

Band 1.3E2

Anlage 15.2

Gutachten Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann:
Stellungnahme zu den Anmerkungen des
Behördengutachters des Büros Umtec vom 15.02.2021,
vorgetragen durch Herrn Sasse. Aachen, 22.04.2021



Geotechnisches Büro GmbH • Neuenhofstr. 112 • 52078 Aachen

K + S Minerals and Agriculture GmbH
Postfach 10 20 29

34111 Kassel

52078 Aachen
Neuenhofstr. 112
Tel. (0241) 9 28 39 - 0
Fax (0241) 52 77 62
info@gbduellmann.de
www.gbduellmann.de

Unser Zeichen
Dr. Ne/ 18.020

Sachbearbeiter
Dr.-Ing. Nendza

Durchwahl
0241 92839 0

E-Mail
info@gbduellmann.de

Datum
22.04.2021

Thema: *Ansatz des hydraulischen Gradienten für Restinfiltrationsabschätzungen*

Bezug:

- (1) - Schriftliche Darstellung der vom Behördengutachter vorgetragenen Positionen**
zum Bericht „Zur Existenz eines Anfangsgradienten oder prälinearen Bereiches bei der Durchströmung feinporiger mineralischer Dichtungsschichten bei niedrigen Überstauhöhen und praxisgerechter Ansatz des hydraulischen Gradienten für Restinfiltrationsabschätzungen“ im Rahmen des Präsentationstermins am 11.02.2021,
- (2) - GBD-Studie vom 07.12.2020 – *Zur Existenz eines Anfangsgradienten oder prälinearen Bereiches bei der Durchströmung feinporiger mineralischer Dichtungsschichten bei niedrigen Überstauhöhen,***
- (3) - GBD-Power-Point-Präsentation vom 11.02.2021 - *Zur Existenz eines Anfangsgradienten oder prälinearen Bereiches bei der Durchströmung feinporiger mineralischer Dichtungsschichten bei niedrigen Überstauhöhen und praxisgerechter Ansatz des hydraulischen Gradienten für Restinfiltrationsabschätzungen.***

Hier: Stellungnahme zu den Anmerkungen des Behördengutachters des Büros Umtec vom 15.02.2021, vorgetragen durch Herrn Sasse.



Die nachfolgende Stellungnahme der Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH (GBD) orientiert sich an der Gliederung der Umtec-Stellungnahme vom 15.02.2021.

Der fachlichen Stellungnahme der Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH (GBD) wird eine kurze Zusammenfassung der bodenmechanischen und materialtechnischen Grundlagen im Zusammenhang mit den hier maßgeblichen Fragestellungen vorangestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Zusammenfassung i.W. der besseren fachlichen Nachvollziehbarkeit der im Folgenden ausgeführten Argumentationen und Detailspekte im Rahmen dieser Stellungnahme für alle am Verfahren beteiligten Personen dienen soll. Für weitergehende Grundlagen wird auf die Studie des GBD vom 07.12.2020 gem. (2) verwiesen.

Zusammenfassung

- Das DARCY-Gesetz in der Form:

$$\frac{q}{F} = v = k \cdot i = k \cdot \frac{h + d}{d} = k \cdot \left(\frac{h}{d} + 1 \right) \text{ [m/s]} \quad (1)$$

ist definiert für poröse Sand-Kies-Gemische, bei denen die Strömung eines Fluides im Porenraum in erster Linie vom Gravitations- und Druckpotenzial beeinflusst wird. Haftkräfte bzw. das Kapillarpotenzial werden als vernachlässigbar klein eingeordnet.

- Da in dem Ansatz nach Gl. (1) auch bei einer Überstauhöhe $h = 0$ noch ein Potenzialunterschied der Größe d – bezogen auf die Unterkante der Schicht – verbleibt, führt dieser zwangsläufig zu einer weiteren Entwässerung der Bodenschicht, qualitativ entsprechend Kurve ① (Abb. 1).

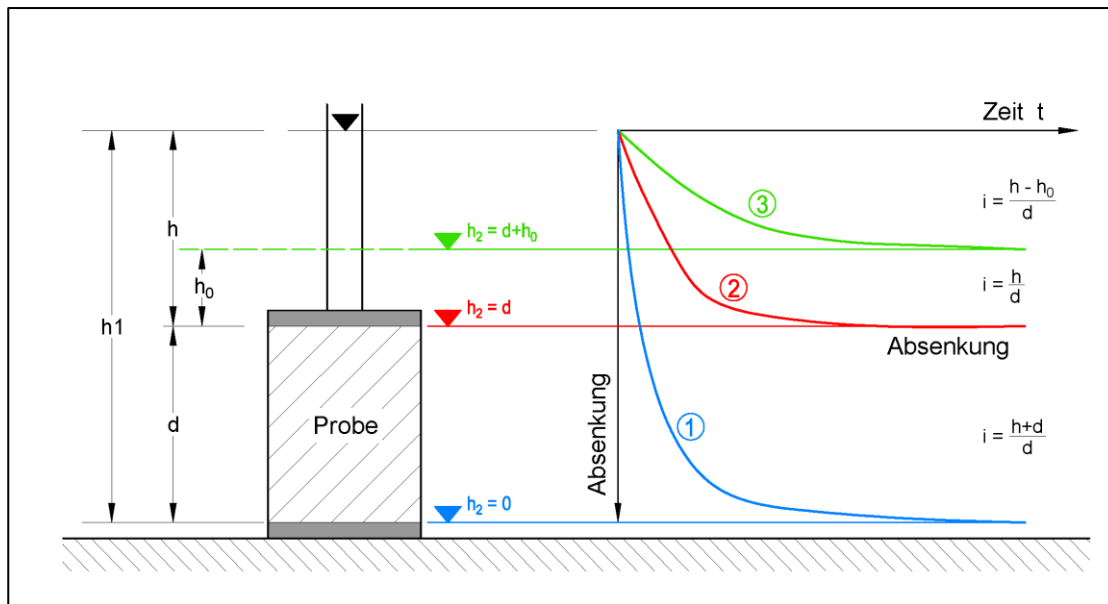


Abb. 1: Definition des Gradienten i

- In einem feinporigen Dichtungsboden sind dagegen die bei der Herleitung des DARCY-Gesetzes getroffenen Voraussetzungen nicht mehr erfüllt. Neben der Adsorption und Adhäsion zwischen angelagertem Wasser und Bodenteilchen beeinflussen vor allem die elektromolekularen Oberflächenkräfte das Fließverhalten des Wassers.
- Setzt man in einem feinkörnigen Boden dem Gravitationspotenzial (+) nach dem Ansatz von DARCY einen mindestens gleich großen Matrixwiderstand (-) über die Probenhöhe d entgegen ($h_2 = d$), verändert sich die Gleichung wie folgt:

$$\frac{q}{F} = k \cdot i = k \cdot \frac{h}{d} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Die Durchflussrate q geht mit abnehmender Überstauhöhe (Druckpotenzial) wie bei (1) zurück. Bei $h = 0$ ist der Potenzialunterschied jedoch ausgeglichen und die Wasserbewegung im Boden kommt zum Stillstand. Das Material verbleibt im gesättigten Ausgangszustand (Kurve ②, Abb. 1).

- Ist der Matrixwiderstand in der Probe größer als das Gravitationspotenzial ($h_2 = d + h_0$), kommt eine Wasserbewegung bereits bei einer Überstauhöhe $h_0 > 0$ zum Erliegen (s. Kurve ③, Abb.1). Die erweiterte DARCY-Gleichung lautet dann:

$$\frac{q}{F} = k \cdot \left(\frac{h - h_0}{d} \right) = k \cdot (i - i_0) \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$



- Dieser Effekt zeigt sich sehr anschaulich bei den in (2) und nachfolgend beschriebenen Versuchen mit fallender Druckhöhe und Durchströmung der Proben von oben nach unten. Alle untersuchten Proben zeigen nach längerer Versuchszeit bei Restüberstauhöhen von wenigen cm keinen Ausfluss an der Probenunterseite mehr an.
- Zahlreiche Untersuchungen an feinkörnigen Böden oder mit Tonmehl vergüteten Mischböden (sandiges oder sandig-kiesiges Grundmaterial), haben in den letzten Jahrzehnten gezeigt, dass die DARCY'sche Gerade nicht durch den Nullpunkt eines v - i -Koordinatensystems geht (Abb. 2).

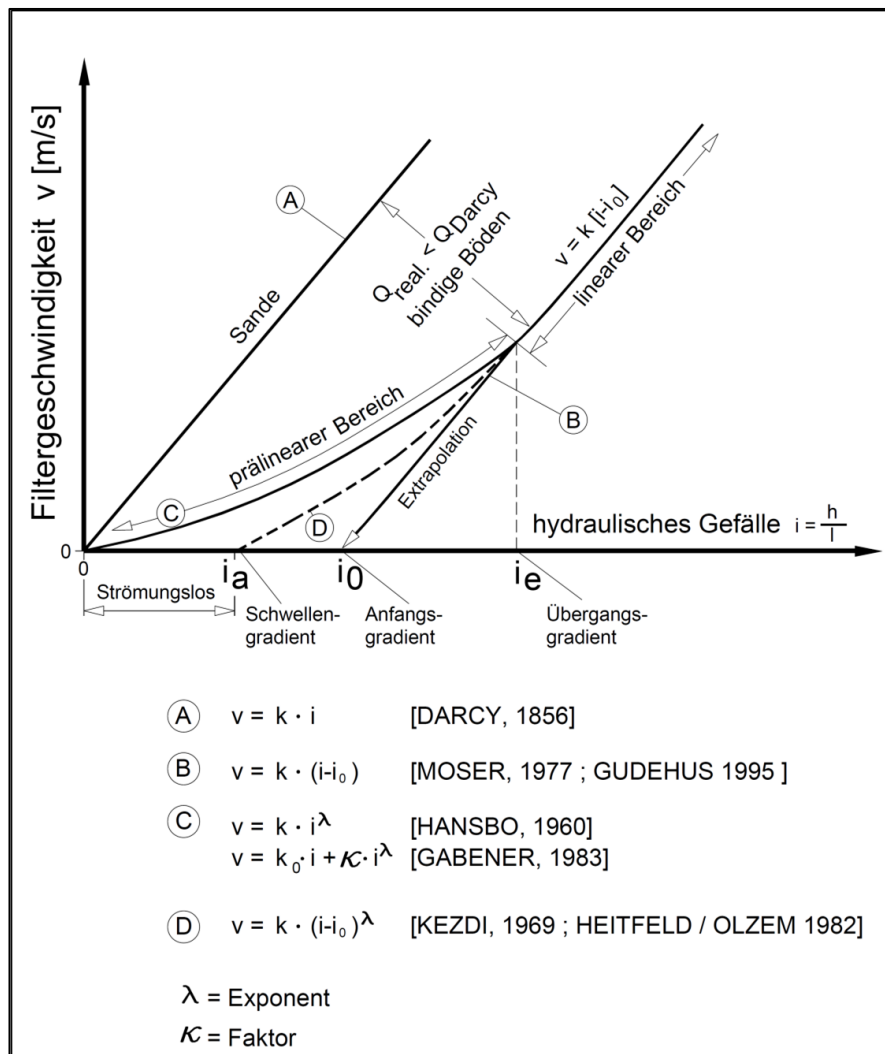


Abb. 2: Gegenüberstellung von Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gefälle bei kleinen Gradienten (umgezeichnet nach GABENER, 1983)



- Bei den eigenen Versuchen ergeben sich bei linearer Extrapolation der Versuchsdaten im v-i-Diagramm ebenfalls i_0 -Werte bzw. enge prälineare Bereiche, die sich den Kurven ③ bzw. ④ und ⑤ nach Abb. 2 zuordnen lassen.
- Eine Gesamtauswertung aller dokumentierten Versuche lässt folgende Schlussfolgerungen zu:
 - Die Bestimmung von i_0 ist zwar versuchstechnisch sehr anspruchsvoll und auch fehleranfällig, seine Existenz aber nicht grundsätzlich in Frage zu stellen.
 - Die modifizierten bzw. erweiterten DARCY-Gleichungen nach (2) und (3) sind anerkannter Stand der Technik, zumindest wenn ein homogenes, feinkörniges Material mit Dominanz von Fein- und Feinstporen vorliegt.
 - Dabei zeichnet sich ab, dass die Abweichungen vom klassischen DARCY-Ansatz und damit auch die i_0 -Werte mit abnehmendem k-Wert zunehmen.
 - Der Formelansatz (1) mit ausschließlicher Berücksichtigung des Gravitationspotenzials wird durch die dokumentierten Versuche auch an dem in Hattorf eingesetzten Mischboden ausdrücklich nicht bestätigt.
- Die unterschiedlichen Formelansätze (1) – (3) sind aber für die deponietechnische Praxis von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei der Abgrenzung der Bereiche **Gleichwertigkeitsnachweis** oder **Ermittlung der realen Restdurchsickerung** einer Basisabdichtung.
 - Beim **Gleichwertigkeitsnachweis** geht es darum, Leistungsdaten einer nach DepV – getrennt für unterschiedliche Deponieklassen – vorgegebenen Oberflächen- oder Basisabdichtung unter Berücksichtigung von k-Wert, Dicke d, Überstauhöhe h, Dauer unterschiedlicher Betriebsphasen und Gesamtzeiträume mit denen eines Alternativsystems zu vergleichen.
 - Die Leistungsdaten der „Standarddichtung“ und des „Alternativsystems“ sind dabei über den Ansatz (1) mit der Gradientendefinition $i = \frac{h+d}{d}$ zu ermitteln.
 - Sowohl die DIBt-Eignungs- und Zulassungsgrundsätze (1995, 1997) selbst als auch nachgeordnete Merkblätter (NRW, 2005) und BQS-Standard (2014) weisen jedoch ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den Werten für die Durchsickerungsrate und Durchsickerungszeit lediglich um Vergleichsgrößen handelt, die keine absolute Aussage über die Wirksamkeit eines Dichtungssystems zulassen.



- Die **absolute Restdurchsickerung** einer Dichtung kann dagegen nur mit Ansatz der modifizierten bzw. erweiterten DARCY-Gleichung realistisch abgeschätzt werden.
- Neben einem materialgerechten, auf statistischer Basis für z.B. eine 5 %-Fraktile ermittelten Bemessungswert für k ist zusätzlich der modifizierte Ansatz für den Gradienten $i = \frac{h}{d}$ entsprechend Gl. (2) anzusetzen.
- Die zusätzliche Berücksichtigung eines i_0 -Wertes entsprechend Gl. (3) entfällt dabei in der Regel und verbleibt als zusätzliche Sicherheit im System.
- Bei dieser Vorgehensweise ergeben sich reale Durchsickerungsraten und Gesamtdurchsickerungsmengen. Sie sind wesentlich kleiner, vor allem bei kleinen mittleren Überstauhöhen, als die, die bei Ansatz der DARCY-Gleichung (1) berechnet werden.
- Da z.B. auch das HELP-Modell bei der Simulation des Wasserhaushaltes der Deponiebasis von der in (1) verwendeten Gradienten-Definition ausgeht und die tatsächlich zu erwartende Sickerrate damit extrem überschätzt, wird in der GDA E2-30, dort Abschn. 4.6.5: „Berechnung der Durchsickerung von Abdichtungen bei Verwendung des HELP-Modells“ ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei einer mittleren Aufstauhöhe $h = 0$ bzw. bei einem sich dann einstellenden Gradienten $i = 1$ die Durchsickerung zu Null anzusetzen ist.



Zu 3.1: Grundlagen zur Berechnung von Wasserströmungen in Böden

- Herr Sasse führt ergänzend zu der vom GBD beigezogenen Literatur eine 2001 vorgelegte Dissertation von HEYER als wesentlich neuere Arbeit in die Fachdiskussion ein, die damit quasi den Stand der Technik beschreiben soll.
- Die Dissertation kommt - kurz gefasst – zu dem Ergebnis: Bei optimierten Versuchsrandbedingungen kann nachgewiesen werden, dass das Gesetz von DARCY auch für sehr gering durchlässige Böden bis $k = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s und sehr kleine hydraulische Gradienten Gültigkeit besitzt.
- Da Herr Sasse sich offensichtlich weitgehend der Einschätzung des Herrn HEYER anschließt, unsere Schlussfolgerungen aus in (2) behandelten Literaturbeispielen nicht mitträgt und andererseits unsere aktuellen Untersuchungsergebnisse zumindest tendenziell als Bestätigung der Untersuchungen von HEYER bewertet, ist es erforderlich zunächst auf diese Arbeit einzugehen.
 - Herr HEYER hat für seine Untersuchungen – speziell zur Existenz eines Anfangsgradienten – ausschließlich mittel- und hochplastische Tone im steifen Konsistenzbereich verwendet.
 - Die zusätzlichen Untersuchungen an Mischböden mit unterschiedlichen Ton- und Bentonit-Anteilen konzentrierten sich schwerpunktmäßig auf die Fragen des Sättigungsvorganges und die hydraulische Stabilität solcher Mischungen.
 - Grundsätzlich ist nach HEYER mit jedem Gradienten ein bestimmter Spannungszustand verbunden, was zur Folge hat, dass bei Variation des hydraulischen Gradienten im Versuchsablauf ein anderer Spannungszustand und damit auch Konsolidationszustand beim k-Wert-Versuch gegeben ist. Die Nichtlinearität entsteht nach Ansicht von HEYER aus einer Überlagerung der Durchströmung mit einer durch die Konsolidation bedingten Entwässerung des Prüfkörpers.
 - Insbesondere Versuche mit fallender Druckhöhe (instationäre Strömung) werden aus den genannten Gründen von HEYER für genauere Untersuchungen zum Durchlässigkeitsverhalten als ungeeignet bewertet.
 - Eine versuchstechnisch und rechnerisch ermittelte Nichtlinearität in Abweichung vom DARCY-Gesetz wird deshalb als Fehlableitung bzw. -beurteilung eingeordnet.



- Dem Eindruck, dass die in Teilaspekten sicherlich erkenntnisreiche Arbeit von HEYER den Stand der Technik beschreibe, möchten wir entschieden entgegenreten und dies nachfolgend auch begründen.
 - Das GBD beschäftigt sich seit Anbeginn der modernen Deponie- und insbesondere Abdichtungstechnik mit dem Durchlässigkeitsverhalten der unterschiedlichsten Materialkonzepte.
 - Nicht zuletzt die Ergebnisse aus 40 Jahren Laborpraxis haben bei uns zu der Überzeugung geführt, dass der Ansatz von DARCY zur Beschreibung der Strömungsprozesse in mineralischen Dichtungsschichten nur in einem bestimmten linearen Bereich Gültigkeit besitzt und nicht-lineare Effekte nicht nur im Bereich einer turbulenten Strömung, sondern auch im Bereich geringer Gradienten auftreten. Dies kann bei Dichtungsböden / -gemischen bis zum Stagnieren einer Durchströmung führen.
- Bei den Ergebnissen der Dissertation HEYER und deren Übertragung auf die Verhältnisse Hattorf durch den Behördengutachter setzt unsere Kritik in folgenden Punkten an:
 - Die Untersuchungen von HEYER wurden an proctorverdichteten, natürlichen, bei Belastung verstärkt zur Konsolidation neigenden Tonen durchgeführt.
 - Von jedem der untersuchten fünf Tone wurde jeweils eine Probe in einem v-i-Diagramm ausgewertet. Die berechneten Regressionsgeraden stützen sich dabei auf nur drei Einzelwerte ($i = 5, 10, 30$).
 - Die Tatsache, dass sich vereinzelt dabei ebenfalls positive Achsenabschnitte auf der i-Achse ergeben, wird von HEYER als Approximationsproblem bei der linearen Regression dargestellt, weil die höheren i/v-Wertepaare nach seiner Einschätzung für den Verlauf der Ausgleichsgeraden bestimmend sind.
 - Diese Vorgehensweise und die Tatsache, dass der Bereich $i < 5$ in den v-i-Diagrammen gar nicht abgedeckt ist, lässt Zweifel aufkommen an der End- und Allgemeingültigkeit der von HEYER formulierten Aussage: „Die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes ist bis in den Bereich kleinster Gradienten i für Materialien bis $k = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ nachgewiesen.“
- Das GBD kommt dagegen bei der Einordnung seiner Versuchsdaten zu folgenden Ergebnissen und Bewertungen:



- Die aktuellen Untersuchungen des GBD wurden an dem Original-Mischboden Hattorf ausgeführt, der im Wesentlichen aus einem grobkörnigen Stützkorn und lediglich als Porenfüllung aus einem mineralchemisch inaktiven Tonmehl besteht.
- Das Material in Hattorf zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Ausgangsdichte, eine damit sehr niedrige Anfangsporenzahl und folglich eine nur äußerst geringe Zusammenpressbarkeit aus.
- Der Unterschied in dem Steifemodul E_s bei den beiden Materialien dürfte etwa bei dem Faktor 10 liegen.
- Bei dem Hattorfer Material sind deshalb durch Spannungsänderungen verursachte Konsolidationsvorgänge, wie sie HEYER für die untersuchten Tone beschreibt und die die k-Wert-Ermittlung beeinflussen könnten, quasi ausgeschlossen. Dies gilt sowohl für die Versuche mit fallender Druckhöhe als auch für die Versuche mit konstanter, aber in Stufen veränderter Druckhöhe.
- Die Untersuchungen des GBD zur Ermittlung der v - $f(i)$ -Diagramme stützen sich jeweils auf fünf Versuchspunkte ($i = 2, 4, 8, 19, 30$) und beziehen mit den Gradienten $i = 2$ und $i = 4$ zwei Werte ein, die noch unter dem kleinsten Gradienten nach HEYER mit $i = 5$ liegen. Die k-Wert-Verläufe innerhalb der einzelnen Gradientenstufen sind dabei weitgehend konstant und deuten ebenfalls auf keine Konsolidationsvorgänge hin.
- Alle vom GBD untersuchten Proben zeigen bei dem vorhandenen k-Wert-Niveau einen kleinen positiven Achsenabschnitt auf der i -Achse, der als i_0 -Wert interpretiert werden kann.
- Mit konservativem Ansatz interpretieren wir den Bereich zwischen $i = 0$ bis ca. $2 \cdot i_0$ als prälinearen Bereich, in dem eine Durchströmung noch stattfindet.
- Trotz der beschriebenen Versuchsergebnisse vertritt das GBD die Auffassung, dass die im niedrigen Gradientenniveau erkennbaren Abweichungen von der Gültigkeit des Darcy-Bereiches nicht bei der Bemessung von Abdichtungskomponenten oder für Emissionsermittlungen genutzt werden sollten.
- Wir sind damit in Übereinstimmung mit einer Konvention in der Deponiepraxis, die besagt, dass für Leistungsberechnungen von einem k-Wert bei $i = 30$ auszugehen ist und mögliche k-Wert-Reduzierungen infolge Ausbildung von Anfangsgradienten oder prälinearen Bereichen als zusätzliche Sicherheiten im System verbleiben sollen.
- Da solche Materialien andererseits durch sehr niedrige k-Werte charakterisiert sind, können diese selbstverständlich in Leistungsberechnungen entsprechend eingeführt werden,



wie dies in der Vergangenheit z.B. bei Dichtungssystemen wie Trisoplast und dem DYWIDAG-Mineralgemisch praktiziert wurde.

Zu 3.2: Ursachen für Abweichungen vom DARCY'schen-Gesetz

- In unserer Ausarbeitung von 12/2020 sind wir deutlich ausführlicher auf diese Ursachen eingegangen als dies in der notwendigerweise verkürzten Form unserer PP-Präsentation (3), u.a. auf Folie 9 zur Saugspannungskurve, möglich war.
- Während bei stark durchlässigen, grobkörnigen Bodenarten – entsprechend dem Ansatz von DARCY – bei der Durchströmung ausschließlich auf Gravitationskräfte abgestellt wird, zeigen feinkörnige, bindige Böden mit geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit ein anderes Durchströmungsverhalten.
- Es treten in der Bodenmatrix wirkende widerstehende Kräfte hinzu, die im gesättigten Zustand mit den Gravitationskräften im Gleichgewicht stehen.
- Mit dem „Matrix- oder Kapillarpotenzial“ wird die inhärente Energie (z.B. Hubarbeit) ausgedrückt, die das Wasser entgegen der Schwerkraft in der Bodenmatrix hält.
- Unter isothermen Bedingungen gibt deshalb ein feinkörniges Material, wie es im Dichtungsbau eingesetzt wird, ohne Störung des Gleichgewichtszustandes kein Wasser ab. Voraussetzung für eine Wasserbewegung ist immer ein Potenzialgefälle bzw. -unterschied.
- Nur wegen der Gültigkeit dieses physikalisch begründeten Sachverhaltes ist z.B. der Einbau einer dauerhaft nahezu gesättigten mineralischen Dichtungsschicht unter einer KDB in der Kombinationsdichtung überhaupt erst möglich und sinnvoll.
- Wenn in der Deponiepraxis bei Freilegungen unter einer KDB in der mineralischen Dichtungskomponente vereinzelt Austrocknungserscheinungen oder an der Oberseite auch höhere Wassergehalte festgestellt wurden, sind diese ausschließlich auf anisotherme Randbedingungen (Temperaturgradient) und nicht auf einen gravitativ verursachten Feuchtefluss zurückzuführen gewesen. Bei Temperaturänderungen verläuft der Wassertransport immer in Richtung abnehmender Temperatur.
- Dass im Gegensatz dazu eine wassergesättigte Sand- oder Kiessäule im Laborexperiment oder auch in natura nach unten entwässern kann, ist der Tatsache geschuldet, dass in dem Material ein Ungleichgewicht herrscht. Die Gravitationskräfte sind dominant, die Wasserbindkräfte bzw. Kapillarkräfte dagegen in Abhängigkeit von der Kornverteilung weitgehend vernachlässigbar.
- Dieser Strömungsansatz wird übrigens im HELP-Modell, auch gemäß Umtec-Studie von 11/2017, für den Haldenkörper gewählt. Die Wasserströmung wird ausschließlich von der



Gravitation abwärts angetrieben betrachtet, entgegenwirkende Kapillarkräfte werden nicht berücksichtigt. Der k -Wert für die Salzaufhaltung wird mit $3 \cdot 10^{-3}$ m/s in Ansatz gebracht. Dieser Wert charakterisiert ein grobkörniges Material und ist damit größer als der für die Dränageschicht an der Haldenbasis.

- Der vom GBD in der Ausarbeitung von 12/2020 vorgenommene Hinweis auf die Entwässerungs- bzw. Wasserspannungskurve diene ausschließlich als Beleg dafür, dass die im Ausgangszustand eines entsprechenden Versuches vorhandene „Sättigung“ der Probe nur durch Aufbringen einer zusätzlichen, materialspezifischen Druck- oder Saugspannung reduziert werden kann.
- Der Vorhalt des Behördengutachters, wir hätten mit diesem Bezug und mit dem Begriff „Matrixpotenzial“ gesättigte und nicht gesättigte Bodenverhältnisse miteinander vermengt, ist zurückzuweisen.
- Auch das GBD geht selbstverständlich in einer Dichtungsschicht an der Deponiebasis von dauerhaft gesättigten Verhältnissen aus. Denn mit dem wesentlichen Unterschied zum Ansatz von DARCY wirken in einer solchen Dichtungsschicht nicht ausschließlich Gravitationskräfte, sondern zusätzlich entgegengesetzt wirkende Matrixkräfte.
- Damit wird von uns nicht der DARCY'sche Ansatz an sich in Frage gestellt, sondern dessen unkritische Anwendung auf den betrachteten Fall der Durchsickerung einer feinkörnigen Dichtungsschicht.

Zu 3.3: Konkrete Projektdaten für die in Hattorf eingesetzten Materialgemische

- Das GBD empfiehlt für die Bewertung der konkreten Materialdaten Hattorf die Verwendung der ausführlicheren Ausarbeitung von 12/2020 (2), da die PP-Präsentation (3) eine Verkürzung der Ausführungen darstellt.
- In dieser Ausarbeitung sind sowohl Proben der Oberen als auch der Unteren Lage behandelt worden.
- Zu dem Einwand von Herrn Sasse, die Proben der Unteren Lage hätten aufgrund ihrer geringeren Durchlässigkeit einen höheren Anfangsgradienten oder einen stärker ausgeprägten prä-linearen Verlauf zeigen müssen, ist anzumerken:
 - Die konkreten Projektdaten der laufenden Qualitätsüberwachung und auch die vom GBD durchgeführten ergänzenden Eignungsprüfungen weichen signifikant nach unten von den Mindestvorgaben des Planungskonzeptes mit $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s (Obere Lage) und $k < 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (Untere Lage) ab.



- Die in Anl. 1 zusammengestellten Daten der ergänzenden Untersuchungen des GBD zeigen dabei gute Übereinstimmungen mit den ausgewählten Datensätzen der lfd. Qualitätssicherung bei Ausführung der Dichtungsarbeiten im ersten Bauabschnitt.
 - Die statistische Auswertung der Daten zeigt aber auch, dass sich die k-Wert-Bereiche der Oberen und Unteren Lage stark überlappen und sich deshalb die Mittelwerte der Stichproben nicht wesentlich unterscheiden.
 - Aus den dargestellten Gründen ist es also nicht verwunderlich, dass auch die v-i-Diagramme für beide Materialien einen nahezu gleichen Verlauf zeigen.
-
- Der von Herrn Sasse bei der Probe S6 festgestellte Verlauf oberhalb des Koordinatenursprungs ist tatsächlich so nicht vorhanden. Die Regressionsgerade weist wie bei allen anderen untersuchten Proben einen positiven Abschnitt auf der i-Achse auf.
 - Die Untersuchungen des GBD bestätigen ausdrücklich nicht die Schlussfolgerungen von HEYER, wonach bei feinkörnigen Böden im k-Wert-Bereich bis $k < 1 \cdot 10^{-11}$ m/s keine Abweichungen vom DARCY-Ansatz auftreten und wenn sie dennoch im Versuch ermittelt werden, sei dies auf Unzulänglichkeiten in den Versuchsrandbedingungen zurückzuführen.

Zu 3.4: Ansatz eines materialgerechten Gradienten für Restinfiltrationsabschätzungen

Definitionen des hydraulischen Gradienten

- Wie in Abschn. 3.2 bereits ausgeführt, beschreibt die Darstellung in Abb. 4.1 unserer Studie (2) (Folie 13 der PP-Präsentation (3)), dort Kurve ①, vereinfacht die Situation bei ausschließlicher Angriff von Gravitationskräften nach dem Ansatz von DARCY, wie sie bei einem Versuch mit fallender Druckhöhe und Durchströmung von oben nach unten und entsprechend dem Geltungsbereich des Ansatzes von DARCY für grobkörnige Materialien (Sande, Kiese) charakteristisch ist.
- Betrachtet man zunächst eine wassergesättigte Probe der Höhe d ohne eine Überstauhöhe ($h = 0$), ergibt sich an der Probenoberseite eine Potenzialhöhe $h_1 = d$, an der Unterseite eine Potenzialhöhe $h_2 = 0$, d.h. die Potenzialhöhe $h_1 = d$ baut sich bei freiem, vertikalem Abfluss nach unten allein als Folge der Schwerkraft auf Null ab. Bis auf Haftwasserreste läuft die Probe leer.
- Im gesättigten Ausgangszustand der Probe mit einer Überstauhöhe $h = 0$ ergibt sich damit bei ausschließlicher Wirksamkeit des Gravitationspotenzials ein Gradient der Größe:



$$i = \frac{h_1 = d}{d} = \frac{d}{d} = 1 \quad (4)$$

- Wird die gesättigte Probe oder Dichtungsschicht der Höhe d zusätzlich mit einer Wassersäule der Höhe h überstaut, wird der Gradient wie folgt definiert:

$$i = \frac{h_1}{d} = \frac{h+d}{d} \quad \text{bzw.} \quad i = \frac{h}{d} + 1 \quad (5)$$

- Das hydraulische Potenzial h_1 entspricht jetzt den Gravitationsteilpotenzialen $h + d$. Bezugsniveau des Potenzials h_1 ist dabei wieder die Unterseite der Probe mit $h_2 = 0$.
- Aus dem Formelansatz nach (5) folgt für die Praxis, dass sich bei geringem Überstau die Durchsickerungsrate q weitgehend proportional zum k -Wert verhält. Bei im Verhältnis zur Schichtdicke d geringerem Überstau wirkt sich die Mächtigkeit der Schicht nur sehr untergeordnet auf die Durchsickerungsrate aus, da das Druckpotenzial h_1 nahezu linear mit d ansteigt.
- Herr Sasse wendet hierzu richtigerweise ein, dass die Bedingung $h_1 < d$ (s. Abb. 4.1 unserer Studie (2) bzw. Abb. 1 dieser Stellungnahme) im Betriebszustand einer Deponie nicht zu erwarten bzw. möglich ist.
- Diese Einschätzung - der wir uns anschließen - impliziert aber gleichzeitig, dass an die Stelle der Gradientendefinition gemäß Kurvenverlauf ① mindestens die Kurve nach ② treten muss.
- Die Definition des Gradienten in der Form:

$$i = \frac{h}{d} \quad (6)$$

ist aber zwingend mit der Annahme verknüpft, dass das über die Höhe d der Probe wirkende Gravitationspotenzial im Ansatz (4) durch einen entgegenwirkenden Widerstand der Größe $h_M = d$ ausgeglichen werden muss, der nach dem Potenzialkonzept dem Matrixpotenzial entspricht, das häufig auch mit Begriffen wie elektromolekulare Anziehungskräfte, molekulare Wechselwirkungen an Kornoberflächen oder Matrixwiderstand in cm Wassersäule beschrieben wird.

- Der Ansatz $i = \frac{h}{d}$ impliziert, dass ausschließlich die Druck- bzw. Überstauhöhe h (in cm Wassersäule) über die Probenhöhe d abgebaut und bei $h = 0$ der Ausfluss bzw. die Durchsickerung zu Null wird. Eine vertikale Wasserbewegung bzw. Ausrichtung wird damit ausschließlich von der Druck- oder Überstauhöhe h , gemessen bis OK Dichtung, verursacht.
- Bei einem Versuch mit konstanter Druckhöhe tritt an die Stelle der im Versuch mit fallender Druckhöhe sich zeitlich ändernden Überstauhöhe h die Druckdifferenz $\Delta h = h_E - h_A$, mit:



h_E = Druckhöhe an der Einlaufseite der Probe (cm)

h_A = Druckhöhe an der Auslaufseite der Probe (cm)

Der Formelansatz für den Gradienten i lautet dann:

$$i = \frac{\Delta h}{d} \quad (7)$$

- Diese Formelansätze finden Anwendung bei allen Verfahren zur Bestimmung des k -Wertes bei mineralischen Stoffen (ob mit konstanter oder fallender Druckhöhe, ob bei Durchströmung von unten nach oben oder von oben nach unten) wie auch bei der absoluten Abschätzung der konvektiven Durchtrittsraten bei ein- oder mehrlagigen Abdichtungsschichten.
- Der modifizierte Formelansatz für Kurve ③ in Abb. 4.1 unserer Studie von 12/2020 in der Form:

$$i = \frac{h - h_0}{d} \quad (8)$$

ist dann zu erwarten, wenn der Matrixwiderstand die Gravitation in der Probe überwiegt und die Absenkung bereits in einer Höhe h_0 über Dichtungsoberkante zum Stillstand kommt. Dieser Fall wäre gleichzusetzen mit dem Nachweis der Existenz eines Anfangs- oder Schwellengradienten und damit auch einer eindeutigen Abweichung vom DARCY-Gesetz.

Ergänzende Laborversuche und Archivdaten

- Ein Materialverhalten nach Kurve ② oder ③ ist im Gegensatz zu dem Formelansatz nach DARCY entsprechend Kurve ① das Ergebnis normaler Versuchspraxis im Dichtungsbau und wird deshalb nachfolgend an einer weiteren Probe Q4 aus der Unteren Dichtungslage Hattorf sowie anhand von Materialproben (Archivdaten des GBD), die im Vergleich zu dem in Hattorf eingesetzten Material im Standard-Triaxialversuch ($i = 30$) deutlich niedrigere k_{10} -Werte aufweisen und deshalb eine deutlichere Abweichung vom Darcy-Verlauf erwarten lassen, erläutert.
- Diese Datenerweiterung ist nicht wie der Behördengutachter ausführt „allenfalls von akademischem Interesse“, sondern hat sehr wohl eine praktische Bedeutung in Bezug auf die grundsätzliche Frage möglicher Abweichungen von der Linearität der v - i -Beziehung.
- Die Probe Q4 der Unteren Dichtungslage Hattorf wurde sowohl mit konstanter als auch mit fallender Druckhöhe im gesättigten Zustand untersucht. Im Triaxialversuch mit konstant $i = 30$ zeigt sie einen stabilisierten Wert von $k = 1,5 \cdot 10^{-10}$ m/s und liegt damit im Bereich des Mittelwertes der in Anl. 1 dokumentierten Projektdaten Hattorf.



- Die Absenkungskurve $h = f(t)$ der Probe Q4 (Anl. 2.1) zeigt über eine Versuchszeit von 840 Stunden in Übereinstimmung mit den Proben V3 und Q3 unserer Studie von 12/2020 die nach längerer Versuchszeit zu erwartende asymptotische Annäherung der Absenkungskurve an eine Waagerechte im Abstand $h \geq 0$. Eine Unterschreitung dieser Bezugslinie ist aus physikalischen Gründen bei einem feinkörnigen Material also nicht möglich.
- Die bei den Proben V3 und Q3 und jetzt auch bei Q4 gemessenen Restüberstauhöhen von 4,4, 4,1 und 3,6 cm sind gerätetechnisch bedingt und lassen sich messtechnisch nicht unterschreiten. Das bedeutet, dass unterhalb dieser Überstauhöhe die Einlaufseite der Probe im Versuch nicht mehr messtechnisch weiter beobachtet werden kann. Dies war bei der Probe Q4 nach etwa 840 Stunden der Fall.
- Da bei der vom GBD gewählten Versuchstechnik sowohl der Einlauf Q_E als auch der Auslauf Q_A erfasst werden, lässt sich darüber der weitere Versuchsablauf messtechnisch beobachten und der Zeitpunkt für $\Delta Q_A / \Delta t = 0$ und damit die Annäherung an eine waagerechte Gerade über den Auslauf Q_A relativ genau bestimmen (Anl. 2.2). Bei der Probe Q4 kam die Durchströmung nach ca. 960 Stunden zum Erliegen. Rechnerisch ergibt sich damit für die Probe Q4 eine Endüberstauhöhe von ca. 2,8 cm. bzw. ein i_0 -Wert von 0,23.
- Zum Verständnis und zur Vermeidung von Fehlinterpretationen sei erläutert, dass sich gegen Ende der Versuchszeit die täglichen Massenänderungen um 0,01 g bzw. cm^3 bewegen und damit bereits in der Größenordnung der Messunsicherheit liegen.
- Insbesondere die dokumentierten Versuche mit fallender Druckhöhe zeigen – entgegen der bisherigen Interpretation des Behördengutachters – eindeutig und in Übereinstimmung mit den theoretischen Grundlagen eine gegen Null gehende Durchflussänderung $\Delta Q / \Delta t$ und eine gegen einen Endwert laufende Restüberstauhöhe h im niedrigen cm-Bereich und damit eine signifikante Abweichung vom DARCY'schen Ansatz.
- Bezogen auf die Probenhöhe $h = 12$ cm ergeben sich nach Anl. 2.3 für die unterschiedlichen Gradientendefinitionen, abgeleitet aus der Absenkungskurve nach Anl. 2.1, die zeitabhängigen Verläufe $i = \frac{h+d}{d} = f(t)$ und $\frac{h}{d} = f(t)$.
- In Übereinstimmung mit den zuvor erläuterten unterschiedlichen Ansätzen für die Absenkungskurven ② und ③ gemäß Abb. 4.1 unserer Studie von 12/2020 lassen sich aus dem Versuch Q4 je nach Gradientendefinition als niedrigste mögliche Grenzwerte $i = 0$ (für $i = \frac{h}{d}$) bzw. $i = 1$ (für $i = \frac{h+d}{d}$) ableiten, d.h. spätestens bei diesen Werten kommt der Durchfluss zum Stillstand, d.h. die Filtergeschwindigkeit v wird Null. Diese Verhältnisse kann bei der Berechnung der Filtergeschwindigkeit $v = k \cdot i$ nur der Ansatz $i = \frac{h}{d}$ abbilden, für den bei $h = 0$ die Filterge-



schwindigkeit ebenfalls zu Null wird. Das Matrixpotential, das unabhängig von der Aufstauhöhe wirkt, beträgt demzufolge h_M bzw. $i_0 \geq 0$.

- Ergänzend ist für den Ansatz $i = \frac{h}{d}$ in Anl. 2.4 die aus den Messwerten der Absenkungskurve abgeleitete Beziehung $v = f(i)$ dargestellt.
- Die Messpunkte lassen sich mit hohem Bestimmtheitsmaß als Gerade darstellen. Die Filtergeschwindigkeiten zeigen, wie alle anderen untersuchten Proben auch, einen positiven Schnittpunkt mit der i -Achse und damit einen rechnerisch sehr niedrig ausfallenden i_0 -Wert oder engen prälinearen Übergangsbereich.
- Aus den Untersuchungen an den in Hattorf eingesetzten Materialien können folgende **Schlüsse** gezogen werden:
 - Die mittleren k -Werte der beiden Materialkonzepte für die Obere und Untere Lage liegen relativ eng beieinander, sie zeigen ausgesprochen niedrige Streuungsmaße und einen deutlichen Abstand zu den planerisch vorgegebenen Mindestwerten.
 - Alle vom GBD untersuchten Proben zeigen in den v - i -Diagrammen einen positiven Achsenabschnitt auf der i -Achse bzw. einen engen prälinearen Bereich.
 - Der Ansatz des Gradienten $i = \frac{h+d}{d}$ hat für die Abschätzung realer Volumenströme bzw. Durchsickerungsraten in den Versuchen keine Bestätigung gefunden.
- Die Auswertungen in Anl. 3.1 und 3.2 an einer Dichtwandmasse (DWM) und einem hochplastischen Ton belegen weiter, dass bei ausreichend niedriger Durchlässigkeit der Matrixwiderstand des Materials ansteigt und eine Wasserbewegung infolge der Gravitation bereits bei einer Überstauhöhe $h = h_0$ deutlich > 0 entsprechend Kurve ③ in Abb. 1 zum Erliegen kommt. Für die in Anl. 3.2 ausgewerteten Materialien entspricht das einer Überstauhöhe h_0 von 95,2 cm (DWM, $d = 12$ cm) und 29,4 cm (Ton, $d = 5$ cm), bzw. Anfangsgradienten von $i_0 = 7,9$ und 5,9.
- Auch die von upi seit 2014 durchgeführten Langzeit-Durchströmungsversuche (s. Anl. 4.1) an Material für die Halde Zielitz ($k < 1 \cdot 10^{-11}$ m/s) zeigen bei einer Reduktion des Gradienten von $i = 30$ in 08/2017 auf $i = 5$ bis 12/2018 keinen messbaren Durchfluss. Dieses Verhalten deutet ebenfalls auf die Existenz eines Anfangsgradienten $i_0 \geq 5$ hin.
- In Anl. 5 sind des Weiteren Ergebnisse an Tonproben dokumentiert, die vom GBD zur i_0 -Fragestellung in systematischen Versuchen im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Auftrag des Umweltbundesamtes und des Landesamtes für Wasser und Abfall NRW bereits 1985 untersucht worden sind. Das Material stammt aus einer Testfeld-



fläche, die nach 10-jähriger Müllüberlagerung und Sickerwasserbelastung wieder freigelegt wurde. Die aus der Dichtung entnommenen U-Proben hatten \varnothing von 10 und 25 cm sowie Höhen von 12 bzw. ca. 22 cm. Die Proben wurden in Triaxialzellen in jeweils fünf Gradientenstufen zwischen $i \sim 30$ und $i \sim 2$ geprüft. Die Prüfzeit lag für die Einzelprobe jeweils bei ca. drei Monaten. Geprüft wurden zwölf nahezu gesättigte Normalproben und fünf Großproben. Auch diese Untersuchungen weisen eindeutig eine Abweichung von dem Ansatz nach DARCY im niedrigen Gradientenbereich nach.

Ansätze für die Abschätzung der Restinfiltration (RI)

DIBt-Grundsätze (1995)

- Da der Behördengutachter die Auffassung vertritt, die im Zusammenhang mit den „DIBt-Grundsätzen“ von 1995 gezogenen Schlussfolgerungen des GBD seien aus dem Zusammenhang gerissen und nicht geeignet für die Übertragung auf die gegenständliche Fragestellung, erscheint es notwendig, näher auf Inhalt und Zweck dieser „Grundsätze“ einzugehen.
- In diesem Zusammenhang möchten wir darauf hinweisen, dass der rechts Unterzeichnende über mehrere Jahre aktiv in dem seinerzeitigen Arbeitskreis „Grundsätze der Deponietechnik und Sicherung von Altlasten“ (AK GDSA) beim „Deutschen Institut für Bautechnik“ bei der Entwicklung der „Grundsätze“ mitgearbeitet hat.
- Im Abschn. 4.4.5: *Hydraulische Einwirkungen* der DIBt-„Grundsätze“ werden die Auswirkungen darin gesehen, dass ein hydrostatischer Aufstau auf einer Dichtung konvektive Permeationsvorgänge verursachen kann. Die Höhe des hydrostatischen Aufstaus beeinflusst dabei sowohl die Durchtrittszeit als auch die Durchflussrate.
- Bei dem Nachweis der Dichtigkeit bzw. konvektiven Durchlässigkeit wird von der Gültigkeit der Formel von DARCY ausgegangen in der Form $v = k \cdot i$ (m/s) bzw. $q = k \cdot i \cdot A$ (m³/s).
- Für den Gradienten i wurde bei vertikaler Durchströmung vereinfachend und unter ausschließlicher Berücksichtigung der Gravitationskräfte der Ansatz $i = \frac{h+d}{d}$ (4) gewählt.
- Die **Durchtrittsraten q** und die auf dem gleichen Ansatz beruhenden **Durchtrittszeiten t** werden in den „Grundsätzen“ für unterschiedliche hydraulische Belastungsszenarien bzw. Überstauhöhen h als Vergleichswerte des Standardsystems in Abhängigkeit von der Deponieklasse tabellarisch für Oberflächen- und Basisabdichtungen angegeben.
- Die für den Systemvergleich letztendlich maßgebenden Durchtrittsmengen Q (m³/m²) sind im konkreten Fall jeweils projektbezogen rechnerisch für die einzelnen Betriebsphasen und den angesetzten Gesamtbetrachtungszeitraum zu ermitteln.



- Da es bei den Ansätzen des DIBt ausschließlich auf einen Vergleich der Leistungsfähigkeit des Standardsystems mit der eines Alternativsystems ankommt, spielt die Definition des Gradienten, ob nach Ansatz (4) oder (5), letztlich keine entscheidende Rolle.
- Bei den Vergleichsgrößen q und t handelt es sich vereinbarungsgemäß von vornherein um reine Rechenwerte bzw. fiktive Kenngrößen.
- Eine alternative Systemkomponente wird nach den erläuterten Ansätzen als gleichwertig eingestuft, wenn sie in ihren Leistungen hinsichtlich der bezweckten Wirkung mindestens gleich gute Eigenschaften wie der Regelaufbau aufweist.
- Die in den DIBt-Grundsätzen von 1995 beschriebenen Ansätze für den Nachweis der Dichtigkeit bzw. konvektiven Durchlässigkeit von Oberflächen- und Basisabdichtungen wurde nicht dafür entwickelt, die absolute Wirksamkeit und tatsächliche Restdurchsickerung einer konkreten Abdichtungsschicht zu berechnen. Dies ergibt sich schon allein aus dem Ansatz für den Gradienten i .
- Nicht zuletzt deshalb wurde in die Grundsätze von 1995 (dort Abschn. 5.1.1.2 *Anforderungen*) folgender Hinweis aufgenommen: *„Es ist darauf hinzuweisen, dass die in Tab. 5.1 – 2 angegebenen Mengen keine Rückschlüsse auf die tatsächlich auftretenden Permeationsraten zulassen. Sie dienen lediglich als Vergleichswerte unter den angenommenen Einwirkungen und Gesetzmäßigkeiten des Stofftransports zum Nachweis der grundsätzlichen Eignung“*.
- Die Interpretation des Behördengutachters, der zitierte Hinweis sei nur darauf zurückzuführen, dass in den Grundsätzen lediglich ein Aufstau von $h = 3$ cm angesetzt und damit seinerzeit für Vergleichsrechnungen bei Systemen, deren Durchlässigkeit nicht nach DARCY ermittelt werden kann, z.B. Kapillarsperren, die Messlatte möglichst hoch gehängt werden sollte, ist nicht nachzuvollziehen und nicht korrekt.
- Die „Grundsätze“ variieren sehr wohl den Aufstau in Abhängigkeit von Lastfällen und Betriebsphasen und sind nicht auf $h = 3$ cm fixiert (3, 30, 100 und 500 cm). Alternative Systeme, deren Durchflussrate bzw. Leistungsfähigkeit nicht über den k -Wert beschrieben werden kann, wie z.B. Kapillarsperren, standen seinerzeit noch nicht zur Bewertung an.
- Die sich aus dem Ansatz für den Gradienten $i = \frac{h+d}{d}$ ergebenden Durchsickerungsraten stellen keine hoch gehängte, sondern eine sehr niedrig gehängte Messlatte dar, weil sie bei absoluter und nicht relativer Betrachtung die Durchtrittsraten völlig überschätzt.
- Verantwortlich hierfür ist der nicht sachgerechte Ansatz dieses Gradienten bei Betrachtung der realen Restdurchsickerung.



NRW-Merkblatt Nr. 42 (2005)

- Auch das 2005 in NRW vom Landesumweltamt verfasste Merkblatt Nr. 42, *Gleichwertigkeit von Deponiesystemkomponenten, Teil 1: Geologische Barriere*, weist im Zusammenhang mit Permeabilitätsberechnungen (Durchsickerungsrate, Durchsickerungszeit, Durchsickerungsmenge) darauf hin, dass sich die Berechnungsansätze an den allgemeinen DIBt-Grundsätzen von 1995 orientieren mit dem entsprechenden Zusatz: „Zu betonen ist, dass es sich hier um Vergleichsgrößen handelt, die nur dazu dienen können, Systeme untereinander zu vergleichen. Eine Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Deponien und der absoluten Wirksamkeit von Dichtungssystemen kann hiermit nicht vorgenommen werden“.

Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 5-0 (12/2014)

- Bei Komponenten, deren Leistungsfähigkeit über den k-Wert beschrieben werden, wird nach dem Bundeseinheitlichen Qualitätsstandard BQS 5 – 0 vom 04.12.2014: *Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten* Folgendes vorgegeben:
 - Die Nachweise der Leistungsfähigkeit können durch Versuche und / oder Rechnungen erbracht werden. Der rechnerische Nachweis der Konvektion erfolgt für mineralische Abdichtungsschichten unter Annahme eines gesättigten Porenraums mit Hilfe der Formel nach DARCY, wonach die Durchflussrate q proportional zu dem Durchlässigkeitsbeiwert k multipliziert mit dem hydraulischen Gefälle i ist ($q = k \cdot i$).
 - Der hydraulische Gradient wird in der Form $i = \frac{h}{d}$ angegeben.
 - Als Druckhöhendifferenz h wird – auf den ersten Blick nicht erkennbar – analog zu den DIBt-Grundsätzen die Potenzialdifferenz $h_1 - h_2$ nach Gleichung (2) verwendet und auch die nachzuweisenden Leistungsdaten (Referenzwerte) für 30 cm Aufstau gemäß DIBt-Grundsätzen übernommen.
 - Auch der BQS-5-0 von 2014 enthält dementsprechend den Hinweis, dass die angegebenen maximal zulässigen Permeationsraten nach den DIBt-Grundsätzen keine Rückschlüsse auf die tatsächlich auftretenden Durchflussraten zulassen.

GDA-Empfehlung E2-30 (2003):

- In der GDA-Empfehlung E2-30 (2003):
Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien (z.B. mit HELP), dort Abschn. 2.2.4: *Durchsickerung der Abdichtungsschicht* aus bindigem Material, wird für einfache Abschätzungen der Ansatz nach Darcy: $v = k \cdot i$ und unter der



Annahme einer senkrechten Durchströmung und einer Aufstauhöhe $h = 0$ das hydraulische Gefälle näherungsweise zu 1 angesetzt. Dieser Ansatz entspricht damit der Gradientendefinition (4) und (5) dieser Stellungnahme.

- Die Filtergeschwindigkeit v und die Durchtrittsrate q ergeben sich damit unmittelbar aus dem Durchlässigkeitsbeiwert k .
- In der gleichen Empfehlung wird in Abschn. 4.6.5: *Berechnung der Durchsickerung mineralischer Abdichtungsschichten*, auf der Grundlage des DARCY-Gesetzes bei Anwendung des HELP-Modells der hydraulische Gradient i zwar entsprechend dem Formelansatz (4) dieser Stellungnahme noch einmal explizit mit: $i = \frac{h+d}{d}$ verbal beschrieben, aber zusätzlich einschränkend festgelegt: „Wenn die mittlere Aufstauhöhe h über der Abdichtung zu Null wird, d.h. bei einem Gradienten $i = 1$, wird die Durchsickerung zu Null angenommen.“

Bewertung der unterschiedlichen Gradientenansätze: Handlungsempfehlungen

- In Übereinstimmung mit den durchgeführten Laborversuchen mit fallender Druckhöhe und bodenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten ist für die Abschätzung der Restinfiltration sehr gering durchlässiger, fein- und gemischtkörniger Materialien der Gradient: $i = \frac{h}{d}$ in Ansatz zu bringen.
- Als wesentlich bei diesem Ansatz ist herauszustellen, dass ohne Überstau h auf der Oberseite der Dichtung auch keine Durchsickerung stattfindet.
- Das Gravitationspotenzial der wassergesättigten Probe der Höhe d wird durch Matrixwiderstände ausgeglichen und bleibt damit unwirksam.
- Hydraulisch wirksam ist damit ausschließlich das Druckpotenzial in cm Wassersäule oberhalb der Probe bzw. Dichtungslage.
- Der in den Bezugsquellen aus dem Geltungsbereich der DepV enthaltene Ansatz $i = \frac{h+d}{d} = \frac{h}{d} + 1$ berücksichtigt dagegen das hydraulische Gesamtpotenzial $h + d$, bezogen auf die Unterseite der Probe bzw. Dichtungsschicht und ohne Berücksichtigung des Matrixwiderstandes in der Probe.
- Dieser Ansatz führt zwangsläufig zu einer deutlichen Überschätzung der tatsächlichen Durchsickerungsraten, insbesondere bei im Verhältnis zur Schichtdicke geringen Überstauhöhen. Selbst für $h = 0$ und damit $i = 1$ ist danach mit einer Durchsickerungsrate proportional zum k -Wert zu rechnen.
- Bei im Verhältnis zur Schichtdicke d sehr großen Überstauhöhen h , die im Deponiebau bei wirksamer Drainage aber nicht zu erwarten sind, geht der Einfluss des Matrixwiderstandes der Dichtungslage zunehmend zurück.



- Nicht zuletzt deshalb sind die auf obiger Gradientendefinition in den DIBt-Grundsätzen und zeitlich nachfolgenden Merkblättern und Empfehlungen basierenden Leistungsdaten der Regelaabdichtungssysteme lediglich als Referenzwerte für alternative Dichtungselemente im Eignungs- bzw. Gleichwertigkeitsnachweis anzusehen.
- Ein konkretes Beispiel für die Überschätzung der tatsächlichen Durchsickerungsrate nach diesem Ansatz stellen die RI-Berechnungen nach HELP und DARCY des Büros Umtec von 11/2017 dar.
 - Allein die sich für den Zustand $h = 0$ bzw. $i = 1$ ergebenden Sickerwassermengen in Abhängigkeit vom k -Wert der Dichtung liegen zwischen ca. 10.000 und 15.000 m³/a, bezogen auf die Gesamtfläche von 63 ha.
 - Die für variable Überstauhöhen h bzw. Gradienten $\frac{h}{d}$ ermittelten Sickerwassermengen, die eigentlich die realen Verhältnisse abbilden, treten dagegen deutlich zurück.
 - Entsprechend der Vorgabe in der GDA E2-20 sind deshalb für eine realistische Restinfiltrationsabschätzung die rechnerischen Durchflüsse für $h = 0$ bzw. $i = 1$ von den Gesamtdurchflussraten in Abzug zu bringen.
- Der Gradientenansatz $i = \frac{h+d}{d}$ bei der Durchströmung sehr gering durchlässiger fein- und gemischtkörniger Böden wird nicht nur eindeutig durch praktische Durchströmungsversuche im Labor widerlegt, sondern auch durch die Konsequenzen, die sich daraus für den praktischen Anwendungsfall ergeben würden.
- Mit der bisher auf diesem Rechenansatz fußenden RI-Rate von 212 m³/(ha · a) und einem für DKI-Deponien üblicherweise anzusetzenden Betrachtungszeitraum von mindestens 100 Jahren würde sich für die Gesamtfläche ein Gesamt-RI-Volumen von ca. 1,4 Mio m³ mit einer geschätzten Salzfracht von ca. 400.000 t ergeben.
- Die tatsächlichen Leistungsdaten des in Hattorf umgesetzten Abdichtungskonzeptes (s. Abschn. 3.3 und Anl. 1) stehen in erheblichem Widerspruch zu diesen Rechenwerten, die eigentlich eine Bewertung als qualifizierte Dichtung ausschließen.
- Da die RI von mehreren Einzelparametern abhängt, führt eine ausschließlich ungünstige Abschätzung dieser Parameter zu einem Gesamtergebnis, das die Qualität des bisher eingesetzten, extrem aufwendigen Material- und Einbaukonzeptes nicht realistisch beschreibt.

Dr.-Ing. M. Nendza

Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann



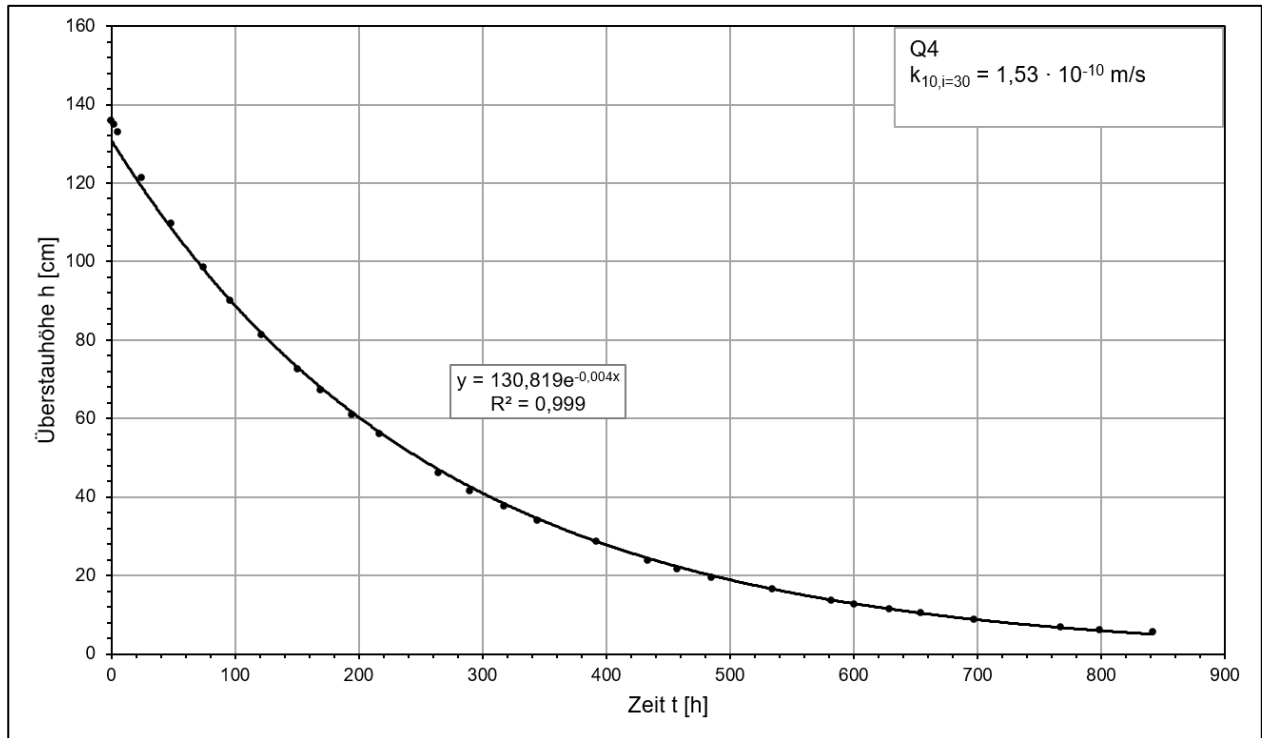
Anlagen:

- 1 Zusammenstellung von k-Werten aus der Projektphase und ergänzenden Eignungsprüfungen
- 2 Probe Q4 (Untere Lage Hattorf)
 - 2.1 Fallende Druckhöhe, Absenkkurve $h = f(t)$
 - 2.2 Ein- und Auslauf-Summenlinie, $Q_E, Q_A = f(t)$
 - 2.3 Entwicklung des Gradienten $i = f(t)$ für unterschiedliche Definitionen des Gradienten
 - 2.4 Filtergeschwindigkeit $v = f(i)$
- 3 Dichtwandmasse (DWM) und Ton (T)
 - 3.1.1 Standard-Triaxialversuch DWM ($i = 30$)
 - 3.1.2 Standard-Triaxialversuch Ton ($i = 30$)
 - 3.2 Fallende Druckhöhe, Absenkkurve $h = f(t)$ mit Abschätzung des Anfangsgradienten i_0 und der Restüberstauhöhe h_0
- 4 Mischbodenkonzept Zielitz (u_{pi})
 - 4.1 k-Wert- und Durchflussentwicklung vor und nach Umstellung auf einen Gradienten $i = 5$
- 5 Untersuchung ungestört entnommener Tonproben aus einem Versuchsfeld ($A = 1000 \text{ m}^2$) der Deponie Geldern Pont
 - 5.1 Filtergeschwindigkeit $v = f(i)$ – Gesamtauswertung Normalproben ($\varnothing = 12 \text{ cm}$, $h = 12 \text{ cm}$)
 - 5.2 Filtergeschwindigkeit $v = f(i)$ – Gesamtauswertung Großproben ($\varnothing = 25 \text{ cm}$, $h = 22 \text{ cm}$)

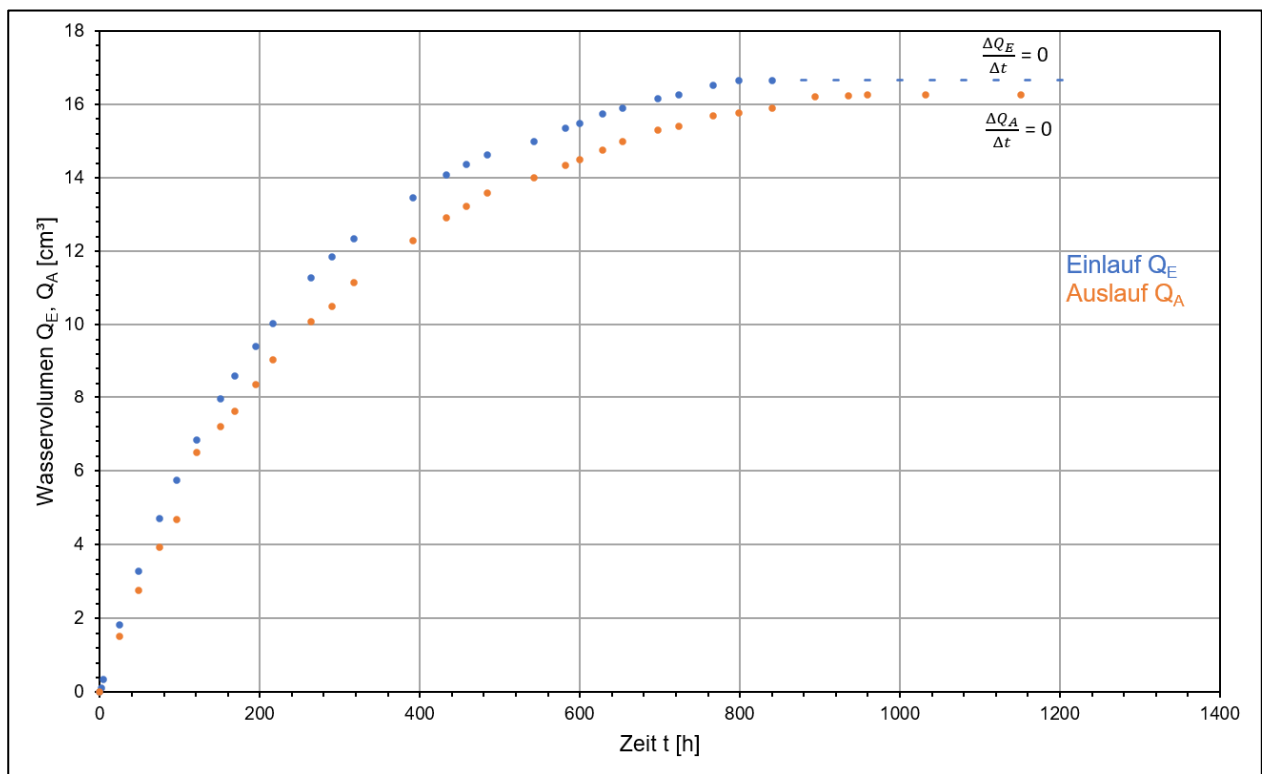
Anlage 1: k_{10} -Werte (Obere und Untere Lage) für den Standardgradienten $i = 30$

Statistische Kenngröße	Dimension	Material (EU + FP)			
		Obere Lage		Untere Lage	
		QMP (GGU)	GBD ^{*)}	QMP	GBD ^{*)}
Probenzahl n	1	n = 50	12	263	7
arithm. Mittel \bar{x}	m/s	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,36 \cdot 10^{-10}$
geom. Mittel \tilde{x}	m/s	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$1,45 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-10}$
Standardabweichung s	m/s	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$0,7 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$
Variationskoeffizient $v = s / \bar{x} \cdot 100$	%	42,7	23,3	59,5	12,5
Spannweite R	m/s	$1 \cdot 10^{-9} - 9,8 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-10} - 4,0 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10} - 3,1 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-10} - 1,6 \cdot 10^{-10}$

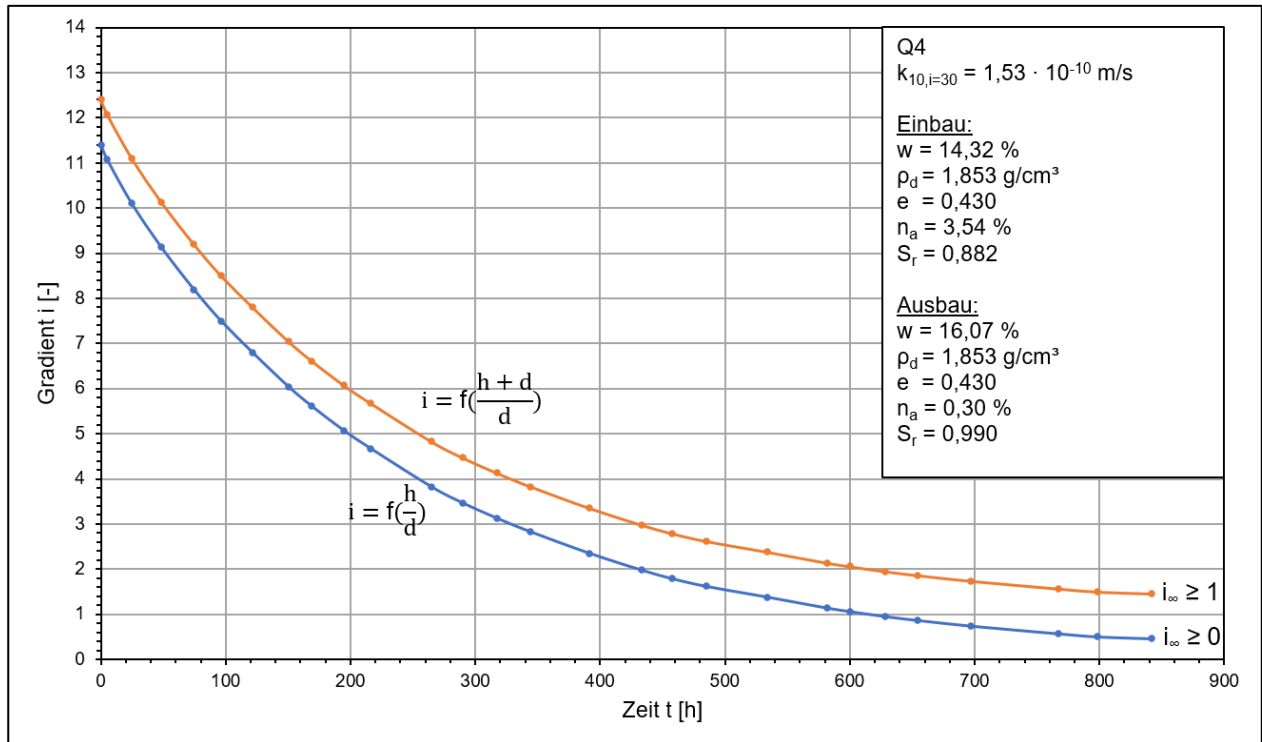
^{*)} Proben mit Einbauwassergehalten $w > w_{Pr}$



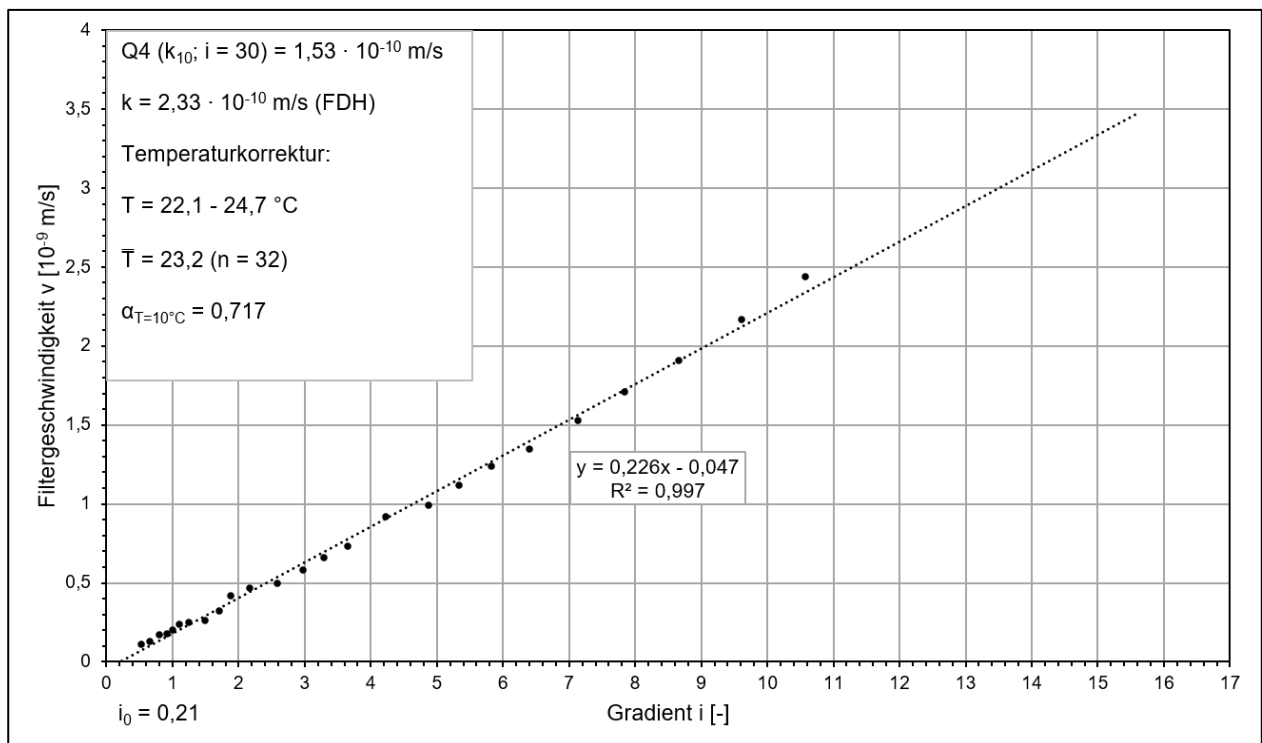
Anl. 2.1: Probe Q4 (untere Lage Hattorf) – Fallende Druckhöhe, Absenkkurve $h = f(t)$



Anl. 2.2: Probe Q4 (untere Lage Hattorf) - Ein- und Auslauf-Summenlinie, $Q_E, Q_A = f(t)$



Anl. 2.3: Probe Q4 (untere Lage Hattorf) - Entwicklung des Gradienten $i = f(t)$ für unterschiedliche Definitionen des Gradienten



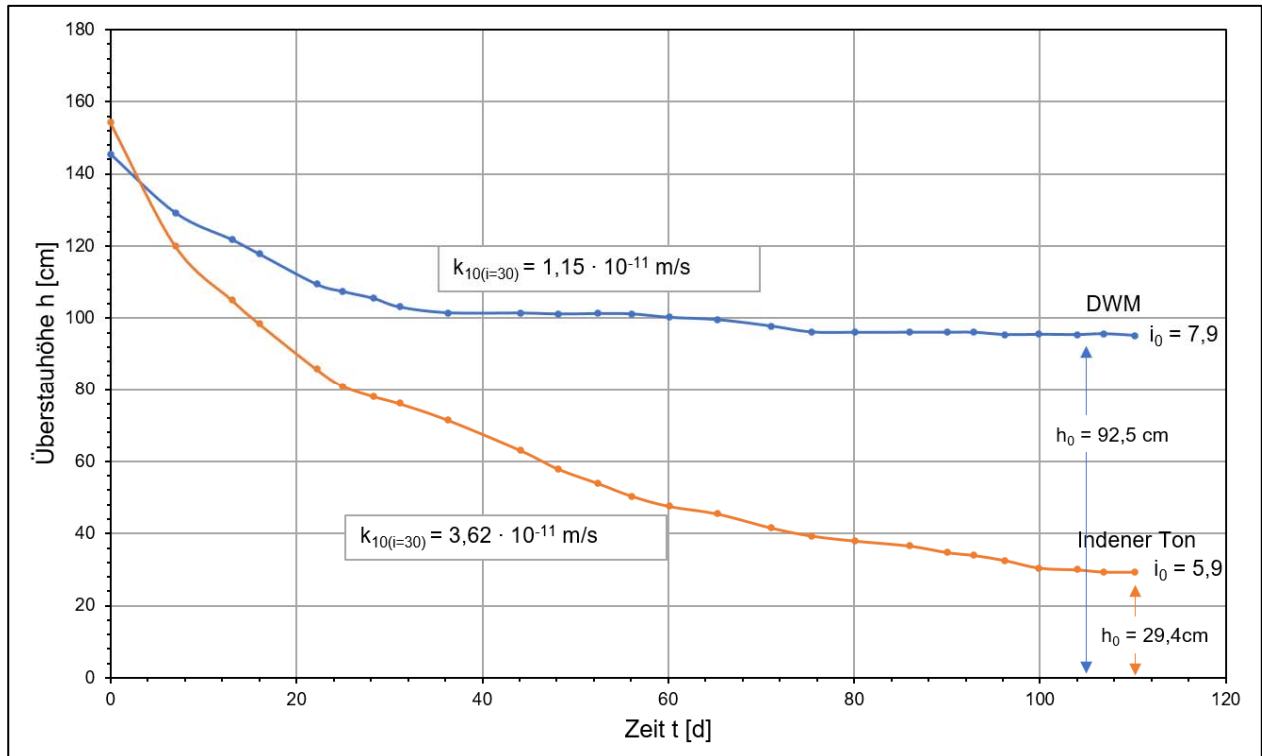
Anl. 2.4: Probe Q4 (untere Lage Hattorf) - Filtergeschwindigkeit $v = f(i)$

(DIN 18 130 TX - DE - MZ - SB)

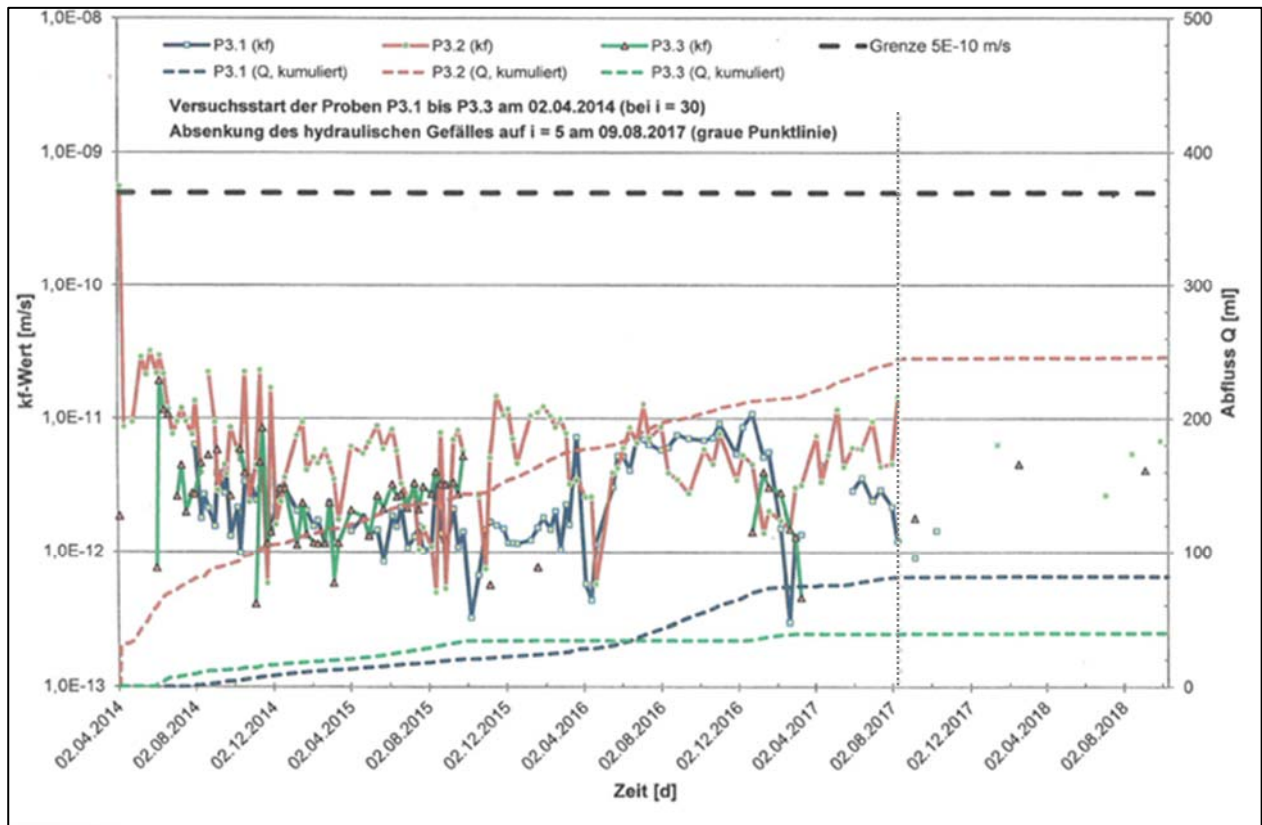
Der Prüfbericht darf nur ungekürzt und mit Genehmigung der Geotechnischen Prüfstelle Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH an Dritte weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

(DIN 18 130 TX - DE - MZ - SB)

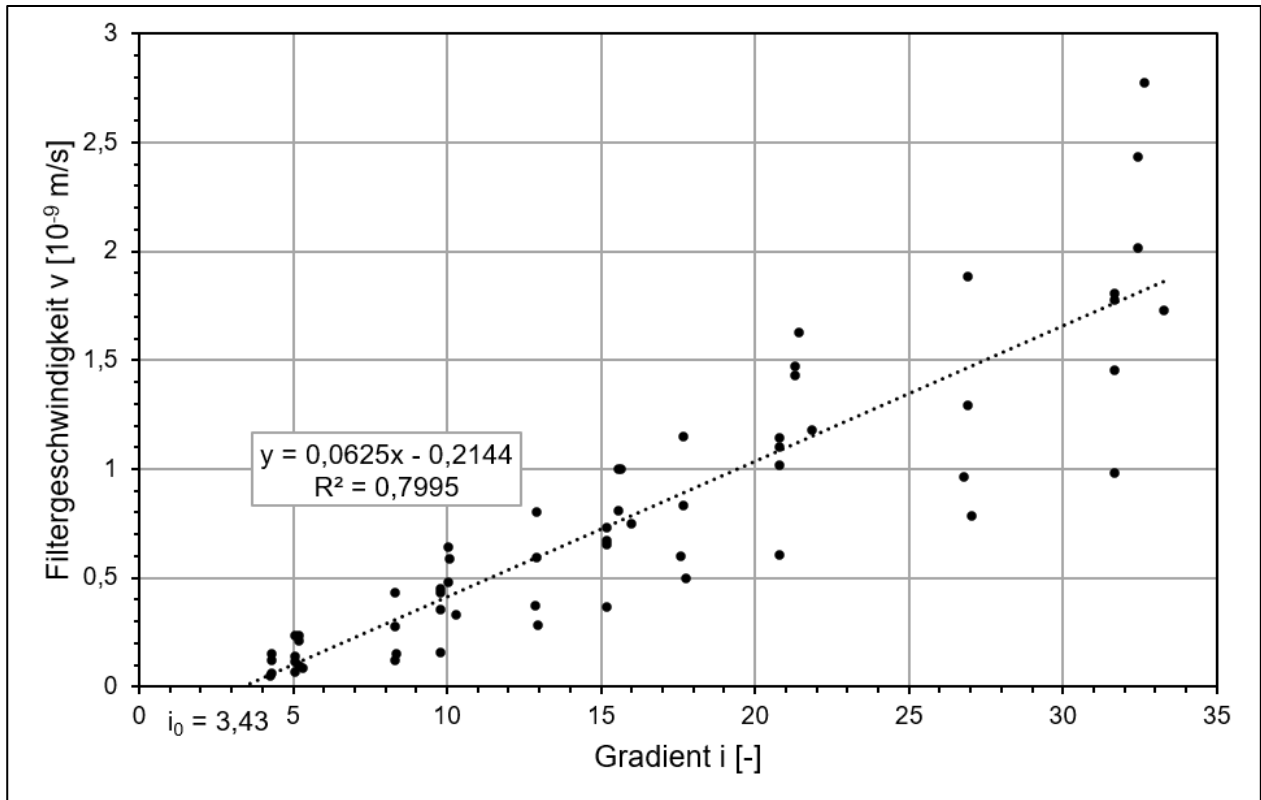
Der Prüfbericht darf nur ungekürzt und mit Genehmigung der Geotechnischen Prüfstelle Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH an Dritte weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.



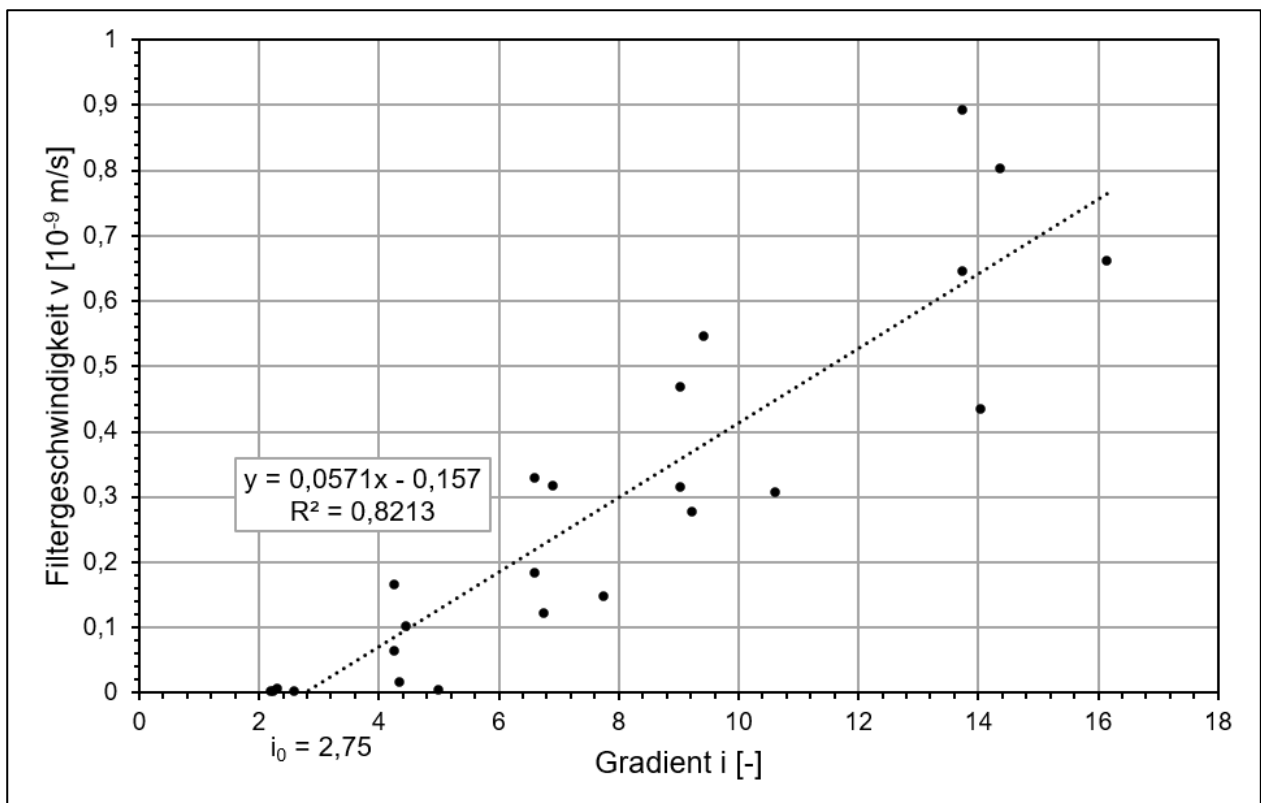
Anl. 3.2: Dichtwandmasse (DWM) und Indener Ton – Fallende Druckhöhe, Absenkkurve $h = f(t)$ mit Abschätzung des Anfangsgradienten i_0 und der Restüberstauhöhe h_0



Anl. 4.1: Mischbodenkonzept Zielitz (upi) – k-Wert- und Durchflussentwicklung vor und nach Umstellung auf einen Gradienten $i = 5$



Anl. 5.1: Filtergeschwindigkeit $v = f(i)$ – Gesamtauswertung Normalproben – Ton-Testfeld Geldern Pont ($n = 12$)



Anl. 5.2: Filtergeschwindigkeit $v = f(i)$ – Gesamtauswertung Großproben – Ton-Testfeld Geldern Pont ($n = 5$)