

E 2-38 Tonmineralogisch orientierte Kombination in Basisabdichtungssystemen

April 2017

1 Allgemeines

Bei der Herstellung von Abdichtungssystemen für sind tonhaltige Erdstoffe von entscheidender Bedeutung, sei es als Baustoff für eine mineralische Abdichtung, als natürlich anstehende geologische Barriere oder als Baustoff für Herstellung des Ersatzes einer geologischen Barriere. Der mineralischen Deponiebasisabdichtung wird vor allem eine abdichtende Funktion zugeordnet, während das geforderte hohe Schadstoffrückhaltevermögen in der bis zu mehrere Meter mächtigen geologischen oder technisch nachgebesserten Barriere lokalisiert ist. Vor allem bei Sonderabfalldeponien ist für die Basisabdichtung außer der Forderung nach geringsten Durchlässigkeiten auch die Schadstoffrückhaltung wichtig.

Zu deponierende Abfälle und Standorte unterliegen grundsätzlich den Anforderungen der Deponieverordnung (DepV 2009). Alle nachfolgenden Ausführungen beziehen sich somit auf Einzelfälle, für die eine besondere Ausgestaltung der mineralischen Basisabdichtung erforderlich erscheint.

Je nach örtlicher Gegebenheit kann es erforderlich sein, die mineralische Abdichtungskomponente der Basisabdichtung zu modifizieren bzw. zusätzliche Anforderungen an die mineralische Abdichtungskomponente zu stellen und deshalb eine tonmineralogisch orientierte Kombination im Basisabdichtungssystem vorzusehen. Diese modifizierten Abdichtungssysteme bieten sich dort an, wo

- die geologische Barriere eine ungenügende Schadstoffrückhaltung aufweist,
- Ablagerungen mit (im gemäß DepV zulässigen Rahmen) besonders hohem Gehalt an Schwermetallen und/oder unpolaren organischen Schadstoffen einen über das normale Maß hinausgehenden Schadstoffaustrag erwarten lassen bzw. starke Säuren über einen längeren Zeitraum die Tonminerale schädigen könnten,
- große Mengen natürlicher Materialien für den Bau der Kompensations-schichten (Ersatz bzw. Ergänzung der natürlichen geologischen Barriere) bzw. der mineralischen Abdichtung fehlen,
- das Kapillarwasser im Deponieauflager zur Erhaltung der Feuchte in der mineralischen Basisabdichtung fehlt und damit eine Austrocknung der Basisabdichtung zu befürchten ist,
- ungleiche Setzungen erwartet werden,
- steile Böschungen im Planum größere Reibungswinkel des mineralischen Dichtbaustoffs erforderlich machen,

- mineralische Abdichtungen längere Zeit den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind.

2 Anforderungen

Um die in E 2-3 aufgeführte Wirkung der Systemkomponenten eines kombinierten Basisabdichtungssystems entfalten zu können, ist das mineralische Abdichtungsmaterial so zu wählen, dass u.a. nachstehende Bedingungen erfüllt sind:

- Wasserdurchlässigkeit $k_f \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s,
- geringe Rissanfälligkeit,
- Widerstandsfähigkeit gegen hydraulische Einwirkungen (Suffosion und Erosion),
- ausreichendes Verformungsvermögen,
- Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Einwirkungen sowie Witterungseinflüssen und alterungsbedingten nachteiligen Materialveränderungen.

Zum Erreichen der o.g. Anforderungen wird empfohlen, folgende Kriterien einzuhalten:

- Anteil an Feinstkorn $< 2 \mu\text{m}$ mindestens 20 Gew.-%,
- Tonmineralanteil mindestens 10 Gew.-%,
- organische Substanz ≤ 5 Gew.-%,
- Karbonatanteil ≤ 15 Masse-%.

Der Anteil und die Art an Tonmineralien sind auf das im Einzelfall erforderliche Adsorptionsvermögen abzustimmen.

3 Tonhaltige Baustoffe für Abdichtungen: Zusammensetzung, Eigenschaften und Wirkungsweise

3.1 Zusammensetzung

Tone sind unverfestigte, sehr feinkörnige Sedimentgesteine aus Tonmineralen und sonstigen Verwitterungsresten (z.B. Quarz, Feldspat, Glimmer) sowie Mineraleubildungen (Karbonate u. a.). Der Begriff „Ton“ ist eine reine Korngrößenbezeichnung, die nichts über Art und Anteil der Tonminerale bzw. der NebenkompONENTEN aussagt.

Tonvorkommen entstehen durch in-situ-Verwitterung silikatischer Gesteine bzw. feinkörniger Ausgangsgesteine wie Tonschiefer und Tonstein sowie durch Umlagerung und Sedimentation feinkörniger Sedimente. Für die mineralische Basisabdichtung kommen als natürliche Erdstoffe in erster Linie Ton und schluffiger Ton der Bodengruppen TA und TM (DIN 18196) in Betracht. Aber außer natürlich anstehenden Tonen („Naturton“) können auch künstlich gemischte und homo-

genisierte Tone sowie gemischtkörnige Abdichtungen mit unterschiedlichen Tonmehlen Verwendung finden. Gemischtkörnige Materialien mit ungleichförmiger, kontinuierlich verlaufender Korngrößenverteilung sind geeignet, sofern sie ausreichend Feinkorn (Schluff und Ton) aufweisen, um die Porenzwickel auszufüllen. Durch Zugabe von Tonmehl zu dafür geeigneten mittel- bis grobkörnigen Materialzusammensetzungen können Dichtbaustoffe mit niedrigem Porenvolumen hergestellt werden.

3.2 Eigenschaften und Wirkungsweisen

Tone bilden hydraulische und chemische Barrieren. Die mit tonigen Dichtbaustoffen zu erzielende hohe Dichtwirkung basiert auf der gemeinsamen Wirkung der Korngrößenverteilung, der hohen mechanischen Verdichtung und auch auf dem Quellvermögen der Tonminerale (siehe E 3-1 und E 3-3). Hierbei ist zu unterscheiden:

- die intrakristalline Quellung durch Hydratation der austauschbaren Kationen, besonders ausgeprägt bei Montmorillonit,
- die osmotische Quellung, die auf den großen Unterschied der Ionenkonzentration (vor allem Kationenkonzentration) an der Tonmineraloberfläche und in der Porenlösung zurückzuführen ist.

Die Quellvorgänge bewirken eine Reduzierung des nutzbaren Porenraumes und führen somit zu einer Verringerung der Wasserdurchlässigkeit. Quellverhalten, aber insbesondere auch Plastizität und Scherverhalten ändern sich u. U. durch Kationenaustausch.

Umgekehrt können Schrumpfprozesse durch Wasserabgabe bzw. Mineralneubildungen, vor allem bei hoch-quellfähigen Tonabdichtungsmaterialien (z.B. Montmorillonit), zu Schäden an der mineralischen Abdichtung führen.

Die Advektion wird in der Regel durch Verdichtung und Quellung so weit reduziert, dass nur noch der diffusive Stofftransport eine maßgebliche Rolle für den Schadstofftransport in der Tondichtung spielt.

Die Diffusion basiert auf Konzentrationsunterschieden, wobei Wechselwirkungen zwischen Sickerwasser und Tonmineraloberflächen die Mobilität der Schadstoffe und damit das Maß der Transportverzögerung (Retardation) und der Rückhaltung (Retention) beeinflussen.

Diese so genannte Schadstoffrückhaltung ist auf mehrere Prozesse während des Schadstofftransports in der mineralischen Abdichtungskomponente zurückzuführen:

- Sorption,
- Fällung und Pufferung,
- Mineralneubildung,
- Filterwirkung.

Die Sorption beinhaltet je nach pH-Wert des Mediums Adsorptions- und Desorptionsvorgänge. Adsorbierte Schadstoffe können bei einer Veränderung des Milieus und der Sickerwasserzusammensetzung wieder in Lösung gehen. Vor allem die Adsorption von Metallionen (Kationenaustausch) an Tonmineralen ist maßgebend für die Schadstoffrückhaltung. Qualität und Quantität des Austausches werden bestimmt durch den Ionenradius, die Valenz, den pH-Wert der Lösung bzw. des Abdichtungsmaterials und die Art des Tonminerals. Die als Kationenaustauschkapazität (KAK) bezeichnete Summe der austauschbaren Kationen (LAGALY, 1992, DOHRMANN, 1996 und HEIMERL, 1998) ist vor allem bei smectitischen Tonen hoch, während die Kaolinite aufgrund ihrer geringen spezifischen Oberfläche und ihrer ausgeglichenen Ladung nur einen niedrigen KAK-Wert aufweisen und somit über ein geringeres Schadstoffrückhaltepotential verfügen.

Bei Überschreiten des Löslichkeitsprodukts kommt es zur Ausfällung von Schwermetallverbindungen. Auch das Verschieben des pH-Werts vom sauren in den alkalischen Bereich führt zur Ausfällung von z. B. Hydroxiden. Diese Mineralneubildungen können zum einen trotz ständiger Lösungsbedeckung zu Schwindrissen in der Tondichtung führen, andererseits aber auch Poren in der Abdichtung verschließen.

Tone mit in der Matrix fein verteiltem Karbonat sind in der Lage, als Reaktionsschicht saure Sickerwässer zu puffern und damit die Austauschvorgänge und Mineralneubildungen günstig zu beeinflussen.

Untergeordnet können auch Schwermetallionen aus schwermetallhaltigen Sickerwasserwässern in das Kristallgitter von Tonmineralen „eingebaut“ werden. Diese Verlagerung und Festlegung einzelner Schwermetalle ist irreversibel. Tonige Dichtbaustoffe weisen zudem eine hohe Membranfiltrationswirkung auf. Die Dichtwirkung und Schadstoffrückhaltung hängen von der Homogenität der Abdichtungslagen ab.

Weitere Ausführungen zu Tonen und Tonmineralen im Deponiebau finden sich z. B. in KOHLER (1993) und in HILTMANN & STRIBRNY (1998).

4 Deponiespezifische Eigenschaften unterschiedlicher Tonminerale

Aufgrund der nachfolgend genannten Eigenschaften werden in der Praxis vorwiegend tonige Dichtbaustoffe für Deponiebasisabdichtungen gewählt:

- hohe hydraulische Dichtwirkung,
- hohe Plastizität,
- hohes Quellvermögen bei quellfähigen Tonen,
- Rückhaltung und Transportverzögerung von Schadstoffen (Schadstoffrückhaltepotenzial),

- chemische Schadstoffresistenz vor allem bei nicht-quellfähigen Tonen.

Die vorgenannten Eigenschaften werden von der Art und Menge der im Dichtbaustoff enthaltenen Tonminerale beeinflusst. Nicht alle Tonminerale tragen in gleichem Umfang zu all diesen Eigenschaften bei.

Hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten für Deponieabdichtungen können die tonigen Dichtbaustoffe in zwei Gruppen mit unterschiedlichen Tonmineraltypen unterteilt werden:

Materialien mit einem hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen (z. B. Montmorillonit)

Sie weisen folgende deponiespezifische Eigenschaften auf: Hohes Schadstoffrückhaltevermögen, ausgeprägte Quell- und Schrumpfmehanismen, relativ geringe chemische Beständigkeit.

Die Porenraumversiegelung dieser Dichtbaustoffe ist als

- optimal bei anorganischen Sickerwasserbestandteilen bzw.
- relativ unsicher bei organischen Sickerwasserbestandteilen (da Reduzierung der Quellfähigkeit)

zu bezeichnen.

Materialien mit geringer Quellfähigkeit (z. B. kaolinitische und illitische Tonminerale)

Sie besitzen eine relativ hohe chemische Beständigkeit und sind weniger anfällig für Quell- und Schrumpfmehanismen. Aber sie verfügen über ein relativ geringes Schadstoffrückhaltevermögen.

Die Porenraumversiegelung ist optimal bei anorganischen und organischen Sickerwasserbestandteilen (Voraussetzung: Dichtestpackung).

Nur der getrennte Einbau verschiedenartiger Tonschichten erfüllt die Anforderungen an mineralische Basisabdichtungen optimal. Eine Vermischung zweier Dichtbaustoffe aus den beiden zuvor genannten Gruppen ist weniger wirksam, da das Mischprodukt die zuvor genannten Eigenschaften nur zum Teil aufweist.

5 Mineralische Basisabdichtungen mit unterschiedlichem Schichtaufbau

5.1 Übersicht

Nachfolgend werden mineralische Basisabdichtungen vorgestellt, die unterschiedliche Vergütungs- und Reaktionsmaterialien bzw. Tonminerale enthalten und

vor allem aufgrund der unterschiedlichen Anordnung einzelner Schichten verschiedene Eigenschaften besitzen. Die Mindestschichtdicke für mineralische Abdichtungskomponenten beträgt 0,50 m. Die Schichten sollten aus einzelnen Lagen mit jeweils 0,25 m Mächtigkeit bestehen.

Drei prinzipielle Systeme mit unterschiedlichen Anordnungen der einzelnen Schichten lassen sich unterscheiden:

- Verschiedene bentonitische Adsorptionsschichten übereinander (Ca-Bentonit über Na-Bentonit, evtl. dazwischen organophillierter Bentonit),
- kaolinitische bzw. illitische Abdichtungsschicht über bentonitischer Adsorptionsschicht,
- bentonitische Adsorptionsschicht über kaolinitischer bzw. illitischer Abdichtungsschicht.

Darüber hinaus gibt es einzelfallspezifische Varianten und Ergänzungen mit Additiven. Die nachstehend beschriebenen Systeme sind z. T. in der Praxis und in Testfeldern erprobt, einige basieren ausschließlich auf theoretischen Überlegungen.

Die wesentlichen Entscheidungskriterien für die Wahl der Abdichtungskomponenten sind Schadstoffresistenz, Schadstoffrückhaltevermögen und Austrocknungsverhalten. Die Anforderungen an die Dichtigkeit (advektiver und diffusiver Wasser- und Stofftransport) müssen in allen Fällen erfüllt sein.

Bei der Anordnung unterschiedlicher Abdichtungsschichten sowie der Verwendung der nachgenannten Vergütungsmaterialien ist zu beachten, dass u.U. Patentrechte zu berücksichtigen sind (s. Abschnitt 9).

5.2 „Ca-Bentonit über Na-Bentonit, evtl. in Kombination mit organophilliertem Bentonit“

Dieses von WEISS (1988) konzipierte System sieht die Anordnung einer Ca-Bentonitschicht über Na-Bentonit vor, um insbesondere den Schwermetallaustrag zu minimieren. Die sehr kleinen Tonteilchen des Montmorillonits könnten auch Mikrokapillaren des Untergrundes schließen. Bei organischen Sickerwässern sollte eine Lage organophillierten Bentonits über der Na-Bentonit-Lage eingebaut werden. Damit besteht die Möglichkeit, sowohl organische Kationen durch Ionenaustausch zu binden als auch polare organische Verbindungen im Schichtzwischenraum des Montmorillonits zurückzuhalten.

Der Einbau einer "schadstoffresistenten" Abdichtungsschicht aus kaolinitischen bzw. illitischen Materialien ist bei diesem Prinzip nicht vorgesehen. Es ist nicht auszuschließen, dass die organischen Bestandteile der organophillierten Tone langfristig Alterungsprozessen unterliegen.

5.3 „Gering-quellfähige Tone über quellfähigen Tonen“

Das von KOHLER (1990) entwickelte System wurde in verschiedenen Variationen bereits in mehreren Deponien eingebaut (z.B. in der Deponie Erbenschwang/Bayern, Blockland/Bremen und in zahlreichen Deponien in Rheinland-Pfalz). Es besteht aus einer chemisch stabilen meist kaolinitischen oder kaolinitisch-illitischen Abdichtungsschicht mit langfristig geringen Wasserdurchlässigkeiten über einer stark adsorbierenden Schicht aus Bentonit (reich an Montmorillonit).

Um die chemisch sensiblere Bentonitabdichtung vor aggressiven Deponiesickerwässern zu schützen, wird diese stark adsorbierende Schicht im unteren Bereich der mehrfach-mineralischen Abdichtung eingebaut. Die im möglichen direkten Kontakt zum Deponiesickerwasser angeordnete Schicht aus hochverdichtetem "schadstoffresistenten" Kaolinit und Illit soll in erster Linie advektiven Schadstofftransport unterbinden, so dass die bentonitische Schicht vollkommen für die Aufnahme der diffusiv transportierten Schadstoffe zur Verfügung steht und nicht bereits durch Sickerwasserkontakt mit Schadstoffen belastet wird.

Darüber hinaus sind Vergütungen einzelner Lagen (z.B. mit Silikat-Hydrogel) möglich (siehe Kap. 5.5). Auch eine zusätzlich über der kaolinitischen bzw. illitischen Schicht angeordnete, aus Bentoniten bestehende "Zehrschicht" ist denkbar, um die Schadstoffe vor dem Auftreffen auf das eigentliche Abdichtungssystem durch Adsorption abzufangen.

5.4 „Quellfähige Tone über gering-quellfähigen Tonen“

Das auch als Karlsruher Deponiekonzept bezeichnete Abdichtungssystem von WAGNER (1991) sieht eine Kombination aus zwei verschiedenen Abdichtungsschichten vor. Die obere „aktive“ Schicht aus Bentonit übernimmt hierbei die Sorptionsaufgabe und soll bereits beim ersten Sickerwasserkontakt dank des starken Quellvermögens ihre hohe Dichtwirkung entfalten. Die unterlagernde "inaktive" Schicht aus Kaolinit gewährleistet eine langfristig geringe Wasserdurchlässigkeit. Sofern die Sorptionskapazität der "aktiven" Schicht ausreichend bemessen ist, trifft auf das untere Element der Basisabdichtung nur noch ein weitgehend durch Fällung und Sorption in der „aktiven“ Schicht schadstoffreduziertes Sickerwasser.

Von WAGNER (1991) wird empfohlen, die "aktive" Schicht in eine obere Na-Bentonit-Einheit und in eine untere Ca-Bentonit-Einheit zu differenzieren. Der Na-Bentonit besitzt gegenüber dem Ca-Bentonit ein höheres Quellvermögen, das aber bei Zutritt von mehrwertigen und organischen Kationen durch Mineralumbildungsvorgänge wieder verloren geht und bei zu geringer Überlagerung zu höheren Durchlässigkeiten führen könnte. Der Ca-Bentonit besitzt zwar ein geringeres Quell- und Adsorptionsvermögen, ist aber gegenüber Sickerwässern beständiger.

Für die Anwendung dieses Systems wären Kenntnisse über die zu erwartende Art und Menge der aus dem Abfallkörper austretenden Schadstoffe erforderlich.

5.5 Sonstige Systeme

Die vorgenannten Abdichtungssysteme aus gering-quellfähigen und hochquellfähigen Tonen lassen sich variieren und durch einzelne Lagen mit ausgewählten Additiven ergänzen. Einige Varianten sind nachfolgend aufgeführt.

Dreifach-Barriere

Ziel dieses von CZURDA (1994) vorgestellten Abdichtungssystems ist insbesondere die Rückhaltung von unpolaren organischen Verbindungen des Sickerwassers. Hierzu wird über einer kaolinitischen „Dicht“-Schicht eine Ca-Bentonit-Schicht zur Erhöhung der Sorptionskapazität und darüber eine Schicht mit organophilisiertem Bentonit eingebaut. Dieser besitzt dank dem Austausch von metallischen Gegenionen an den Tonmineraloberflächen des Zwischenschichttraums durch langkettige organische Kationen nicht nur hydrophobe Eigenschaften, sondern kann auch organische Verbindungen wie LCKW und Phenole in den Tonmineral-zwischenschichträumen adsorbieren.

Die Langzeitstabilität der organophilisierten Tone wird allerdings in Frage gestellt.

Mehrfachmineralische Abdichtung mit Silikat-Hydrogel

Dieses Abdichtungskonzept besteht aus den natürlichen Rohstoffen Ton und Sand sowie Wasserglaslösung und Gelbildner als Additiv. Es eignet sich für Standorte mit ungenügender geologischer Barriere und ist in Steillagen, wo keine ausreichende Standsicherheit für Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) gegeben ist, als Alternative zur KDB denkbar.

Die Basisabdichtung kann wie folgt aufgebaut sein (von oben nach unten):

- Abdichtungsschicht aus kaolinitischem bzw. illitischem Ton,
- Zwischenlage aus Kies, Sand, kaolinitischem Tonmehl und einem Gel aus Wasser, chemischen Zuschlagstoffen (Dynagrout DWR-A und Dynagrout DWR- B) sowie Wasserglas,
- Abdichtungsschicht aus montmorillonitischem Ton mit hohem Schadstoff-rückhaltevermögen.

Das Silikat-Hydrogel verringert die Wasserdurchlässigkeit und bietet höchste Stabilität gegenüber Sickerwasser bei gleichzeitiger Erhaltung der Plastizität und Pufferfähigkeit. Die Gel-Füllung der Sedimentporen verringert nicht nur den advektiven Wassertransport, sondern verlangsamt auch die Diffusionsprozesse. Durch das alkalische Milieu im Silikat-Hydrogel werden Schwermetalle des diffundierten Sickerwassers als Hydroxide gefällt und immobilisiert.

Mehrfachmineralische Abdichtung mit Trockenmineralgemisch

Das nach dem Schlupfkornprinzip aufgebaute Trockenmineralgemisch verwendet eine Grobkies/Sand/Ton-Mischung, die in einer Zwangsmischanlage gemischt und im Trockeneinbau bei einer Restfeuchte von $w < 2 \%$ eingebaut wird. Das dabei entstehende Gefüge gewährleistet, dass das gröbere Korn jeweils in der nächst feineren Fraktion schwimmt, womit eine optimale Verdichtung auf $2,05 - 2,20 \text{ g/cm}^3$ ermöglicht wird. Dies entspricht einem Porenanteil von nur $17 - 23 \%$. Mit Hilfe von

Na-Bentonit soll zusätzlich zur Minimierung der Transportmechanismen Diffusion und Advektion ein hoher Grad an Sorptionsvermögen gegenüber Schadstoffen erreicht werden. Bei Sickerwasserzutritt erhöht sich infolge des Quellvorgangs der Anteil an Feinstporen auf Kosten der Grobporen und der Anteil der wasserwegsamem Poren wird reduziert.

Folgende Vorteile werden dem Gemisch zugeschrieben:

- Sehr geringer Porenraum und hohe Verdichtbarkeit,
- niedrige Diffusionskoeffizienten,
- hohe Sorptionsfähigkeit und -kapazität,
- niedriger Wasserdurchlässigkeitsbeiwert ($k_f < 5 \cdot 10^{-11}$ m/s),
- problemlose Herstellung im mixed-in-plant-Verfahren,
- homogene Materialeigenschaften,
- schneller und unkomplizierter Einbau,
- sehr geringes Schrumpfen,
- Frostunempfindlichkeit,
- sehr gutes Verformungsverhalten,
- einfache und effektive Qualitätssicherung.

Problematisch während des Einbaus ist die starke Abhängigkeit von der Witterung, um die geringe Restfeuchte zu gewährleisten, sowie die hohe Staubbelastung.

Abdichtungssystem mit zusätzlicher schrumpfarmer Schicht an der Basis

Besteht das Deponieauflager aus grobkörnigen Sedimenten oder klüftigem Festgestein, so ist in der Regel die Austrocknung der mineralischen Abdichtung infolge fehlender Kapillarwassernachlieferung zu befürchten. Dasselbe tritt ein, wenn unter der Basisabdichtung flächig eine kapillarbrechende Schicht („Flächendränage“) angeordnet wurde, um bei hohem Grundwasserstand eine Konsistenzänderung der Abdichtung zu vermeiden.

Bei diesen für den Einbau einer mineralischen Basisabdichtung sehr ungünstigen Standortvoraussetzungen sollten vor allem in der untersten Schicht gering-quellfähige Dichtbaustoffe mit geringerer Austrocknungsempfindlichkeit eingesetzt werden. Diese können aus kaolinitischen und illitischen Tonen bzw. gemischtkörnigen Materialien bestehen. Im Einzelfall kann an solchen Standorten folgende Anordnung angezeigt sein(von oben nach unten):

- Adsorptionsschicht aus montmorillonitischem Ton
- Schadstoffresistente kaolinitische bzw. illitische Abdichtungsschicht
- Kompensationsschicht für die nicht ausreichende geologische Barriere aus montmorillonitischem Material
- Schrumpfarme Schicht aus gering-quellfähigem kaolinitischem bzw. illitischem Material (evtl. gemischtkörnig).

5.6 Abdichtungen mit Reaktionsschichten

Mehrfachmineralisches System mit Karbonatanreicherung

TAUBALD (1995) empfiehlt bei besonders sauren Sickerwässern ein mehrlagiges Abdichtungssystem aus dichtenden und adsorbierenden Schichten, in denen in mindestens einer Lage homogen verteiltes Karbonat angereichert ist. Bei ausreichender Karbonatmenge werden saure, in die Abdichtung eindringende Deponiesickerwässer neutralisiert. Dies führt zu einer Verbesserung der Langzeitstabilität der Tonminerale. Das Karbonat sollte aus Calcit und Dolomit (Calcit-/Dolomit-Verhältnis: ca. 1:5 bis 4:5) bestehen, um ein abgestuftes Einsetzen der Pufferwirkung zu erzeugen, die Korngröße sollte im Bereich unter ca. 0,2 mm liegen. Für den Gesamtkarbonatgehalt dieser Schicht wird ein Bereich von 10 bis 40 % empfohlen.

Außer der Anreicherung von Abdichtungstonen mit Karbonatpulver ist auch der Einsatz natürlicher karbonatischer Tone möglich, wie er bereits im Einzelfall praktiziert wird.

Als weitere Vorteile karbonatischer Abdichtungstone sind zu nennen:

- Der Transport gelöster Schwermetalle wird im neutralen pH-Bereich verlangsamt bis verhindert.
- Durch die Wiederausfällung bereits gelöster Karbonatphasen kann es zu einer Zementierung offener Poren kommen. Gleichzeitig muss jedoch mit der Verringerung der Plastizität gerechnet werden.

Der Einbau der karbonathaltigen Schicht sollte allerdings nicht in der obersten Lage erfolgen, um den direkten Kontakt mit Deponiesickerwasser und damit das Ausfällen von gelöstem Karbonat in den Filterschichten zu vermeiden.

6 Hinweise zur Eignungsprüfung und Materialauswahl

Grundsätzlich ist E 3-1 "Eignungsprüfung mineralischer Oberflächen- und Basisabdichtungen" zu beachten. Auf E 3-3 wird hingewiesen. Einen Überblick über die tonmineralogischen Untersuchungsmethoden geben HILTMANN & STRIBRNY (1998).

Zusätzlich zu den bodenphysikalischen Untersuchungen sind auch biologische (z.B. bei Additiven etc.), chemisch-physikalische und mineralogische Untersuchungen des Abdichtungsmaterials erforderlich. Folgende Parameter sind im Rahmen der Eignungsuntersuchung zusätzlich zu den in der E 3-1 genannten zu ermitteln:

- Kationenaustauschkapazität (KAK)
- qualitative und quantitative Elementbestimmung (geochemische Analyse)
- qualitativer Mineralbestand (Pulveraufnahme)
- qualitativer Tonmineralbestand (Texturaufnahme)
- semiquantitativer Gesamtmineralbestand incl. Tonminerale
- Gehalt an quellfähigen Tonmineralen (z. B. Methylenblau-Versuch oder

Methode nach HEIMERL 1995).

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse ist nur dann möglich, wenn jeweils dieselben Untersuchungsmethoden verwendet wurden. Dies gilt insbesondere für die Bestimmung der KAK. Bei tonigen Abdichtungsmaterialien hat sich in der Praxis vor allem die DIN ISO 13536 zur KAK-Bestimmung bewährt. Sehr zuverlässig ist auch die Schnellmethode mit Cu-Komplexionen, die sogenannte Cu-trien-Methode nach MEIER & KAHR (1999). Sie kann auch anstelle der Methylenblau-Methode eingesetzt werden (KAUFHOLD & DOHRMANN, 2003). Im Einzelfall können Diffusionsversuche in Diffusionszellen insbesondere zur Dimensionierung der Adsorptionsschicht erforderlich sein.

Im Einzelfall können Diffusionsversuche in Diffusionszellen insbesondere zur Dimensionierung der Adsorptionsschicht erforderlich sein.

Nachfolgend werden einzelne Systemkomponenten aufgeführt.

6.1 Hoch-quellfähige Tone

Bei der Auswahl des hoch-quellfähigen Abdichtungsmaterials, das nach E 3-1 und E 3-5 zu verarbeiten ist, sind tonhaltige Erdstoffe mit überwiegend quellfähigem Mineralbestand (z. B. Montmorillonit) einzusetzen.

Die Höhe der Kationenaustauschkapazität ist abhängig von der angestrebten Funktion der tonmineralogisch orientierten Kombination im Basisabdichtungssystem und der dann gewählten Schichtmächtigkeit. MAIER-HARTH (1996) empfiehlt beispielsweise zur Verbesserung einer nicht ausreichend vorhandenen geologischen Barriere für eine 1 m mächtige Schicht einen KAK-Wert von mindestens 10 mmol(eq)/100 g.

Bei der Auswahl der Abdichtungsmaterialien ist zu berücksichtigen, dass Dichtbaustoffe mit einem hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen vor allem auf dem nassen Ast der Proctorkurve schwierig zu bearbeiten sind (Material klebt an den Walzen).

6.2 Gering-quellfähige Tone

Für die geringquellfähigen Tone sind ebenfalls E 3-1 und E 3-5 zu berücksichtigen. Hinzu kommen weitere Mindestanforderungen:

- maximal 5 % quellfähige Tonminerale,
- mindestens 95 % der Tonminerale aus Kaolinit und Illit bestehend,
- $KAK \leq 25 \text{ mmol(eq)/100 g}$.

6.3 Gemischtkörnige Dichtbaustoffe

Nachfolgend wird die Charakteristik von kornabgestuften Dichtbaustoffen wie z. B. Bentokies und Chemoton aufgeführt.

Bentokies

Aus Kies und Schluff/Ton wird in Zwangsmischern eine möglichst homogene Mischung nahe der Fullerkurve hergestellt. Der Tonanteil ($< 0,002$ mm) muss zwischen 5 und 10 % liegen, um k_f -Werte $\leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s zu erreichen. Bei niedrigerem Wassergehalt und geringem Anteil quellfähiger Tonminerale sinkt die Gefahr der Austrocknung. Die Bentokiesabdichtung zeigt eine hohe mechanische Belastbarkeit, die vor allem bei hoher Überlagerung und in steilen Böschungsbereichen von Vorteil ist.

Chemoton

Das Abdichtungsmaterial mit sehr hoher Chemikalienresistenz besteht aus weitgehend karbonatfreien (Kalkgehalt ≤ 15 Gew.-%), gemischtkörnigen Rohstoffen (Natursand, Edelbrechsand, Kies oder Edelsplit) und kaolinitischem Tonmehl. Die Mineralgemische GK32, GK16 oder GK8 müssen innerhalb des vorgegebenen Sieblinienbereichs liegen. Der Tonmehlgehalt sollte mindestens 12 % betragen, um einen k_f -Wert $< 1 \cdot 10^{-10}$ m/s zu erzielen. Die zusätzliche Vergütung mit Wasserglas oder Hydrosilikatgel verbessert die bodenmechanischen Kennwerte und chemische Resistenz der mineralischen Abdichtung. Gleichzeitig wird die Gefahr des Austrocknens und Gefrierens der Dichtschicht reduziert. Ein Verdichtungsgrad von mindestens 97 %, ein Luftporenanteil unter 5 % und eine Wasserdurchlässigkeit (bei $i = 30$) von maximal $5 \cdot 10^{-11}$ m/s ist zu erreichen.

6.4 Vergütungs- und Reaktionsmaterialien

Hydrosilikatgel

Ein abgestuftes Korngemisch (Fullerkurve) aus Kies, Sand und Tonen mit geringer Quelleigenschaft und hoher chemischer Stabilität (z. B. kaolinitisch-illitische Tone) wird im Zwangsmischer mit Hydrosilikatgel gemischt und anschließend wie gemischtkörniges Dichtmaterial verdichtet eingebaut. Die individuell abgestimmte Zusammensetzung der einzelnen Hydrosilikatgel-Komponenten (spezielle Phosphatlösung, Alkylalkoxysilan, Wasserglas und Wasser) bewirkt

- reduziertes Schrumpfen
- eine Verringerung der Durchlässigkeit durch Bildung eines engmaschigen Netzwerks im Porenraum
- Stabilität gegen Sickerwassereinfluss durch Bildung eines Alkylsilan-Überzugs über alle mineralischen Komponenten
- Veränderung der Kapillaraktivität durch Hydrophobierung
- Erhöhung der Kohäsion durch Entzug des freien Porenwassers.

Eine Zwischenlagerung des fertig gemischten Dichtbaustoffs von mehr als fünf Tagen sowie eine Austrocknung z.B. durch Sonneneinstrahlung ist zu vermeiden (DÜLLMANN, 1995).

7 Hinweise zum Einbau

Beim Einbau der Erdstoffe sind E 3-5 und E 5-2 "Qualitätssicherung für mineralische Oberflächen- und Basisabdichtungsschichten" zu berücksichtigen.

Aufgrund des getrennten Einbaus unterschiedlicher Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften ist auf folgendes zu achten:

- Die auf der Baustelle angelegten Depots für die einzelnen Dichtbaustoffe sind voneinander zu trennen. Es ist sicherzustellen, dass während des Betriebs keine Vermischung und Verwechslung erfolgen kann.
- Im Grenzbereich zweier unterschiedlicher Dichtschichten darf nicht bis in die bereits eingebaute Dichtlage hinein gefräst werden, um eine Durchmischung unterschiedlicher Dichtbaustoffe zu vermeiden. Zur besseren Verzahnung der einzelnen Lagen kann die Oberfläche der unteren Lage mit den Schaufelzähnen einer Planierraupe aufgeraut oder mit der Schaffußwalze profiliert werden.
- Sowohl bei der Verwendung von Tongemischen (z. B. aus verschiedenen Vorkommen) als auch beim Einbau vergüteter Dichtbaustoffe ist auf eine ausreichende Homogenisierung zu achten.
- Kaolinitische bzw. illitische Abdichtungslagen sind mit hoher Verdichtung (> 97 % Proctordichte) einzubauen, um eine größtmögliche Dichtestpackung (KÖHLER, 1990) und somit einen geringen Porenanteil und geringe K- Werte zu erzielen.

Die Qualitätssicherung ist prinzipiell wie bei herkömmlichen mineralischen Abdichtungen, z.B. aus Naturton, durchzuführen. Es ist jedoch zu beachten, dass vergütete mineralische Abdichtungen bei der K-Wert-Messung in Triaxialzellen lange Prüfzeiten benötigen, so dass alternative Prüfverfahren für die Freigabe einzelner Einbaufelder anzuwenden sind. Da es problematisch ist, aus gemischtkörnigen, fertig eingebauten Lagen mit Komponenten > Sandkorngroße ungestörte Proben für die Durchführung von Durchlässigkeitsversuchen zu entnehmen, sollten Proben aus dem laufenden Mischprozess im Labor entsprechend den im Feld erreichten Werten verdichtet und anschließend untersucht werden (DÜLLMANN, 1995).

Literatur

- CZURDA, K. A., 1990: Funktion geologischer und mineralischer Barrieren im Deponiebau. In: MAIER-HARTH, U. (Hrsg.): Multi-mineralische Basisabdichtungen. Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 27. Nov. 1990 in Bingen/Rhein.
- CZURDA, K. A., 1994: Multimineralische Abdichtung. In: BURKHARDT G. & EGGLOFFSTEIN, T. (Hrsg.): Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensicherung. Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 30, 1-22, Karlsruhe.

- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK, 1998: DIBT-Zulassung Nr. Z-68.12-2 vom 20.1.1998 (Stand April 2017: Zulassung ist nicht mehr beim DIBt verzeichnet)
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK, 1998: DIBT-Zulassung Nr. Z-68.12-7 vom 6.5.1998 (Stand April 2017: Zulassung ist nicht mehr beim DIBt verzeichnet)
- DOHRMANN, R., 1996: Kritischer Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der Kationenaustauschkapazität von geologischen Barrieregesteinen, Kompensationsschichten und mineralischen Deponiebasisabdichtungen. In: MAIER-HARTH, U. (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung. 3. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30. Mai 1996 in Bingen/Rhein.
- DÜLLMANN, H., 1995: Vergleichbarkeit von Kombinationsabdichtungssystemen mit wasser-glasvergüteten Dichtungssystemen mit und ohne aktive Rissbildung. Abschlussbericht über ein Fachgespräch am 7.9.1994 im MURL, Düsseldorf, 90 S., Aachen.
- Europäisches Patentamt, 1985: Patentblatt 85/19, Veröffentlichungsnummer: EP 0 139 838 B1, Paris.
- Europäisches Patentamt, 1991: Patentblatt 91/25, Veröffentlichungsnummer: EP 0 234 504 B1, Paris.
- Europäisches Patentamt, 1992: Patentblatt 92/49, Veröffentlichungsnummer: EP 0 292 941 B1, Paris.
- GÖSKE, J., 1999: Die mineralogisch-chemische Barriere. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Reihe B: Geologie, Paläontologie, Mineralogie, Beiheft 7, Halle (Saale).
- GRONEMEIER, K., 1990: Zur technischen Realisierung des Deponie-Basisabdichtungssystems „System Blockland“. In: MAIER-HARTH, U. (Hrsg.): Multi-mineralische Basisabdichtungen. Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 27. Nov. 1990 in Bingen/Rhein.
- HEIMERL, H., 1995: Methodenoptimierung zur Analyse der Schadstoffmobilität in tonigen Deponiedichtungsmaterialien. Diss. Univ. Regensburg, 135 S., Regensburg.
- HEIMERL, H., 1998: Physikalisch-chemische Verfahren: Kationenaustauschkapazität. In: HILTMANN, W. & B. STRIBRNY (Hrsg.): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 5: Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer-Verlag Heidelberg, 297 S.
- HILTMANN, W. & STRIBRNY, B. (Hrsg.), 1998: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 5: Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer-Verlag Heidelberg, 297 S.
- HITZE, R., 1990: Einsatz des Hydrosilikatgels „DynagROUT“ im Deponiebau. In: MAIER-HARTH, U. (Hrsg.): Multi-mineralische Basisabdichtungen. Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 27. Nov. 1990 in Bingen/Rhein.
- HORN, A., 1989: Mineralische Deponie-Flächendichtungen aus gemischtkörnigen Böden. Bautechnik, 66, Heft 9, 311-318, Berlin.
- KAUFHOLD, S. & R. DOHRMANN, R., 2003: Beyond the Methylene Blue method: Determination of the smectite content using the Cutriene method. Zeitschrift für Angewandte Geologie, 49, 13-17; Stuttgart.

- KOHLER, E., 1990: Beständigkeit von Tonmineralen. Die multimineralische Basisabdichtung. In: MAIER-HARTH, U. (Hrsg.): Multimineralische Basisabdichtungen. Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 27. Nov. 1990 in Bingen/Rhein.
- KOHLER, E., 1993: Tone und Tonminerale in der Umweltsicherung. In: JASMUND, K. & LAGALY, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone, Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- LAGALY, G., 1993: Reaktionen der Tonminerale. In: JASMUND, K. & LAGALY, G.: Tonminerale und Tone, Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- MAHLER, H., 1994: Dichtungssysteme für die Deponiebasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 46, Heft 1/2, 15 – 24.
- MAIER-HARTH, U., 1996: Bewertung und Ergänzung des „Deponieauflagers“ als Teil der „Geologischen Barriere“ – Auswahl geeigneter mineralischer Rohstoffe für Kompensations- und Dichtungsschichten. Müll und Abfall, 28, 100-109.
- MEIER, L.P. & G. KAHR, 1999: Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of Copper (II) ion with Triethylenetetramine and Tetraethylenepentamine. Clays and Clay Minerals, 47, 386–388; Aberdeen.
- TAUBALD, H., 1995: Neue geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen zur Karbonatlösung in mineralischen Deponieabdichtungen. Müll und Abfall, 5, 299-308.
- UPMEIER, M., 1996: Zeolithe und Aktivkohle als Sorptionsmedien in vergüteten mineralischen Abdichtungen. In: Burkhardt, G. & Egloffstein, Th. (Hrsg.): Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensicherung – Innovative, kostengünstige und gleichwertige Lösungen. Schr. Angew. Geol., 41, 8-1 – 8-24, Karlsruhe.
- WAGNER, J.-F., 1988: Mineralveränderungen bei der Migration von Schwermetalllösungen durch Tongesteine. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 4, 47-62, Karlsruhe.
- WAGNER, J.-F., 1991: Die doppelte mineralische Basisabdichtung – Ein Deponieabdichtungssystem mit zwei unterschiedlichen Funktionsweisen. Ber. 8. Tag. Ing.-Geol., 75-81, Berlin.
- WEISS, A., 1988: Über die Abdichtung von Mülldeponien mit Tonen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses organischer Bestandteile im Sickerwasser. Mitt. Inst. Grundbau u. Bodenmechanik ETH Zürich, 133, 77-90, Zürich.

Regelwerke

- DIN ISO 13536, 1997-04: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der potentiellen Kationenaustauschkapazität und der austauschbaren Kationen unter Verwendung einer bei pH = 8,1 gepufferten Bariumchloridlösung. Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- DIN 18196, 2011-05: Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag, Berlin/Köln
- DepV – Deponieverordnung (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 27. April 2009, BGBl. I S. 900, zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 4. März 2016 (BGBl. I S. 382)

Ansprechpartner Dr. B. Vielhaber
Berliner Stadtreinigung
beate.vielhaber@bsr.de

Maßgebliche Bearbeiter
Dr. U. Maier-Harth, Mainz
Dr. B. Vielhaber