m/s	$1 \cdot 10^{-6} = 0,0864$ m/d			
Durchlässigkeitsbeiwert	k _y	m/s	$1 \cdot 10^{-7} = 0,00864$ m/d			
Elastizitätsmodul	E'	MN/m ²	5,0			
Poissonzahl	v'	-	0,33			
Dilatanzwinkel	ψ'	Grad	0,0			

¹ Türke H., Statik im Erdbau, Ernst & Sohn, 1984

² Witt K. J., Grundbau – Taschenbuch Teil 1, Ernst & Sohn

³ Schmidt H. H., Grundlagen der Geotechnik, 3 Auflage, Teubner

⁴ DIN 1055-2 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Bodenkenngößen

Tab. I 2 Ausgewertete Versuchsdaten Schlammteichmaterial – Schnitt 3-3

Schlammteichmaterial - Schnitt 3-3						
Bodenart	Schluff / Ton					
Lithologie	Si / Cl					
Kurzbeschreibung	Die abgelagerten Schlammteichsedimente entstanden durch die örtlich konzentrierte Einspülung, der durch die Kieswäsche entstandenen Spültrübe (Wasser – Feststoffgemisch), über die Lebensdauer des Schlammteichs (ca. 30 Jahre). Die Lage des Schnittes 3-3 weist die größte Entfernung zur ehemaligen Einspülstelle auf und ist durch das Absetzverhalten der Spültrübe der Bereich mit den feinsten Ablagerungen. Demzufolge wird das Schlammteichmaterial im Schnitt 3-3 gegenüber den Schnitten 1-1 und 2-2 gesondert betrachtet.					
Kornform	> 99,5% Schlammkorn ($\varnothing < 0,063$ mm)					
Weitere Bestandteile	An der Schlammteichoberfläche teils organische Beimengungen durch Bewuchs					
Beginn gesättigte Zone	gesamtes Schlammteichmaterial gesättigt					
Bemerkungen	Konsistenz: weich					
	Bez.	Dlm.	charakteristischer Wert	Bemerkungen		
Kennwerte aus Laborversuchen						
Korngrößenverteilung	Ton	%	41,9	1 kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Schluff	%	57,9	1 kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Sand	%	0,2	1 kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Kies	%	0,0	1 kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
	Steine	%	0,0	1 kombinierte Sieb-Schlammanalyse		
Wassergehalt	w	%	40,0	4 Versuche		
Kornwichte	γ_s	kN/m ³	26,0	2 Versuche (Pyknometer)		
Porenanteil	n	-	0,51	berechnet		
Trockenwichte	γ_d	kN/m ³	13,0	berechnet		
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	18,0	berechnet		
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	8,0	berechnet		
Reibungswinkel	φ'	Grad	22,3-27,3	2 Versuch CU Triaxialversuch		
Kohäsion	c'	kN/m ²	4,0-14,0	2 Versuch CU Triaxialversuch		
Anmerkung:						
Kennwerte aus In-situ Versuchen (CPT)						
Wichte	γ	kN/m ³	17,1	1 Versuch		
Reibungswinkel	φ'	Grad	22,9-26,1	1 Versuch		
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-10}$ – $1 \cdot 10^{-9}$	1 Versuch		
Anmerkung:						
Kennwerte aus Literatur						
			Türke ⁵ (TM)	GBT ⁶ (TM)	GDG ⁷ (Cl)	DIN 1055 ⁸ (TM)
Wichte	γ	kN/m ³	19,0	18,0	17,0	18,5
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	9,0	8,5	7,0	8,5
Reibungswinkel	φ'	Grad	25,0	20,0	17,5	17,5-27,5
Kohäsion	c'	kN/m ²	20,0	-	10,0	5,0-10,0
Steifemodul	E_s	MN/m ²	4,0	-	1-2,50	-
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	-
Anmerkung:						
gewählte charakteristischer Werte für Standsicherheitsbetrachtung						
Wichte	γ	kN/m ³	20,0			
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	20,5			
Reibungswinkel	φ'	Grad	22,0			
Kohäsion	c'	kN/m ²	3,0			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_x	m/s	$1 \cdot 10^{-7} = 0,00864$ m/d			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_y	m/s	$1 \cdot 10^{-8} = 0,000864$ m/d			
Elastizitätsmodul	E'	MN/m ²	5,0			
Poissonzahl	ν'	-	0,33			
Dilatanzwinkel	ψ'	Grad	0,0			

⁵ Türke H., Statik im Erdbau, Ernst & Sohn, 1984

⁶ Witt K. J., Grundbau – Taschenbuch Teil 1, Ernst & Sohn

⁷ Schmidt H. H., Grundlagen der Geotechnik, 3 Auflage, Teubner

⁸ DIN 1055-2 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Bodenkenngößen

Tab. I 3 Ausgewertete Versuchsdaten Übergangszone – Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2

Übergangszone - Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2					
Bodenart	schluffiger sandiger Kies				
Lithologie	<i>cgr'' cl'' si' sa FGr/MGr</i>				
Kurzbeschreibung	Die definierte Übergangszone im geotechnischen Schnitt 1-1 und Schnitt 2-2 ist auf das Konstruktionsprinzip des Dammbauwerkes zurückzuführen (Dammachse zur Wasserseite verschoben, upstream method). Durch die schrittweise Erhöhung des Dammkörpers hat sich in diesem Bereich das eingespülte Schlammteichmaterial mit dem verwendeten Dammbaumaterial vermischt.				
Kornform	Kantengerundet - angerundet				
Weitere Bestandteile	-				
Beginn gesättigte Zone	Der Verlauf der Sickerlinie in der Übergangszone und dem Dammbauwerk ist in den geotechnischen Schnitten und den Standsicherheitsberechnungen ersichtlich.				
Bemerkungen	Lagerungsdichte: mitteldicht				
	Bez.	Dim.	charakteristischer Wert	Bemerkungen	
Kennwerte aus In-situ Versuchen (DPH)					
Bezogene Lagerungsdichte	I_D	-	0,40 (Mitteldicht)	1 Versuch	
Reibungswinkel	φ'	Grad	33,2	1 Versuch	
Anmerkung:					
Kennwerte aus Literatur					
			Türke ⁹ (GU,GT)	GBT ¹⁰ (GU, GT)	
Wichte	γ	kN/m ³	21,0	20,0-22,5	
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	12,0	10,5-13,0	
Reibungswinkel	φ'	Grad	35,0	28,0-35,0	
Kohäsion	c'	kN/m ²	0,0-5,0	-	
Steifemodul	E_s	MN/m ²	80,0	-	
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
Anmerkung:					
gewählte charakteristischer Werte für Standsicherheitsbetrachtung					
Wichte	γ	kN/m ³	21,0		
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	22,0		
Reibungswinkel	φ'	Grad	32,0		
Kohäsion	c'	kN/m ²	2,0		
Durchlässigkeitsbeiwert	k_x	m/s	$1,5 \cdot 10^{-5} = 1,296 \text{ m/d}$		
Durchlässigkeitsbeiwert	k_y	m/s	$1,5 \cdot 10^{-6} = 0,1296 \text{ m/d}$		
Elastizitätsmodul	E'	MN/m ²	20,0		
Poissonzahl	ν'	-	0,33		
Dilatanzwinkel	ψ'	Grad	2,0		

⁹ Türke H., Statik im Erdbau, Ernst & Sohn, 1984

¹⁰ Witt K. J., Grundbau – Taschenbuch Teil 1, Ernst & Sohn

Tab. I 4 Ausgewertete Versuchsdaten Übergangszone – Schnitt 3-3

Übergangszone - Schnitt 3-3				
Bodenart	gering toniger schluffiger sandiger Kies			
Lithologie	<i>cgr'' cl' si sa FGr/MGr</i>			
Kurzbeschreibung	Die definierte Übergangszone im geotechnischen Schnitt 3-3 ist auf das Konstruktionsprinzip des Dammbauwerkes zurückzuführen (Dammachse zur Wasserseite verschoben, upstream method). Durch die Schrittweise Erhöhung des Dammkörpers hat sich in diesem Bereich das eingespülte Schlammteichmaterial mit dem verwendeten Dammbaumaterial vermischt. Aufgrund der Entfernung des Schnittes 3-3 zur ehemaligen Einspülstelle wird auch die Übergangszone in diesem Bereich gesondert betrachtet.			
Kornform	Kantengerundet - angerundet			
Weitere Bestandteile	-			
Beginn gesättigte Zone	Der Verlauf der Sickerlinie in der Übergangszone und dem Dammbauwerk ist in den geotechnischen Schnitten und den Standsicherheitsberechnungen ersichtlich.			
Bemerkungen	Lagerungsdichte: locker - mitteldicht			
	Bez.	Dlm.	charakteristischer Wert	Bemerkungen
Kennwerte aus In-situ Versuchen (DPH)				
Bezogene Lagerungsdichte	I_D	-	0,35 (locker - mitteldicht)	1 Versuch
Reibungswinkel	φ'	Grad	31,3	1 Versuch
Anmerkung:				
Kennwerte aus Literatur				
			Türke ¹¹ (GU,GT)	GBT ¹² (GU, GT)
Wichte	γ	kN/m ³	21,0	20,0-22,5
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	12,0	10,5-13,0
Reibungswinkel	φ'	Grad	35,0	28,0-35,0
Kohäsion	c'	kN/m ²	0,0-5,0	-
Steifemodul	E_s	MN/m ²	80,0	-
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Anmerkung:				
gewählte charakteristischer Werte für Standsicherheitsbetrachtung				
Wichte	γ	kN/m ³	21,0	
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	22,0	
Reibungswinkel	φ'	Grad	30,0	
Kohäsion	c'	kN/m ²	0,0	
Durchlässigkeitsbeiwert	k_x	m/s	$1,5 \cdot 10^{-5} = 1,296 \text{ m/d}$	
Durchlässigkeitsbeiwert	k_y	m/s	$1,5 \cdot 10^{-6} = 0,1296 \text{ m/d}$	
Elastizitätsmodul	E'	MN/m ²	20,0	
Poissonzahl	ν'	-	0,33	
Dilatanzwinkel	ψ'	Grad	0,0	

¹¹ Türke H., Statik im Erdbau, Ernst & Sohn, 1984

¹² Witt K. J., Grundbau – Taschenbuch Teil 1, Ernst & Sohn

Tab. I 5 Ausgewertete Versuchsdaten Dammbaumaterial – Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2 / Schnitt 3-3

Dammbaumaterial - Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2 / Schnitt 3-3						
Bodenart	Weitgestuftes Kies – Sand Gemisch					
Lithologie	<i>si' co' sa Gr</i>					
Kurzbeschreibung	Das für den Damm verwendete Material wurde in der eigenen Kiesgrube gewonnen und ist al weitgestuftes Kies – Sand Gemisch zu klassifizieren. Der Damm wurde im Laufe der Jahre immer wieder Schrittweise erhöht und die neu entstandenen Schüttungen mit einer Walze verdichtet.					
Kornform	Kantengerundet - angerundet					
Weitere Bestandteile	-					
Beginn gesättigte Zone	Der Verlauf der Sickerlinie in der Überganszone und dem Dammbauwerk ist in den geotechnischen Schnitten und den Standsicherheitsberechnungen ersichtlich.					
Bemerkungen	Lagerungsdichte: mitteldicht					
	Bez.	Dlm.	charakteri- stischer Wert	Bemerkungen		
Kennwerte aus In-situ Versuchen (DPH)						
Bezogene Lagerungsdichte	I_D	-	0,50 (Mitteldicht)	3 Versuche		
Reibungswinkel	φ'	Grad	37,4	3 Versuche		
Anmerkung:						
Kennwerte aus Literatur						
			Türke ¹³ (GW)	GBT ¹⁴ (GW)	GDG ¹⁵ (Sa)	DIN 1055 ¹⁶ (GW)
Wichte	γ	kN/m ³	20,0	21,0-23,0	19,0	19,0
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	11,0	11,5-13,5	11,0	11,5
Reibungswinkel	φ'	Grad	40,0	35,0	35,0	32,5-37,5
Kohäsion	c'	kN/m ²	0,0	-	2,0-8,0	-
Steifemodul	E_s	MN/m ²	100,0	-	80,0-150,0	-
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-4}$	-
Anmerkung:						
gewählte charakteristischer Werte für Standsicherheitsbetrachtung						
Wichte	γ	kN/m ³	20,0			
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	21,0			
Reibungswinkel	φ'	Grad	35,0			
Kohäsion	c'	kN/m ²	5,0			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_x	m/s	$1 \cdot 10^{-4} = 8,64$ m/d			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_y	m/s	$1 \cdot 10^{-4} = 8,64$ m/d			
Elastizitätsmodul	E'	MN/m ²	40,0			
Poissonzahl	ν'	-	0,33			
Dilatanzwinkel	ψ'	Grad	5,0			

¹³ Türke H., Statik im Erdbau, Ernst & Sohn, 1984

¹⁴ Witt K. J., Grundbau – Taschenbuch Teil 1, Ernst & Sohn

¹⁵ Schmidt H. H., Grundlagen der Geotechnik, 3 Auflage, Teubner

¹⁶ DIN 1055-2 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Bodenkenngrößen

Tab. I 6 Ausgewertete Versuchsdaten Urgelände – Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2 / Schnitt 3-3

Urgelände - Schnitt 1-1 / Schnitt 2-2 / Schnitt 3-3						
Bodenart	schwach schluffiger Kies					
Lithologie	s' Gr					
Kurzbeschreibung	Die Aufstandsfläche des Schlammteichs (gewachsener Boden) besteht aus einem schluffigen Sand-Kies-Stein Gemisch. Dazwischen können immer wieder Sandlagen auftreten.					
Kornform	angerundet – gut gerundet					
Weitere Bestandteile	-					
Grundwasser	kein Grundwasser vorhanden					
Bemerkungen	-					
	Bez.	Dlm.	charakteristischer Wert	Bemerkungen		
Kennwerte aus Literatur						
			Türke ¹⁷ (SW)	GBT ¹⁸ (SW)	GDG ¹⁹ (Sa)	DIN 1055 ²⁰ (SW)
Wichte	γ	kN/m ³	21,0	21,0	19,0	19,0
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m ³	12,0	12,0	11,0	11,5
Reibungswinkel	φ'	Grad	37,5	33,0-41,0	35,0	32,5-37,5
Kohäsion	c'	kN/m ²	0,0	-	2,0-8,0	-
Steifemodul	E_s	MN/m ²	80,0	-	80,0-150,0	-
Durchlässigkeitsbeiwert	k	m/s	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-4}$	-
Anmerkung:						
gewählte charakteristischer Werte für Standsicherheitsbetrachtung						
Wichte	γ	kN/m ³	20,0			
Wichte gesättigt	γ_{sat}	kN/m ³	21,0			
Reibungswinkel	φ'	Grad	35,0			
Kohäsion	c'	kN/m ²	10,0			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_x	m/s	$1 \cdot 10^{-4} = 8,64$ m/d			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_y	m/s	$1 \cdot 10^{-4} = 8,64$ m/d			
Elastizitätsmodul	E'	MN/m ²	100,0			
Poissonzahl	ν'	-	0,33			
Dilatanzwinkel	ψ'	Grad	5,0			

¹⁷ Türke H., Statik im Erdbau, Ernst & Sohn, 1984

¹⁸ Witt K. J., Grundbau – Taschenbuch Teil 1, Ernst & Sohn

¹⁹ Schmidt H. H., Grundlagen der Geotechnik, 3 Auflage, Teubner

²⁰ DIN 1055-2 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Bodenkenngrößen