

Evaluierung der Dichtigkeit einer existierenden, planungsabweichend hergestellten Oberflächenabdichtung unter Verwendung von Bentonitmatten

Clemens Borrmann; Christian Niehues

Clemens Borrmann, CBIconult, Brückengasse 3, 01734 Rabenau, Tel.: 0171 4414261, E-Mail: borrmann@cbiconsult.de

Christian Niehues, Naue GmbH & Co. KG, Gewerbestr. 2, 32339 Espelkamp, Tel.: 05743 41-549, E-Mail: cniehues@naue.com

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung
2. Veranlassung, Situationsbeschreibung
 - 2.1 Ausgangslage, Randbedingungen, Sicherungsansatz gemäß zugelassenem APB
 - 2.2 Bautechnische Sicherungsmaßnahmen 2009-2010 gemäß ABP und Zulassung
 - 2.3 Mängel in der bautechnischen Realisierung des ABP
 - 2.4 Ergebnisse einer ersten Phase der Mängel- und Ursachenforschung
3. Aktuelle Untersuchungen zur Zustandserfassung
 - 3.1 Geometrische Verhältnisse der Oberflächenabdichtung
 - 3.2 Mächtigkeit der Schichten der Oberflächenabdichtung
 - 3.3 Einstauversuch Ringdrainageleitungen
 - 3.4 Drainagesysteme: Rohrleitungsspülung und Kamerabefahrung
4. Untersuchungen zu Zustand und Dichtigkeit der Bentonitmatte und des Oberflächenabdichtungssystems
 - 4.1 Feldarbeiten
 - 4.2 Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit/Permittivität der Bentonitmatte
 - 4.3 Nachweis hinreichende Dichtigkeit der Oberflächenabdichtung mittels Wasserhaushaltsuntersuchungen
 - 4.3.1 Methodischer Ansatz
 - 4.3.2 Wesentliche Eingabeparameter
5. Wasserhaushaltsberechnungen
 - 5.1 Vorbemerkungen
 - 5.2 Methodik
 - 5.3 Referenzdurchlässigkeit gemäß ABP
 - 5.4 Berechnungsergebnisse für die Modellvariationen
6. Ergebniszusammenfassung
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen allgemeiner Art
8. Literatur

1. Zusammenfassung

Es wurde eine bestehende einlagige Oberflächenabdichtung mit einer zweilagig verlegten Bentonitmatte als Dichtungselement aufgegraben und die Bentonitmatte labortechnisch auf ihre aktuelle Dichtigkeit geprüft. Die Bentonitmatte liegt seit mehr als zehn Jahren. Die Prüfung ergab, dass die Bentonitmatte den Anforderungen der Eignungsbeurteilung und den Anforderungen des zugelassenen Abschlussbetriebsplans (ABP) genügt und auch weiterhin genügen wird. Gleiches gilt auch für das gesamte Oberflächenabdichtungssystem.

Vorausgegangen war, dass relativ bald nach ihrer Fertigstellung diverse phänomenologische Mängel festgestellt worden waren, deren Ursachen in der juristischen Behandlung nur partiell aufgeklärt wurden. In diesem Zusammenhang wurde auch die hinreichende Leistungsfähigkeit des Oberflächenabdichtungssystems mit einer zweilagig verlegten Bentonitmatte in Zweifel gezogen mit der Schlussfolgerung, dass die Oberflächenabdichtung kostenintensiv neu hergestellt werden müsse.

Da der Kenntnisstand bezüglich des tatsächlichen Schadensumfangs und der Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems noch lückenhaft erschien, wurden weitere Untersuchungen nacheinander vorgenommen. Diese waren eine Neuvermessung, die Ermittlung der tatsächlichen Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht, das Verhalten der Drainageleitungen bei Rückstau und eine Kamerainspektion des Drainageleitungssystems. Da auch mit diesen Untersuchungen die Leistungsfähigkeit des Oberflächenabdichtungssystems nicht abschließend verifiziert werden konnte, wurden schließlich Untersuchungen zur Ermittlung der aktuellen Dichtigkeit der verlegten Bentonitmatte selbst vorgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bentonitmatte den Anforderungen gemäß ihrer Eignungsbeurteilung nach wie vor genügt und aller Voraussicht nach auch zukünftig genügen wird. Für den Nachweis, dass auch das gesamte Oberflächenabdichtungssystem den Dichtigkeitsanforderungen genügt, die der ABP implizit vorgegeben hat, wurden Wasserhaushaltsberechnungen mit dem Programm HELP vorgenommen. Sie ergaben, dass das System den Anforderungen des ABP genügt. Mittels Parametervariationen wurden die Grenzen des Systems ausgelotet.

2. Veranlassung, Situationsbeschreibung

2.1 Ausgangslage, Randbedingungen, Sicherungsansatz gemäß zugelassenem APB¹

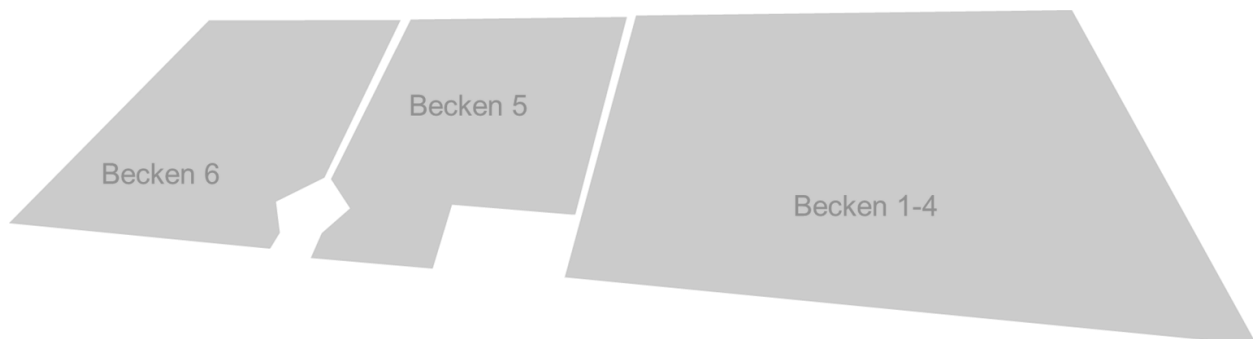


Abbildung 1: Schematisierte Anordnung der Mineralschlammbecken (Schrägdraufsicht)

¹ „Abschlussbetriebsplan“ nach Bergrecht (entspricht einer Genehmigungsplanung), „Zulassung“ entspricht einer Baugenehmigung

Die vorzustellenden Untersuchungen wurden an mit einer Oberflächenabdichtung und umlaufenden Drainageleitungssystemen gesicherten Erdbecken, in die anorganisch kontaminierter Mineralschlamm verbracht worden war, vorgenommen. Abbildung 1 zeigt eine schematische Schrägansicht der mineralischen Becken zum Zeitpunkt des Betriebs.

Die Becken 1-4 (ca. 27.500 m²) waren mit Bentonitsuspension ausgekleidet gewesen und umfassten eine Endfüllmenge von ca. 22.500 m³. Becken 5 (ca. 10.000 m²) ist mit Bentonitsuspension abgedichtet und zusätzlich nachträglich an den Flanken mit KDB ausgekleidet worden und enthielt eine Endfüllmenge von ca. 23.000 m³. Becken 6 (ca. 10.350 m²) ist mit KDB ausgekleidet und war nur geringfügig mit Mineralschlamm, überwiegend mit Überstandswasser, gefüllt. Da es sich um mit anorganischen Schadstoffen kontaminierten Mineralschlamm handelt, die im Grundwasserabstrom nachweisbar sind, formulierte der ABP folgende Sicherungsziele und Methoden (Soll):

Ziele:

- Minderung/Unterbrechung Emissionspfade
 Mineralschlamm -> Grund- und Oberflächenwasser
 Mineralschlamm -> Luft; Boden; Flora; Fauna

Hauptziel:

- Minderung der Grundwasserbelastung durch anorganische Schadstoffe um zunächst $\geq 25\%$ mit regressiver Tendenz

Methoden:

- Wesentliche Verkleinerung der verbleibenden Ablagerungsfläche (Emissionsfläche), bedeutet die Konditionierung und Umlagerung der Schlämme aus den Becken 1-4 nach Becken 6
- Oberflächenabdichtung der verbleibenden, mit Mineralschlamm gefüllten Becken 5 und 6

2.2 Bautechnische Sicherungsmaßnahmen 2009-2010 gemäß ABP und Zulassung

Abbildung 2 zeigt schematisch den Ablauf der Sanierung und die Anordnung der Sicherungssysteme.

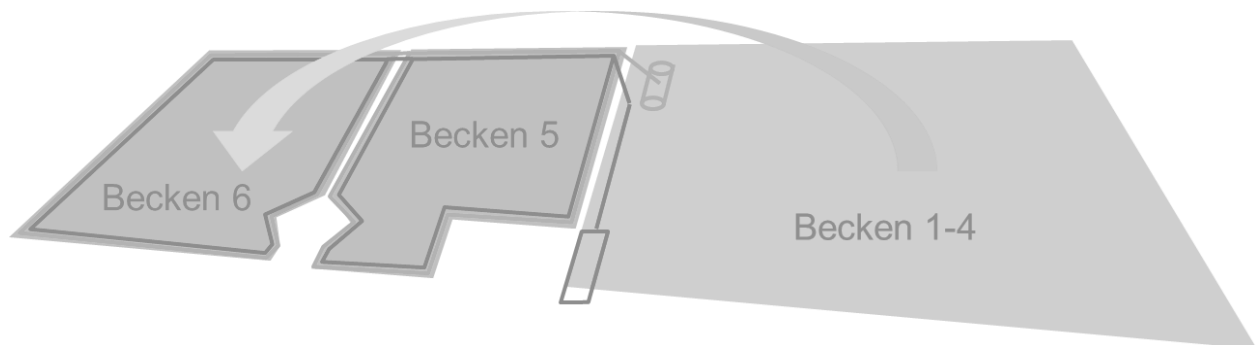


Abbildung 2: Schematisierte Darstellung des Sanierungsablaufs

Folgende Sicherungsmaßnahmen wurden nacheinander ausgeführt:

- Beräumung Becken 1 bis 4, Konditionierung Mineralschlamm, Umlagerung nach Becken 6
- Rekultivierung der beräumten Flächen der Becken 1 bis 4
- Profilierung, Oberflächenabdichtung Becken 5 und 6, Mindestneigung nach Setzungen 3%, Vorgabe Regelaufbau (Abbildung 3) für eine einlagige Oberflächenabdichtung mit zweilagiger Bentonitmatte
- Ringdrainagen um Becken 5 und 6 für Konsolidierungswasser aus Mineralschlamm bzw. Niederschlagssickerwasser
- Fassung Konsolidierungswasser in einem Speichertank zur externen Entsorgung
- Versickerung Niederschlagswasser über eine unterirdische Rigole

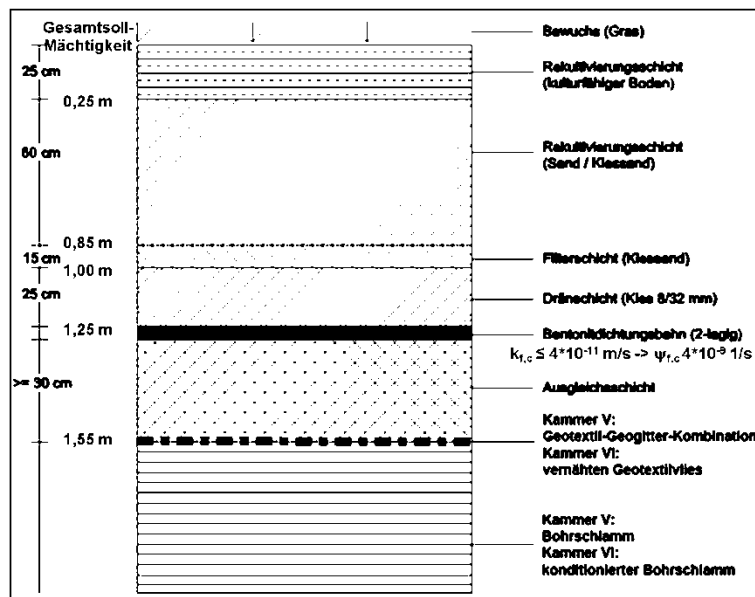


Abbildung 3: Regelaufbau Oberflächenabdichtung (Ausführungsplanung)

2.3 Mängel in der bautechnischen Realisierung des ABP

Bereits kurz nach Fertigstellung und der bautechnischen Abnahme wurden phänomenologische Mängel festgestellt und auch gegenüber den am Bau Beteiligten gerügt:

- Vergleichsweise wesentlich erhöhter Anfall Konsolidierungswasser im Speichertank
- Größere Setzungen an Oberfläche Becken 5
- Schiefstellung von Schächten der Ringdrainagen

2.4 Ergebnisse einer ersten Phase der Mängel- und Ursachenforschung

Es wurden erste Untersuchungen zur Mängelaufklärung und Ursachenforschung vorgenommen. Die seinerzeitige Vermessung, dargestellt in Abbildung 4, zeigt erhebliche Abweichungen bei der Oberflächenneigung und auch der Abflussrichtungen. Auf Becken 5 ist die Mindestneigung von 3 % vorwiegend im

oberen Abschnitt unterschritten. Hervorzuheben ist weiterhin, dass es im oberen Bereich von Becken 5 bereits zu einer Neigungsumkehr gekommen war, also ein ungehinderter Abfluss in Richtung der Randdrainage in diesem Bereich offensichtlich nicht mehr gegeben ist. Zu ergänzen ist, dass sich in Becken 5 der dort von der Landzunge (unten) aus eingespülte Mineralschlamm befindet, der auch nicht konditioniert worden ist und für den eine Konsolidierungssetzung berechnet wurde. Becken 6 hingegen weist eine maßgebende Unterschreitung der Mindestneigung überwiegend im zentralen Bereich auf, woraus geschlussfolgert werden darf, dass dies bereits so planabweichend hergestellt worden ist, da sich hier der konditionierte und umgelagerte Mineralschlamm aus den Becken 1-4 befindet. Ein allseitiger Abfluss des Niederschlagswassers erscheint aber gewährleistet zu sein.

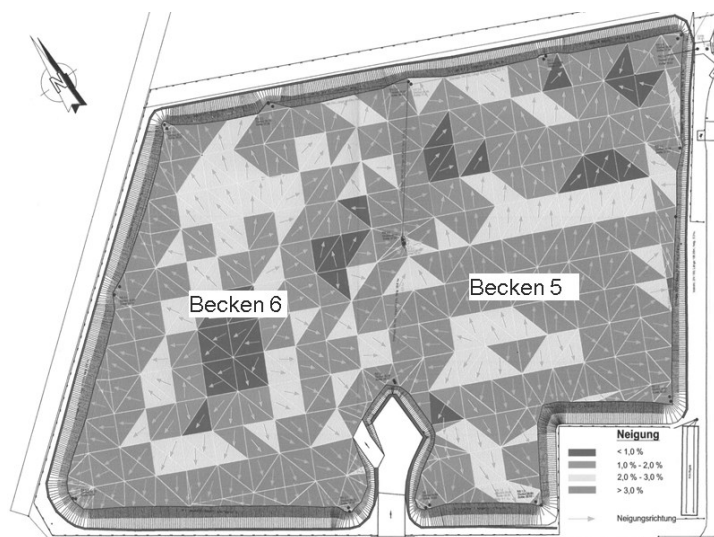


Abbildung 4: Neigungsanalyse, 2 Jahre nach Fertigstellung, seitdem nahezu unverändert

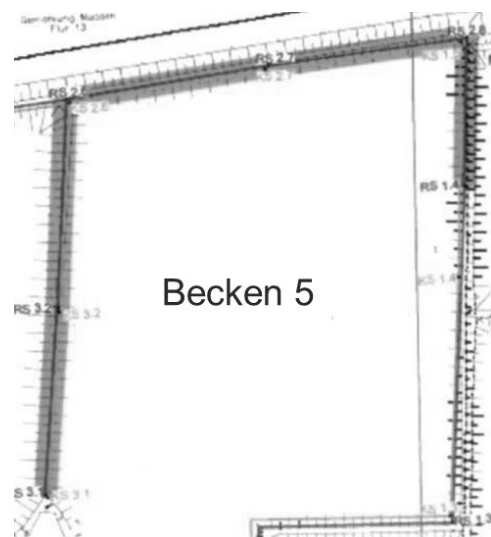


Abbildung 5: Ergebnis Tracerversuch

Ein durchgeführter Tracerversuch, bei dem in zuvor abgeschottete Abschnitte der umlaufenden Niederschlagswasserdrainageleitung ein Tracermedium eingefüllt und der Abfluss in der parallellaufenden Konsolidierungswasserleitung beobachtet worden war, zeigte in den in Abbildung 5 dargestellten Abschnitten jeweils ein potientiell Vorhandensein von Kurzschlüssen zwischen beiden Drainagesystemen.

3. Aktuelle Untersuchungen zur Zustandserfassung

Ab 2021 setzte eine erneute intensivere Phase verschiedener, aufeinander aufbauender Untersuchungen mit Blick auf eine möglichst kostengünstige, jedoch den Anforderungen des ABP genügende Sanierung der Sicherungselemente der Mineralschlammbecken ein.

3.1 Geometrische Verhältnisse der Oberflächenabdichtung

Zunächst wurde eine Neuvermessung der Anlage veranlasst. Insbesondere sollte ermittelt werden, ob sich zwischenzeitlich weitere Setzungen ergeben haben und wie die geometrische Form der Oberfläche aktuell beschaffen ist. Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Setzungsverlauf jeweils an einem als setzungsrelevant einzuschätzenden Setzungsmesspegel, die bei der Herstellung installiert worden sind.

Es zeichnete sich folgendes Bild:

- Deutliche Setzungsbeträge innerhalb des im ABP verfügbaren 2-jährigen Beobachtungszeitraums

- Danach minimale Setzungszuwächse bis zu $s = 1,6$ cm auf Becken 5 und $s = 1,1$ cm auf Becken 6
- Somit hat sich Oberflächenform seit der letzten Vermessung kaum noch verändert
- Daraus folgt: Die Setzungen gelten aktuell als abgeklungen -> Konsolidierung des Mineralschlamms ebenfalls abgeklungen (die in Abbildung 5 dargestellten Verhältnisse sind noch zutreffend)

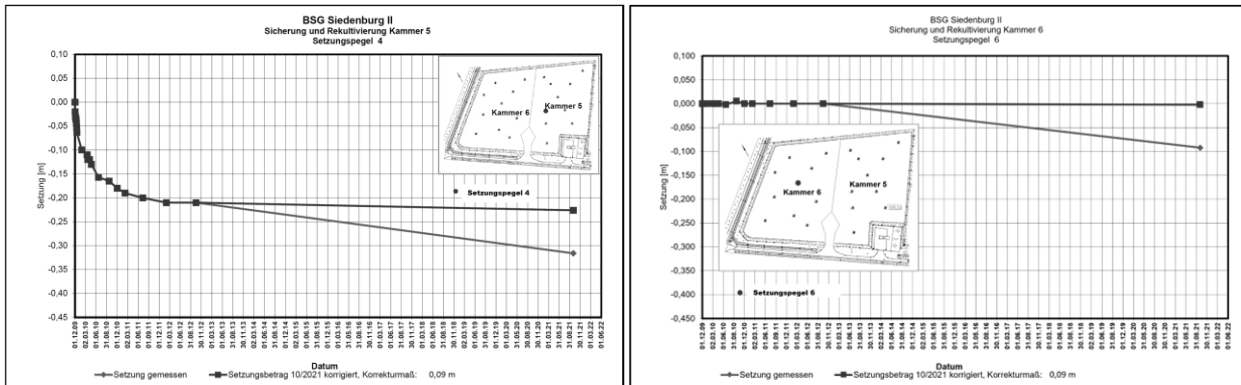
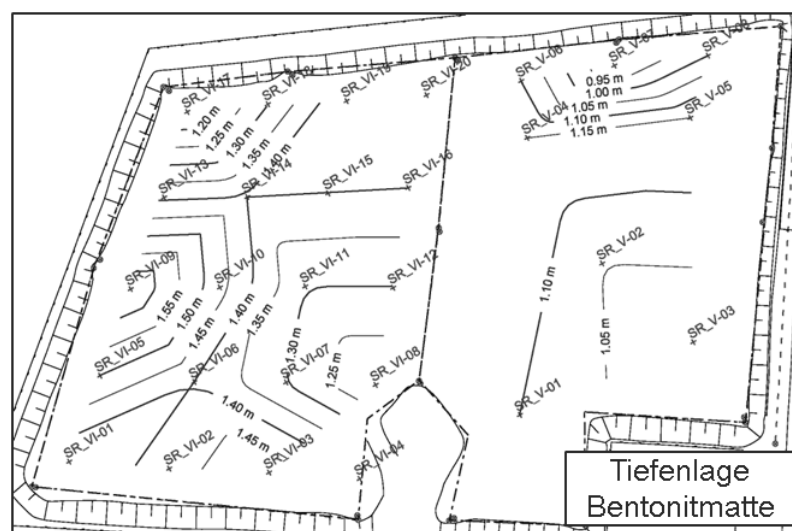
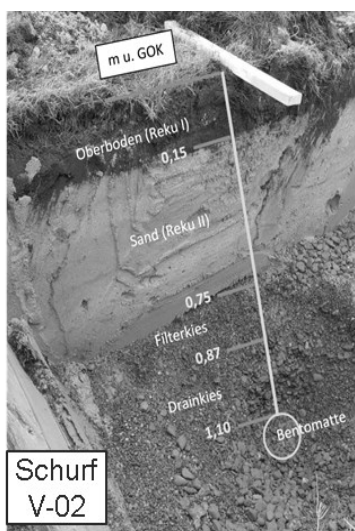


Abbildung 6: Setzungsverlauf bis 2021, die untere Linie zeigt das Vermessungsergebnis im aktuellen Höhensystem, die obere Linie diejenige nach Korrektur²

3.2 Mächtigkeit der Schichten der Oberflächenabdichtung

Die Funktionstüchtigkeit und Leistungsfähigkeit der Oberflächenabdichtung ist auch vom Aufbau und der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht und seiner Elemente abhängig. Zur Ermittlung wurden eine Reihe von sorgfältig und vorsichtig ausgeführten Sondierungen mit dem Pürckhauer-Bohrstock ausgeführt, Sondierpunkte siehe Abbildung 10. Zur Verifizierung wurden weitere fünf Schürfe bis Oberkante Bentonitmatten ausgeführt.



² Das 2010-2012 verwendete Höhensystem war nicht recherchierbar und auch nicht auf den Lageplänen vermerkt. Die Korrektur erfolgte anhand eines Regressionsvergleichs zwischen allen Schachtdeckelhöhen 2010 und 2021.

Abbildung 7: Schurf V-02

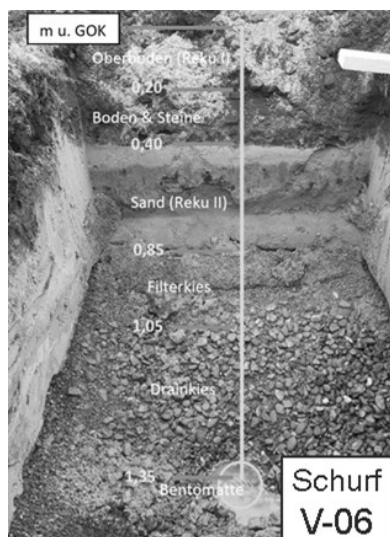


Abbildung 9: Schurf V-06

Abbildung 8:

Mittels Sondierungen ermittelte Tiefenlage der Bentonitmatte

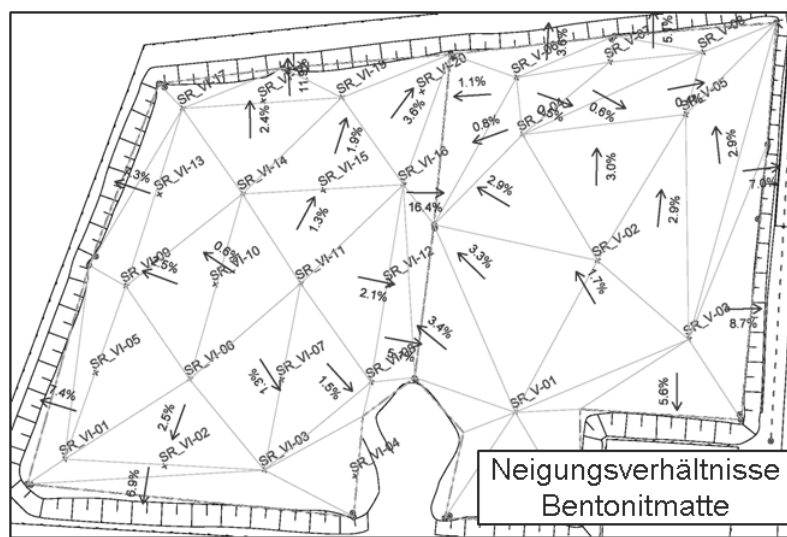


Abbildung 10:

Aus den Sondiertiefen abgeleitete Abflussrichtungen auf der Bentonitmatte

Abbildung 7 und Abbildung 9 zeigen die Aufgrabungen mit markantem Schichtenprofil. Abbildung 8 zeigt eine aus den Sondierungen abgeleitete tatsächlichen Tiefenlage der Bentonitmatte, Abbildung 10 die abzuleitenden Werte für deren Neigung und Abflussrichtung auf den einzelnen, durch die Sondierpunkte aufgespannten Dreiecken.

In Tabelle 1 sind die Messergebnisse für die Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht sowie der Mächtigkeit der einzelnen Teilchichten mit folgender zusammenfassenden Erkenntnis dargestellt:

Becken 5: Mindestmächtigkeit Überdeckung Bentonitmatte von 1,25 m bzw. nach Setzung von 1,15 m in keinem Fall gegeben.

Becken 6: Mindestmächtigkeit Überdeckung Bentonitmatte von 1,25 m bzw. nach Setzung von 1,15 m überwiegend vorhanden.

Tabelle 1: Sondierte Tiefenlage der einzelnen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems

Sondierung	Höhe m NHN	Gesamtmächtigkeit bis Unterkante			
		Reku I (kult. Boden)	Reku II (Kies/ Sand)	Filter- schicht	Drän- schicht /BM
Kammer V		-0,05	-0,05	-0,05	-0,20
SR_V-01	40,61	0,15	0,75	0,95	1,10
SR_V-02	40,15	0,15	0,70	0,85	1,05
SR_V-03	40,63	0,15	0,70	0,85	1,00
SR_V-04	39,24	0,15	0,85	1,05	1,15
SR_V-05	39,07	0,20	0,70	0,95	1,15
SR_V-06	39,22	0,40	0,85	0,95	1,10
SR_V-07	38,92	0,20	0,55	0,65	0,90
SR_V-08	38,89	0,15	0,60	0,80	1,00
Kammer VI		-0,05	-0,05	-0,05	-0,20
SR_VI-01	40,16	0,20	0,85	1,00	1,35
SR_VI-02	40,61	0,30	1,00	1,15	x
SR_VI-03	40,70	0,35	1,05	1,20	1,50
SR_VI-04	39,98	0,25	0,55	0,70	x
SR_VI-05	40,57	0,20	0,85	1,15	x
SR_VI-06	41,00	0,35	0,85	1,10	1,40
SR_VI-07	41,00	0,25	0,75	0,95	x
SR_VI-08	40,37	0,15	0,75	0,95	1,20
SR_VI-09	40,63	0,30	0,95	1,20	1,65
SR_VI-10	41,08	0,25	0,80	1,05	x
SR_VI-11	40,97	0,25	0,75	0,95	1,30
SR_VI-12	40,57	0,15	0,75	0,95	x
SR_VI-13	40,46	0,20	0,75	0,95	x
SR_VI-14	40,90	0,30	0,75	1,00	1,40
SR_VI-15	40,68	0,25	0,60	0,75	x
SR_VI-16	40,61	0,40	0,95	1,20	1,40
SR_VI-17	40,10	0,15	0,60	0,75	1,15
SR_VI-18	40,35	0,30	0,75	0,95	x
SR_VI-19	40,34	0,35	0,90	1,10	1,45
SR_VI-20	40,07	0,20	0,85	0,95	x
Soll		0,25	0,85	1,00	1,25
Soll-Tiefenlage					1,25

Legende

- Soll-Gesamtmächtigkeit unterschritten
- x Bentonitmatte hier nicht Sondierziel

3.3 Einstauversuch Ringdrainageleitungen

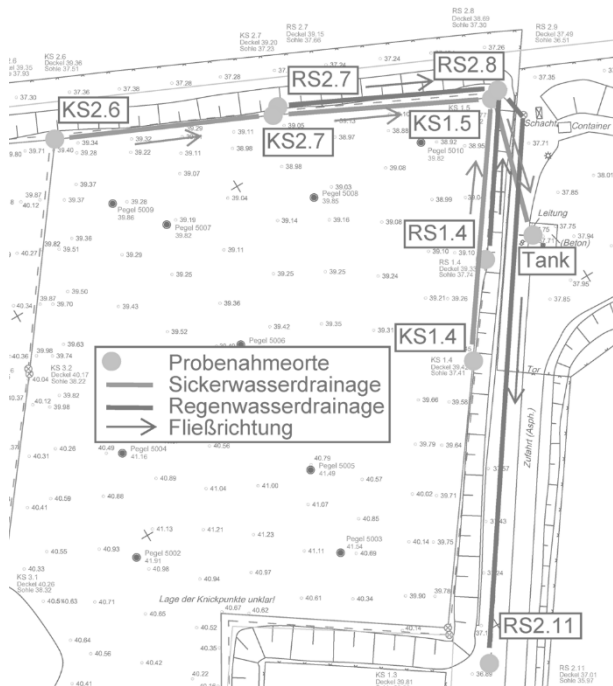


Abbildung 11: Lageplan mit Schächten, Fließrichtungen und Probenahmeorte (Schächte)

Vor dem Hintergrund, dass der Zufluss in den Speichertank längst deutlich hätte zurückgehen müssen, da die Konsolidierung des Mineralschlammes zum Erliegen gekommen ist und somit kaum noch Konsolidierungswasser anfallen dürfte, wurde ein Einstauversuch in den Drainageleitungen mit folgender Zielstellung vorgenommen:

- Verifizierung des Kurzschlusses zwischen umlaufender Sicker- und Regenwasserdrainageleitung
- Ermittlung Entwicklung Kontaminationsgrad Abflusswasser in den beiden Drainagesystemen bei Vermischung und Stau

Für diese Untersuchung wurden die Abgänge der beiden Endschächte mittels Blasen verschlossen, der Aufstau beobachtet und die jeweilige Mineralisationsentwicklung des sich aufstauenden Wassers protokolliert.

Feststellungen:

1. Ein Aufstau mit Ausspiegelung findet in beiden Drainagesystemen statt.
2. Im Konsolidierungswasserdrainagesystem (KSDS) ist die Geschwindigkeit des Wasseranstiegs größer als im Regenwasserdrainagesystem (RSDS).
3. Nach 3 Tagen haben sich die Wasserstände beider Drainagesysteme nahezu angeglichen (Es gab hinreichend Niederschlag).
4. Die Mineralität ist anfänglich im KSDS hoch, im RSDS deutlich erhöht.
5. Die Mineralität nimmt im KSDS mit fortlaufendem Wasseranstieg deutlich ab.
6. Im RSDS nimmt die Mineralität mit zunehmendem Aufstau rasch ab.
7. Die Mineralität gleicht sich mit fortschreitendem Aufstau auf einem niedrigen Niveau an.

Interpretation:

1. Beide Drainagesysteme sind mindestens partiell hydraulisch verbunden.
2. Die Speisung erfolgt im Wesentlichen nur aus die Rekultivierungsschicht und ggf. auch die Bentonitmatte durchsickert habendem Niederschlagswasser. Die Speisung findet permanent statt.
3. Hoher Niederschlagsanfall „sprengt“ rasch die Kapazität des Speichertanks -> Rückstau über Sickerwasserdrainage bis in die Ausgleichsschicht, mögliche Kontaktkontamination des rückgestauten Wassers über die Mineralschlamm-oberfläche möglich.
4. Ein Übertritt von kontaminiertem Wasser in die Umgebung und den Untergrund findet nicht statt, da das System nach außen geschlossen ist.

3.4 Drainagesysteme: Rohrleitungsspülung und Kamerabefahrung

Das Ergebnis des Aufstauversuchs war Anlass für die Vornahme einer Kamerainspektion mit Rohrleitungsspülung. Abbildung 12 zeigt Ausschnitte aus der Befahrung.

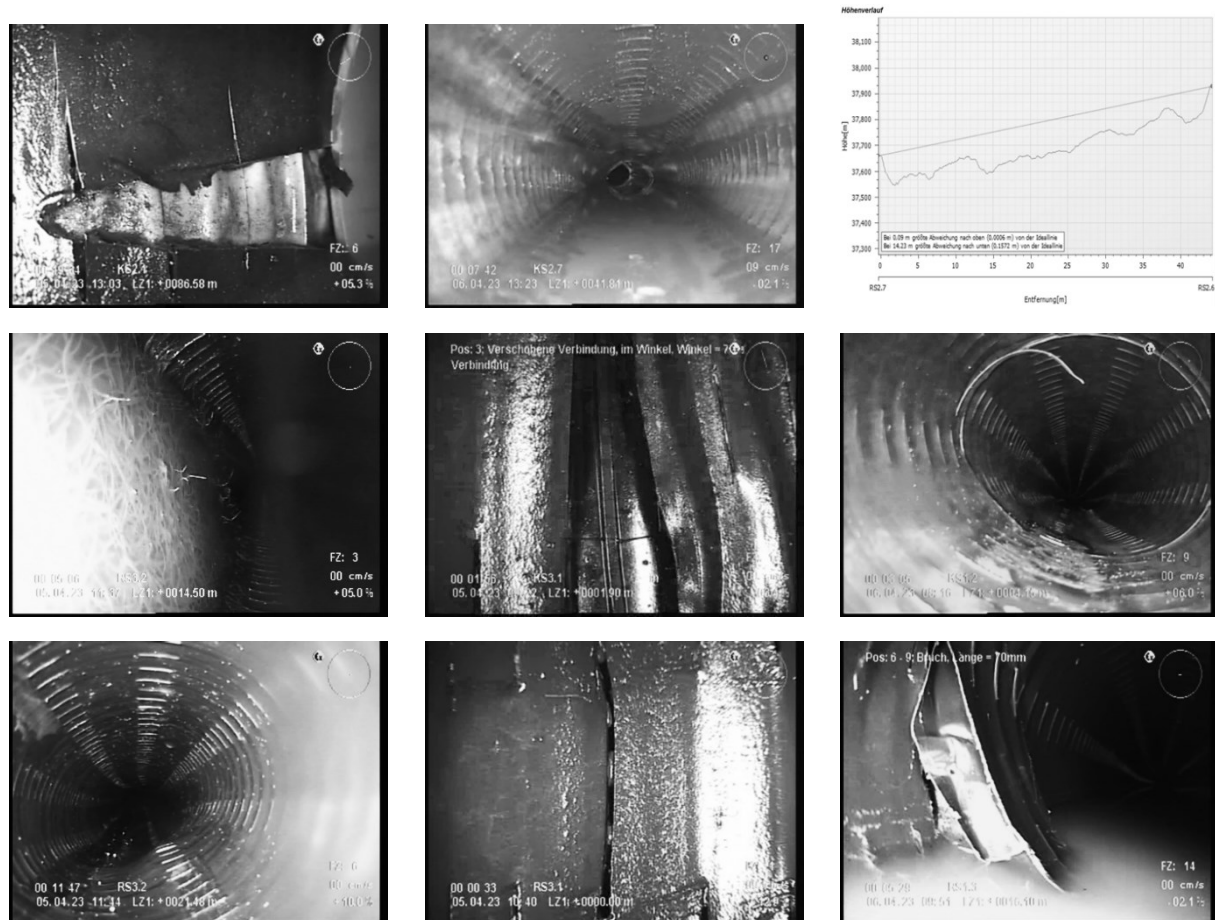


Abbildung 12: Kamerabefahrung: (von links oben nach rechts unten) Rissbildung bei Schachtanschluss, Einstauinkrustation bis fast Firstbereich, Inklinometeraufzeichnung, Wurzeleinwuchs, unvollständig gesteckte Rohrverbindung, Rohrzusammendrückung, Rohreinbeulung, Ringriss, Scherbenbildung

Folgende Erkenntnisse wurden gewonnen:

1. Mehrfach unsachgemäß ausgeführte Rohrverbindungen im Übergang Schacht-Drainageleitung -> tw. offene Längsrisse im Rohr
2. Fast alle Haltungen „hängen durch“ und an Innenflanken der Wandung und Sohle sind häufig Wasserstandsänderungen erkennbar -> permanenter oder langzeitiger auch erheblicher Wasserstand
3. Teilweise erheblicher Wurzeleinwuchs
4. Partielle Drainagerohre nicht vollständig zusammengesteckt, Lücken bis ca. 60 mm breit
5. Leitungsverlauf oft nicht geradlinig
6. Partielle Querschnitte infolge vertikaler Last bei fehlendem Druck im Kämpferbereich deutlich zu einer Ellipse verformt
7. Vereinzelt „Beulen“ an der Rohrsohle bzw. an Wandabschnitten
8. Ausbildung von Ringrissen in der Rohrwandung -> nicht ordnungsgemäße Ausbildung des Rohrlagers bzw. der Hinterfüllung im Kämpferbereich

9. Vereinzelt nach innen ragende Scherbenbildung infolge parallellaufender Ringrissbildungen -> Querschnittsverengung

Fazit:

1. Während der Herstellung wurde die Qualität erheblich vernachlässigt
2. Beide Drainageleitungssysteme sind nicht (mehr) in der Lage, ihre Funktion als Entwässerungseinrichtung zu erfüllen.
3. Eingesetzte Drainagerohre (Art und Material) ungeeignet
4. Eine Leitungskontrolle durch Spülung und Kamerabefahrung nach Herstellung von Leitungen ist unverzichtbar.

4. Untersuchungen zu Zustand und Dichtigkeit der Bentonitmatte und des Oberflächenabdichtungssystems

Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl das Profil der Oberflächenabdichtung und die Dicke der Rekultivierungsschicht als auch beide umlaufenden Drainagesysteme augenscheinlich nicht den Planvorgaben entsprechen. Für die Drainagesysteme konnte festgestellt werden, dass sie in ihrer Funktion erheblich eingeschränkt sind. Die Untersuchungen beantworten aber noch nicht die Frage, ob auch die Oberflächenabdichtung selbst trotz der festgestellten Defizite eine hinreichende Dichtigkeit besitzt.

Erste numerische Voruntersuchungen zum Wasserhaushalt mit dem Programm HELP gaben Anlass zu mutmaßen, dass eine hinreichende Dichtigkeit gegeben sein kann, wenn die verlegte Bentonitmatte tatsächlich den Anforderungen genügt, die ihr in der Eignungsbeurteilung bescheinigt worden waren.

Dieser Frage wurde zunächst mit Untersuchungen an Ausbauprobestücken nachgegangen.

4.1 Feldarbeiten

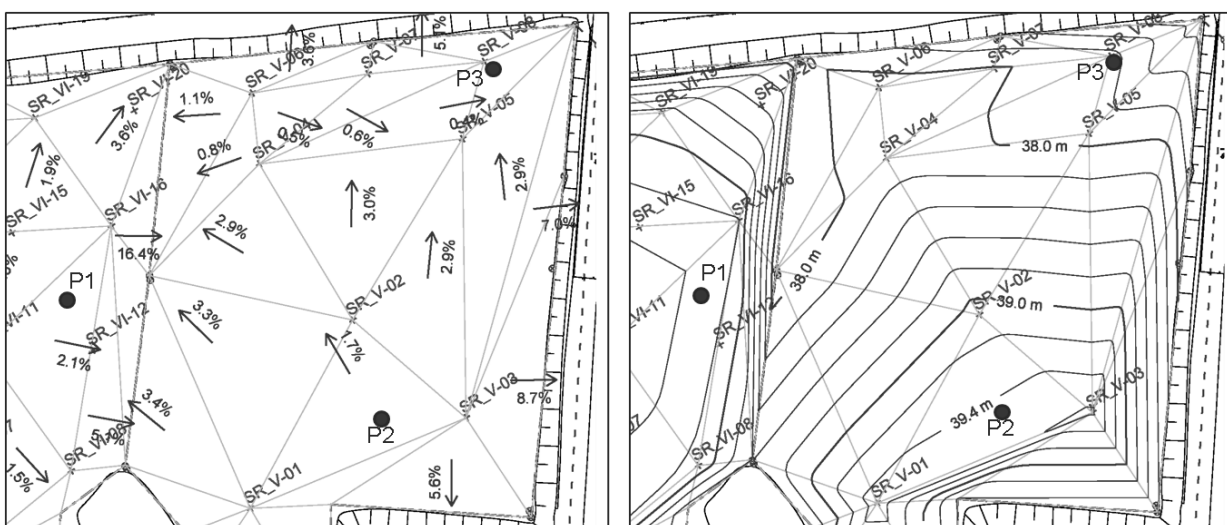


Abbildung 13: Schurfortauswahl anhand Abflussrichtungen und Neigungsverhältnissen

Für die Probenahme wurden drei exponierte Orte wie folgt identifiziert:

- P1: Mächtigkeit und Neigung der Rekultivierungsschicht gemäß Zulassung zum ABP

- P2: Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht geringer, Standort eher trocken
- P3: Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht geringer, Standort feucht (Senke)

Die Probenahmeorte sind in Abbildung 13 zusammen mit der Neigung der Oberfläche und den Abflussrichtungen dargestellt.

Die Entnahme der Bentonitmattenprobestücke und die fachgerechte „Reparatur“ der doppellagigen Bentonitmattendichtung erfolgte durch Mitarbeiter des Herstellers der Bentonitmatte.

Abbildung 14 zeigt einige Momentaufnahmen der Probenahme.

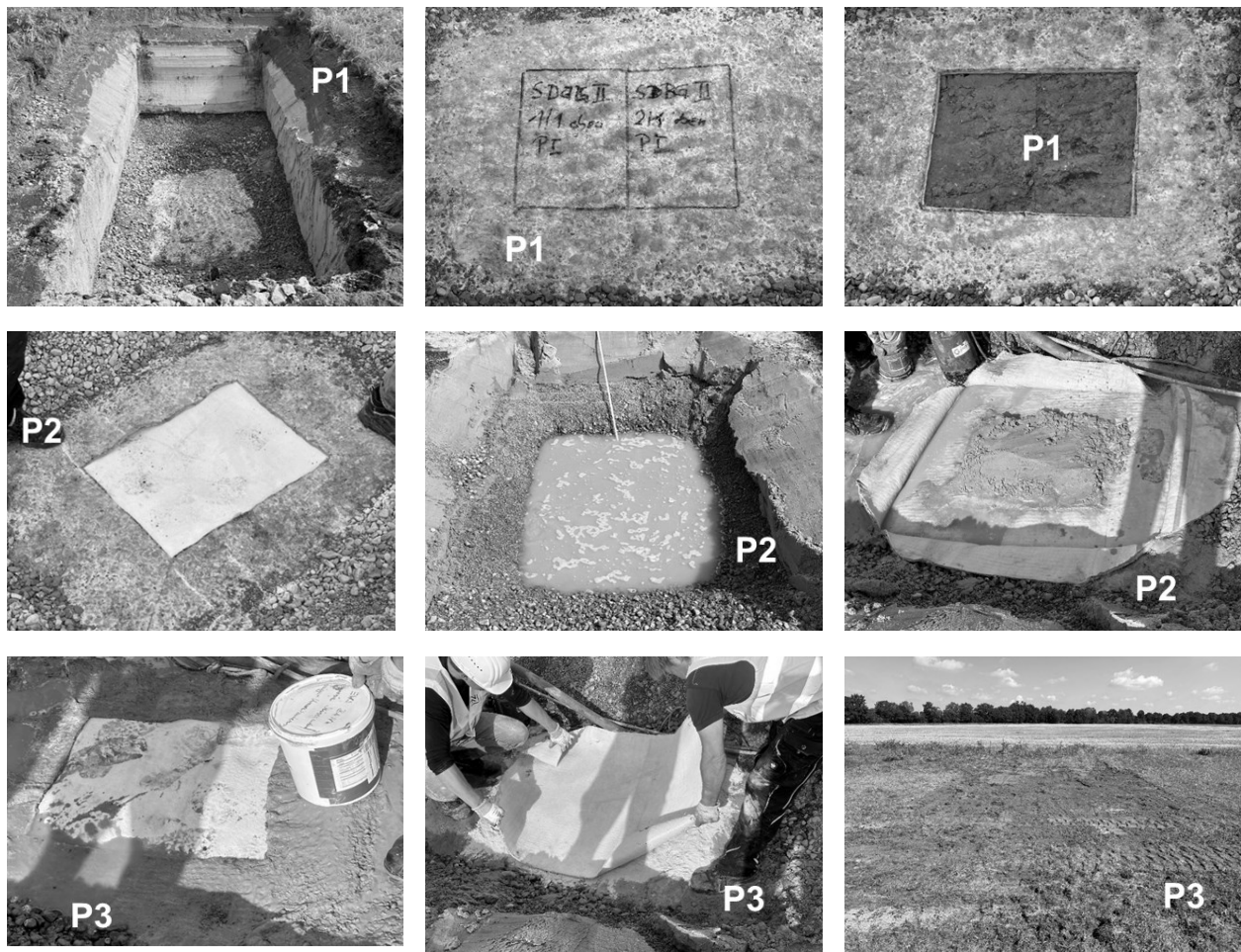


Abbildung 14: Momentaufnahmen bei Aufgrabungen, Entnahme Bentonitmattenprobestück, "Reparatur" der Bentonitmatte, Wiederherstellung Oberfläche

4.2 Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit/Permittivität der Bentonitmatte

Der Hersteller nahm auch die ordnungsgemäße Verpackung und den Versand zur laborativen Untersuchung der Durchlässigkeit/Permittivität der Bentonitmatte vor. Die Durchlässigkeitsversuche wurden von ICP nach der für Bentonitmatten üblichen Methodik durchgeführt. Die Ergebnisse der mehrere Wochen dauernden Versuche sind in Abbildung 15 dargestellt.

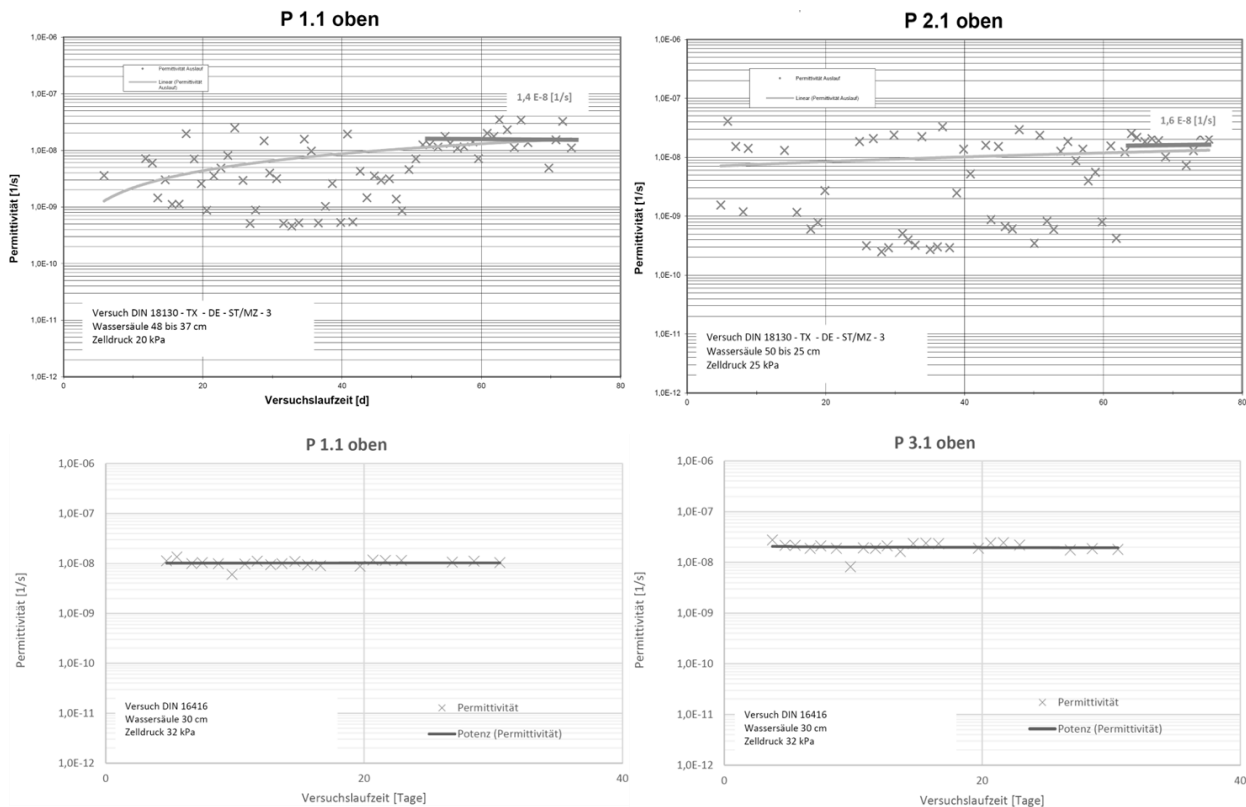


Abbildung 15: Durchflussversuche an ausgebauten Bentonitmattenprobestücken bei abnehmendem und bei konstantem hydraulischen Gefälle

Aus dem Prüfbericht von ICP, 17.01.2024 - Durchlässigkeit, sei wie folgt zitiert:

„Es wurden zwei Prüfungen nach DIN 18130 -TX-DE-ST/MZ-3, abnehmendes hydraulisches Gefälle, ausgeführt und für die Auslaufseite ermittelt.“

„An einem Prüfstück der Probe haben wir gemäß DIN EN 16416:2023-04 (modifiziert) die Durchflussrate q_i bei Versuchstemperatur bzw. temperaturkorrigiert auf 10°C (Durchflussrate q_{10}) bestimmt. Die Permittivität ψ_{10} [1/s] ergibt sich unter Berücksichtigung des Druckhöhenverlustes über die Messprobe ΔH [m] nach der Formel $\psi_{10} = q_{10} / \Delta H$ und beträgt“:

„Die ermittelten Permittivitäten $\psi = 1,1 \times 10^{-8}$ [1/s] bzw. $\underline{\psi = 1,9 \times 10^{-8}$ [1/s] liegen bei beiden Versuchen mit fallendem bzw. konstantem hydraulischem Gefälle und mit bzw. ohne Backpressure im vergleichbaren Bereich.“

Parallel dazu wurde geprüft, wie sich der Ionenaustausch von Natrium zu Calcium in der Bentonitmatte zwischenzeitlich entwickelt hat. Ein hinreichender Indikator dafür ist das Wasseraufnahmevermögen des Bentonits, sprich der Vergleich zwischen Natriumbentonit und Calciumbentonit. Im Testreport NAUE - Wasseraufnahmevermögen, 08.12.2023, ist folgendes Ergebnis dokumentiert:

„Die Quellvolumina und die Enslin-Neff Werte sind typisch für einen ionengetauschten Bentonit und lassen keine weitere Veränderung der Permittivitäten aufgrund eines weiteren Ionenaustausches erwarten.“

Überprüfung bezüglich der Vorgabe der Zulassung zum ABP:

Mit den Ergebnissen kann nun überprüft werden, ob die verlegte Bentonitmatte der Vorgabe des ABP und der Zulassung genügt. Dort ist gefordert:

„...ein Oberflächenabdichtungssystem aus Vegetations- und Dränschichten über einer zweilagigen Bentonitmatte mit einer Durchlässigkeit von $k = 4 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ (im Stoßbereich $k = 4 \times 10^{-10} \text{ m/sec}$) erbringt dies wirkungsvoll.“

Der Nachweis erfolgt mit folgender Vergleichskette:

$$\psi_{f,c,ABP} \leq 4 \cdot 10^{-9} \text{ 1/s}$$

$$\text{cal}\psi_{ABP} \leq 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s} > \text{Prüfwert } \psi \leq 1,9 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}^3$$

Der Vergleich zeigt, dass die Bentonitmatte selbst nach wie vor und voraussichtlich auch zukünftig den Anforderungen des ABP genügt und die Auswahl des Produktes zum Zeitpunkt der Herstellung richtig gewesen ist.

4.3 Nachweis hinreichende Dichtigkeit der Oberflächenabdichtung mittels Wasserhaushaltsuntersuchungen

Für die Bemessung und den Nachweis des Wasserhaushalts einer Oberflächenabdichtung bzw. der hinreichenden Dichtigkeit selbiger war das US-amerikanische Programm HELP auf deutsche Verhältnisse übertragen und validiert worden. Mit der aktuellen Version HELP Version 3.95 D wird die Evaluierung der hinreichenden Dichtigkeit des vorhandenen Oberflächenabdichtungssystems methodisch wie folgt vorgenommen.

4.3.1 Methodischer Ansatz

Die Evaluierung erfolgt mit Wasserhaushaltsberechnungen mit dem Programm HELP

Die Wetter- und Klimadaten wurden für den 30-jährigen Zeitraum 1992-2021 beim DWD recherchiert. Die bodenkundlichen Parameter wurden dem Benutzerhandbuch für HELP entnommen, die dort wiederum aus der KA5 entlehnt worden waren. Für die Bentonitmatte wurde der im Handbuch HELP enthaltene Datensatz verwendet.

Der Durchlässigkeitsbeiwert resp. die Permittivität der Bentonitmatte wurde wie folgt festgelegt bzw. ermittelt:

- Als zulässige bzw. höchste Solldurchlässigkeit ist im ABP ein charakteristischer Wert für den Durchlässigkeitsbeiwert vorgegeben.
Für die Berechnungen wird dieser mittels Anpassungsfaktoren A1 und A2 in einen Rechenwert überführt.
Der charakteristische Wert gilt für eine Regelauflast von 30 kPa, was einer Dicke der Rekultivierungsschicht von ca. 1,5 m entspricht, Für die vorliegend geringere Mächtigkeit von regulär 1,25 m bzw. zum Teil nur 1,0 m sind höhere Durchlässigkeiten anzusetzen. Diese wurden aus einer zugänglichen Versuchsreihe für Durchlässigkeiten bei verschiedenen Auflasten ermittelt. Aus ihnen wurde ein weiterer Anpassungsfaktor A3 abgeleitet, mit dem der Rechenwert der Durchlässigkeit für eine jeweils zutreffende Auflast angepasst werden kann.
Mit diesem Sollrechenwert, berechnet als Produkt des charakteristischen Werts und den

³ Ermittlung $\text{cal}\psi_{ABP}$: siehe unten „Permittivität für die Solldurchlässigkeit gemäß ABP“

Anpassungsfaktoren A1, A2 und A3, wird die quasi implizit vom ABP geforderte einzuhaltende Durchlässigkeit der Oberflächenabdichtung, gekennzeichnet als mittlerer Jahresdurchfluss, mit HELP ermittelt. Dieser Wert ist die zulässige bzw. höchste Solldurchlässigkeit, also der Richtwert für die Evaluierung.

- Die „hergestellte“ Durchlässigkeit der Bentonitmatte entspricht der Normdurchlässigkeit für die tatsächlich eingebaute Bentonitmatte, vorliegend Bentofix® B 4000 der Firma NAUE GmbH & Co. KG, Espelkamp, gemäß der Eignungsbeurteilung. Diese wird analog in einen Rechenwert der Durchlässigkeit umgerechnet. Mit dieser „Herstell“-Durchlässigkeit wird überprüft, ob die Vorgabe des ABP bei der Herstellung eingehalten wurde.
- Für die Ermittlung der aktuell gegebenen Durchlässigkeit der Oberflächenabdichtung wird der laborativ ermittelte, tatsächlich vorhandene Durchlässigkeitsbeiwert (resp. Permittivität) verwendet. Es wird unterstellt, dass dieser Wert unmittelbar dem Rechenwert der Durchlässigkeit entspricht.

Für diese drei und für einen vierten Ansatz für den aktuellen Zustand, jedoch bei abgeminderter Böschungsneigung von 2 %, werden zunächst die Durchlässigkeiten für den Regelaufbau der Oberflächenabdichtung (Grundmodell) gemäß ABP ermittelt und miteinander verglichen.

Die eigentliche Evaluierung erfolgt schließlich dadurch, dass verschiedene Eingangsparameter (Geometrie, Bewuchsgüte, Abflussverhalten und nicht zuletzt die Durchlässigkeit der Bentonitmatte) variiert werden. Diese Variationen dienen der Beurteilung der Grenzen des Systems einerseits und seiner Robustheit andererseits.

Eine Worst Case Betrachtung rundet die Untersuchung ab.

4.3.2 Wesentliche Eingabeparameter

Regelaufbau Oberflächenabdichtung, Eingabedaten

Der Aufbau der Oberflächenabdichtung ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Solldurchlässigkeit der Bentonitmatte nach ABP beträgt $\text{cal}\psi_{\text{ABP}} \leq 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$.

Auf die Herleitung und Wiedergabe der Klimadaten und bodenkundlichen Parameter wird hier aus Platzgründen verzichtet. Die Methodik und die Werte sind einschlägig.

Ermittlung Rechenwert der Permittivität der Bentonitmatte

Der Prüfdruck für die Bestimmung der Wasserdichtigkeit einer Bentonitmatte beträgt 30 kPa, was der Last einer 1,5 m mächtigen Rekultivierungsschicht entspricht. Vorliegend ist die reguläre wie auch die tatsächliche Mächtigkeit geringer, was eine vergrößerte Wasserdurchlässigkeit der Bentonitmatte nach sich zieht. Dementsprechend wird ein dritter Anpassungsfaktor A3 für die Auflasten 20 kPa und 25 kPa für die Bestimmung des Rechenwertes der Permittivität bei diesen Lasten eingeführt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Permittivität für geringe Auflasten, abgeleitet aus einem Reihenversuch

Auflastspannung kPa	Permittivität k/d (ψ) 1/s Versuch 1	Permittivität k/d (ψ) 1/s Versuch 2	Permittivität k/d (ψ) 1/s Versuch 3	Permittivität k/d (ψ) 1/s Versuch 4	Permittivität k/d (ψ) 1/s Mittelwert	Permittivität k/d (ψ) 1/s Exp. Regression	Anpassungs- faktor A3
20						2,52E-09	1,06
25						2,45E-09	1,03
30	2,10E-09	2,30E-09	2,00E-09	2,30E-09	2,18E-09	2,39E-09	1,0
50	1,80E-09	2,00E-09	1,50E-09	4,40E-09	2,43E-09	2,14E-09	
100	1,30E-09	1,30E-09	1,50E-09	1,40E-09	1,38E-09	1,64E-09	
200	8,60E-10	1,40E-09	7,80E-10	1,70E-09	1,19E-09	9,53E-10	
400	3,20E-10	2,90E-10	3,10E-10	2,80E-10	3,00E-10	3,23E-10	

Permittivität für die Solldurchlässigkeit gemäß ABP

Die im ABP geforderte Wasserleitfähigkeit für die Bentonitmatte:

$$k_f = 4,0E-11 \text{ m/s}$$

Diesem Wert liegen gemäß Eignungsbeurteilung die Randbedingungen

Dicke der Matte: $d = 1 \text{ cm}$

Durchströmungsgradient: $i = 150$

Auflast aus darüber liegendem Rekultivierungsboden: 30 kPa

zugrunde. Es handelt sich um den charakteristischen Wert. Für die Berechnungen ist der Rechenwert für den Parameter Permittivität, ermittelt mittels Anpassungsfaktoren, zu verwenden. D. h. der charakteristische Wert der Wasserleitfähigkeit wird in den charakteristischen Wert der Permittivität umgerechnet, mit den Anpassungsfaktoren dessen Rechenwert ermittelt und dieser schließlich als Eingangsgröße in die Berechnung wieder in den Rechenwert der Wasserleitfähigkeit transformiert (in HELP kann nur mit der Wasserleitfähigkeit gerechnet werden).

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, und das gilt für alle nachfolgend zu untersuchenden Szenarien, dass gemäß ABP die planmäßige Auflast nicht 30 kPa für eine 1,5 m mächtige Überdeckung, sondern 25 kPa für die vorgegebene 1,25 m mächtige Überdeckung beträgt.

Charakteristischer Wert der Permittivität ψ

$$\psi_k = k_f / d$$

$$\psi_k = 4E-11 \text{ m/s} / 0,01 \text{ m}$$

$$\psi_k = 4E-9 \text{ 1/s}$$

Der Rechenwert der Permittivität⁴ ergibt sich wie folgt:

$$\text{cal } \psi = A1 * A2 * A3 * \psi_k$$

$$A1 = 1,05 \quad \text{veränderte Dichtigkeit an Überlappungen / Fügstellen}$$

⁴ Für A1 und A2 siehe: Eignungsbeurteilung von Bentofix® B 4000 zur Herstellung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien vom 27.01.2009 Fortschreibung vom 27.04.2018

$A_2 = 6,0$ Veränderungen der Dichtungseigenschaften des Bentonits infolge Kationenaustausch gemäß Laboruntersuchungen

$A_3 = 1,03$ Auflast 25 kPa

$$\text{cal } \psi = 1,05 * 6,0 * 1,03 * 4\text{E-}9 \text{ m/s}$$

$$\text{cal } \psi = 2,60\text{E-}8 \text{ 1/s}$$

Daraus ergibt sich der Rechenwert der Wasserleitfähigkeit

$$\text{cal } k_f = \text{cal } \psi * d = 2,60\text{E-}8 \text{ 1/s} * 0,01 \text{ m}$$

$$\text{cal } k_f = 2,60\text{E-}10 \text{ m/s} = 2,60\text{E-}8 \text{ cm/s} \quad \text{bei } d = 1 \text{ cm, } i = 150, P = 30 \text{ kPa}$$

Diese Wasserleitfähigkeit wird den Berechnungen für die Soll-Zustände gemäß den Vorgaben des ABP und seiner Zulassung und gemäß der Ausführungsplanung zugrunde gelegt.

Permittivität für Bentonitmatte Bentofix® B4000 gemäß Eignungsbeurteilung

Verbaut wurde die Bentonitmatte Bentofix® B 4000 der Firma NAUE GmbH & Co. KG, Espelkamp. Gemäß Eignungsbeurteilung hat die Bentonitmatte eine charakteristische Permittivität $\psi_k = 2,5\text{E-}9 \text{ 1/s}$ bei der angegebenen Dicke $d = 1 \text{ cm}$, der Prüfauflast $= 30 \text{ kPa}$ und dem hydraulischen Gradienten $i = 150$ (entspricht 30 cm Aufstau). Mit diesen Parametern ergibt sich eine charakteristische Wasserleitfähigkeit von $k_f = 2,5\text{E-}11 \text{ m/s}$.

Für die Berechnungen ist der Rechenwert der Permittivität zu verwenden. Dieser Wert beträgt laut Eignungsbeurteilung

$$\text{cal } \psi_{30\text{kPa}} = 1,6\text{E-}8 \text{ 1/s}$$

Anwendung Anpassungsfaktor $A_3 = 1,03$ für 25 kPa :

$$\text{cal } \psi_{25\text{kPa}} = 1,6\text{E-}8 \text{ 1/s} * 1,03 \text{ E-}8 \text{ 1/s}$$

$$\text{cal } \psi_{25\text{kPa}} = 1,65\text{E-}8 \text{ 1/s}$$

und der Rechenwert der Wasserleitfähigkeit

$$\text{cal } k_f = \text{cal } \psi * d = 1,65\text{E-}8 \text{ 1/s} * 0,01 \text{ m}$$

$$\text{cal } k_f = 1,65\text{E-}10 \text{ m/s} = 1,65\text{E-}8 \text{ cm/s} \quad \text{bei } d = 1 \text{ cm bei } d = 1 \text{ cm, } i = 150, P = 25 \text{ kPa}$$

Die Wasserhaushaltsberechnung mit dieser Wasserleitfähigkeit liefert die Wasserdurchlässigkeit der gebauten Soll-Oberflächenabdichtung mit der verwendeten Bentonitmatte Bentofix®4000, also wenn bei der Herstellung alle geometrischen Parameter eingehalten worden wären und die „Alterung“ der Bentonitmatte abgeschlossen ist. Ergebnis dieser Berechnung ist in Bezug auf die ABP-Vorgabe gewissermaßen das Maß einer zusätzlichen Sicherheit der Dichtigkeit der Oberflächenabdichtung, die der Bauausführende mit der Wahl der Bentonitmatte Bentofix®4000 in das System implementiert hat.

Permittivität für Bentonitmatte Bentofix® B4000 gemäß Laborbefund:

Die aktuelle Permittivität der Bentonitmatte wurde wie oben beschrieben in Durchlässigkeitsversuchen an der Oberflächenabdichtung entnommenen Proben ermittelt:

$$\text{Laborbefund: } \psi_{\text{ist},30\text{kPa}} = 1,1 \dots 1,9\text{E-}8 \text{ 1/s, gewählt: } \psi_{\text{ist},30\text{kPa}} = 1,9\text{E-}8 \text{ 1/s}$$

Es handelt sich um einen Ist-Wert, vergleichbar mit dem Rechenwert. Daher ist hierauf nur noch die reduzierte Auflast als Anpassung A3 anzuwenden.

$$\Psi_{\text{ist},25\text{kPa}} = \Psi_{\text{ist},30\text{kPa}} * 1,03$$

$$\Psi_{\text{ist},25\text{kPa}} = 1,9\text{E-}8 \text{ 1/s} * 1,03$$

$$\Psi_{\text{ist},25\text{kPa}} = 1,96\text{E-}8 \text{ 1/s}$$

$$k_{f,25,\text{ist}} = \Psi_{25,\text{ist}} * d = 1,96\text{E-}8 \text{ 1/s} * 0,01 \text{ m}$$

$$k_{f,25,\text{ist}} = 1,96\text{E-}10 \text{ m/s} = 1,96\text{E-}8 \text{ cm/s} \quad \text{bei } d = 1 \text{ cm bei } d = 1 \text{ cm, } i = 150, P = 25 \text{ kPa}$$

Anwendung Anpassungsfaktor A3 = 1,06 für 20 kPa (für baubedingt nochmals reduzierte Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht und damit der Mächtigkeit):

$$\Psi_{20,\text{ist}} = \Psi_{30,\text{ist}} * 1,06$$

$$\Psi_{20,\text{ist}} = 1,9\text{E-}8 \text{ 1/s} * 1,06$$

$$\Psi_{20,\text{ist}} = 2,02\text{E-}8 \text{ 1/s}$$

$$k_{f,20,\text{ist}} = \Psi_{25,\text{ist}} * d = 2,02\text{E-}8 \text{ 1/s} * 0,01 \text{ m}$$

$$k_{f,20,\text{ist}} = 2,02\text{E-}10 \text{ m/s} = 2,02\text{E-}8 \text{ cm/s} \quad \text{bei } d = 1 \text{ cm bei } d = 1 \text{ cm, } i = 150, P = 25 \text{ kPa}$$

5. Wasserhaushaltsberechnungen

5.1 Vorbemerkungen

Für die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der doppelagigen Bentonitmattendichtung in Verbindung mit der Geometrie und dem Aufbau der Deckschichten (Rekultivierungsschichten, Filterschicht und Drainageschicht) sind die berechneten Wasserhaushaltsparameter „Evapotranspiration“ (ACTUAL EVAPO-TRANSPIRATION), „Abfluss Niederschlagswasser auf der Oberfläche“ (RUNOFF), „Abfluss Niederschlagssickerwasser in der Drainageschicht“ (LATERAL DRAINAGE COLLECTED) und „Wasserdurchfluss durch die doppelagige Bentonitmatte“ (PERCOLATION/LEAKAGE THROUGH LAYER) der Ausgabeprotokolle des Programms HELP relevant. Die übrigen, insbesondere bodenkundlichen Parameter sind vorliegend Konstanten, da sie sich auf die vorhandene Situation beziehen.

5.2 Methodik

Am „Grund-/Referenzmodell ABP“ der Oberflächenabdichtung (gemäß ABP) wird der Soll-Wasserhaushalt und mit ihm die maximal zulässige Durchsickerungsmenge von Niederschlagswasser durch die zweilagige Bentonitmattenschicht ermittelt, die gemäß den Vorgaben des ABP zu erwarten, also quasi zugelassen ist. Mit den nachfolgenden Berechnungen wird, das Ergebnis vorwegnehmend, gezeigt, dass die Durchsickerung der Bentonitmattenschicht sowohl der Oberflächenabdichtung entsprechend der

- Ausführungsplanung „Grundmodell Ausführungsplanung“
- mit Bentonifix®4000 hergestellten Oberflächenabdichtung, wenn die Soll-Neigung (3 %) eingehalten worden wäre „Grundmodell Ausführung B4000“
- letztere im aktuellen Zustand „Grundmodell Ausführung, B4000, P_{akt}“

- Letztere bei einer aktuell vorhandenen mittleren Neigung von 2 % „Grundmodell Ausführung B4000 P_{akt}, N = 2 %“

geringer ist, als die Durchsickerung gemäß dem Soll-Wasserhaushalt nach ABP.

Anschließend werden für den aktuellen Zustand einzelne Parameter variiert, um die Grenzen des Systems hinsichtlich der Durchsickerung auszuloten.

Als Böschungslänge wird eine Strecke von 75 m festgelegt. Das entspricht etwa dem maximalen Betrag der Böschungslängen der Oberfläche beider Becken.

5.3 Referenzdurchlässigkeit gemäß ABP

Entsprechend den Daten des DWD ereignete sich im realen Betrachtungszeitraum 1992 – 2021 ein mittlerer Jahresniederschlag von 716,36 mm.

Für das „Grund-/Referenzmodell“ betragen die ermittelten Anteile am Wasserhaushalt

- Oberflächenwasserabfluss: 3,98 mm/a
- tatsächliche Evapotranspirationsrate: 469,25 mm/a
- Abfluss in der Drainageschicht: 234,15 mm/a
- Durchfluss durch die Bentonitmatte: 9,62 mm/a

Die Bilanzsumme 717,0 mm entspricht dem Niederschlag. Damit sind alle Anteile am Wasserhaushalt erfasst. Der ermittelte Durchfluss durch die Bentonitmatte für das „Grund-/Referenzmodell ABP“ in Höhe von 9,62 mm/a ist der Maßstab für die Bewertung aller ermittelten Durchlässigkeit aller Variationen.

Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Variationen können den Diagrammen in Abbildung 16 entnommen werden. Das Grund-/Referenzmodell ist in allen Diagrammen als erste Säule (Referenz) enthalten.

5.4 Berechnungsergebnisse für die Modellvariationen

1. Alle Grundmodelle halten die Anforderung des ABP an die Dichtigkeit ein.
2. Eine Verringerung der Böschungslänge bzw. der Abflussstrecke für Niederschlag und Niederschlagssickerwasser in der Drainageschicht führt richtigerweise zu einer geringeren Durchsickerung.
3. Eine Reduzierung der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht, genauer gesagt der Unterbodenschicht, führt überraschenderweise nicht zu einer Vergrößerung des Durchflusses, sondern eher zu einer geringfügigen Verringerung.
4. Eine Verringerung der Einflusstiefe der Evapotranspiration führt tatsächlich zu einer Vergrößerung des Durchflusses gegenüber den Grundmodellen, bleibt aber noch unterhalb des Referenzwertes. Das gilt nicht mehr, wenn die Neigung der Oberfläche gegen Null geht.
5. Die Untersuchung des Einflusses der Böschungsneigung auf den Durchfluss zeigt, dass die „zulässige“ Grenzneigung (bei einer Böschungslänge von 75 m) bei 1% liegt. Der Durchfluss steigt bei weiterer Verringerung der Neigung erheblich an, auch weitgehend unabhängig von der Einflusstiefe der Evapotranspiration.

6. Die Untersuchung für flache Oberflächenabschnitte zeigt, dass, wie oben schon erläutert, die Durchsickerung den Referenzwert erheblich überschreitet. Das gilt jedoch nicht für schmale flache Abschnitte, wie einer am oberen Rand von Becken 5 identifiziert wurde, wenn es keinen Zufluss in der Drainageschicht aus höher liegenden Abschnitten geben würde. Andernfalls übersteigt die Durchsickerung auf einem flachen Abschnitt (hier gewählt 10 m Breite) den Referenzwert.
7. Die Bewuchsgüte, ausgedrückt durch den Blattflächenindex, hat einen Einfluss auf die Evapotranspiration und damit auch auf den Durchfluss, der jedoch unterhalb des Referenzwertes bleibt.
8. Die Kurvenzahl als Parameter für die Qualität der Oberfläche hat einen marginalen Einfluss auf die Durchsickerung.
9. Die Güte, d. h. die Permittivität der Bentonitmatte hat einen entscheidenden Einfluss auf die Durchsickerung. Bereits eine um 50% erhöhte Durchlässigkeit der Bentonitmatte führt zu einer (geringfügigen) Überschreitung des Referenzwertes. Deutliche Überschreitungen treten auf, wenn zudem die Neigung der Oberfläche gegen null geht oder aber die Durchlässigkeit der Bentonitmatte den zulässigen Wert erheblich überschreitet.
10. Das Diagramm „Worst Case“ zeigt die Auswirkung erheblicher Abweichungen vom Sollzustand, was bis hin zum Totalversagen in dem Fall führt, dass eine um zehnfach erhöhte Durchlässigkeit der Bentonitmatte auf einer fast horizontalen Fläche verlegt wird und sich kein hinreichender Bewuchs ausbildet.

Alle Parametervariationen und Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt.

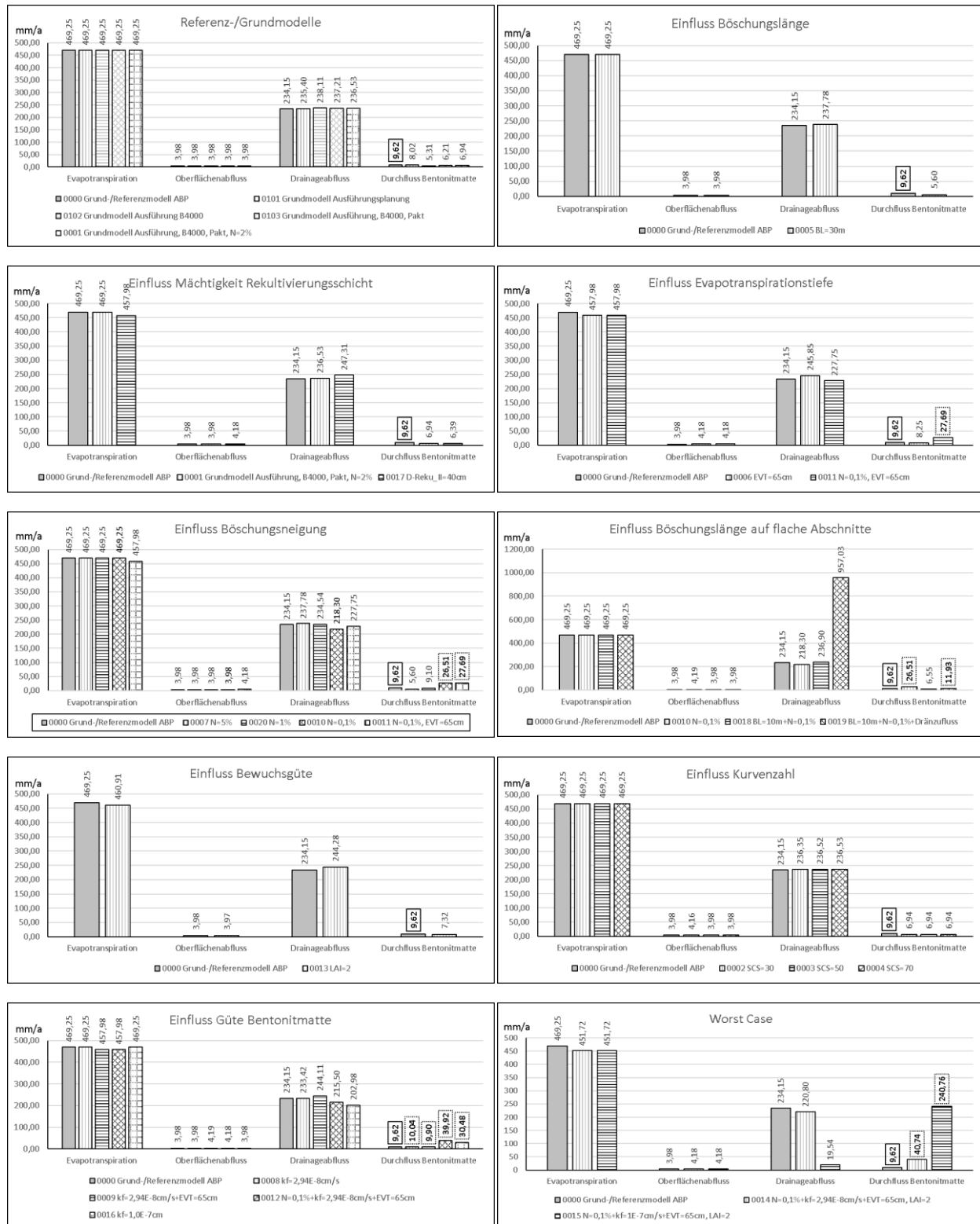


Abbildung 16: Mit HELP berechneter mittlerer Jahresdurchfluss durch die Oberflächenabdichtung, Untersuchung des Einflusses verschiedener Parametervariationen

Tabelle 3: Parametervariation und Ergebnisse der Durchflussberechnungen, Zeilen 0018 bis 0026 dienen der Abschätzung des Gesamtdurchflusses der Oberflächenabdichtung

Parametervariation und Berechnungsergebnisse

Nr.	Fläche ha	Neigung %	Länge m	kf-BM cm/s	SCS	Evapo- Depth cm	D_Re- ku_ll cm	Leaf- In- dex	Nieder- schlag mm	Run- off mm	aktuell ET mm	Drän- abfluss mm	BM- Durch- fluss mm	BM- Durch- fluss [%] von 0000	Dränab- fluss m³/a	Dränab- fluss m³/11a	BM- Durchfluss s m³/a	BM- Durchfluss s m³/11a	Bemerkung
0000	2,02	3,0	75	2,60E-08	57,10	80	60	3	716,36	3,98	469,25	234,15	9,62	100%	4729,83	52028,13	194,32	2137,56	Referenz-/Grundmodell (ABP)
0101	2,02	3,0	75	2,60E-08	57,10	80	60	3	716,36	3,98	469,25	235,4	8,02	83%	4755,08	52305,88	162,00	1782,04	Grundmodell Ausführungsplanung
0102	2,02	3,0	75	1,65E-08	57,10	80	60	3	716,36	3,98	469,25	238,11	5,31	55%	4809,82	52908,04	107,26	1179,88	Grundmodell Ausführung B4000
0102	2,02	3,0	75	1,96E-08	57,10	80	60	3	716,36	3,98	469,25	237,21	6,21	65%	4791,64	52708,06	125,44	1379,86	Grundmodell Ausführung, B4000, akt ψ
0001	2,02	2,0	75	1,96E-08	56,45	80	60	3	716,36	3,98	469,25	236,53	6,94	72%	4777,91	52556,97	140,19	1542,07	Grundmodell Ausführung, B4000, akt ψ , Ng.=2%
0002	2,02	2,0	75	1,96E-08	70,00	80	60	3	716,36	4,16	469,25	236,35	6,94	72%	4774,27	52516,97	140,19	1542,07	Kurvenzahl
0003	2,02	2,0	75	1,96E-08	50,00	80	60	3	716,36	3,98	469,25	236,52	6,94	72%	4777,70	52554,74	140,19	1542,07	Kurvenzahl
0004	2,02	2,0	75	1,96E-08	30,00	80	60	3	716,36	3,98	469,25	236,53	6,94	72%	4777,91	52556,97	140,19	1542,07	Kurvenzahl
0005	2,02	2,0	30	1,96E-08	59,32	80	60	3	716,36	3,98	469,25	237,78	5,6	58%	4803,16	52834,72	113,12	1244,32	Böschungslänge
0006	2,02	2,0	75	1,96E-08	56,45	65	60	3	716,36	4,18	457,98	245,85	8,25	86%	4966,17	54627,87	166,65	1833,15	Evapo-Tiefe
0007	2,02	5,0	75	1,96E-08	57,31	80	60	3	716,36	3,98	469,25	237,78	5,6	58%	4803,16	52834,72	113,12	1244,32	Neigung
0008	2,02	2,0	75	2,94E-08	56,45	80	60	3	716,36	3,98	469,25	233,42	10,04	104%	4715,08	51865,92	202,81	2230,89	k_r
0009	2,02	5,0	75	2,94E-08	57,31	65	60	3	716,36	4,19	457,98	244,11	9,9	103%	4931,02	54241,24	199,98	2199,78	k_r +Evapo-Tiefe
0010	2,02	0,1	75	1,96E-08	51,30	80	60	3	716,36	3,98	469,25	218,3	26,51	276%	4409,66	48506,26	535,50	5890,52	Neigung
0011	2,02	0,1	75	1,96E-08	51,30	65	60	3	716,36	4,18	457,98	227,75	27,69	288%	4600,55	50606,05	559,34	6152,72	Neigung+Evapo-Tiefe
0012	2,02	0,1	75	2,94E-08	51,30	65	60	3	716,36	4,18	457,98	215,5	39,92	415%	4353,10	47884,10	806,38	8870,22	Neigung+ k_r +Evapo-Tiefe
0013	2,02	2,0	75	1,96E-08	56,45	80	60	2	716,36	3,97	460,91	244,28	7,32	76%	4934,46	54279,02	147,86	1626,50	LAI
0014	2,02	0,1	75	2,94E-08	51,30	65	60	2	716,36	4,18	451,72	220,8	40,74	423%	4460,16	49061,76	822,95	9052,43	Worst Case 1
0015	2,02	0,1	75	1,00E-07	51,30	65	60	2	716,36	4,18	451,72	19,54	240,8	2503%	394,71	4341,79	4863,35	53496,87	Worst Case 2
0016	2,02	2,0	75	1,00E-07	56,45	80	60	3	716,36	3,98	469,25	202,98	30,48	317%	4100,20	45102,16	615,70	6772,66	k_r
0017	2,02	2,0	75	2,02E-08	56,45	65	40	3	716,36	4,18	457,98	247,31	6,39	66%	4995,66	54952,28	129,08	1419,86	Dicke Reku-Schicht
0018	0,5350	0,1	7	1,96E-08	56,81	80	60	3	716,36	3,98	469,25	236,9	6,55	68%	1238,40	13622,40	34,10	375,10	Ng. 0,1%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS
0019	0,2675	0,1	7+55	1,96E-08	56,81	80	60	3	716,36	3,98	469,25	957,03	11,93	124%	2561,03	28171,33	30,95	340,45	Ng. 0,1%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS, 236,72mm Dränzufluss
0020	2,0200	1,0	75	1,96E-08	55,31	80	60	3	716,36	3,98	469,25	234,54	9,1	95%	4737,71	52114,79	183,82	2022,02	Ng. 1%
0021	1,4850	2,0	55	1,96E-08	57,44	80	60	3	716,36	3,98	469,25	237,07	6,36	66%	3520,49	38725,38	94,45	1038,91	Ng. 2%, L=55m i.M., Innenfläche, Infiltration in 0019: 725.05mm
0022	0,1338	1,0	7+55	1,96E-08	60,36	80	60	3	716,36	3,99	469,25	961,1	7,83	81%	1285,79	14143,69	10,15	111,65	Ng. 1%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS, 236,72mm Dränzufluss
0023	0,1338	2,0	7+55	1,96E-08	61,37	80	60	3	716,36	4,00	469,25	961,99	7,01	73%	1286,80	14154,80	9,09	99,99	Ng. 2%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS, 236,72mm Dränzufluss
0024	0,2675	0,1	7	1,96E-08	56,81	80	60	3	716,36	3,98	469,25	236,9	6,55	68%	634,19	6976,09	17,03	187,33	Ng. 0,1%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS
0025	0,1338	1,0	7	1,96E-08	60,36	80	60	3	716,36	4,00	469,25	238,29	5,05	52%	318,90	3507,90	6,58	72,38	Ng. 1%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS
0026	0,1338	2,0	7	1,96E-08	61,37	80	60	3	716,36	4,00	469,25	238,64	4,69	49%	319,35	3512,85	6,10	67,10	Ng. 2%, L=7m, Bösch-L = 15 für SCS

Legende:

xxx	Parameter für	Referenz-/Grundmodell (ABP)
xxx	Parametervariation gegenüber	Referenz-/Grundmodell (ABP)
xxx	Parameter für	Grundmodell Ausführung, B4000, akt ψ , Ng.=2%
xxx	Parametervariation gegenüber	Grundmodell Ausführung, B4000, akt ψ , Ng.=2%
xxx	Durchfluss durch Bentonitmatte >	Durchfluss Referenz-/Grundmodell (ABP)

6. Ergebniszusammenfassung

Die vorgestellten Untersuchungen und Berechnungen können wie folgt zusammengefasst und in Empfehlungen übergeleitet werden:

1. Die aktuelle und zukünftige Dichtigkeit der doppelagigen Bentonitmatte genügt den Vorgaben des ABP.
2. Das gilt auch für flache Abschnitte, wenn ein Drainagewasserzufluss auf der Bentonitmatte unterbunden wird.
3. Das gilt auch bei nicht hinreichend mächtig ausgebildeter Rekultivierungsschicht.
4. Im Übrigen erscheint das System der einlagigen Dichtung (vergleichbar mit Deponieklasse I) vergleichsweise robust bezüglich verschiedener nachteiliger Einflüsse.
5. Dem Eigentümer kann empfohlen werden, trotz der festgestellten planerisch-baulichen Mängel mit der Behörde das Gespräch dahingehend zu suchen, die Oberflächenabdichtung unverändert zu belassen und nicht sanieren zu müssen.
6. Eine vollständige geeignete Sanierung des umlaufenden Drainagesystems bleibt erforderlich.

7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen allgemeiner Art⁵

1. An den Bauherrn:

Nicht die Größe Ihres Planers und die Anzahl vergleichbarer Projekte entscheidet über die Qualität seiner Leistung und den Projekterfolg, sondern das Engagement und die Kontinuität seines Projektteams.

2. An den Planer:

Achten Sie auf ein qualifiziertes, konsistentes und kontinuierliches Projektteam mit einem möglichst den gesamten Projektzeitraum begleitenden Projektleiter. Vorliegend haben Informations- und Ideenverluste beim Übergang zur Phase der Ausführungsplanung zu fatalen Mängeln in der Ausführungsplanung geführt.

Ändern Sie nicht die Geokoordinaten während der gesamten Projektlaufzeit. Wer will, kann diese jederzeit umrechnen.

3. An Bauausführende und Bauüberwacher:

Führen bzw. überwachen Sie die Bauausführung hinreichend sorgfältig. Hinterfragen Sie die Intentionen des Plans.

4. An den Fremdprüfer (mehr aus anderweitigen Erfahrungen):

Konzentrieren Sie sich auf die notwendigen Tätigkeiten mit hinreichender Genauigkeit.

⁵ Dieses Kapitel enthält Schlussfolgerungen und Empfehlungen allgemeiner Art von Clemens Borrmann aus Projekt- und aus langjähriger praktischer Erfahrung.

5. An die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“:

Das Programm HELP wurde bisher von Dr. Berger betreut, der sich meines Wissens zwischenzeitlich im Ruhestand befindet. Kümern Sie sich bitte um den Erhalt der Kompetenzen und die Fortführung der Arbeit und der Ausbildung (falls das nicht schon passiert).

Meine erste Bentonitmatte habe ich vor ca. 30 Jahren geplant und verlegen lassen. Ich war nicht der erste. Ich zweifelte aber später, nachdem der Ruf der Bentonitmatte wegen möglicher langfristig zu erwartender Mängel bis hin zum Versagen, insbesondere auf Böschungen und hinsichtlich der Langzeitdichtigkeit beschädigt worden war, ob die Lösung richtig war.

Aber nicht zuletzt die vorgestellten Untersuchungen bestärken mich darin, seinerzeit eine gute und richtige Wahl getroffen zu haben.

Und ich möchte die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ fragen, wann dieses Produkt auch für die Deponiebasis zugelassen werden wird. Ich persönlich hätte keine Bedenken gegen eine Kombinationsbasisabdichtung aus Bentonitmatte und Kunststoffdichtungsbahn.

Und am Rande: An den Eingabedaten für HELP kann man die Klimaerwärmung in Deutschland ablesen:

Innerhalb des Betrachtungszeitraums von Anfang der 90er Jahre bis heute (30 Jahre) hat sich das vom DWD ausgegebene Enddatum der Wachstumsperiode kontinuierlich um insgesamt 1 Woche nach hinten verschoben.

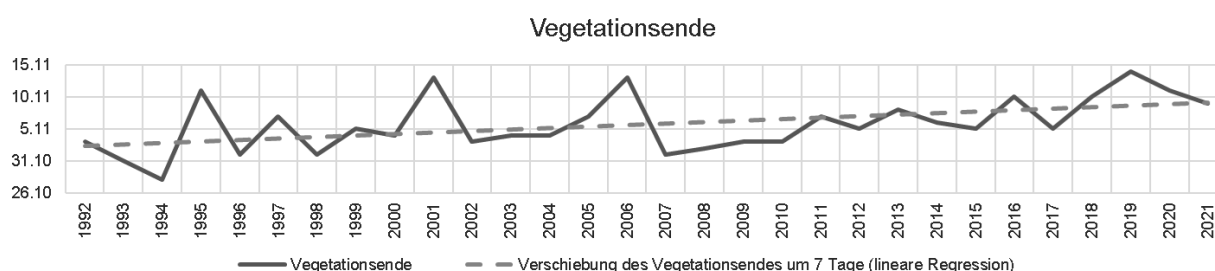


Abbildung 17: Entwicklung des vom DWD veröffentlichten Zeitpunktes des Vegetationsendes im Zeitraum 1992 bis 2021

8. Literatur

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598) geändert worden ist

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2005): Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme; 31.01.2005

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2008): Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien "Bentonitmattengrundsätze"; 10.12.2008

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-0 „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten Übergreifende Anforderungen“ vom 04.12.2014

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-5 Oberflächenabdichtungskomponenten aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen vom 09.03.2022

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“: Eignungsbeurteilung von Bentofix® B 4000 zur Herstellung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien vom 27.01.2009 Fortschreibung vom 27.04.2018 durch die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“

DGGT AK6: GDA-EMPFEHLUNG E 2-30 Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien Stand: September 2003, URL: <https://dggd.de/images/GDA/PDF/e2-30.pdf>

Berger, K.; Schroeder P. R.: Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell, Benutzerhandbuch für HELP-D (Version 3.95 D), Hamburg, 2013

Deutscher Wetterdienst: Open Data, URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/opendata.html>

AG Boden: Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5), 5. Aufl., Hannover 2005

Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München: Bentofix – Dichtungsmatte, Durchlässigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Konsolidierungsspannung und der hydraulischen Druckhöhe, München, 19.05.1993 (unveröffentlicht, vertraulich hinterlegt für LAGA Ad-hoc GTD)

Interne unveröffentlichte Dokumente