

Langzeit-Wasserhaushalt von konvektionsdichten Oberflächenabdichtungen

Die Halden des ehemaligen Uranerzbergbaues in Sachsen und Thüringen wurden zum größten Teil im Rahmen bereits abgeschlossener Sanierungstätigkeiten mit einer mineralischen Abdeckung versehen. Alterungsprozesse in der mineralischen Abdeckung z. B. aufgrund von klimatischen Bedingungen, Wühlaktivität und Durchwurzelung können zu Rissen und Wegsamkeiten in der Abdeckschicht führen und somit zum Austrag von Radon beitragen. Vorgestellt werden Untersuchung zur Wirkung einer Asphaltabdichtungsschicht oder einer Kunststoffdichtungsbahn als konvektionsdichtes Dichtungselement.

Fengqing Li und Petra Schneider

Bei der Gewinnung von Uran entstehen große Mengen an schwach radioaktiven Rückständen. Diese Rückstände werden in Form von Halden und/oder Industriellen Absetzanlagen in der Nähe des Gewinnungsortes abgelagert [1]. Bei der Errichtung der Halden und industriellen Absetzanlagen wurden zwar geotechnische Aspekte wie beispielsweise Böschungsstandsicherheiten, Verdichtungsgrade usw. berücksichtigt; Basisabdichtungen in der Regel aber nicht. Als eines der typischen Umweltprobleme der Halden sind neben Schwermetall- und Arsenemissionen Radonemissionen zu nennen, die durch Wind- und Wassererosion in die Umgebung abgegeben werden. Radon kann sich in der Atmosphäre ausbreiten, wenn das Haldenmaterial nicht gasdicht abgedichtet ist. Zwar kommt es in der Atmosphäre schnell zu einer Verdünnung, jedoch kann in der Nähe von Wohnbebauung eine erhöhte Radonkonzentration in der Umgebungsluft zur Überschreitung von Richtwerten gemäß der Strahlenschutzgesetzgebung führen [1].

Im Rahmen von Sanierungstätigkeiten der Halden in Sachsen seit den 1990er-Jahren wurden u. a. Oberflächenabdichtungssysteme zur Reduzierung des Gasaustauschs zwischen Haldenmaterial und Umgebungsluft sowie zur Minimierung der Durchsickerung in Anlehnung an den damaligen Stand der Technik und unter Berücksichtigung der Vorgaben des Bergrechtes entwickelt. Dabei kamen je nach Sanierungsziel einschichtige, zweischichtige und mehrschichtige mineralische Abdecksysteme sowie Teilabdeckungen zur Anwendung [2].

/ Kompakt /

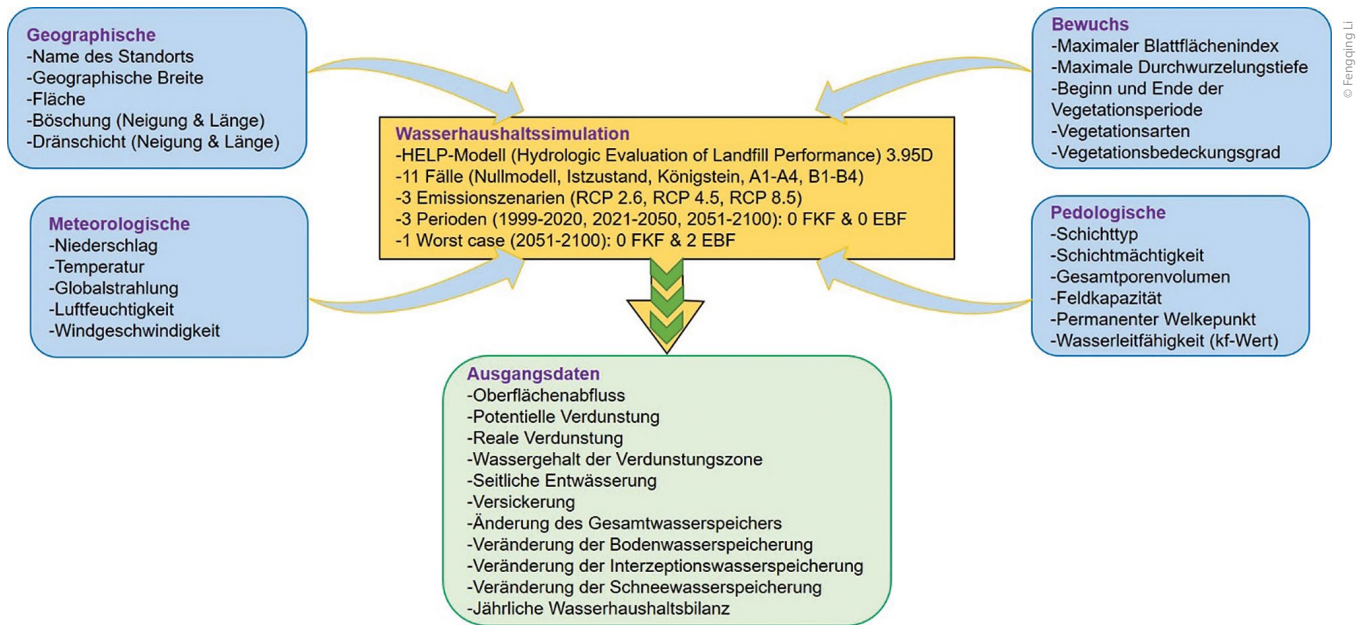
- Alterungsprozesse in der mineralischen Abdeckung von Halden des ehemaligen Uranerzbergbaues in Sachsen und Thüringen und Umwelteinflüsse können zum Austrag von Radon beitragen.
- Kunststoffdichtungsbahnen oder Asphaltabdichtungen können hier konvektionsdichte Oberflächenabdichtungen erzeugen, was durch Simulationen mit wasserwirtschaftlichem Ansatz festgestellt werden kann.
- Austrocknungsgefährdung ist für beide Dichtungselemente ausgeschlossen, da sie nicht den Austrocknungsprozessen mineralischer Materialien unterliegen.

Konvektionsdichte Oberflächenabdichtungen zielen auf die Unterbrechung des Transportpfades von Radon aus dem Haldenmaterial in die Atmosphäre ab. Anlass für die Konvektionsdichtheit ist die festgestellte Reduzierung der Funktionalität, insbesondere bzgl. der Permeabilität von mineralischen Abdichtungssysteme 5 bis 15 Jahre nach dem Bau [1]. Als Dichtungselement in konvektionsdichten Oberflächenabdichtungen eignen sich Asphaltabdichtungen (AD) und Kunststoffdichtungsbahnen (KDB). Das Sanierungsergebnis soll die Radonexhalation aus den Halden langfristig stabil vermindern, damit die effektive Referenzdosis von 1 mSv/a unterschritten wird [1]. Die Durchführung der numerischen Untersuchung der Fließprozesse und der Nachweis der Tragfähigkeit sowie die Bewertung der Sanierungsvarianten einer Halde des Uranerzbergbaues erfolgte an einer Modellhalde, die ein synthetisches Modell darstellt. Für die Modellhalde wurde eine Aufstandsfläche von 25 ha und eine maximale Höhe von 50 m ab der Oberkante des umgebenden Geländes bis zum Mittelpunkt des Plateaus angenommen. Die langfristige Sickerwasserbildung in den konvektionsdichten Systemen wurde beispielhaft für diese Modellhalde berechnet. Für die Modellhalde wurden die Ergebnisse für AD und KDB mit der bisherigen mineralischen Dichtschicht verglichen.

Bei der Sickerwasserprognose von Abdichtungssystemen wird die Bilanzierung der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss, Speicherung und Versickerung in den tieferen Untergrund unter Berücksichtigung des Systems Boden – Pflanze vorgenommen. Bestimmende Kennwerte des Wasser- und Lufthaushaltes sind nutzbare Feldkapazität und Gesamtporenvolumen. Ob sich ein Abdichtungssystem wie ein natürlicher Boden verhält und welche Absickerungsraten aus dem Abdichtungssystem sich ausbilden, ist stark von der Korngrößenverteilung (insbesondere auch Korngrößenunterschieden zwischen den Schichten) und der Lagerungsdichte abhängig.

Methodische Vorgehensweise

Im aktuellen Fall erfolgte die Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell „Hydrologic Evaluation of Landfill Performance“



© Fengqing Li

Bild 1: Schema für die Datenverarbeitung, Modellierung und Liste der Ausgangsdaten;
RCP = repräsentativer Konzentrationspfad; FKF = Fabrikationsfehlstellendichte; EBF = Einbaufehlstellendichte

(HELP), da dieses sowohl Asphaltabdichtungen als auch eine Bildung von Rissen bzw. Löchern in einer KDB berücksichtigen kann. Das Modell HELP wurde 1984 von Paul Schroeder (U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station) und mehreren Co-Autoren für die U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) entwickelt. Die neueste englische Version ist 4.0, die neueste deutsche Version ist 3.95D [3]. Das HELP-Modell ist ein „quasi-zweidimensionales“ Schichtenmodell zur Abschätzung des Wasserhaushalts von offenen und geschlossenen Deponien und insbesondere von Bodenabdichtungssystemen und Abdeckungssystemen.

Hauptzweck war der Vergleich von Auslegungsalternativen, die anhand des Wasserhaushalts für das Klima des jeweiligen Standorts beurteilt werden. Mit Hilfe von HELP können mehrere hydrologische Prozesse mit einem eintägigen Zeitschritt modelliert werden. Erforderliche Eingabedaten sind Tageswerte des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung von 1 – 100 vollständigen Kalenderjahren, Parameter zur Berechnung der Verdunstung, Daten der Boden- und Materialeigenschaften sowie Daten des Schichtaufbaus und des Standortes. Das Übersichtsschema für die Datenverarbeitung und Modellierung sowie die Liste der Ausgangsdaten kann **Bild 1** entnommen werden.

In der Modellierung wurden 11 Fälle berücksichtigt:

- Nullmodell: ist eine Vergleichsvariante. Halde ohne Abdeckung bzw. Abdichtung.
- Istzustand: 1, ist eine Vergleichsvariante: Einschichtabdeckung, d. h. die aktuelle Abdeckkonfiguration der Halden in Aue.
- Istzustand: 2, ist eine Vergleichsvariante: Zweischichtabdeckung, d. h. die aktuelle Abdeckkonfiguration der Halde in Königstein.
- A1-A4: sind Abdicht-Szenarien. Das konvektionsdichte Element ist Kunststoffdichtungsbahn KDB (BAM-zugelassen).

- B1-B4: sind Abdicht-Szenarien. Das konvektionsdichte Element ist Asphaltabdichtung (LAGA-eignungsbeurteilt).

Für die generellen Varianten A (KDB als Dichtungselement) und B (Asphalt als Dichtungselement) wurden weitere Variationen des Schichtaufbaus berücksichtigt, wie sie in der Praxis üblich sind. Das betrifft vor allem den Einsatz von Kunststoffdränelementen (KDE) als Ersatz für die Drainageschicht aus Primärrohstoffen oder auch unterschiedliche Schichtdicken bei der Rekultivierungsschicht. Alle dargestellten Schichtpaket-Variationen sind in der Praxis übliche Ausführungen.

Folgende Schichtaufbauten für die Abdicht-Szenarien wurden basierend auf den bisherigen Projektergebnissen berücksichtigt:

- **A) konvektionsdichtes Element: Kunststoffdichtungsbahn KDB (BAM-zugelassen):**
 - A1 – KDB (2,5 mm) – KDE (ca. 8 mm) – Rekultivierungsboden (mind. 0,8 m Unterboden + 0,2 m Oberboden)
 - A2 – KDB (2,5 mm) – KDE (ca. 8 mm) – Rekultivierungsboden (mind. 2,7 m Unterboden + 0,3 m Oberboden)
 - A3 – KDB (2,5 mm) – Schutzvlies 1.200 g/m² (ca. 8 mm) à mineralische Entwässerung 16/32 mm à Trenn-/Filtervlies 300 g/m² (ca. 3 mm) – Rekultivierungsboden (mind. 0,8 m Unterboden + 0,2 m Oberboden)
 - A4 – KDB (2,5 mm) – Schutzvlies 1.200 g/m² (ca. 8 mm) à mineralische Entwässerung 16/32 mm à Trenn-/Filtervlies 300 g/m² (ca. 3 mm) – Rekultivierungsboden (mind. 2,7 m Unterboden + 0,3 m Oberboden)
- **B) konvektionsdichtes Element: Asphaltabdichtung (LAGA-eignungsbeurteilt):**
 - B1 – Deponieasphalttragschicht – AC 16 T-DA (mind. 6 cm) – Deponieasphaltdichtungsschicht – AC 11 D-DA (mind. 4 cm) – KDE (ca. 8 mm) – Rekultivierungsboden (mind. 0,8 m Unterboden + 0,2 m Oberboden)

Tabelle 1: Geographische- und Bewuchseigenschaften der Modellhalde und Eigenschaften der KDB über den Betrachtungszeitraum

Kategorie	Parameter	Nullmodell	Istzustand 1	Istzustand 2	Rekultivierungstyp 1	Rekultivierungstyp 2
Fall	Fall	Keine Abdeckung	Einschichtabdeckung	Zweischichtabdeckung	A1, A3, B1, B3	A2, A4, B2, B4
Geographisch	Fläche	25 ha	25 h	25h	25 ha	25 ha
	Böschung_Neigung	24,2 %	24,2 %	24,2 %	24,2 %	24,2 %
	Böschung_Länge	102 m	102 m	102 m	102 m	102 m
	Dränschichte_Neigung	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
	Dränschichte_Länge	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
Bewuchs	Vegetation	Keine	Gras	Gras	Gras	Baum
	Oberboden	0 cm	20 cm	45 cm	20 cm	30 cm
	Unterboden	0 cm	80 cm	45 cm	80 cm	270 cm
	Durchwurzelungstiefe	20 cm	100 cm	100 cm	100 cm	250 cm
	Blattflächenindex	0	5	5	5	7
	Deckungsgerade	–	mäßig	mäßig	mäßig	ausgezeichnet
	Kurvenzahl (automatisch berechnet)	20 (vordefiniert)	71,15	71,15	71,15	59,27
Abdichtungselemente	Einbauqualität	–	–	–	gut	gut
	Fabrikationsfehlstellendichte	–	–	–	0	0
	Einbaustellendichte_1999-2020	–	–	–	0	0
	Einbaustellendichte_1921-2050	–	–	–	0	0
	Einbaustellendichte_1951-2100_Normal	–	–	–	0	0
	Einbaustellendichte_1951-2100_Worst	–	–	–	2	2

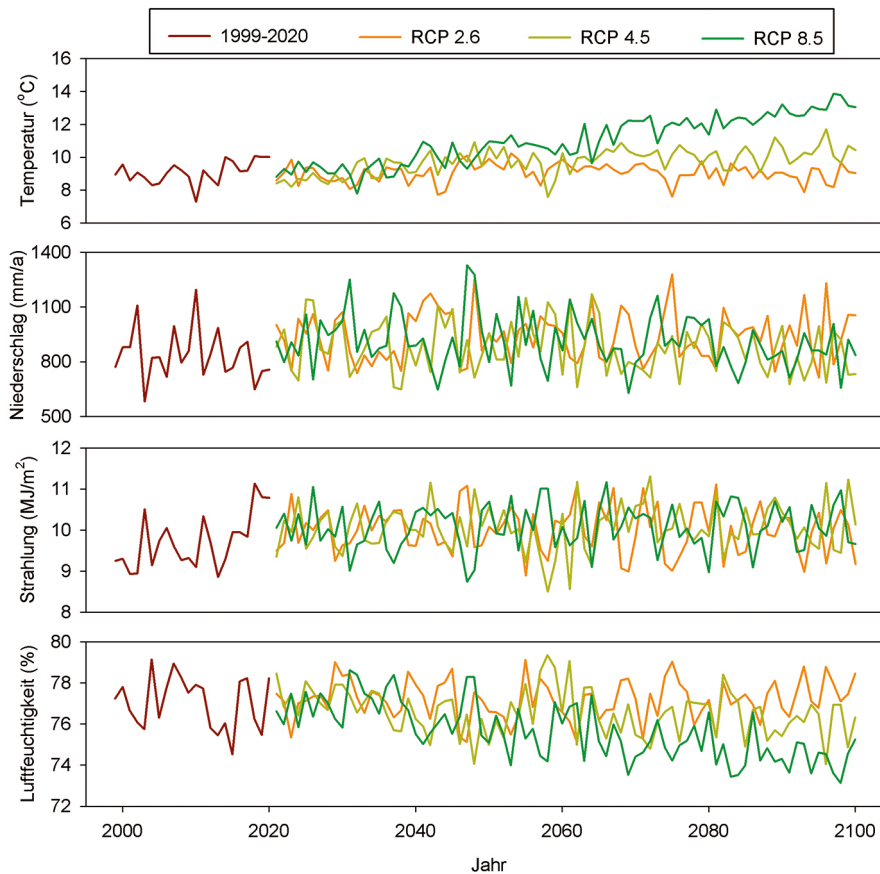
Quelle: Fengqing Li

- B2 – Deponieasphalttragschicht – AC 16 T-DA (mind. 6 cm) – Deponieasphaltdichtungsschicht – AC 11 D-DA (mind. 4 cm) – KDE (ca. 8 mm) – Rekultivierungs-Boden (mind. 2,7 m Unterboden + 0,3 m Oberboden)
- B3 – Deponieasphalttragschicht – AC 16 T-DA (mind. 6 cm) – Deponieasphaltdichtungsschicht – AC 11 D-DA (mind. 4 cm) – mineralische Entwässerung 16/32 mm – Trenn-/Filtervlies 300 g/m² (ca. 3 mm) – Rekultivierungs-Boden (mind. 0,8 m Unterboden + 0,2 m Oberboden)
- B4 – Deponieasphalttragschicht – AC 16 T-DA (mind. 6 cm) – Deponieasphaltdichtungsschicht – AC 11 D-DA (mind. 4 cm) – mineralische Entwässerung 16/32 mm – Trenn-/Filtervlies 300 g/m² (ca. 3 mm) – Rekultivierungs-Boden (mind. 2,7 m Unterboden + 0,3 m Oberboden).

Außerdem wurde der untersuchte Zeitraum in drei Perioden unterteilt, nämlich 1999 – 2020, 2021 – 2050 und 2051 – 2100. Da das HELP-Modell den Effekt der Alterung des Abdichtungselements nicht simulieren kann, wurde zusätzlich ein Worst Case betrachtet. In diesem Sinne wurden drei Normalfälle (0 Fabrikationsfehlstellendichte (FKF) und 0 Einbaufehlstellendichte (EBF)) für die drei Perioden und ein Worst Case (0 FKF und 2 EBF/ha) während 2051 – 2100 entwickelt. Da in Deutschland aufgrund der strengen

Qualitätssicherungsmaßnahmen im Deponiebau FKF nicht vorkommen, wurden diese auf Null gesetzt. Auf die Baustelle gelieferte KDB-Rollen mit FKF unterliegen der Fremdprüfung und dürfen nicht eingebaut werden. EBF sollten bei sachgerechter Qualitätssicherung beim Einbau auch ausgeschlossen sein, jedoch ist nicht mit vollständiger Sicherheit auszuschließen, dass in der fernen Zukunft eine lokale Beschädigung der KDB erfolgen kann. Daher wurden hier für den Zeitraum 2051 – 2100 zwei EBF/ha angesetzt. Diese Fehlstellen bilden praktisch Löcher mit einem Durchmesser von maximal 1 mm und können daher in der Praxis fluid- und somit auch radondurchgängig sein. In den Ergebnistabellen sind jeweils folgende Zustände als meteorologische Szenarien darstellt (Emissionsszenarien - Representative Concentration Pathway RCP):

- Istzustand Klima 1999 – 2020 (Messwerte)
- Prognosezustand Klima 2021 – 2050 und 2051 – 2100 (Prognosewerte des LfULG)
- Emissionsszenarium RCP 2.6 für 2021-2051 und 2051 – 2100 sowie worst case für 2051 – 2100
- Emissionsszenarium RCP 4.5 für 2021 – 2050 und 2051 – 2100 sowie worst case für 2051 – 2100
- Emissionsszenarium RCP 8.5 für 2021 – 2050 und 2051 – 2100 sowie worst case für 2051 – 2100.



© Fengqing Li

Bild 2: Zeitliche Muster von vier klimatischen Variablen zwischen 1999 und 2100 unter drei Emissionsszenarien

Der Begriff repräsentativer Konzentrationspfad (representative concentration pathway, RCP) wird seit dem Fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) zur Beschreibung von Szenarien für den Verlauf der absoluten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre verwendet. Dort wurden vier Szenarien ausgewiesen, die entsprechend dem angenommenen Bereich des Strahlungsantriebs im Jahre 2100 (z. B. $2,6 \text{ W/m}^2$) als RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5 bezeichnet werden. Dabei stellt RCP 2.6 ein Szenarium mit maximalen Klimaschutz-Anstrengungen dar, während RCP 8.5 einem „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario entspricht (sog. Baseline).

Die Simulationen des Wasserhaushalts wurden für die Jahre 1999 – 2100 durchgeführt. Zwei Datenquellen wurden in dieser Studie verwendet:

1. die beobachteten Klimadaten zwischen 1999 und 2020 wurden vom DWD (Deutscher Wetterdienst) bezogen; und
2. die vorhergesagten Klimadaten zwischen 2021 und 2100 wurden von ReKIS (Regionales Klimainformationssystem) bezogen.

Das verwendete Vorhersagemodell war CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018 mit den folgenden drei Emissionsszenarien des repräsentativen Konzentrationspfads (RCP): (1) die globalen jährlichen Treibhausgasemissionen in RCP 2.6 erreichen ihren Höhepunkt zwischen 2010 – 2020, danach gehen die Emissionen deutlich zurück; (2) die Emissionen in RCP 4.5 erreichen ihren Höhepunkt um 2040 und gehen dann zurück; (3) die Emissionen in RCP 8.5 steigen während des gesamten 21. Jahrhunderts.

Das Setting der Modellhalde wurde an die Halde 38 neu/208 der Wismut GmbH angelehnt, die sich in Aue-Bad Schlema, Sachsen

befindet. Daher wurden für die Simulation auch die meteorologischen Daten dieses Standorts verwendet, welche vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) sowohl als historische Daten als auch als Prognosedaten für verschiedene Prognoseszenarien, d. h. Emissionsszenarien, zur Verfügung gestellt wurden (**Tabelle 1**).

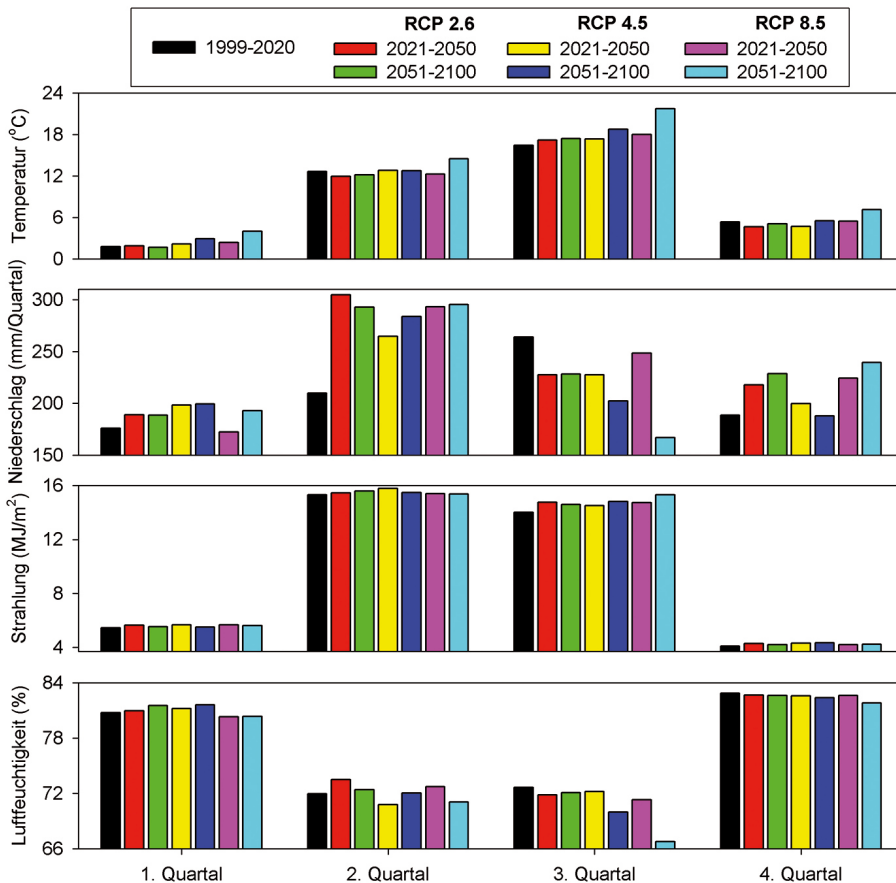
Ergebnisse der Modellierung

Entwicklung der Klimavariablen

Die mittleren zeitlichen Muster der ausgewählten vier klimatischen Variablen wurden über die vier Quartale analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die mittlere Temperatur im Laufe der Zeit in allen vier Quartalen anstieg. Der Niederschlag nahm im dritten Quartal stark ab, stieg aber im zweiten und vierten Quartal an. Bei der Globalstrahlung gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Quartalen. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit nahm im zweiten und dritten Quartal unter RCP 4.5 und RCP 8.5 im Zeitverlauf signifikant ab (**Bild 2** und **Bild 3**).

Entwicklung der langjährigen mittleren wasserhaushaltlichen Verhältnisse

Insgesamt sind die Werte des Oberflächenabflusses und der realen Verdunstung zwischen den Fällen von A und B identisch und die Werte der Durchsickerung gingen bei allen vier Fällen von der Gruppe B gegen Null. Die Niederschlagsmenge beeinflusst das Verhalten des



© Fengqing Li

Bild 3: Vergleiche von vier klimatischen Variablen im Quartal zwischen sieben Zeiträumen

Wasserhaushalts der Halde. Im Detail würde sich die Niederschlagsmenge in Oberflächenabfluss, reale Verdunstung, Drainwasser (nur die Fälle von den Abdeck-Szenarien A und B, d. h. das Vorhandensein einer Drainschicht), Versickerung und Veränderung des Wasserspeichers aufteilen. Bei den drei Vergleichsfällen ging der meiste Niederschlag in die reale Verdunstung und Perkolatation. Die Versickerungsmenge war beim Nullmodell geringfügig höher als bei den anderen beiden Vergleichsfällen. Mit zunehmender Mächtigkeit des Oberbodens verringerte sich die Versickerungsmenge drastisch, und die Oberflächenabflussmenge und die reale Verdunstung nahmen zu.

In den Abdeck-Szenarien A und B ging der meiste Niederschlag in die reale Verdunstung und den Oberflächenabfluss. Die Anteile der Versickerung durch KDB bzw. Asphalt waren unter allen vier Fällen von B Null. Diese Anteile waren auch unter allen vier Normalfällen von A Null, und 0,1 % unter dem „Worst Case“ von A3 und A4.

In **Tabelle 2** zeigt sich bei allen Varianten trotz höherer Jahresabflussmengen beim RCP 8.5 eine Zunahme der Versickerung bei Abnahme des Oberflächenabflusses, was an der hohen Durchlässigkeit der Schichten im Nullzustand liegt. Daneben bleibt darauf hinzuweisen, dass das HELP-Modell bei Oberflächenabflüssen < 10 mm nicht sehr sensitiv reagiert.

Im Istzustand gibt es keine Dichtungselemente. Aus diesem Grund zeigt die Wasserhaushaltsbilanz hohe Versickerungsmengen in den Haldenkörper. Die Ergebnisse zeigten, dass ohne Abdeckung mehr als die Hälfte des Niederschlages im Haldenkörper versickert, was erwartungsgemäß auch in der Zukunft ohne Abdeckung der Fall wäre. Die Ergebnisse für die aktuellen Abdeckungen zeigen für

die Einschichtabdeckung etwa 100 mm pro Jahr weniger als ohne Abdeckung, und für das Zweischichtsystem etwa 200 mm pro Jahr weniger Versickerung in den Haldenkörper.

Die Verdunstung nahm in der Simulation tendenziell im Betrachtungszeitraum nach 2050 zu, was an den prognostizierten höheren Jahresmitteltemperaturen liegt. Prinzipiell bleibt festzuhalten, dass der Anteil der Versickerung im Istzustand (ohne Abdeckung und mineralischer Abdeckung, aber ohne Abdichtung) etwas höher ist als die Verdunstung. Dies liegt an den vergleichsweise hohen Durchlässigkeiten des Haldenkörpers, die die Versickerung begünstigen. Dies trifft auch für bestehende Abdecksysteme ohne Dichtungselement zu, da durch die Unterschiede in den Kf-Werten ein hydraulisches Gefälle in den Haldenkörper besteht.

Die Ergebnisse für die Simulation des Zustands mit Abdichtungssystem erbringen erwartungsgemäß Versickerungsraten um Null. Im aktuellen klimatischen Zustand, aber auch für die klimatischen Prognosezustände ist für mittlere Verhältnisse ohne Leckstellen im Dichtungselement die Versickerung durchgehend praktisch Null, und das System somit auch konvektionsdicht. Das heißt, dass auch kein Radon die Dichtungselemente durchdringen kann.

Bild 4 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der für die reale Verdunstung und die Durchsickerung im Laufe der Zeit. Für den Worst Case von A1-A4 blieb die Menge der Versickerung durch die KDB im Laufe der Zeit auf einem ähnlichen Niveau, mit einer höheren Menge unter dem RCP 2.6-Szenario. Für den Worst Case von A1 und A2 stieg die Menge der Versickerung durch den Haldenkörper in der ersten Hälfte des Zeitraums 2051 – 2100 marginal und in der zweiten Hälfte des

Zeitraums (auf Grund der Annahme von Schäden am Dichtungselement) schneller an. Der Wendepunkt war für den Worst Case von A3 und A4 früher, und zwar im Jahr 2057 bedingt durch die Fehlstellenannahmen. Die Werte erreichten ein Gleichgewicht im Jahr 2065.

Die wesentlichen Ergebnisse der wasserhaushaltlichen Modellrechnungen für die Abdicht-Szenarien A und B auf der Modellhalde zeigten, dass im Betrachtungszeitraum bis 2050 etwa die Hälfte des Niederschlagswassers verdunstet und die andere Hälfte in der Entwässerungsschicht abfließt. Im Betrachtungszeitraum nach 2050 nahm die Verdunstung weiter zu, was zu einer Abnahme des Drainabflusses im Drainelement führte. Die Versickerung im Normalzustand (keine Defekte der Dichtungselemente) blieb nahezu durchgehend Null, d. h.

dass die Dichtungselemente ihre Funktion erfüllen und keine Versickerung stattfindet. Dies änderte sich erst, allerdings geringfügig, wenn in der Langfristbetrachtung der „Worst Case“ mit Fehlstellen im Abdichtungselement berücksichtigt wurden. In einem solchen Fall können unter der KDB bis zu 8 mm Versickerung auftreten, was letztlich ebenfalls als sehr geringe Versickerungsrate zu bewerten ist.

Auswertung der Simulationsergebnisse

Das Versickerungsverhalten von drei Vergleichsvarianten im Istzustand und acht Abdicht-Szenarien wurden mit Hilfe des HELP-

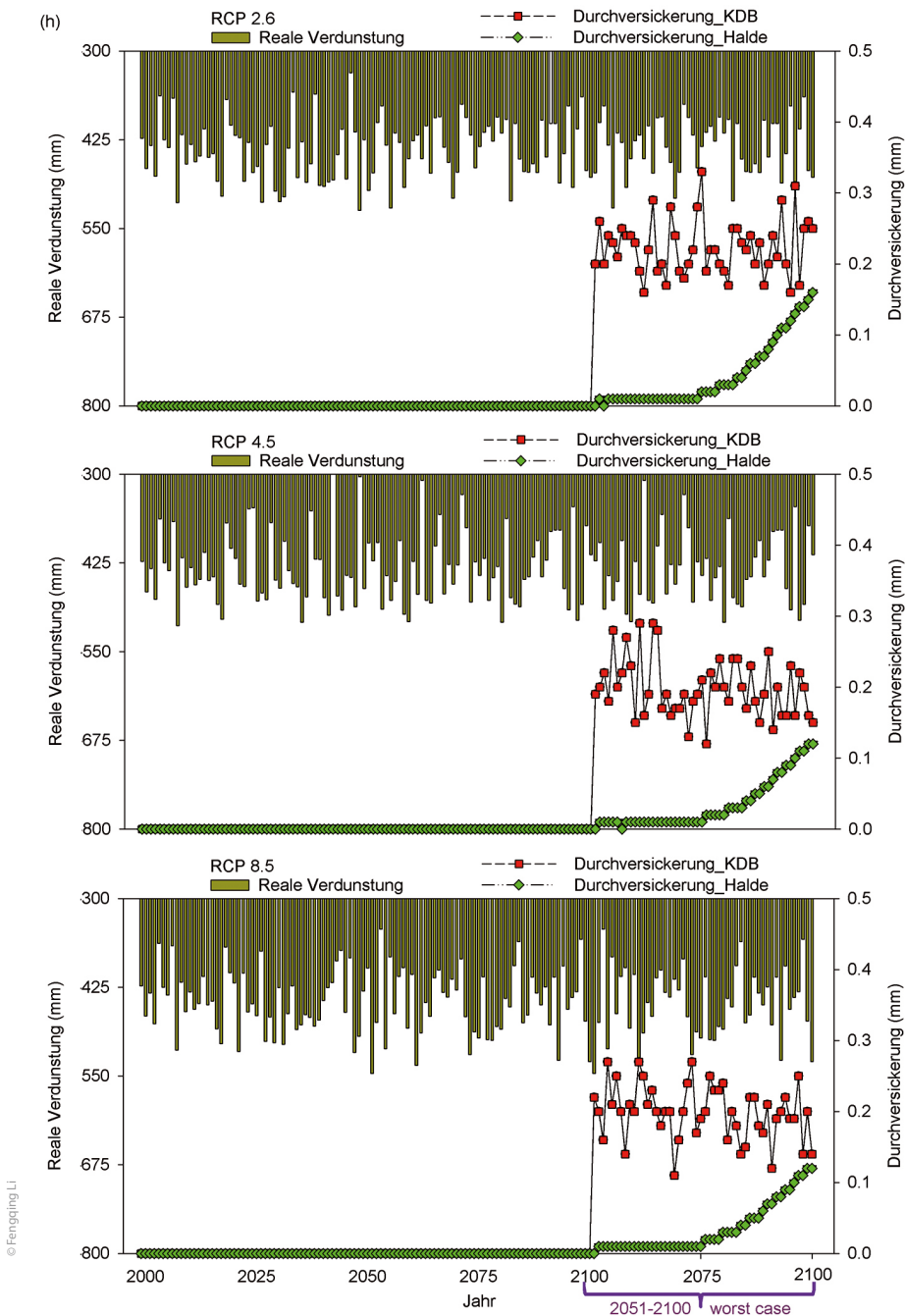


Bild 4: Beispielhafte Darstellung der Simulationsergebnisse für die Konfiguration A1: reale Verdunstung und Durchsickerung

Tabelle 2: Verteilung der Niederschlagsmenge in der Haldenschicht für den Nullzustand, Istzustand 1 (Einschichtabdeckung) und Istzustand 2 (Zweischichtabdeckung) in mm/a

Wert	Variante	Szenario	Zeitraum	Oberflächenabfluss	Reale Verdunstung	Versickerung	
Wert [mm/a]	Nullmodell	Historisch	1999 – 2020	11,20	3.351,23	447,98	
		RCP 2.6	2021 – 2051	2,31	385,63	536,74	
			2051 – 2100	3,83	363,59	558,11	
		RCP 4.5	2021 – 2050	6,28	359,11	502,12	
			2051 – 2100	1,43	365,47	493,87	
		RCP 8.5	2021 – 2050	0,58	376,00	541,98	
			2051 – 2100	0,26	370,48	514,64	
		Istzustand 1 Einschicht- abdeckung	Historisch	1999 – 2020	6,85	442,07	358,89
			RCP 2.6	2021 – 2051	1,75	460,23	459,85
				2051 – 2100	2,48	440,48	480,37
			RCP 4.5	2021 – 2051	3,16	437,42	424,49
				2051 – 2100	1,41	437,73	421,30
	RCP 8.5		2021 – 2051	1,53	458,15	455,52	
			2051 – 2100	0,69	452,61	430,60	
	Istzustand 2 Zweischicht- abdeckung		Historisch	1999 – 2020	19,20	533,46	253,31
		RCP 2.6	2021 – 2051	8,02	547,93	365,43	
			2051 – 2100	10,77	533,37	378,87	
		RCP 4.5	2021 – 2051	12,03	535,35	320,09	
			2051 – 2100	5,68	536,41	319,09	
		RCP 8.5	2021 – 2051	8,14	557,15	351,40	
			2051 – 2100	4,10	562,04	318,28	

Quelle: Fengqing Li

Modells für aktuelle klimatische Zustände und verschiedene Klimawandelzustände analysiert.

- Die Ergebnisse zeigen, dass ohne Abdeckung mehr als die Hälfte des Niederschlages im Haldenkörper versickert, was erwartungsgemäß auch in der Zukunft ohne Abdeckung der Fall wäre. Die Ergebnisse für die aktuellen Abdeckungen zeigen für die Einschichtabdeckung etwa 100 mm pro Jahr weniger als ohne Abdeckung, und für das Zweischichtsystem etwa 200 mm weniger Versickerung in den Haldenkörper. Wesentliche Ursache hierfür ist eine erhöhte Verdunstung.
- Die Versickerungsmengen in den nassen Jahren waren mehr als doppelt so hoch wie die des langfristigen Jahreswertes im Nullmodell. Diese Menge nahm mit zunehmender Mächtigkeit des Oberbodens ab. Aufgrund des Effekts der KDB näherten sich die Versickerungsmengen durch die KDB unter beiden Szenarien (d. h. Langzeit und nasse Jahre) dem Wert Null an. Im „Worst Case“ mit nassen Verhältnissen und Leckagen waren die Versickerungsmengen in den nassen Jahren jedoch etwa 25 % höher als der langfristige Jahreswert, blieben aber auf insgesamt niedrigem Niveau.
- Die Werte des langjährigen Oberflächenabflusses und der realen Verdunstung sind wischen den Abdeck-Szenarien A und B identisch, die Werte der Durchsickerung gingen bei allen vier Fällen der Abdeck-Szenarien B gegen Null. Für alle elf Fälle nahm der Oberflächenabfluss mit der Zeit ab. Für die drei Vergleichsfälle gab es keine klaren Trends für die reale Verdunstung und die Durchsickerung im Laufe der Zeit. Allerdings war die Durch-

sickerung unter dem „Worst Case“ geringfügig höher (bis 8 mm/a) als im Normalzustand ohne Leckagen.

- Der Oberflächenabfluss stieg unmittelbar nach starken Regenfällen an. Die Spitzenwerte der Versickerung durch den Haldenkörper wurden jedoch in den Vergleichsfällen erst drei bis fünf Tage später erreicht. Die Spitzenwerte der Versickerung durch die KDB wurden unter den Abdeck-Szenarien A ein bis drei Tage später beobachtet. Es gab jedoch keine klaren ansteigenden Muster nach starken Regenereignissen für die Versickerung durch den Haldenkörper unter den Abdeck-Szenarien A.
- In Bezug auf die Menge der Versickerung durch den Haldenkörper war die Qualität der Asphaltabdichtung sehr geringfügig niedriger als die der KDB (wegen der etwas geringeren Permeabilität des KDB-Dichtungselements, der Unterschied ist aber sehr klein), und das Kunststoffdrainelement KDE führte zu besseren Ergebnissen als die mineralische Entwässerung. Aus wasserhaushaltlicher Sicht werden die günstigsten Ergebnisse mit den Abdeck-Szenarien B1 oder B2 (Asphaltabdichtung als Dichtelement) erzielt, während geringfügig schlechtere Ergebnisse mit den Abdeck-Szenarien A3 oder A4 (KDB als Dichtelement) erzielt werden. Außerhalb des „Worst Case“-Szenarios geht die Durchsickerung durch die Dichtungselemente gegen Null.
- Im „Worst Case“-Szenario ist zwar prinzipiell eine geringe Versickerung und somit auch Gasdurchlässigkeit gegeben, allerdings sind die Mengen auf Grund der geringen Anzahl der Fehlstellen mit sehr kleinen Durchmessern sehr klein.

- Für den „Worst Case“ der Abdeck-Szenarien A1 und A2 stieg die Menge der Versickerung durch den Haldenkörper in der ersten Hälfte des Zeitraums 2051 – 2100 langsam und in der zweiten Hälfte des Zeitraums schneller an, allerdings nach wie vor auf sehr niedrigem Niveau. Der Wendepunkt war für den „Worst Case“ von A3 und A4 früher, nämlich im Jahr 2057, und die Werte erreichten ein Gleichgewicht im Jahr 2065.
- In den Zukunftsszenarien nahm die Austrocknungsgefährdung sowohl von der kritischen auch als der extremen Situation zu, wobei die extreme Situation noch stärker war, nämlich auf 53,9 % (für kritisch: 39,8 %). Der Anteil des nassen Bodens nahm in der Zukunft dagegen um 27,7 % ab.

Schlußfolgerungen

Beide Abdichtkonfigurationen, d. h. Asphaltabdichtung und KDB, können im wasserhaushaltlichen Sinne kurz- und langfristig, und auch im „Worst Case“ als dicht bezeichnet werden. Im Umkehrschluss sind sie somit praktisch auch konvektionsdicht. Eine weiterführende Eignung der Abdichtungssysteme ist im Anwendungsfall daher nicht auf der Basis von wasserhaushaltlichen Anforderungen, sondern geomechanischen und ökonomischen Aspekten zu entscheiden. Austrocknungsgefährdung ist für beide Dichtungselemente ausgeschlossen, da sie nicht den Austrocknungsprozessen mineralischer Materialien unterliegen. Austrocknungsprozesse betreffen somit nur mineralische Schichten wie die Rekultivierungsschicht. Falls es zu einem Ausfall des Bewuchses kommen sollte und somit Erosion eintreten kann, ist eine Beschädigung des Dichtungselements nicht völlig ausgeschlossen. Allerdings ist hier die Widerstandsfähigkeit der Asphaltabdichtung auf Grund der höheren Schichtdicke als höher zu bewerten.

Danksagung

Das Vorhaben „Langzeitstabilität sanierter Halden aus dem Uranbergbau“ wurde finanziert durch das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (Projektlaufzeit: 03/2020 – 09/2022). Die Projektleitung wurde durch Prof. Dr.-Ing. Said Al-Akel, Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e. V. realisiert. Der Forschungsbericht des Vorhabens wurde in der LfULG-Schriftenreihe Heft 27/2022 veröffentlicht und ist im Internet verfügbar [4]. Die Wasserhaushaltsstudie wurde im Rahmen des Forschungsprojektes im Auftrag der DBI-EWI GmbH durchgeführt.

Literatur

- [1] Al-Akel, S.; Kunze, C.; Müller, M.; Schneider, P.: Langzeitstabilität sanierter Halden des Uranbergbaus - Bericht zum Arbeitspaket 1. LFULG (Hrsg.), Dresden, September 2020
- [2] Barnekow, U. et al. (2013): Fifteen years of design, construction and monitoring of soil covers on Wismut's uranium mining legacy sites – a synopsis, https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1352_10_Barnekow/, 12.06.2020
- [3] Berger, K., (2022). On the new Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model version 4 for the water balance simulation of landfill liner systems. Detritus 70–76.
- [4] <https://www.strahlenschutz.sachsen.de/langzeitstabilitaet-sanierter-uranbergbauhalden-31658.html>

Autoren

Dr. Fengqing Li

Hochschule Magdeburg-Stendal
 Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
 39114 Magdeburg
 und
 Wasserverband Burg
 Blumenstraße 9B
 39288 Burg (bei Magdeburg)

Prof. Dr. Petra Schneider

Hochschule Magdeburg-Stendal
 Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
 39114 Magdeburg
 petra.schneider@h2.de
 und
 DBI-EWI GmbH
 Halsbrücker Straße 34
 09599 Freiberg



Uranerzbergbau



Lersow, M.: Überwachungsbedürftige radioaktive Rückstände des Uranerzbergbaus. In: Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum. 2018. <https://sn.pub/4nza71>