

# Zkušenosti s dlouhodobě stabilizovaným snižováním konvekce plynů systémy krycích vrstev na příkladu těžebních hald

## Erfahrungen zur langzeitstabilen Minderung der Gaskonvektion in Abdecksystemen am Beispiel von Bergbauhalden

Christian Kunze, H. Schulz, René Baumert<sup>1</sup>

### Abstrakt

Krycí vrstvy skládek a těžebních hald vykazují z hlediska transportu plynů řadu společných rysů. V souvislosti se sanací reliktní těžby uranu v Sasku a v Durynsku hraje roli především transport radioaktivního plynu radonu (Rn-222) v tělesech hald. Autoři vyvinuli v uplynulých letech komplexní koncepční chápání systému, používané při dimenzování zakrývacích systémů.

V příspěvku je podán přehled o zásadních fyzikálních procesech, jakými jsou konvekce a difuze a o jejich relativním významu v celkové bilanci transportu plynu v tělesech skládky s a bez systémů zakrytí.

V příspěvku je přehledně shrnut význam různých parametrů materiálů na haldách a v krycích vrstvách, především s ohledem na konvekční transport plynu. Vzniká tak ucelený a praktický celkový obraz souhry jednotlivých procesů a pokynů pro minimalizaci transportu plynů.

### Kurzfassung

Oberflächenabdeckungen von Deponien und Bergbauhalden weisen hinsichtlich des Gastransports eine Reihe von Gemeinsamkeiten auf. Im Zusammenhang mit der Sanierung der Hinterlassenschaften des sächsischen und thüringischen Uranerzbergbaus spielt vor allem die Verringerung der Freisetzung des in den Haldenkörpern gebildeten radioaktiven Edelgases Radon (Rn-222) in die Außenatmosphäre eine entscheidende Rolle. Es wurde ein umfangreiches konzeptionelles Systemverständnis entwickelt, welches bei der Dimensionierung der Abdecksysteme Anwendung findet. Insbesondere wird in diesem Beitrag die Bedeutung der verschiedenen Materialparameter von Halden- und Abdeckmaterial im Hinblick auf den konvektiven Gastransport in übersichtlicher und zusammengefasster Form zusammengestellt.

---

<sup>1</sup> IAF-Radioökologie GmbH, Wilhelm-Rönsch-Str. 9, D-01454, Radeberg, kunze@iaf-dresden.de

## 1 Einleitung

Die Entwicklung der Eigenschaften von Deponieabdeckungen ist ein in der Literatur sowohl forschungsseitig als auch unter praktischen Gesichtspunkten seit vielen Jahren diskutiertes Gebiet. Es liegen umfangreiche Beobachtungen zum Langzeitverhalten der hydraulischen und geotechnischen Eigenschaften von Abdeck- und Rekultivierungsschichten vor [1, 2]. Darüber hinaus steht seit einigen Jahren die Gasdurchlässigkeit von Schichtsystemen auf Deponien im Fokus der Untersuchungen [3]. Auch bei der Nutzung von Deponiegas ist eine Prognose des Langzeitverhaltens im Sinne einer befriedigenden Planungssicherheit notwendig. Von grundlegender Bedeutung ist die Erkenntnis, dass hydraulische Durchlässigkeit und die Gasdurchlässigkeit in engem Zusammenhang stehen und deshalb Erkenntnisse in einem der beiden Fachgebiete auch relevant für das jeweils andere sind.

Parallel zu den im Kontext des Betriebs und vor allem der Schließung und Nachsorge von Deponien gestellten Fragen, und weitgehend unabhängig davon, wurde seit Mitte der 1990-er Jahre im Zusammenhang mit der Schließung und Sanierung der Hinterlassenschaften des sächsisch-thüringischen Uranerzbergbaus durch die Wismut GmbH intensiv der Transport von Radon in Bergbauhalden untersucht.

Die IAF-Radioökologie GmbH hat in den vergangenen 20 Jahren, unter anderem im Auftrag der Wismut GmbH, umfangreiche Untersuchungen des konvektiven Radontransports durchgeführt und die Grundlagen für ein konzeptionelles Verständnis der wesentlichen Vorgänge gelegt.

Das Verständnis des Radontransports in Halden und Haldenabdeckungen erlaubt eine Reihe von Analogieschlüssen sowohl hinsichtlich des grundsätzlichen Systemverständnisses und der wesentlichen Einflussgrößen, als auch hinsichtlich der Verringerung des Gastransports und der Langzeitstabilität technischer Lösungen. Deshalb sollen ausgewählte Erfahrungen im Zusammenhang mit Haldenabdeckungen im vorliegenden Beitrag einem breiteren Hörerkreis der Deponietechnik zur Kenntnis gegeben werden.

Der vorliegende Beitrag beginnt in Abschnitt 2.1 mit einer kurzen Übersicht über das Vorkommen von Radon in der Natur und insbesondere in natürlichen Gesteinen in Bergbauhalden und wendet sich anschließend in Abschnitt 2.2 wesentlichen Erkenntnissen hinsichtlich zum Systemverhalten des Radontransports in Halden und Abdecksystemen zu. Hierbei wird erkennbar, dass vor allem der konvektive Radontransport unter dem Einfluss von Temperaturgradienten entlang der Haldenoberfläche und den damit induzierten Luftdruckgradienten von wesentlicher Bedeutung sind, während diffusionsgetriebene Transportprozesse im Vergleich zur Konvektion weitgehend vernachlässigbar sind. Für eine effektive Reduzierung des Radontransports im Vergleich zu einer nicht abgedeckten Halde sind an die Haldenabdeckung genau definierte Anforderungen zu stellen, auf die in Abschnitt 2.2 eingegangen wird und deren Stabilität für die langfristige Erreichung des Sanierungsziels von zentraler Bedeutung sind.

In Abschnitt 3 werden Beobachtungsergebnisse zum Langzeitverhalten der Gasdurchlässigkeit dargestellt und daraus in Abschnitt 4 Schlussfolgerungen abgeleitet, unter welchen Bedingungen eine langzeitstabile Unterdrückung des konvektiven Radontransports realistisch erwartet werden kann.

## 2 Radon und Radontransport in Bergbauhalden

### 2.1 Grundlagen

Radon ist ein Edelgas mit der Ordnungszahl 86, das natürlich in verschiedenen Isotopen vorkommt, die teilweise radioaktiv sind. Das bekannteste Radon-Isotop besitzt die Massenzahl 222, sein Kern enthält also außer 86 Protonen 136 Neutronen (sog. Rn-222). Rn-222 ist ein Nuklid der sogenannten Uran-Radium-Zerfallskette, die bei U-238 beginnt und mit einem stabilen Bleisotop (Pb-206) endet. Es entsteht durch den Zerfall von Radium (Ra-226) und zerfällt

mit einer Halbwertszeit von 3,82 Tagen über kurzlebige Polonium-, Blei- und Bismutnuklide in das Nuklid Pb-210 mit einer Halbwertszeit von ca. 22,3 Jahren, siehe Abbildung 1.

Da U-238 und Ra-226 in allen natürlichen Stoffen vorhanden ist, wird auch in diesen kontinuierliche Rn-222 gebildet. Von den Eigenschaften des jeweiligen Gesteins (Radiumgehalt, Porosität, Wassersättigung) hängt es ab, inwieweit sich das in den Gesteinskörnern gebildete Radon diffusiv zur jeweiligen Kornoberfläche bewegen, das mineralische Korn verlassen und sich in den luftgefüllten Porenhohlraum bewegen kann, wo es durch diffusive oder konvektive Prozesse in die Atmosphäre weitertransportiert wird.

In Halden mit Abraum des Uranerzbergbaus liegen naturgemäß die Nuklide der Uran-Radium-Zerfallsreihe in gegenüber dem natürlichen Hintergrund erhöhten Aktivitätskonzentrationen vor. Während in durchschnittlichem Boden in Deutschland die entsprechenden Nuklide (U-238, Ra-226, Rn-222, Pb-210) eine Aktivitätskonzentration von größenordnungsmäßig jeweils 50 Zerfällen je Sekunde und Kilogramm (Bq/kg) besitzen, liegt die Aktivitätskonzentration dieser Nuklide in Halden des Uranerzbergbaus bei einigen hundert bis tausend Bq/kg. Hieraus resultiert eine entsprechend höhere Bildung von Rn-222 im Haldenmaterial und damit auch eine höhere Freisetzung (Exhalation) in die Umgebungsluft.

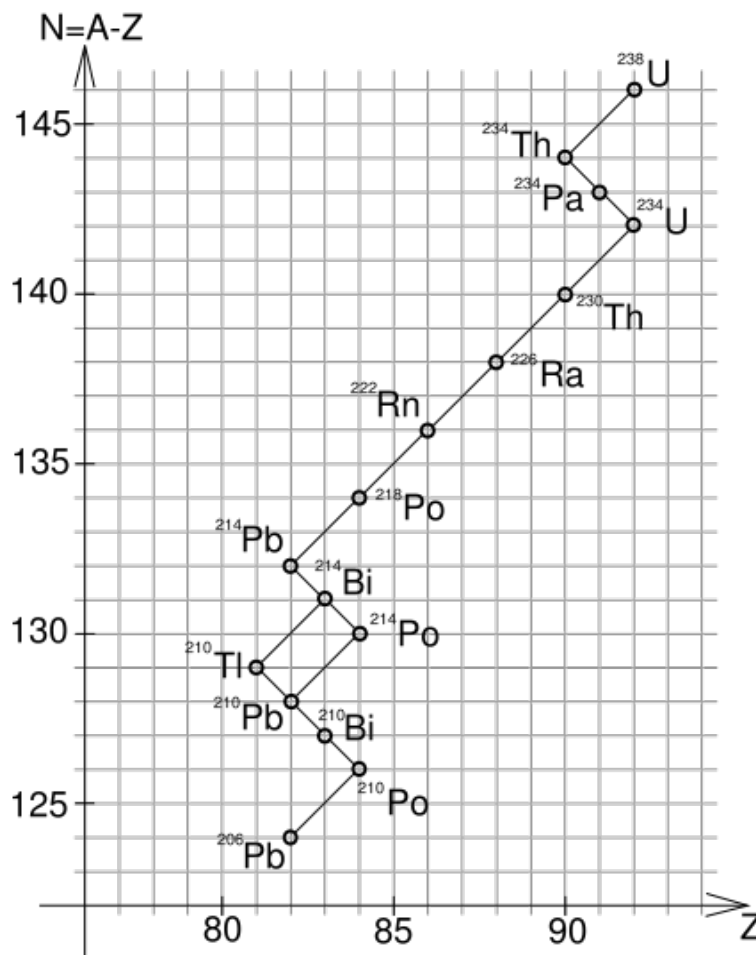


Abbildung 1: Uran-Radium-Zerfallsreihe.

Auf die gesundheitlichen Auswirkungen des Radons, die Festlegung von Referenzwerten der Radonkonzentration und verwandte Fragestellungen soll im vorliegenden Beitrag nicht eingegangen werden. Dazu wird auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen [4]. Von Bedeutung ist hier lediglich die Zielstellung einer Reduzierung der Radonkonzentration in der

Umgebungsluft von Halden entsprechend dem Sanierungskonzept der bergbaulichen Hinterlassenschaft (z.B. [5]). Die Zielstellung der Radonkonzentration in der oberflächennahen Luft am Standort Schlema beträgt  $80 \text{ Bq/m}^3$  [6]; zum Vergleich beträgt die mittlere Radonkonzentration in der bodennahen Luft in Deutschland ca.  $10 \text{ Bq/m}^3$  [7].

Entsprechend [5] wurde zum Erreichen des Zielwertes der Radonkonzentration im Umfeld der Halden, zur Reduzierung der Niederschlagsinfiltration sowie zur Reduzierung der Staubabwehrung von den Halden wurde beispielhaft am Standort Schlema eine Regelabdeckung konzipiert, bestehend aus einer 1 m mächtigen mineralischen Schicht. Die Abdeckschicht besteht aus einer Dämm-/Speicherschicht und einem kulturfähigen Oberboden, der anschließend noch begrünt wird [5].

Es wurde jedoch nach dem qualitätsgetreuen Aufbringen der Haldenabdeckung und dem anfänglichen Erreichen des o.g. Zielwertes ein tendenzieller Anstieg der Radonkonzentration im Umfeld einiger Halden beobachtet. Im Umweltbericht 2013 der Wismut GmbH [6] wurde die Radonsituation in Niederschlema folgendermaßen charakterisiert:

- In weiten Teilen von Niederschlema lagen die Radonkonzentrationen im Jahr 2013 unter dem Zielwert von  $80 \text{ Bq/m}^3$ ;
- Radonkonzentrationen oberhalb dieses Wertes wurden in der unmittelbaren Umgebung einiger Haldenfüße in lokal begrenzten Bereichen festgestellt, wobei diese Situation das Ergebnis eines mehrjährigen Anstieges der Radonfreisetzung der betreffenden sanierten Halden ist.

Daraus ergibt sich die Frage nach dem Langzeitverhalten der Haldenabdeckung und den Prozessen, die zu einer Erhöhung der Gasdurchlässigkeit beitragen. Hierzu ist zunächst ein Grundverständnis des Radontransports in dem System aus Haldenmaterial und Abdeckung erforderlich, auf welches in Abschnitt 2.2 eingegangen wird.

## 2.2 Systemverständnis des konvektiven Radontransports

Radon breitet sich in Luft und in mineralischen Substraten (Haldenmaterial, Abdeckungen) grundsätzlich sowohl diffusiv als auch konvektiv aus. Grundsätzlich bei der Beschreibung des Radons auch der radioaktive Zerfall zu beachten; Rn-222 zerfällt auf seinem konvektiv bzw. diffusiv zurückgelegten Weg innerhalb seiner Halbwertszeit von 3,82 Tagen. Der Transport von Radon innerhalb von Haldenmaterial und aus Haldenmaterial durch Abdeckungen hindurch ist somit durch den radioaktiven Zerfall begrenzt. Eine in diesem Zusammenhang nützliche Größe ist die Migrationslänge, welcher den Weg beschreibt, den ein Teilchen bei diffusivem und/oder konvektivem Transport innerhalb seiner Halbwertszeit im Mittel zurücklegen kann, bevor es zerfällt [8]. In Abbildung 2 ist die Abhängigkeit der Migrationslänge von der Gaspermeabilität bei verschiedenen Druckgradienten dargestellt. Hierbei fällt auf, dass

- bereits bei Luftdruckgradienten von wenigen Pa/m ausreichen, um eine für den Radontransport in Halden und Haldenabdeckungen relevante Migrationslänge von mehreren Metern zu erzielen, und
- bei Materialien mit einer Gaspermeabilität von größer als typischerweise von  $1\text{E-}12 \text{ m}^2$  die Konvektion gegenüber der Diffusion dominiert, und zwar weitgehend unabhängig vom jeweiligen Druckgradienten.

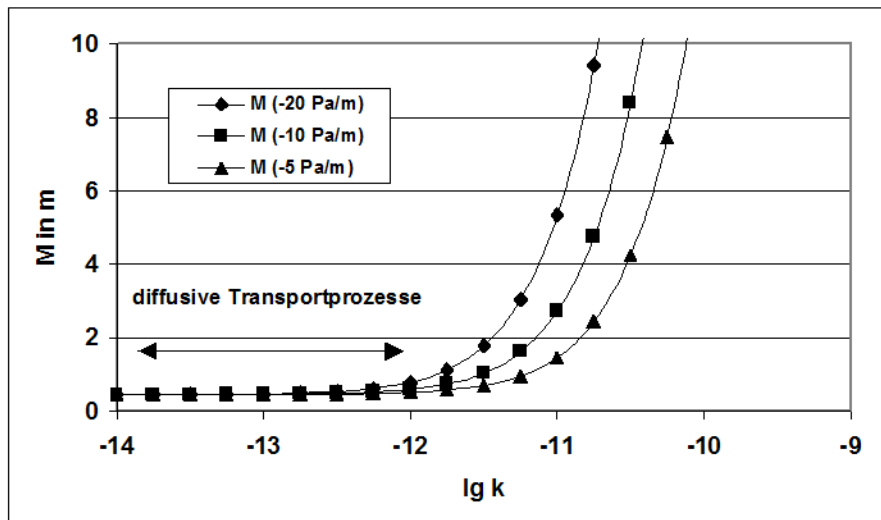


Abbildung 2: Migrationslänge in Abhängigkeit vom Logarithmus der Gaspermeabilität (in  $m^2$ ) sowie dem Druckgradienten.

Haldenmaterial und unverdichtete mineralische Abdeckungen weisen fast immer eine Gaspermeabilität von mehr als  $1E-12 m^2$  auf, so dass hier in der Regel die Konvektion dominiert. Es sei darauf hingewiesen, dass im Gegensatz zu Halden bei feinkörnigen, ggf. wassergesättigten, Aufbereitungsrückständen die Gaspermeabilität deutlich geringer sein kann, so dass dort hauptsächlich ein diffusiv geprägter Radontransport aus dem abgelagerten Material und durch die Abdeckung hindurch stattfinden kann. Für diese Prozesse wird auf die entsprechende Literatur [9, 10] verwiesen.

Der Druckgradient unterliegt zeitlichen Schwankungen sowohl im Tag-Nacht- als auch im jahreszeitlichen Rhythmus, welche auf Temperaturdifferenzen zwischen dem höchsten Punkt einer Halde (z.B. Haldenplateau) und dem Haldenfuß zurückzuführen sind. Dieser Zusammenhang ist vereinfacht in dargestellt.

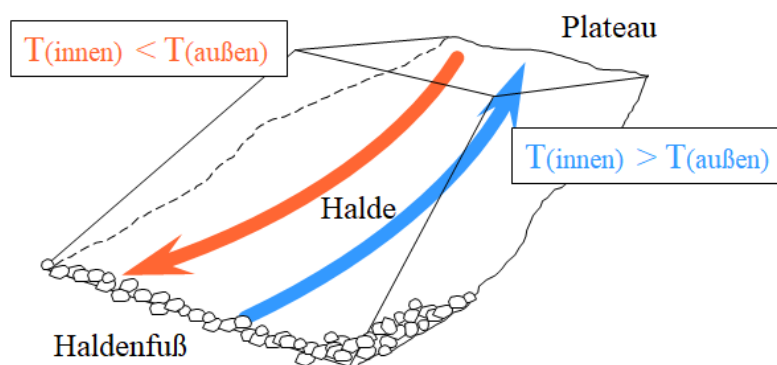


Abbildung 3: Abhängigkeit der Konvektionsrichtung von Temperaturdifferenzen zwischen Haldenplateau und -fuß.

Für das konzeptionelle Verständnis des Radontransports in Halden und Abdeckungen ist weiterhin die Tatsache von Bedeutung, dass die Exhalationsrate (d.h., die auf die Oberfläche und Zeit bezogene aus der Halde abgegebene Aktivität von Rn-222) mit zunehmender Konvektionsgeschwindigkeit nicht beliebig ansteigen kann, sondern durch die Fähigkeit des Haldenmaterials, Rn-222 durch Zerfall von Ra-226 nachzuliefern, begrenzt wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4 verdeutlicht.

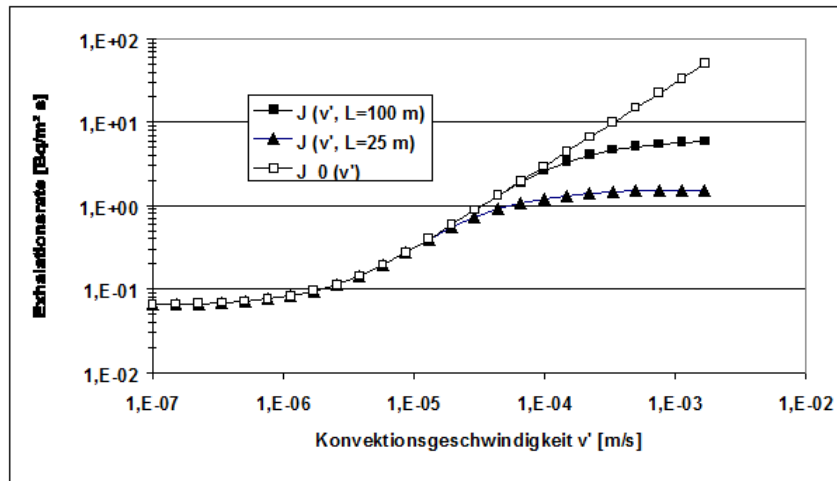


Abbildung 4: Abhängigkeit der Exhalationsrate von der Konvektionsgeschwindigkeit und der durchströmten Haldenlänge.

Um die Gaskonvektion und damit die Freisetzung von Radon aus Halden signifikant zu verringern, kann eine Abdeckung mit geringerer Gaspermeabilität als das Haldenmaterial selbst aufgebracht werden. Die Konvektionsgeschwindigkeit einer abgedeckten Halde wird gemäß der Darcy-Gleichung durch eine vom Abdeck- und Haldenmaterial bestimmte Durchlässigkeit  $\bar{k}$  und die durch die meteorologischen Bedingungen festgelegten Druckunterschiede bestimmt. Die Konvektionsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Darcy-bekanntem Gleichung, wobei die effektive Permeabilität

$$\bar{k} = \frac{Lk_1k_2}{L_2k_1 + L_1k_2}$$

sich aus der Permeabilität des Haldenmaterials  $k_1$  und der Permeabilität der Abdeckung  $k_2$  mit  $L = L_1 + L_2$  der Gesamtlänge des Strömungsweges ergibt. Aus der Abbildung 5 kann als Faustregel abgeleitet werden, dass die Gaspermeabilität der Abdeckung um mindestens eine Größenordnung geringer sein muss als diejenige des Haldenmaterials.

Da die hydraulische und Luftdurchlässigkeit eng miteinander zusammenhängen, sind Ergebnisse der Literaturrecherche für das Langzeitverhalten der hydraulischen Eigenschaften von Abdeckungen und die in Abdeckungen stattfindenden Prozesse deshalb direkt übertragbar auf die Durchlässigkeit für Luftströmungen.

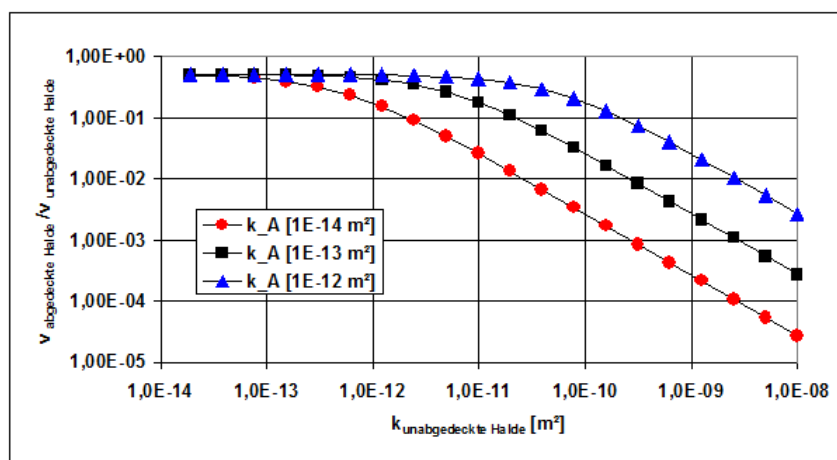


Abbildung 5: Abhängigkeit der Exhalationsrate von der Konvektionsgeschwindigkeit und der durchströmten Haldenlänge.

Wie in der Einleitung bereits dargestellt, liegen außerhalb der Erfahrungen und Veröffentlichungen im Zusammenhang mit der Sanierung der Hinterlassenschaften des sächsisch-thüringischen Uranerzbergbaus durch Wismut kaum Informationen zur Luftkonvektion in Halden bzw. Haldenabdeckungen und zur zeitlichen Entwicklung der Permeabilität für diese Strömungen vor. Im Gegensatz dazu sind Eigenschaften von Abdecksystemen im Hinblick auf den Wasserhaushalt und insbesondere die Infiltration sowie die zu Veränderungen dieser Eigenschaften führenden Prozesse in der Literatur weitaus besser beschrieben. Dies gilt insbesondere auch für die Bildung von Makroporen, die sowohl für die Veränderung der wasserhaushaltlichen Parameter von Abdeckungen als auch konvektive Luftströmung als bestimmende Faktoren herausgearbeitet wurden.

Böden oder mineralische Abdecksysteme sind heterogene Strukturen. Die Bedeutung der Heterogenitäten des Bodens wurde bei der Dimensionierung von Abdecksystemen lange Zeit nur unzureichend berücksichtigt. Erst durch die Feststellung, dass die Modelle mit ausschließlich homogenen Materialeigenschaften nicht in der Lage sind, die im Rahmen des Monitorings von Abdeckungen festgestellte Wasserbewegung (relativ hohe Sickerraten) zu erklären, wurde in den letzten Jahren auch international verstärkt auf die Bedeutung der Bodenheterogenität hingewiesen.

In den letzten Jahren hat die experimentelle und theoretische Untersuchung des Einflusses von Grobporensystemen auf das Strömungsverhalten von Wasser und Bodenluft in heterogenen Materialien und Böden stark an Bedeutung zugenommen. Für den Gastransport bedeutet das Vorhandensein von Grobporen, dass diese nach einem schnellen Drainieren des Wassers aus den Grobporen für den Gastransport bevorzugt zur Verfügung stehen [11].

In Böden bzw. Abdeckungen mit Makroporen wird die effektive Gaspermeabilität  $k_{\text{Boden}}$  zum einen durch die Gaspermeabilität der Bodenmatrix  $k_{\text{Matrix}}$  und zum anderen durch die Gaspermeabilität von Rissen  $k_{\text{Riss}} = Cb^2/12$  bzw. von Wurzelkanälen oder Regenwurmlöchern ( $k_{\text{Pore}} = C\pi r^4/8$ ) bestimmt<sup>1</sup> Eine einfache schematische Modellanordnung ist in Abbildung 6 dargestellt.

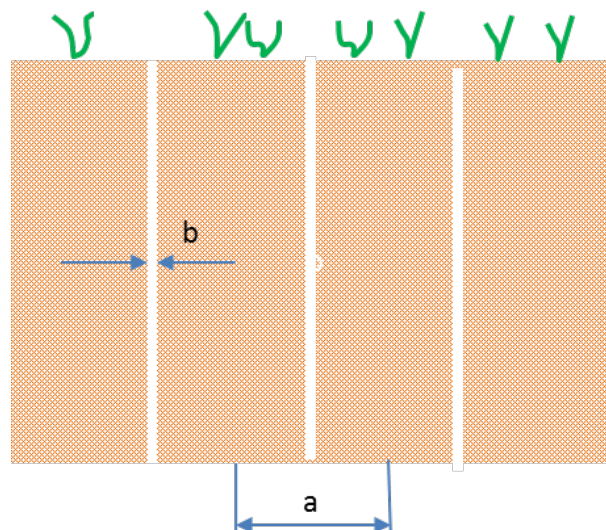


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Abdeckung mit Grobporen.

Wird beispielsweise ein mittlerer Rissabstand im Boden mit  $a$  und eine Rissöffnungsweite  $b$  angenommen, so ergibt sich als einfachste Näherung für die effektive Permeabilität  $k_{\text{Boden}}$  von Abdecksystemen:

<sup>1</sup> C ist jeweils ein geeignet zu wählender Proportionalitätsfaktor.

$$k_{\text{Boden}} = k_{\text{Matrix}} + C \frac{b^3}{12 \cdot a}$$

Der zweite Term auf der rechten Seite der obigen Formel ist für typische Grobporen in Abdecksystemen infolge von Frost-Tau-/Feucht-Trocken-Wechseln sowie Bioturbation um mehrere Zehnerpotenzen größer sein als die Permeabilität  $k_{\text{Matrix}}$  des homogenen Substrates. Daraus folgt, dass die Gaspermeabilität der Risse und Makroporen die Gaspermeabilität des Bodens dominiert.

### 3 Langzeitverhalten von Abdecksystemen

Die Bildung von Makroporen in Abdecksystemen und die damit verbundene Erhöhung der Permeabilität ist nach den im vorangegangenen Abschnitt zusammengefassten Erkenntnissen der ausschlaggebende Prozess, der nach anfänglicher deutlicher Reduzierung des konvektiven Radontransports zu einem Wiederanstieg der konvektiven Radonexhalation führt. Durch IAF wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Recherchen der deutschen und internationalen Literatur zum Langzeitverhalten von Abdecksystemen sowohl aus Sicht der Infiltration als auch des Gastransports durchgeführt [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29], deren Ergebnisse sich wie folgt verallgemeinern lassen:

- Nahezu alle ausgewerteten Fallstudien zeigen einen signifikanten Anstieg der Permeabilität in den ersten 2 bis 10 Jahren nach Fertigstellung der Abdeckung, teilweise um eine Größenordnung oder mehr, und zwar weitestgehend unabhängig von der beim Einbau erreichten Kompaktierung, die im Zeitverlauf ihre Wirkung verliert.
- Ausschließlich aus mineralischen Komponenten aufgebaute Abdeckungen sind anfällig gegenüber Wurzeln und grabenden Tieren sowie Frost-Tau- und Feucht-Trocken-Wechseln. Wurzeln trocknen die beim Einbau verdichteten Schichten aus, was zur Rissbildung führt, auch wenn darüber eine dauerhaft gesättigte Schutzschicht liegt. Darüber hinaus schaffen abgestorbene Wurzeln Makroporen und Kanäle für bevorzugten Transport von Wasser und Gas. Wurzelexsudate verändern zudem die Struktur von Tonen und führen zu höherer Permeabilität.
- Jeder Bewuchs entzieht einer mineralischen Abdeckschicht Feuchtigkeit, was zur Austrocknung und Rissbildung führen kann. Um die Austrocknung und Rissbildung zu verhindern, ist eine ausreichende Mächtigkeit der Abdeckung erforderlich, so dass sich in größeren Tiefen eine stabile Wassersättigung einstellen kann.
- Bodenbildungsprozesse sowie diversifizierte Ökosysteme auf bzw. in mineralischen Abdeckungen sind natürlich und in den meisten Fällen auch gewollt. Auflockerung und die Bildung von Grobporen sind ein Zeichen gesunder Bodenentwicklung. Ein gesunder Boden mit grundsätzlich anstrebenswerter Biodiversität steht der Zielstellung einer Konvektionssperre entgegen. Die natürliche, langfristig unkontrollierbare Sukzession der Pflanzen und standortspezifische Entwicklung des Systems Boden und Wurzelraum lassen sich jedoch unter realistischen Bedingungen nicht steuern und unterbinden.
- Hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) werden in der Literatur kaum Versagensfälle beschrieben. KDB und Bitumenschichten besitzen im Gegensatz zu rein mineralischen Abdecksystemen den erforderlichen hohen und nachhaltigen Widerstand gegen Bioturbation.

Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass Bodenbildungsprozesse, die wegen der für eine naturnahe Entwicklung von Abdecksystemen gewünscht sind und ein Charakteristikum



für gesunde Bodenentwicklung darstellen, im Hinblick auf die technischen Zielstellungen der Sanierung (Reduzierung des konvektiven Radontransports und der Infiltration) in der Regel unerwünscht sind. Für den langfristigen Erhalt einer ausreichend geringen Permeabilität von Schichten, die der Minimierung der Gaskonvektion dienen, ist eine ausreichende Schichtdicke in der Größenordnung von mindestens 2,5 bis 3 Metern erforderlich. Die Umsetzung dieser Forderung führt jedoch zu hohen Kosten.

Alternativ können qualitätsgerecht verlegte und verschweißte Kunststoffdichtungsbahnen zur langzeitstabilen Verringerung der Radonkonvektion eingesetzt werden. Die Abdeckung sollte entsprechend der Studie [34] am Haldenfuß bis in den geogenen Untergrund geführt werden (z.B. durch einen vertikalen Dämmriegel).

#### **4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Die Erkenntnisse, die im Zusammenhang mit der Reduzierung des Radontransports aus Halden des ehemaligen Uranerzbergbaus gewonnen wurden, bieten die Möglichkeit einer Übertragung auf den Gastransport in Deponieabdeckungen.

Der konvektive Transport überwiegt unter den meisten in der Praxis anzutreffenden Bedingungen bei weitem den diffusiven Anteil. Er wird durch Temperaturdifferenzen zwischen Haldenfuß und Haldenplateau angetrieben und unterliegt tages- und jahreszeitlichen Richtungsänderungen. Zur signifikanten Verringerung der Gaskonvektion ist eine Abdeckung erforderlich, deren Durchlässigkeit mindestens eine Größenordnung unterhalb derer des Haldenmaterials liegt.

Auf die Permeabilität haben Makroporen einen entscheidenden Einfluss, die sich durch in der Regel gewünschte Bodenbildungsprozesse bei der Renaturierung der Abdeckung innerhalb weniger Jahre nach Fertigstellung bilden. Sie können nur langfristig vermieden werden, wenn die mineralische Abdeckung eine Mächtigkeit von mindestens 2,5 bis 3 Metern besitzt oder alternativ ein Asphalt- oder Kunststoffdichtungsbahn als Bestandteil der Abdeckung verwendet wird.

# Literaturverzeichnis

- [1] WATTENDORF, P. ; EHRMANN, O. ; BIEBERSTEIN, A.: *Standortsicherheits- und Bodeneigenschaften von Rekultivierungssubstraten in Baden-Württemberg*. 2018. – 14. Leipziger Deponiefachtagung, Leipzig, 06.-07.03.2018, Tagungsband S. 223 ff
- [2] GRÖNGRÖFT, A. ; RIEDL, S. ; ESCHENBACH, A.: *Eigenschaften von Rekultivierungsschichten einer Monodeponie im Vergleich zu den Anforderungen des BQS 7-1*. 2017. – 13. Leipziger Deponiefachtagung, Leipzig, 07.-08.03.2017, Tagungsband S. 195 ff
- [3] AL-AKEL, S.: *Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Gasdurchlässigkeit des Bodens – geotechnische Aspekte bei der Auswahl von geeigneten Böden für Methanoxidationsschichten*. 2018. – 14. Leipziger Deponiefachtagung, Leipzig, 06.-07.03.2018, Tagungsband S. 269 ff
- [4] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS): *Ionisierende Strahlung – Radon*. [http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/radon\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/radon_node.html). – (10.10.2018)
- [5] WISMUT GMBH: *Die Haldensanierung am Standort Schlema-Alberoda*. [https://www.wismut.de/de/nl-aue\\_halden.php](https://www.wismut.de/de/nl-aue_halden.php). – (10.10.2018)
- [6] WISMUT GMBH: *Umweltbericht 2013, Chemnitz, 2014*. <https://www.wismut.de/de/downloads/umweltbericht2013.pdf>. Version:2013. – (10.10.2018)
- [7] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS): *Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau)*. 03 2010. – BfS-SW-07/10, Salzgitter
- [8] LÖBNER, W. ; SCHULZ, H.: *Wie und warum gelangt Radon in ein Haus?* 2005. – 1. Tagung Radonsicheres Bauen, 28.09.2005, HTW Dresden
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Measurement and Calculations of Radon Releases from Uranium Mill Tailings*. 1992. – Technical Reports Series, No.333, Vienna
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Measurement and calculation of radon releases from NORM residues*. 2013. – Technical Reports Series No. 474, Vienna
- [11] ALLAIRE, S. E. ; ROULIER, S. ; CESSNA, A. J.: *Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques*. 2009. – J. Hydrology 378, p. 179–204
- [12] GARD (*Global Acid Rock Drainage*) Guide, Chapter 6.0: *Prevention and Mitigation*. <http://www.gardguide.com>. – 10.04.2016
- [13] SCHÖPE, M. ; NIGANG, L. R. ; HÄHNE, R. ; LÖSER, R.: *Austrocknung der Dichtungsschicht von Abdecksystemen durch Gaskonvektion*. 2001. – Wasser & Boden, 53/6, S. 30-35
- [14] BENSON, C. ; SAWANGSURIYA, A. ; TRZEBIATOWSKI, B. ; ALBRIGHT, W.: *Pedogenic Effects on the Hydraulic Properties of Water Balance Cover Soils*. 2007. – J. of Geotech. and Geoenv. Engr, 133:4, p. 349-359

- [15] WAUGH, J.W.: *Design, Performance, and Sustainability of Engineered Covers for Uranium Mill Tailings*. <http://energy.gov/sites/prod/files/engcovers.pdf>. – 10.04.2016
- [16] LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN: *Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen*. – LANUV-Fachbericht 25, Recklinghausen 2010
- [17] MELCHIOR, S.: *Langzeitbeständigkeit von baulichen Sicherungsmaßnahmen*. [http://www.mplusw.de/pdf/Melchior\\_25a%20DGW\\_Endfassung%20mit%20Bildern.pdf](http://www.mplusw.de/pdf/Melchior_25a%20DGW_Endfassung%20mit%20Bildern.pdf). Version:2010. – In: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (Hrsg.): 25 Jahre Sanierung der Deponie Georgswerder. Umgang mit baulich gesicherten Altlasten - Erkenntnisse und Perspektiven. Tagungsband zur Fachtagung am 11./11.06.2010, 77-91 (aufgerufen am 29.03.2016)
- [18] *Evaluation of the Long-Term Performance of Dry Cover Systems, Phase 2 Final Report*. 03 2003. – O’Kane Consultants, prepared for the International Network for Acid Prevention
- [19] TAYLOR, G. ; SPAIN, A. ; NEFIODOVAS, A. ; TIMMS, G. ; KUZNETSOV, V. ; BENNETT, J.: *Determination of the Reasons for Deterioration of the Rum Jungle Waste Rock Cover*. Juli 2003. – Australian Centre for Mining Environmental Research: Brisbane
- [20] RYKAART, M. ; HOCKLEY, D. ; NOEL, M. ; PAUL, M.: *Findings of International Review of Soil Cover Design and Construction Practices for Mine Waste Closure*. 2006. – Paper presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis MO. R.I. Barnhisel (ed.) Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR), Lexington, Kentucky
- [21] DEISSMANN, G. ; GOLDSWORTHY, M. ; KISTINGER, S. ; STOLLENWERK, R. H.: *Design constraints on engineered dry covers for waste rock dumps*. 2003. – Brenk Systemplanung, Aachen, In: Proceedings Sudbury 2003 – Mining and the Environment III, Editors: G. Spiers, P. Beckett, H. Conroy, pp.6
- [22] HEERTEN, G. ; REUTER, E.: *Erfahrungen mit der mineralischen Komponente in Oberflächenabdichtungssystemen*. <http://www.iwa-owl.de/veroeffentlichungen.html>. Version:2006. – (aufgerufen am 17.05.2016)
- [23] WATTENDORF, P. ; EHRMANN, O.: *Wurzelsperren in Rekultivierungsschichten als Schutz der Dichtungselemente? Untersuchungen zu Funktion und Wirksamkeit von Wurzelsperrsystemen*. [http://www.deponiefachtagung.de/html/tagungen/inhalt\\_2007tagung03.html](http://www.deponiefachtagung.de/html/tagungen/inhalt_2007tagung03.html). Version:2007. – 3. Leipziger Deponiefachtagung, Leipzig 2007 (aufgerufen am 07.04.2016)
- [24] DREWS, R.: *Erfahrung des Landkreises Spree-Neiße zum Einsatz von Gehölzpflanzen als Funktionsbestandteil von Wasserhaushaltsschichten*. [http://www.deponiefachtagung.de/html/tagungen/inhalt\\_2014tagung10.html](http://www.deponiefachtagung.de/html/tagungen/inhalt_2014tagung10.html). Version:2014. – 10. Leipziger Deponiefachtagung, Leipzig 2014 (aufgerufen am 29.03.2016)
- [25] LAHMIRA, B. ; BARBOUR, L. ; HUANG, M.: *Numerical Modeling of Gas Flow in the Suncoar Coke Stockpile Covers*. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/13/1/vzj2013.07.0119>. Version:2014. – Vadose Zone Journal, Vol. 13 No. 1
- [26] DEJONG, D. ; TIBBETT, M. ; FOURIE, A.: *Geotechnical systems that evolve with ecological processes*. – Environmental Earth Science, Published online 20 July 2014

- [27] SCHULZE, B. ; LÄCHLER, W. ; DIETZEL, F.: *Erfahrungen beim Freilegen einer 20 Jahre alten Kombinationsdichtung auf der Oberfläche der Sonderabfalldeponie Billigheim*. 2011. – 27. Fachtagung „Die sichere Deponie 2011 - Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“. SKZ - ConSem GmbH, Würzburg, und AK GWS Arbeitskreis Grundwasserschutz e.V., Berlin
- [28] MEIERS, G.P. ; O’KANE, M. ; MAYICH, D.: *Performance Monitoring of a Cover System with Geosynthetic Layers*. – Case Study - Franklin Waste Rock Pile, Sydney NS
- [29] *Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegase*. 1992. – Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle. Zentraler Fachdienst Wasser – Boden – Abfall – Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Bd. 10, Ministerium für Umwelt und Verkehr, Hg. Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe 1. Aufl.