

Langzeitstabilität sanierter Uranbergbauhalden

Schriftenreihe, Heft 27/2022



Anforderung an die Sanierung von Halden aus dem Uranbergbau und das Langzeit- monitoring zum Sanierungserfolg unter Beachtung des Optimierungsgrund- satzes und der Langzeitstabilität

Prof. Dr.-Ing. Said Al-Akel, Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.

Dr. Christian Kunze, IAF-Radioökologie GmbH

Dr.-Ing. Mario Müller, DBI-EWI GmbH

Prof. Dr. Petra Schneider, DBI-EWI GmbH

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Stand der Wissenschaft und Technik	10
2.1	Kenntnisstand zum Radontransport in Halden.....	10
2.2	Technische Anforderungen.....	12
2.3	Mögliche Sanierungsmethoden für Halden.....	12
2.4	Auswertung der Sanierungsmethoden.....	14
2.5	Bewertung der Abdichtung bezüglich des Radontransports.....	15
2.5.1	Bedeutung von Kaltluftabflüssen.....	15
2.5.2	Teilabdeckung von Böschungsbereichen.....	16
2.5.3	Auswirkungen von Defekten in der Haldenoberflächenabdichtung.....	18
2.6	Schlussfolgerung.....	20
3	Optimierung des Abdichtungssystems	21
3.1	Oberflächenabdichtung.....	22
3.1.1	Aufbau der optimierten Oberflächenabdichtung.....	22
3.1.2	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	23
3.1.3	Planungshilfe aus radiologischer Sicht.....	26
3.1.4	Qualitätssicherung und -prüfung.....	27
3.2	Vertikale Abdichtung.....	30
4	Modellhalde	32
4.1	Geometrie.....	32
4.2	Parametrisierung des Oberflächenabdichtungssystems.....	35
4.3	Abschätzung des Radonaustrages aus der Modellhalde.....	36
5	Wasserhaushalt von Halden – Simulation der Sickerwasserbildung	40
5.1	Theoretische Grundlagen.....	40
5.2	Vorgehensweise bei der Simulation der Sickerwasserbildung.....	43
5.2.1	HELP-Modell.....	43
5.2.2	Grundlagendaten.....	44
5.2.2.1	Meteorologische Parameter.....	46
5.2.2.2	Geographische und geometrische Parameter.....	46
5.2.2.3	Bewuchsparameter.....	47
5.2.2.4	Pedologische Parameter.....	48
5.3	Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung.....	50
5.3.1	Klimavariablen.....	50
5.3.2	Langjährige mittlere Verhältnisse.....	51
5.4	Auswertung der Ergebnisse.....	57
6	Stand sicherheitsuntersuchung	59
6.1	Untersuchungsszenarien.....	60
6.2	Kennwerte der Stand sicherheitsberechnungen.....	63
6.3	Stand sicherheit der Haldenböschungen.....	64
6.4	Nachweis der Gleitsicherheit nicht bewehrter Systeme.....	69

6.5	Nachweis der Gleitsicherheit geokunststoffbewehrter Systeme	70
6.6	Standicherheit vorhandener Haldenabdeckungen am Beispiel der Modellhalde	72
6.7	Präzisierung der Anwendungsgrenzen der Oberflächenabdichtungssysteme	75
7	Bewertung der Sanierungsvarianten	76
7.1	Oberflächenabdichtungssystem.....	78
7.2	Vertikale Abdichtung.....	83
8	Zusammenfassung.....	83
8.1	Oberflächenabdichtung.....	83
8.2	Vertikale Abdichtung.....	89
8.3	Ausblick.....	91
Literaturverzeichnis		92
A 1	Oberflächenabdichtungssystem	96
A 1.1	konvektionsdichtes Element Typ A: Kunststoffdichtungsbahn.....	96
A 1.2	konvektionsdichtes Element Typ B: Asphaltabdichtung	97
A 2	Wasserhaushaltsmodellierung.....	99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konvektionsströmung, Austritt aus dem Haldenfuß.....	11
Abbildung 2: Grundprinzip der Einkapselung von Altablagerungen [35].....	13
Abbildung 3: Radonexhalation aus der Haldenoberfläche	17
Abbildung 4: Anschlussausbildung Kunststoffbahn / vertikale Abdichtung, Herstellung und Qualitätsmanagement des Gussasphaltes laut [6]	30
Abbildung 5: Anschlussausbildung Asphaltabdichtung / vertikale Abdichtung, Herstellung und Qualitätsmanagement des Gussasphaltes laut [6]	31
Abbildung 6: Abdecksystem der Wismut für Halden im Erzgebirge [3].....	32
Abbildung 7: Grundriss einer freistehenden Modellhalde und angelehnten mit zwei Bermen	33
Abbildung 8: Querschnitt einer Halde mit zwei Bermen	34
Abbildung 9: Querschnitt einer Halde mit drei Bermen	34
Abbildung 10: Abschätzung des gesamten Radonaustrages aus der Modellhalde in Abhängigkeit vom Anteil der abgedichteten Böschungslänge	38
Abbildung 11: Schematisches Profil zum Aufbau einer Oberflächenabdichtung [29]	42
Abbildung 12: Schema für die Datenverarbeitung, Modellierung und Liste der Ausgangsdaten	46
Abbildung 13: Zeitliche Muster von vier klimatischen Variablen zwischen 1999 und 2100 unter drei Emissionsszenarien	50
Abbildung 14: Vergleiche von vier klimatischen Variablen im Quartal zwischen sieben Zeiträumen ..	50
Abbildung 15: Grundformen der Böschungsversagensmechanismen.....	59
Abbildung 16: Innere und äußere Standsicherheitsbetrachtung einer Halde	60
Abbildung 17: Oberflächenrutschungen in der Bauphase auf Grund der schweren Verkehrslast	66
Abbildung 18: Vergleich der Ausnutzungsgrade für die Endzustände 1 und 2.....	67
Abbildung 19: Einfluss der Bermenanzahl auf den Ausnutzungsgrad.....	68
Abbildung 20: Definition der Teilböschungsbereiche der Modellhalde	68
Abbildung 21: Abhängigkeit Kohäsion und Reibungswinkel des Bodens	69
Abbildung 22: Anordnung des Geogitters und Verankerungslänge L_1	71
Abbildung 23: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Böschungsbruchberechnungen, Berechnungsnummer aus Spalte 3 der Tabelle 21 zu entnehmen	74
Abbildung 24: Langjährige Muster von Niederschlag, Oberflächenabfluss, realer Verdunstung und Durchsickerung für sieben Fälle.....	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile möglicher Oberflächenabdichtungssysteme	14
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der vertikalen Abdichtungssysteme	15
Tabelle 3: Übersicht der optimierten Oberflächenabdichtungssysteme	22
Tabelle 4: Zusammenfassung der Geometrie der Modellhalde	34
Tabelle 5: Übersicht der bodenkundlichen Parametrisierung der Schichtelemente der Modelhalde	35
Tabelle 6: Bodenkennwerte, mineralische Böden	36
Tabelle 7: Kennwerte, Geokunststoffe und Asphalt.....	36
Tabelle 8: Betrachtete Szenarien zum Radonaustrag	37
Tabelle 9: Verwendete Modellparameter.....	37
Tabelle 10: Geographische- und Bewuchseigenschaften der Modellhalde und Eigenschaften der KDB über den Betrachtungszeitraum	47
Tabelle 11: Beschreibung der Parametrisierung der Schichtprofile für die Szenarien	49
Tabelle 12: Verteilung der Niederschlagsmenge in der Haldenschicht für den Nullzustand, Istzustand 1 (Einschichtabdeckung) und Istzustand 2 (Zweischichtabdeckung) in mm/a	52
Tabelle 13: Verteilung der Niederschlagsmenge in Oberflächenabdichtung und Halde für die Oberflächenabdicht-Szenarien A, in % des Niederschlages und in mm/a.....	53
Tabelle 14: Verteilung der Niederschlagsmenge in Oberflächenabdichtung und Halde für die Oberflächenabdichtungs-Szenarien B, in % des Niederschlages und in mm/a	55
Tabelle 15: Einwirkungen der Bemessungssituationen zum Gleitsicherheitsnachweis gemäß [30] ...	61
Tabelle 16: Ermittelte böschungparallele Windlasten FW	64
Tabelle 17: Versagenszustände der Haldenoberflächenabdichtung.....	65
Tabelle 18: Mindestscherfestigkeit des Bodens / des Geokunststoffes für die Erfüllung des Stand sicherheitsnachweises	70
Tabelle 19: Lastannahmen der Untersuchungsszenarien vorhandener Haldenabdeckung	72
Tabelle 20: Bodenkennwerte, mineralische Böden der vorhandenen Haldenabdeckung	72
Tabelle 21: Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchung der vorhandenen Haldenabdeckung.....	74
Tabelle 22: Wichtung der Untersuchungskriterien zur Auswahl von optimierten Lösungsansätzen ...	77
Tabelle 23: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Anwendung eines Dichtungs- kontrollsystems (DKS) bei der Sanierung von Uranbergbauhalden	79
Tabelle 24: Wirksamkeit gegen Radonaustrag in Abhängigkeit vom Anteil der abgedichteten Bö- schungslänge der Modellhalde.....	80
Tabelle 25: Zusammenfassung der Bewertung der Oberflächenabdichtungssysteme für voll- abgedeckte Halden	81
Tabelle 26: Vergleich der Bewertungsergebnisse für Voll- und Teilabdeckung der Halden	82
Tabelle 27: Zusammenfassung der Bewertung der vertikalen Abdichtungssysteme	83
Tabelle 28: Zusammenfassende Darstellung der Eignung der Oberflächenabdichtungssysteme.....	87
Tabelle 29: Eignung der vertikalen Abdichtungssysteme zur Sicherung der Dichtigkeit des Systems.....	90

Abkürzungsverzeichnis

1: <i>n</i>	Seitenverhältnis einer Böschung (vertikal: horizontal)
B	Anzahl der Berme
BAM	Bundesanstalt für Materialprüfung
BS-A	Bemessungssituation für außergewöhnliche Einwirkungen
BS-P	Bemessungssituation für ständige Einwirkungen aus üblicher Nutzung
BS-T	Bemessungssituation für vorübergehende Einwirkungen und zeitlich begrenzte Zustände
HDPE	High-density polyethylene
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
KDE	Kunststoffdränelement
ORS	organische Rekultivierungsschicht
TAS	Trag- und Ausgleichsschicht

Formelzeichenverzeichnis

a'_k	wirksame Adhäsion eines Geokunststoffes
c'_k	wirksame Kohäsion eines Bodens
E	Emanationskoeffizient des Haldenmaterials
g	Fallbeschleunigung
H	geodätische Höhendifferenz zwischen Haldenfuß und -plateau in m
k_A	Permeabilität der Dichtschicht
k_H	Permeabilität des Haldenmaterials
$k_H(\theta)$	sättigungsabhängige Permeabilität des Haldenmaterials ¹
L	Länge des „Stromfadens“ im Haldeninneren
l	Gesamtböschungslänge
L_A	Dicke der Dichtschicht
L_H	Länge des konvektiven Stromfadens in der Halde
l_i	Böschungslänge zwischen zwei Berme
l_p	Länge der Böschungsschulter zwischen Böschungsoberkante und Mittelpunkt des Plateaus
P	Radonproduktionsrate in Bq/(m ³ s)
R	spezifische Aktivität von Ra-226 im Haldenmaterial
$R_{B,k0}$	Kurzzeitfestigkeit eines Geokunststoffes
v_B	Strömungsgeschwindigkeit entlang eines Stromfadens
α	Ausdehnungskoeffizient von Luft (0,0037 /K) bei der Temperatur 283.15 K
β	Böschungsneigung
β_p	Neigung der Plateauoberfläche (5:100)
γ_k	Wichte des Bodens
γ'_k	Wichte des Bodens unter Auftrieb
$\gamma_{r,k}$	wassergesättigte Wichte des Bodens

¹ vereinfachend wurde von trockenem Haldenmaterial ausgegangen

δ'_k	wirksamer Reibungsbeiwert eines Geokunststoffes
Δh	vertikaler Abstand der Bermen
Δh_p	Höhenunterschied zwischen Plateaumittelpunkt und Plateaurand einer Halde
Δp	Druckdifferenz entlang des Stromfadens
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Innerem der Halde und Außenluft
ε	effektive Porosität des Haldenmaterials
ε_1	Dehnung eines Geogitters
η	Viskosität der Luft (1,8E-5 Pa s)
λ	Zerfallskonstante von Rn-222 (2,1E-6 s ⁻¹)
ρ	Luftdichte beim mittleren Luftdruck (1013 hPa)
ρ_b	Schüttdichte des Haldenmaterials
φ'_k	wirksamer Reibungswinkel eines Bodens

1 Einleitung

Bei der Gewinnung von Uran entstehen große Mengen an schwach radioaktiven Rückständen. Diese Rückstände wurden in Form von Halden und Industriellen Absetzanlagen in der Nähe des Gewinnungsortes abgelagert. Bei der Errichtung der Halden und Industriellen Absetzanlagen wurden zwar geotechnische Aspekte wie beispielsweise Böschungsstandsicherheiten, Verdichtungsgrade usw. berücksichtigt, oftmals fanden Umweltaspekte jedoch keine Berücksichtigung, sodass die Standorte i.d.R. nicht von der Umgebung (Boden, Wasser, Luft) isoliert sind.

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 breitet sich in der Atmosphäre aus, wenn das Haldenmaterial nicht gasdicht abgedichtet ist. Eine Verunreinigung des Grundwassers ist i.d.R. auf eine fehlende Basisabdichtung zurückzuführen. Im Rahmen von Sanierungstätigkeiten der Halden seit den 1990er Jahren wurden u.a. Oberflächenabdichtungssysteme zur Minimierung 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 Abdeckungssysteme sowie Teilabdeckungen zur Anwendung [12].

Schwerpunktmäßig legt die aktuelle Studie das Augenmerk auf die Unterbrechung des Transportpfades von Radon aus dem Haldenmaterial in die Atmosphäre. Anlass dafür ist die festgestellte Reduzierung der Funktionalität, insbesondere bzgl. der Permeabilität der mineralischen Oberflächenabdichtungssysteme 5 bis 15 Jahre nach dem Bau. Mögliche Gründe zur Reduzierung der Funktionalität sind in [2] detailliert beschrieben. Ziel des Projektes ist es, wissenschaftlich begründete, technisch durchführbare Verfahren, die dem Optimierungsgrundsatz entsprechen, für die Sanierung und Nachsanierung radiologisch relevanter Halden in Sachsen zusammenzustellen. Das Sanierungsergebnis soll die Radonexhalation aus den Halden langfristig stabil vermindern, damit die effektive Referenzdosis von 1 mSv/a unterschritten wird. Anhand eines abgestimmten Fallbeispiels "Modelhalde" wird die Wirksamkeit der abgeleiteten Lösungsvarianten in der Praxisanwendung analysiert und hinsichtlich der bautechnischen Realisierbarkeit, der bodenmechanischen, wasserhaushaltlichen und radonfachlichen Fragestellungen, insbesondere auf ihre Langzeitstabilität, beurteilt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Kenntnisstand zum Radontransport in Halden

Radon (Rn-222) entsteht durch radioaktiven Zerfall von Radium (Ra-226) in der Uran-Radium-Zerfallsreihe. Die volumenbezogene Abgabe von Radon in das Porenvolumen des Haldenmaterials ist

$$P = ER\lambda\rho_b \quad (1)$$

- P Radonproduktionsrate in Bq/(m³s)
- λ Zerfallskonstante von Rn-222 (2,1E-6 s⁻¹)
- E Emanationskoeffizient des Haldenmaterials
- ρ_b Schüttdichte des Haldenmaterials
- R spezifische Aktivität von Ra-226 im Haldenmaterial

Radon in der Porenluft des Haldenmaterials steht für einen konvektiven und diffusiven Transport an die Haldenoberfläche zur Verfügung. Der Radonaustrag ist im Wesentlichen an eine konvektive Luftströmung gebunden, welche aufgrund eines thermischen Gradienten zwischen der Porenluft im Haldenmaterial und der Umgebungsluft angetrieben wird.

Zur Berechnung der Druckdifferenz entlang eines Stromfadens wird üblicherweise die vereinfachende Annahme einer gleichmäßigen Temperatur jeweils im Haldeninneren und in der Außenluft sowie ein stationärer Zustand zugrunde gelegt. Die Druckdifferenz Δp zwischen dem Innerem und dem Äußerem der Halde am Haldenfuß wird beschrieben durch

$$\Delta p = \rho H \alpha g \Delta T \quad (2)$$

- ρ Luftdichte beim mittleren Luftdruck (1013 hPa)
- g Fallbeschleunigung
- α Ausdehnungskoeffizient von Luft (0,0037 /K) bei der Temperatur 283.15 K
- ΔT Temperaturdifferenz zwischen Innerem der Halde und Außenluft
- H geodätische Höhendifferenz zwischen Haldenfuß und -plateau in m.

Die Strömungsgeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit) v_B entlang eines Stromfadens im Haldenmaterial kann mit Gleichung 3 ermittelt werden.

$$v_B = k_H(\theta) \frac{\Delta p}{\eta L} \quad (3)$$

- v_B Strömungsgeschwindigkeit entlang eines Stromfadens
- η Viskosität der Luft (1,8E-5 Pa s)
- $k_H(\theta)$ sättigungsabhängige Permeabilität des Haldenmaterials, vereinfachend kann bei Halden mit Oberflächenabdichtung von trockenem Haldenmaterial ausgegangen werden
- Δp Druckdifferenz entlang des Stromfadens
- L Länge des „Stromfadens“ im Haldeninneren

Die je nach Vorzeichen der Temperaturdifferenz am Haldenfuß bzw. aus dem Haldenplateau austretende Radonstromdichte beträgt dann unter der Annahme trockenen Haldenmaterials:

$$J_k = \frac{P v_B}{\lambda} \left(1 - \exp \left[\frac{-\lambda \varepsilon L}{v_B} \right] \right) \quad (4)$$

ε effektive Porosität des Haldenmaterials

Für die weiteren Betrachtungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen ist jedoch lediglich ein Vergleich zwischen nicht abgedeckter und abgedeckter Halde vorgesehen, sodass die genauen Flächenanteile mit konvektiver Strömung auf der gesamten Haldenoberfläche nicht relevant sind.

Der Austrag von Radon aus Halden des Uranbergbaus führt insbesondere am Haldenfuß zu einer erhöhten Aktivitätskonzentration von Radon und Radonfolgeprodukten, was wiederum zu einer erhöhten Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung führen kann. Der Austrag der im Vergleich zur Umgebungstemperatur kalten Luft mit einer hohen Radonaktivitätskonzentration am Haldenfuß und damit eine erhöhte Exposition der dort lebenden Bevölkerung ist vorrangig auf die Sommermonate beschränkt. In Wintermonaten kehren sich die Strömungsverhältnisse um, die dann im Vergleich zur Umgebungstemperatur wärmere Luft im Haldeninneren steigt nach oben und tritt auf dem Haldenplateau aus. Bezüglich der Exposition der allgemeinen Bevölkerung ist der konvektive Radonaustrag am Haldenfuß somit besonders in den Sommermonaten relevant, siehe Abbildung 1. Während in der unteren Böschungshälfte die Strömung radonreicher Luft aus der Halde heraus gerichtet ist, wird in der oberen Böschungshälfte (d.h. oberhalb eines "neutralen Punktes") Umgebungsluft in den Haldenkörper eingezogen.

In den Wintermonaten kehrt sich die Temperaturdifferenz zwischen Haldeninnerem, der Umgebungsluft und damit auch die Strömungsrichtung um.

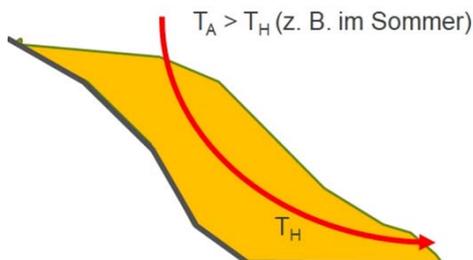


Abbildung 1: Konvektionsströmung, Austritt aus dem Haldenfuß

Unter den für Halden des Uranbergbaus im Erzgebirge charakteristischen Annahmen:

- Permeabilität des Haldenmaterials $1\text{E-}9 \text{ m}^2$
- Temperaturdifferenz zwischen Haldeninnerem und Umgebungsluft: 10 K
- Geodätische Höhendifferenz: 50 m
- Spezifische Aktivität von Ra-226: 1 Bq/g
- Dichte des Haldenmaterials: 2.000 kg/m^3
- Porosität des Haldenmaterials: 0,31
- Emanationskoeffizient des (trockenen) Haldenmaterials: 0,1

liegt die an eine konvektive Luftströmung gekoppelte Radonstromdichte in der Größenordnung von $10 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Dieser Wert ist durch Messungen der Wismut GmbH belegt, wobei zu beachten ist, dass sowohl zwischen einzelnen Halden als auch innerhalb einer Halde erhebliche Schwankungen auftreten können. Beispielsweise liegt teilweise eine starke Klassierung des Haldenmaterials vor [62], so dass Fließwege und Austrittsstellen der Konvektionsströmung stark lokalisiert sein können. Darüber hinaus sind unterschiedliche meteorologische und topographische Bedingungen zu beachten. Grundsätzlich ist stets die konkrete Betrachtung einer einzelnen Halde erforderlich.

Der konvektive Radonaustrag kann nur durch eine Abdichtung mit einer Permeabilität in der Größenordnung von höchstens $1\text{E-}12 \text{ m}^2$ verringert werden. Auf die Sanierungsvarianten, mit denen diese Anforderung dauerhaft erfüllt werden kann, wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Die diffusive Komponente des Radonaustrages aus Bergbauhalden ist im Vergleich zur Konvektion im Regelfall um mindestens eine Größenordnung geringer. Mit den oben angegebenen Parametern und einer Diffusionskonstante des Haldenmaterials von $3\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ beträgt die Stromdichte des diffusiven Radonaustrags etwa $5\text{E-}1 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Die diffusive Komponente wird deshalb im Weiteren nicht weiter betrachtet.

Wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der Radonaktivitätskonzentration am Haldenfuß sind deshalb an die Unterbindung bzw. Verringerung der Konvektionsströmung innerhalb des Haldenmaterials gebunden. Darauf konzentrieren sich die in diesem Vorhaben beschriebenen Varianten.

2.2 Technische Anforderungen

Die Anforderungen an die Permeabilität sind im Abschnitt 2.1 definiert. Daraus ergeben sich weitere Anforderungen an die langfristige Permeabilität von Haldenabdeckungen. Die bislang gemachten Erfahrungen zeigen jedoch, dass diese Anforderungen bei mineralischen Abdeckungen mit natürlichen Böden nicht erreichbar sind [2]. Durchwurzelung, grabende Tiere sowie Frost-Tau- und Feucht-Trocken-Wechsel verbunden mit den veränderten klimatischen Bedingungen in Sachsen führen zu einer negativen Beeinflussung der Bodenstruktur. Unzureichend geschützte mineralische Dichtungsschichten verlieren damit im Laufe der Zeit zu einem erheblichen Teil ihre Wirksamkeit [2]. Aus diesem Grund sind konvektionsdichte Abdichtungssysteme zu bevorzugen. Nach Durchsicht von zahlreichen internationalen Studien zur Abdeckung von Halden und industriellen Absetzanlagen in den Ländern Argentinien, Brasilien, Finnland, Frankreich, Südafrika, Japan, Schweden, der Ukraine, Australien und den USA, [26], [7], [28], [37] sind keine weiteren Oberflächenabdichtungssysteme als das in Deutschland angewandte System (mineralische Dichtung, Drainageschicht und Rekultivierungsboden) bekannt. Daher werden im Rahmen dieser Studie Sanierungsmethoden untersucht, die den konvektiven Radontransport langfristig unterbinden. Zahlreiche Studien sowie gesammelte Erfahrungen aus dem Deponiebau zeigen, dass von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) zugelassene Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) die gestellten Anforderungen stabil erfüllen. Auch Deponieasphaltabdichtungen stellen ein äquivalentes Abdichtungssystem zur KDB dar und erfüllen die gleichen Anforderungen.

2.3 Mögliche Sanierungsmethoden für Halden

Die wesentlichen Kriterien für die Auswahl von Sanierungsvarianten zur Reduzierung des Radonaustrags aus Uranbergbauhalden sind:

- Technische Wirksamkeit, d.h. die Reduzierung des Radonaustrages um mindestens eine Größenordnung gegenüber dem nicht-sanieren Ausgangszustand
- Langzeitstabilität, d.h. Aufrechterhaltung des Sanierungserfolges über einen Betrachtungszeitraum von mindestens 100 Jahren (Stand der Technik, nachgewiesen durch entsprechende Materialprüfungen)
- Qualitätssicherung nach Stand der Technik

Neben diesen notwendigen Kriterien können für die Bewertung von Sanierungsvarianten weitere Kriterien herangezogen werden, auf die in Abschnitt 7 eingegangen wird.

Wie in früheren Studien [7], [39] und [40] bereits dargestellt wurde, werden die oben genannten notwendigen Kriterien nur durch Sanierungsvarianten mit einer Abdichtung durch Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) oder Deponieasphalt erfüllt.

Besondere Herausforderungen beim Einbau dieser Systems sind:

- die Defektfreiheit der KDB und die Dichtigkeit der Schweißnähte bzw. der eingebauten Asphaltsschichten,
- die "konvektionsdichte" Einbindung der Dichtschicht am Haldenfuß.

Auf die beiden genannten Varianten und die technischen Anforderungen wurde in diesem Vorhaben mit entsprechenden Planungsanforderungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen eingegangen, [2], [3], [4], [5]. Sie sind vorrangiger Gegenstand des vorliegenden Abschlussberichtes.

Weitere ebenfalls in der Literatur und in vorangegangenen Studien sowie im Rahmen der Arbeitspakete 1 bis 3 des vorliegenden Forschungsvorhabens betrachtete Sanierungsvarianten wie beispielsweise

- Reduzierung von Kaltluftabflüssen,
- Gezielte Ableitung von Radon aus der Halde,
- Adsorption von Radon in der Haldenabdeckung,
- Tiefenverdichtung des Haldenmaterials,
- Bodenverfestigung, -vermörtelung (Immobilisierung der Schadstoffe),
- Biologische Verfahren.

mussten aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden, da sie mindestens eines der genannten notwendigen Kriterien nicht erfüllen oder der Nachweis (z.B. Langzeitstabilität) nicht zweifelsfrei erbracht werden kann. Diese Varianten werden daher im vorliegenden Bericht nicht weiter betrachtet.

Als besonders geeignet haben sich Isolationsverfahren erwiesen. Isolationsverfahren bewirken eine Einkapselung des Schadensherdes und damit eine Unterbrechung des Emissionspfades von der Schadensquelle zum Schutzgut. Das Grundprinzip ist in Abbildung 2 dargestellt.

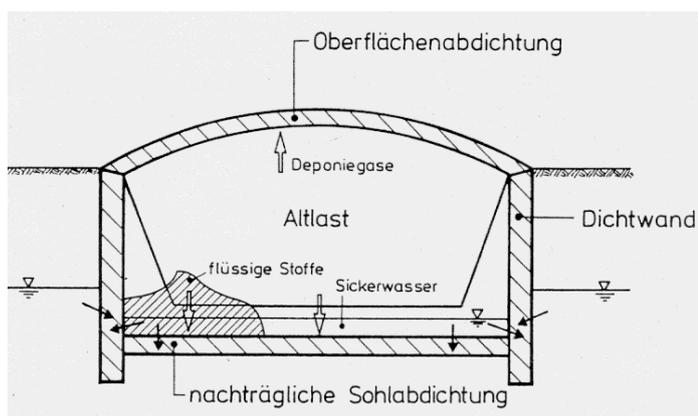


Abbildung 2: Grundprinzip der Einkapselung von Altablagerungen [35]

Durch die gasdichte Einbindung der Oberflächenabdichtung in einer vertikalen Abdichtung kann das Prinzip der Einkapselung erfüllt werden. Die Einbindung der vertikalen Abdichtung am Wandfuß in einer gasdichten Boden- bzw. Felsschicht oder in einer Tiefe von min. 1,0 m unterhalb des Grundwasserstandes ist ausreichend, um auf eine nachträgliche Sohlabdichtung zu verzichten. Zur Herstellung der vertikalen

Abdichtung können verschiedene Verfahren verwendet werden. Diese Verfahren werden in Abschnitt 3.2 dargestellt und bewertet.

2.4 Auswertung der Sanierungsmethoden

Die aus der Literatur bekannten Verfahren wurden im Rahmen des Arbeitspaktes 1 [2] der vorliegenden Studie ausführlich dargestellt. Diese sind als allgemeine Verfahren zur Altlastensanierung zu bezeichnen. Im Hinblick auf die Aufgabenstellung zur langzeitsicheren Verwahrung von Uranbergbauhalden und insbesondere Radondichtheit sind nicht alle Verfahren geeignet. Dabei ist zu beachten, dass die standort-spezifischen, geologischen und hydraulischen Verhältnisse sowie die Zusammensetzung des Haldenmaterials einen großen Einfluss auf die Auswahl des geeigneten Verfahrens haben. Die Auswertung der bekannten möglichen Sanierungsmethoden führte zur Begrenzung der geeigneten Sanierungsverfahren. In der Tabelle 1 und Tabelle 2 werden die Vor- und Nachteile der ausgewerteten Verfahren zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile möglicher Oberflächenabdichtungssysteme

System	Vorteile	Nachteile
Mineralische Dichtung aus natürlichem Feinkornmaterial	Stand der Technik bei der Sanierung von Uranbergbauhalden. Nationale und internationale Erfahrungen sind vorhanden.	Langzeitstabilität ist nicht unter allen klimatischen Bedingungen nachweisbar. Geringe Durchwurzelungs- und Bioturbationsresistenz
Wasserhaushaltsschichten	geringe Durchlässigkeit hohes Wasserrückhaltevermögen und demzufolge wenig Sickerwasser im Haldenkörper. Günstige Schichtdicke als Standort von Sträuchern und Bäumen	Wasserhaushaltsschichten sind dafür gedacht, dass das Niederschlagswasser möglichst nicht bzw. nur in geringen Mengen in den Deponiekörper eindringt. Eine geringe Luftdurchlässigkeit kann damit nicht erreicht werden.
Kombinierte Asphalt/mineralische Dichtung Kombinierte Kunststoffdichtungsbahn (KDB)/mineralische Dichtung	Asphaltdichtung bzw. KDB sind gegen Durchwurzelung und Bioturbation resistent. Damit ist die mineralische Dichtung geschützt. Beide Systeme werden nach dem Multibarrierenkonzept hergestellt, somit ist die Langzeitfunktionalität gegeben. Beide Systeme sind in Deutschland zugelassen und sind als konvektionsdicht definiert.	Hoher Material- und ggf. Finanzaufwand. Umfangreiche Erfahrung bei der Planung, Qualitätsüberwachung und Herstellung notwendig
Bentokies	Herstellung einer korngerüststabilen Schicht und starke Reduzierung der Permeabilität	Durchwurzelungs- und Bioturbationsresistenz sind nicht gegeben.
Geosynthetische Tondichtungsbahn - GTD	Geringer Materialaufwand und schnelle Verlegung.	Aus den Erfahrungen des Deponiebaus ist die Langzeitstabilität nicht gegeben.
Trisoplast	Sehr geringe Permeabilität bei fachgerechtem Einbau ist gegeben. Einbau einer homogenen Dichtungsschicht mit vordefinierten Eigenschaften möglich.	Hoher Finanzaufwand. Bei steilen Böschungen ist der Einbau nur mit hohem technischem Aufwand wie z. B. Einsatz von Geogitter möglich. Durchwurzelungs- und Bioturbationsresistenz sind nicht gegeben.
Kapillarsperre	Einfaches System. Ersetzt eine Abdichtungs-komponente	Wirksam bei Wassertransport, jedoch ist die Luftdichtigkeit im ungesättigten Zustand nicht gegeben.
Kontrollierbare Kunststoffdichtungsbahnen	Die Funktion der KDB oder Deponieasphalt als Konvektionsdichtungen geht bei Entstehung von Schadstellen verloren. Das Leckortungssystem kann die Schadstellen über längere Zeiträume lokalisieren. Damit kann der Wartungsaufwand der Dichtung reduziert werden.	Das System bedarf ständiger Kontrolle. Hoher Finanzbedarf

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der vertikalen Abdichtungssysteme

System	Vorteile	Nachteile
Stahl- / Kunststoffspundwand	kurze Einbauzeit, umfangreiche Erfahrung bei Planung und Ausführung	Große Erschütterung beim Einbringen mit negativen Auswirkungen auf die Nachbarbauwerke. Beim Vorhandensein von Konglomeraten im Baugrund wird häufig die Anwendung von Einbringhilfsmitteln (wie z. B. Vorbohren, Spülhilfen, ...) notwendig sein. Die Gewährleistung der Schösserdichtigkeit gegen Radontransport ist mit großem Aufwand verbunden.
Überschnittene Bohrpfahlwand	Die Herstellung ist erschütterungsarm. Ausführung bei stark inhomogenen Baugrund und komplizierten Grundrissen ist möglich	Die Anschlüsse zwischen zwei Pfählen sind sorgsam auszubilden, um die Wasser- und Luftdichtheit zu gewährleisten. Baustelleneinrichtung ist kostenintensiv.
Dichtungsschmalwand	Geringe Herstellungskosten, Zeitsparend, kostengünstige Baustelleneinrichtung.	Bei inhomogenen Böden ist die Gewährleistung der Dichtheit problematisch.
Schlitzwand, Zweiphasensystem	Dichtheit ist gut realisierbar. Wenig empfindlich bei inhomogenen Baugrund. Erschütterungsarm.	Baustelleneinrichtung ist kostenintensiv.
Schlitzwand, Einphasensystem (Dichtwandsuspension) Dichtwandsuspension kombiniert mit HDPE-Folien	Sehr gut geeignet zur Herstellung von wasser- und luftdichten Sperrwänden. Bei einer Kombination mit HDPE-Folien kann der Anschluss an einer konvektiven Oberflächenabdichtung, z.B. KDB optimal erfolgen	Baustelleneinrichtung ist kostenintensiv.
Injektionsdichtung, Jet-Grouting, HDI	Kurze Ausführungszeiten. Erschütterungsarm	Luftdichtheit zwischen zwei Injektionssäulen und insbesondere bei inhomogenen Boden ist schwer realisierbar. Bei Kontakt mit Grundwasser ist die Eluierbarkeit und ggf. Umweltbeeinträchtigung zu prüfen.

2.5 Bewertung der Abdichtung bezüglich des Radontransports

2.5.1 Bedeutung von Kaltluftabflüssen

Kaltluftabflüsse spielen bei der atmosphärischen Ausbreitung des aus der Haldenoberfläche austretenden Radons eine wesentliche Rolle, die bei der Gesamtbetrachtung nicht außer Acht gelassen werden kann. Mit Kaltluftabfluss wird eine Strömung bezeichnet, die infolge von katabatischem Wind (thermische Ausgleichsströmung, Anteil an einer resultierenden Strömung, der durch laterale Temperaturgradienten in Verbindung mit Geländeunebenheiten entsteht) und Advektion (großräumige Anströmung des Windes auf die Halde) entsteht [56]. An windschwachen Abenden bzw. Nächten bei wolkenlosem Himmel führt die Energieabstrahlung des Bodens zu einer Abkühlung der Oberflächen auf eine Temperatur unterhalb der Umgebungslufttemperatur. Auf Geländeneigungen (z.B. Haldenböschungen) verursacht dies infolge der in dünneren Schichten höheren Dichte der oberflächennahen Luft eine hangabwärts gerichtete instationäre Strömung.

Kaltluftabflüsse treten vorzugsweise in orographisch stark gegliedertem Gelände auf, was im Falle von ausgedehnten Haldenböschungen von mehreren 100 m Länge der Fall ist. Durch Kaltluftabflüsse entlang der Böschung wird das aus der Haldenoberfläche exhalierende Radon in einer nur wenige Meter mächtigen Strömungslamelle hangabwärts transportiert, ohne dass eine nennenswerte atmosphärische Dispersion erfolgt. Sie erhöhen somit die am Haldenfuß resultierende Radonaktivitätskonzentration im Vergleich zu einer atmosphärischen Verdünnung auf der Haldenböschung ohne Kaltluftabfluss. Dadurch kann es zeitweise im Vorfeld der Halden (bis >100 m Entfernung) zu stark erhöhten Radonaktivitätskonzentrationen kommen [42], [50].

Die Strömungsgeschwindigkeit von Kaltluftabflüssen auf einer typischen Haldengeometrie liegt im Bereich einiger m/s. Somit ist ein nennenswerter radioaktiver Zerfall des transportierten Radons entlang der Kaltluftströmung auszuschließen.

Eine Quantifizierung der Wirkung von Kaltluftabflüssen ist nur standortspezifisch anhand einer konkreten Halde mit Berücksichtigung der Orographie und Topographie, des Bewuchses der Haldenböschung, der mikroklimatischen Bedingungen des Standortes und der zum Betrachtungszeitraum gegebenen meteorologischen Bedingungen möglich.

Es ist deshalb im Einzelfall des zu betrachtenden Haldenstandortes anhand von Messdaten zu prüfen, ob bzw. in welchem Umfang Kaltluftabflüsse auftreten. Für den Freistaat Sachsen existieren solche Modelldaten für ausgewählte Regionen in Form des Fachinformationssystem METEOKART GIS. Ob diese Daten für einen zu betrachtenden Haldenstandort verfügbar sind, ist im konkreten Fall zu ermitteln.

Die Mächtigkeit der Luftschicht, in welcher eine Kaltluftströmung stattfindet, sowie die Strömungsgeschwindigkeit sind von der Oberflächenrauigkeit abhängig, d.h. insbesondere vom Bewuchs und ggf. von einer Bebauung. Jedoch wurde an verschiedenen Standorten nachgewiesen, dass selbst mit einer dichten Bebauung (z.B. Photovoltaik-Module), Bewuchs (z.B. Gehölz- oder Waldstreifen) auf einer Böschung der Kaltluftstrom nicht effektiv verringert werden kann. Nach vorliegenden Studien [63] werden Kaltluftströme durch aufgeständerte Photovoltaikanlagen kaum reduziert, da der Kaltluftstrom unter den Aufständungen der Solarpaneele oberflächennah und laminar erfolgt. Die beispielsweise mittels Schafbeweidung oder Mahd kurz gehaltenen Wiesenflächen unter den Modultischen stellen eine geringere Oberflächenrauigkeit dar als hoch gewachsene Ruderalfluren, verbuschte Gebiete oder Vorwaldstrukturen [63]. Entsprechende Einschätzungen aus durchgeführten Bauvorhaben bestätigen dies [64]. In der vom Sächsischen Landesamt herausgegebenen Schrift zu Kaltluftabflüssen [56] werden verschiedene Varianten der Rückhaltung von Kaltluftabflüssen untersucht. Lokal ausgeprägte Barrieren auf der Böschung können Kaltluftabströme so kanalisieren, dass sich dahinter ein „Windschatten“ ausbildet. Barrieren, welche sich über die gesamte Böschungsbreite erstrecken, werden nach einigen Stunden überströmt, so dass eine Zurückhaltung des Kaltluftabflusses auch hier effektiv nicht möglich ist.

2.5.2 Teilabdeckung von Böschungsbereichen

Die Permeabilität einer qualitätsgesichert und bestimmungsgemäß (defektfrei) aufgetragenen konvektiven Abdichtung ist de facto null. Eine Konvektionsströmung auf abgedichteten Böschungsabschnitten kann damit effektiv ausgeschlossen werden. Eine Abdichtung auf der gesamten Böschungsfläche verringert somit den konvektiven Anteil vollständig. (In diesem Fall verbleibt ein diffusiver Anteil der Radonexhalation, der jedoch ebenfalls durch die Abdichtung um mindestens eine Größenordnung gegenüber dem unabgedichteten Zustand reduziert wird).

Anstelle einer ganzflächigen, d.h. sich über die gesamte Böschungslänge der Halde erstreckenden, Oberflächenabdichtung zur Reduzierung des Radonaustrages kann aus Kostengründen grundsätzlich auch eine teilweise Oberflächenabdichtung betrachtet werden. Diese sollte sich vom Haldenfuß über den unteren Teil der Böschung erstrecken (siehe Abbildung 3), da hierdurch der konvektive Radonaustrag in der Nähe von Wohnbebauung verringert wird.

Abbildung 3 veranschaulicht die betrachteten Prozesse. Die standortspezifischen Details aller obigen Betrachtungen müssen vom Planer im konkreten Einzelfall ermittelt und in der Planung umgesetzt werden.

In der in Abbildung 3 gezeigten Situation besteht auch beim Aufbringen einer Teiloberflächenabdichtung weiterhin ein durch Temperaturdifferenzen angetriebener konvektiver Radontransport aus der Halde heraus. Der niedrigste mögliche Austrittspunkt der Strömung auf der Böschung befindet sich hierbei oberhalb der Oberflächenabdichtung, während der unter der Oberflächenabdichtung liegende Haldenbereich bis zum Haldenfuß praktisch strömungsfrei ist.

Aus einer Teilabdeckung resultieren die folgenden, vereinfacht dargestellten Veränderungen gegenüber der nichtabgedeckten Halde:

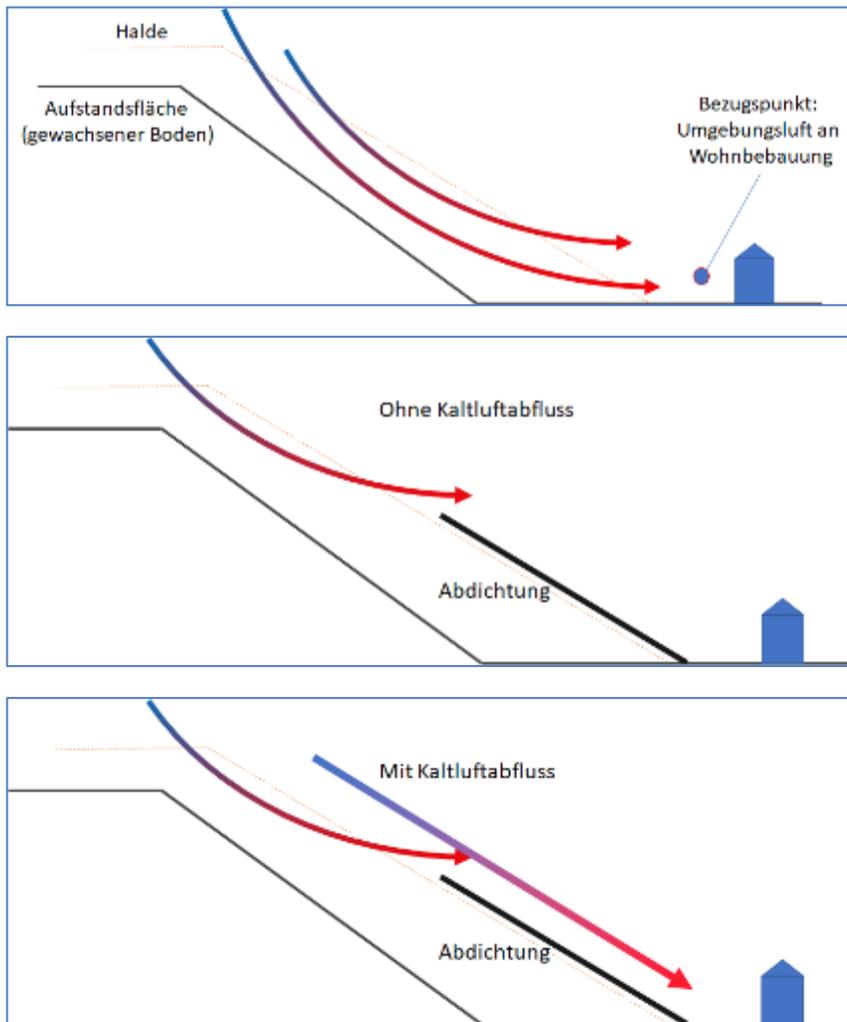


Abbildung 3: Radonexhalation aus der Haldenoberfläche (oben: unabgedichtete Halde, Mitte: teilabgedichtete Halde ohne Kaltluftabfluss, unten: teilabgedichtete Halde mit Kaltluftabfluss)

- Die geodätische Höhendifferenz und damit die Druckdifferenz entlang des Stromfadens, und gleichzeitig auch die Länge des Stromfadens im Haldenmaterial, verringern sich etwa proportional zur verbleibenden nichtabgedeckten Böschungslänge. Die Strömungsgeschwindigkeit bleibt damit rechnerisch konstant. Diese Annahme vereinfacht die realen Verhältnisse stark, dies ist aber für die hier zu treffenden qualitativen Aussagen ohne Bedeutung. Für eine genauere Darstellung der Strömungsverhältnisse im Haldeninneren sind aufwendige numerische Modelle erforderlich, siehe z.B. [49], die jedoch vom Strömungsfeld aufgrund von kaum zu modellierenden Inhomogenitäten ebenfalls abweichen kann. Eine konstante Stromdichte auf der gesamten unabgedichteten Böschungslänge oberhalb der Oberkante der Oberflächenabdichtung bis zum neutralen Punkt ist deshalb eine für die hier verfolgte Zielstellung hinreichend genaue Annahme.

- Die für den Austritt der Konvektionsströmung im unteren, nichtabgedichteten Böschungsbereich verfügbare Fläche verringert sich ebenfalls, sodass die gesamte aus der Halde konvektive ausgetragene Radonfracht proportional zur unabgedichteten Fläche abnimmt (Anmerkung: Dies gilt für den einfachen Fall einer Böschung, die als geneigte Ebene beschrieben werden kann. Auf den Fall einer gekrümmten Haldenböschung, z.B. auf Kegelhalden, wird in Abschnitt 4.3 eingegangen).
- Mit einer Verkürzung des Stromfadens zwischen Ein- und Austrittspunkt der Luftströmung könnte zunächst auch eine geringere aus dem Haldenmaterial abtransportierte Radonfracht erwartet werden. Jedoch führt die typischerweise anzutreffende konvektive Strömungsgeschwindigkeit der Größenordnung $3E-6$ m/s dazu, dass ein Teil des gebildeten Radons bereits zerfällt, bevor es zur Haldenoberfläche transportiert wurde. Zur an die Oberfläche transportierten Radonstromdichte trägt nur eine Länge von der Größenordnung $v_B/(\lambda \varepsilon) \sim 5$ m bei (ε : Porosität des Haldenmaterials, ca. 0,3), was im Vergleich zur gesamten Länge des Stromfadens kurz ist. In erster Näherung bleibt somit die Radonstromdichte unverändert.
- Mit dem über dem Haldenfuß deutlich erhöhten Austrittspunkt ist eine verstärkte atmosphärische Dispersion und Verdünnung zu erwarten, so dass zunächst auch eine beispielsweise in Wohngebieten am Haldenfuß deutlich geringere Radonaktivitätskonzentration als im Fall einer nichtabgedichteten Halde erwartet werden könnte. Durch Kaltluftabflüsse (siehe Abschnitt 2.5.1) erfolgt jedoch ein nahezu vollständiger Transport des aus dem oberen, nichtabgedichteten Böschungsbereichen austretenden Radons innerhalb einer oberflächennaher Strömungslamelle hangabwärts.

Zusammenfassend kann somit mit einer generischen und vereinfachten Betrachtungsweise geschlussfolgert werden, dass die zum Haldenfuß transportierte Radonfracht proportional zur nichtabgedeckten Böschungslänge ist. Für eine signifikante Reduzierung der Radonfracht ist deshalb das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung auf dem überwiegenden Anteil der Böschungslänge erforderlich. Auch hier sind für die planerische Umsetzung wieder die konkreten topographischen und meteorologischen Standortbedingungen sowie die standortspezifischen Eigenschaften des Haldenmaterials zu berücksichtigen.

Kann durch den Planer im konkreten Fall nachgewiesen werden (i.d.R. durch standortspezifische Messungen [47]), dass eine im Vergleich zur Kaltluftströmung stärkere atmosphärische Verdünnung des Radons stattfindet, kann die Oberflächenabdichtung auch nur auf einem geringeren Anteil der Böschungslänge aufgebracht werden (Teilabdichtung). Hierbei ist auch zu ermitteln, ab welcher Höhe auf der Böschungslänge ein Kaltluftabfluss beginnt und ob diese Höhe über dem Ende der Oberflächenabdichtung liegt oder nicht. Ebenfalls zu berücksichtigen sind in Tallagen Kaltluftabflüsse von anderen Hängen ohne Radonfracht, die ggf. zu einer Verdünnung am Betrachtungspunkt (Wohnbebauung) führen können. Zur standortspezifischen Betrachtung sind die in [56] beschriebenen Schritte zur Datenerhebung und Modellierung zu verwenden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Betrachtung von Kaltluftabflüssen eine wichtige Rolle bei der Prognose der Radonaktivitätskonzentration in der Luft am Haldenfuß spielt, für belastbare Aussagen jedoch ein hoher Modellierungsaufwand mit komplexen vorlaufenden Messungen erforderlich ist. Zum detaillierten Verständnis besteht derzeit noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

2.5.3 Auswirkungen von Defekten in der Haldenoberflächenabdichtung

Durch Aufbringen einer idealen, im Einbauzustand nichtpermeablen Barriere (HDPE oder Deponieasphalt), wird der Konvektionsstrom und damit der konvektive Radonaustrag vollständig unterbunden. Im Regelfall einer qualitätsgesichert eingebauten Haldenoberflächenabdichtung können Defekte (Risse, Löcher) auch langfristig ausgeschlossen werden.

Für den **hypothetischen** Fall von Defekten in der Oberflächenabdichtung kann effektive Permeabilität k_{eff} des Schichtsystems Halde-Oberflächenabdichtung durch eine Widerstandsanalogie [39] und [15] ausgedrückt werden:

$$\frac{L_H + L_A}{k_{eff}} = \frac{L_H}{k_H} + \frac{L_A}{k_A} \quad (5)$$

L_A Dicke der Dichtschicht

L_H Länge des konvektiven Stromfadens in der Halde

k_A Permeabilität der Dichtschicht

k_H Permeabilität des Haldenmaterials

Die effektive Permeabilität k_A der Oberflächenabdichtung ergibt sich aus den flächengemittelten Anteilen der Permeabilität in den Störungen. Entsprechend [39] und [59] kann für Löcher und Risse in der Dichtschicht die effektive Permeabilität k_A wie folgt angegeben werden:

a) Löcher mit dem Durchmesser d_L und einer Flächendichte n (in $1/m^2$) führen zu einer effektiven Permeabilität k_A einer Dichtschicht von

$$k_A = \frac{n \pi d_L^4}{8} \quad (6)$$

b) Risse mit der Länge l_R und der Breite b_R und einer Flächendichte n führen zu einer effektiven Permeabilität k_A der Dichtschicht von

$$k_A = \frac{n l_R b_R^3}{12} \quad (7)$$

Sind Löcher mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern in einer KDB und Risse mit einigen Zentimetern Länge und wenigen Millimetern Breite gleichmäßig über die gesamte Fläche einer Deponieasphaltschicht mit einer Flächendichte von einem Defekt je Quadratmeter verteilt, führt dies zu einem Anstieg der Permeabilität auf Werte in der Größenordnung des umgebenden Haldenmaterials und macht damit die Oberflächenabdichtung wirkungslos. Dieses Fehlerszenario ist hochgradig unwahrscheinlich und eher hypothetischer Natur, da einerseits Defekte in einer ordnungsgemäß eingebauten konvektiven Abdichtung nicht vorkommen, und umso weniger über die gesamte Abdichtung verteilt. Es unterstreicht jedoch die Bedeutung eines qualitätsgesicherten Einbaus der Dichtschicht.

Es muss jedoch nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass Defekte wie Löcher oder Risse in der Oberflächenabdichtung bei qualitätsgerechtem Einbau der KDB bzw. des Deponieasphalts äußerst unwahrscheinlich sind und deshalb auch im Rahmen dieses Projektes nur als hypothetisches Szenario betrachtet wurden.

2.6 Schlussfolgerung

Aus den bisherigen Ausführungen folgen die für die Zielstellung des vorliegenden Vorhabens die nachstehenden relevanten Schlussfolgerungen:

- Die Permeabilität des Abdichtungssystems muss um mehrere Größenordnungen niedriger als diejenige des Haldenmaterials sein, um eine wirkungsvolle Reduzierung des dominierenden konvektiven Radonaustrages zu gewährleisten. Bei für Wismut- und Altstandorte typischen Haldenmaterialien bedeutet dies für die Abdeckung eine Permeabilität von höchstens $1\text{E-}12\text{ m}^2$.
- Die bislang realisierten Oberflächenabdichtungssysteme aus reinen mineralischen Materialien haben anfangs die Radonemissionen stark reduziert. Jedoch hat die Leistungsfähigkeit nach fünf bis 15 Jahren an vielen nationalen wie internationalen Standorten stark nachgelassen. Die unvermeidbare Entstehung von Makroporen bedingt die Erhöhung der Gaspermeabilität um mindestens eine bis zwei Größenordnungen. Das hat zur Folge, dass die Unterdrückung des konvektiven Radontransports erheblich reduziert wird, die Emissionen wieder ansteigen und eine nicht akzeptable Radonaktivitätskonzentration in der bodennahen Luft resultiert. Daraus ergibt sich nicht nur die Forderung nach einer hohen Dichtwirkung im Einbauzustand, sondern vor allem auch über Betrachtungszeiträume von deutlich mehr als 100 Jahren.
- Es sollten im Rahmen des vorliegenden F&E-Vorhabens vorrangig Oberflächenabdichtsysteme mit einer HDPE- oder Asphalt-Dichtschicht betrachtet werden, da nur diese Systeme eine ausreichend niedrige Permeabilität dauerhaft sicherstellen können. Der Schwerpunkt sollte in diesem Fall auf der Qualitätssicherung bei der Materialauswahl bzw. -eignung, dem Einbau, der Überbauung und der Kontrollierbarkeit sowie ggf. der Reparierbarkeit dieser Schichten liegen.
- Die Forderung nach Verhinderung der Staubabwehung von Haldenmaterial und nach Reduzierung der Gammastrahlung aus dem Haldenkörper wird durch praktisch jedes realisierte Abdecksystem erfüllt.

3 Optimierung des Abdichtungssystems

Bei der Suche nach einem optimierten Abdeckungssystem für die Sanierung von Uranbergbauhalden sind nach heutigem Stand der Technik folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Reduzierung der Wasser- und Gasinfiltration und somit Radonaustrag auf einen zulässigen Wert sowie Reduzierung des Einflusses der Bioturbation auf die Dichtigkeit des Abdeckungssystems, z.B. durch Tiere und Wurzeln,
- Gewährleistung der Stabilität und des Erosionsschutzes der Abdeckung,
- Anpassung der Halde an das Landschaftsbild und Gewährleistung optimierter Wurzel- und Nährstoffbedingungen für die Vegetation im Rahmen der Rekultivierungsarbeiten,
- Verhinderung des direkten Kontakts zwischen dem kontaminierten Material und der Umwelt bei Einhaltung der Strahlenschutzanforderungen,
- Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Qualitätssicherung während der Planung und des Baus sowie zur langzeitlichen Funktionalitätskontrolle.

Erforderliche Informationen für die Planung von Oberflächenabdichtungen sowie Einkapselung im Allgemeinen:

- Art und Umfang der schon durchgeführten Sanierungsmaßnahmen,
- Permeabilität und spezifische Aktivität von Ra-226 des Haldenmaterials bzw. Austrag von Radon aus der Halde im unsanierten Zustand,
- Vorliegen von Kaltluftabflüssen unter den gegebenen topographischen und mikroklimatischen Bedingungen des Haldenstandortes,
- Haldengeometrie, Querschnitte der evtl. vorhandenen Oberflächenabdichtung und vorhandene Informationen zu Setzungen, Hangbewegungen und Strahlungsintensität,
- Belastbare Informationen zur Geologie und Hydrologie des Gebietes,
- Charakterisierung des Haldenmaterials und Bewertung der Umweltauswirkungen aufgrund radiologischer und nichtradiologischer Kontaminanten,
- Empfindlichkeit der Umgebung gegenüber dem potentiellen Eintrag der Schadstoffe und Abschätzung der Human- und Ökotoxizität,
- Regionale Verfügbarkeit der erforderlichen Oberflächenabdichtungsmaterialien,
- Klimatische Situation, einschließlich meteorologischer Daten,
- Wirtschaftliche und baubetriebliche Rahmenbedingungen,
- Sanierungsziele, Nachnutzungsziele.

Mögliche Versagensmechanismen:

- Verlust der Standsicherheit der Böschungen und Entstehung von Zugrissen,
- Für die Oberflächenabdichtungssysteme unzulässig auftretende Verformungen wie Setzungen, Sackungen und Spreizverformungen,
- Veränderte Bedingungen gegenüber den Planungsparametern wie extreme Wetterereignisse. Zukünftig sollen die klimatischen standortspezifischen Bedingungen und deren prognostizierte langfristige Änderung als wichtige Parameter für die Planung der Abdeckungssysteme berücksichtigt werden.

3.1 Oberflächenabdichtung

3.1.1 Aufbau der optimierten Oberflächenabdichtung

Aus den Ausführungen in Abschnitt 2 wird ersichtlich, dass die Konvektionsdichtung (KDB bzw. Asphalt) die maßgebende Schicht zur Verhinderung des Radonaustritts aus dem Haldenmaterial in die Atmosphäre darstellt. Mineralische Dichtungselemente wie z.B. Tondichtungen verlieren mit der Zeit ihre Wirksamkeit, bilden präferenzielle Fluidwegsamkeiten aus und werden daher nicht weiterverfolgt. Um einer potenziellen Alterung der konvektionsdichten Dichtungselemente (BAM zugelassene KDB bzw. Asphalt) vorzubeugen, beinhalten Dichtungssysteme weitere Elemente, wie Drainageschichten, Vliese, Geogitter und Rekultivierungsschichten. Für die klassische Deponieoberflächenabdichtung ist eine Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von $\geq 1,0$ m vorgesehen, unter der Maßgabe, dass diese nur mit Gras begrünt werden darf. Im Fall der Uranbergbausanierung wurde eine Bewaldung als Nachnutzungsoption prinzipiell als zulässig betrachtet, so dass sich aus dieser Nachnutzungsoption weiterführende Anforderungen an die Rekultivierungsschicht ergeben. Untersuchungen zur Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht bezüglich der vorgesehenen Nachnutzung (Gras/Kräuter, Sträucher bzw. Bäume) werden in den Abschnitten 5 und 6 vorgenommen. Die vorgesehenen Schichtdicken von 1,0 m bis zu 3,0 m erhöht den Platzbedarf auf Grund des erweiterten Auslaufs des Böschungsfußes bei Erhöhung des Schichtenaufbaus nach der Sanierung.

Tabelle 3: Übersicht der optimierten Oberflächenabdichtungssysteme

Type	Konvektive Dichtung	Entwässerung	Stärke des Rekultivierungsbodens	Art der möglichen Begrünung
A1	KDB	KDE	1,0 m	Gras/Kräuter
A2	KDB	KDE	3,0 m	Gras/Kräuter / Sträucher / Bäume
A3	KDB	Mineralische Entwässerung	1,0 m	Gras/Kräuter
A4	KDB	Mineralische Entwässerung	3,0 m	Gras/Kräuter / Sträucher / Bäume
B1	Asphalt	KDE	1,0 m	Gras/Kräuter
B2	Asphalt	KDE	3,0 m	Gras/Kräuter / Sträucher / Bäume
B3	Asphalt	Mineralische Entwässerung	1,0 m	Gras/Kräuter
B4	Asphalt	Mineralische Entwässerung	3,0 m	Gras/Kräuter / Sträucher / Bäume

Die optimierten Oberflächenabdichtungssysteme sind in der Anlage 0 dargestellt und mit Typ- Bezeichnungen versehen. Tabelle 3 enthält eine zusammenfassende Übersicht der optimierten Oberflächenabdichtungssysteme. Bei der vorhandenen mineralischen Dämmschicht wird davon ausgegangen, dass es sich um Bestandsmaterial handelt, welches einer Nachsanierung unterzogen werden muss. Bei nicht sanierten Halden ist diese Schicht naturgemäß nicht vorhanden. In diesen Fall muss eine Trag- und Ausgleichschicht (TAS) vor der Herstellung der konvektiven Dichtung eingebaut werden.

Die Herstellung des Oberflächenabdichtungssystems und Sicherung der Materialparameter erfordert die Einhaltung der Anforderungen im Abschnitt 3.1.4. Diese sind in ausführlicher Form aus [4] zu entnehmen.

Diskussion der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen und Asphaltdeckungen

- Die Kunststoffdichtungsbahn darf auf Zug nicht belastet werden, damit die Dichtungsfunktion auf Grund von Materialermüdung nicht verloren geht. Trotzdem gelten die Kunststoffdichtungsbahnen aus HDPE laut der GDA-Empfehlung E 2-17 [31] als stark dehnfähig, so dass Setzungsmulden bis zu einer Tiefe von ca. 1,80 m bei einer Dehnung von 1,2% möglich sind.
- Auf Basis langjähriger Forschungs- und Praxiserfahrungen kann in [8] ausgewiesen werden, dass bei den aktuell von der BAM zugelassenen KDB von einer Mindestdicke von 2,5 mm und einer fachgerechten Verlegung und Überbauung von einer geschätzten Funktionsdauer von mindestens 300 Jahren bis zu mehr als 1000 Jahren auszugehen ist. Damit entsprechen KDB der allgemein an die Sanierung von Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus gestellten Erwartung einer Langzeitstabilität von mindestens 200 Jahren und in der Regel 1000 Jahren [13]. Fasst man die langjährigen Untersuchungsergebnisse von Müller [53] und [54] hinsichtlich der Langzeitfunktionalität von Kunststoffdichtungsbahnen zusammen, so lässt sich schlussfolgern, dass bei zugspannungsfreiem Einbau der KDB und keinem permanenten UV-Strahleneinfluss eine Funktionsdauer von einigen hundert Jahren auszugehen ist. Dies ist abhängig davon, dass geeignete PEHD-Werkstoffe ausgewählt und potenziell kritische Verformungsgrenzen (3% ... 6%) nicht überschritten werden.
- Versuche an Deponieasphalt zeigen, dass Durchbiegungen von D (Durchmesser):H (Höhe) von 25:1 bis 10:1 ohne Rissbildung in einer Schwachstelle (Nahtbereich) bei einer Temperatur von 12 °C möglich sind. Das entspricht Krümmungsradien $R = 0,65 - 1,57$ m und eine Randfaserzugdehnung von 3,82 bis 10,85 %. Damit wäre eine konvektive Asphaltdeckung in der Lage, starke Verformungen, auch im Nahtbereich, bis zu Biegeradien nahe an den 1-Meter-Bereich schadlos aufnehmen zu können.
- Neben der mechanischen Widerstandsfähigkeit kann für die Deponieabdichtungen aus Asphalt auch eine entsprechend hohe hydraulische Widerstandsfähigkeit festgehalten werden. Durch den Einsatz des Bindemittels Bitumen wird eine entsprechende Bindung der Mineralstoffkörner erreicht. Die aus dem Einsatz von Erdstoffdeckungen bekannten Prozesse der Erosion und Suffusion finden aufgrund der Bindung der Mineralkörner durch das Bitumen sowie der kompakten Struktur der Asphaltdeckung (Korn-in-Korn-Abstufung nach dem Fuller-Prinzip und dem geringen Hohlraumgehalt) nicht statt [46].
- Kunststoffdichtungsbahnen und Asphaltdeckungen sind konvektionsdicht und bei Beibehaltung der geforderten Dichtigkeit in einem hohen Maße verformbar sind. Sie sind mechanisch sehr widerstandsfähig, durchwurzelungs- und chemikalienbeständig sowie umweltverträglich.

3.1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Radiologisch relevante Halden des ehemaligen Uranerzbergbaus unterliegen dem Strahlenschutzgesetz (2017) und der neuen Strahlenschutzverordnung (2018). Die Betroffenheit weiterer Rechtsbereiche ist im Einzelfall zu prüfen. Sofern die Halden dem Bergrecht unterliegen, hat dieses eine bündelnde Funktion hinsichtlich weiterer Rechtsbereiche (z.B. Bodenschutz, Wasserrecht, Abfallrecht). Ausgenommen ist der Strahlenschutz, welcher ein separates Verfahren durchführt, sofern kein Planfeststellungsverfahren gefordert ist. Das Zusammenspiel der betroffenen Rechtsbereiche und dem Strahlenschutzrecht ist in § 150 StrlSchG geregelt.

Haldensanierungen im Rahmen der Stilllegung und Sanierung der Betriebsanlagen und Betriebsstätten des Uranbergbaus (Wismut-Sanierung) erfordern gemäß § 149 StrlSchG eine strahlenschutzrechtliche Antragstellung auf deren Basis eine strahlenschutzrechtliche Genehmigung erteilt wird.

Für Sanierungen an radioaktiven Halden, die nicht der Wismut-Sanierung zuzuordnen sind, fordert die Strahlenschutzbehörde i.d.R. die Vorlage eines Sanierungsplanes nach § 143 StrlSchG. Das LfULG als Strahlenschutzbehörde erklärt den Sanierungsplan nach Vorliegen der strahlenschutzrechtlichen Anforderungen entsprechend § 143 (2) für verbindlich.

Detaillierte Ausführungen zur formalen Unterscheidung von Standorten der Wismut GmbH und sonstigen radioaktiven Altlasten nach dem neuen Strahlenschutzrecht sind in [58] enthalten. § 164 StrlSchV enthält detaillierte Anforderungen an den Inhalt eines Sanierungsplanes, § 149 StrlSchG entsprechende Anforderungen an eine Genehmigungserteilung bei Objekten der Wismut GmbH.

Bestandteil der Genehmigungen oder Verbindlich-Erklärungen sind i.d.R. Nebenbestimmungen, die beispielsweise die Ausführung, radioaktive Ableitungen über den Luft- und/oder Wasserpfad (einschließlich Radon) sowie das Monitoring während der Sanierungsarbeiten und nach ihrem Abschluss betreffen. Während und nach den Sanierungsarbeiten erfolgt eine Überwachung durch die Strahlenschutzbehörde.

Strahlenschutzrelevante Vorhaben für die Haldensanierung sind vom LfULG hinsichtlich der Optimierung der vorgesehenen Sanierungsvariante zu prüfen, wobei nicht nur strahlenschutzrechtliche Aspekte, sondern weitere Aspekte, wie die kurz- und langzeitige Wirkung der Reduktion des Radonaustrages, die Kosten und die Langzeitstabilität einfließen. Maßstab ist der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik. Dies gilt auch für die im Rahmen dieses Forschungsprojektes bewerteten Sanierungsvarianten zur Reduzierung der durch Halden verursachten Radonaktivitätskonzentration in der haldennahen Umgebungsluft.

Die Vorgaben und Erfahrungen aus dem Deponiebau gemäß den abfallrechtlichen Anforderungen sind insofern umsetzbar, da sie den Stand der Technik im Abfallrecht widerspiegeln, welcher den in die Haldensanierung einbezogenen Ingenieur- und Planungsbüros sowie den ausführenden Bauunternehmen bekannt sind und außerhalb der Haldensanierung seit Jahren bzw. Jahrzehnten erfolgreiche Praxis darstellen.

Die entsprechenden Anforderungen an die Qualitätssicherung gemäß Deponiebau wären in den Bescheiden zu den Sanierungsmaßnahmen unter Beachtung der objekt- und fachbezogenen Spezifika bei Halden festzulegen. Im abfallrechtlichen Regelwerk sind die Aufgaben der Behörden und Sachverständigen und deren Zusammenspiel konkret festgelegt. Vergleichbare Regelungen zu betroffenen Fachinhalten gibt es im Strahlenschutz nicht. Da sich die behördlichen Aufgaben und Regelungen der Sachverständigen im Abfall- und Strahlenschutzrecht unterscheiden, sind bei den Haldensanierungen entsprechende Anpassungen wie beispielsweise Art und Umfang der Nachweispflichten zu berücksichtigen. Die aufgeführten abfallrechtlichen Anforderungen wären deshalb in Analogie anzuwenden.

Der rechtliche Rahmen für die langzeitsichere Verwahrung von Deponien wird über die Deponieverordnung (DepV) definiert und geregelt. Gemäß Punkt 2 des Anhangs 1 der DepV ist im Deponiebau der Stand der Technik für alle Materialien, Komponenten oder Systeme über prüffähige Unterlagen nachzuweisen [16], [17].

Es wird kein spezifischer Regelaufbau definiert, sondern alle Dichtungssysteme werden gleich behandelt und müssen die einheitlichen Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Beständigkeit sicherstellen [48].

Die im Deponiebau eingesetzten Oberflächenabdichtungskomponenten sowie -systeme müssen gemäß Anhang 1 Nummer 2.1.1 der DepV eine Funktionserfüllung unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren erfüllen [16]. Dabei ist die Funktionserfüllung hinsichtlich nachfolgender Kriterien im Einzelfall oder im Zuge einer Zulassung bzw. Eignungsbeurteilung nachzuweisen [48]:

- Dichtigkeit (Begrenzung der Durchflussrate),
- Widerstand gegen mechanische und hydraulische Einwirkungen (z. B. Auflast, Setzungen, Verformungen),
- Widerstand gegen chemische und biologische Einwirkungen (z. B. Mikroorganismen, grabende und nagende Tiere, Perkulations- bzw. Sickerwässer),
- Witterungsbeständigkeit (z. B. Frost, Wärme, UV),
- Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten Materialveränderungen (Oxidation, Versprödung, Diffusion).

Neben den o. g. Kriterien muss für die potenziellen Oberflächenabdichtungskomponenten und -systeme die projektspezifische Standsicherheit nachgewiesen werden.

Hinsichtlich des Einsatzes von Geokunststoffen wird dieser Nachweis über die Vorlage einer Zulassung des entsprechenden Materials, Komponente oder Systems durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) erforderlich. Für spezifische mineralische und bituminöse Materialien, Komponenten oder Systeme kann der Nachweis bzgl. des Standes der Technik über eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung der Länder (LAGA Ad-hoc Deponietechnik) erbracht werden. Wird ein nicht zugelassenes Material, Komponente oder System zum Einsatz gebracht, so sind spezifische Eignungsnachweise (in Abstimmung mit der zuständigen Behörde) erforderlich.

Nach [16] dürfen sonstige Baustoffe, Oberflächenabdichtungskomponenten und -systeme u. a. nur eingesetzt werden, wenn sie einem bundeseinheitlichen Qualitätsstandard entsprechen. Dies wurde in [17] konkretisiert. Demnach werden durch die Länder Prüfkriterien für die bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen sowie für den Einsatz von natürlichem, ggf. vergütetem Boden- und Gesteinsmaterial aus der Umgebung sowie von Abfällen (sogenannten Abfällen zur Verwertung bzw. Deponieersatzbaustoffen) definiert. Gleichzeitig werden entsprechende Anforderungen an den fachgerechten Einbau festgelegt. In der Gesamtheit wird dadurch u. a. dem wesentlichen Ziel der Schaffung eines ausreichenden Schutzniveaus und der Gewährleistung der dauerhaften Funktionstüchtigkeitdauer von mindestens 100 Jahren Rechnung getragen. Die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) stellen die Grundlage für Eignungsbeurteilungen im Einzelfall durch die zuständige Behörde dar und dienen als Grundlage für Eignungsbeurteilungen durch die Ad-hoc-AG Deponietechnik der LAGA. Durch die Ad-hoc-AG wird für die Komponenten der Oberflächenabdichtungssysteme, soweit sie nicht Gegenstand der Zulassungen der BAM sind, jeweils ein Bundeseinheitlichen Qualitätsstandard erarbeitet.

Die detaillierten Ausführungen zu den organisatorischen, strukturellen und sonstigen Grundlagen, Verfahrensweisen und Anforderungen an die Qualitätssicherung sind in [4] definiert.

Neben der Definition der Struktur der Qualitätsüberwachung wird in der DepV auch die Erarbeitung eines standort- und projektspezifischen Qualitätsmanagementplan (QMP) festgeschrieben. Dabei hat sich der QMP an den Grundsätzen des Qualitätsmanagements entsprechend der GDA-Empfehlung E5-1 des Arbeitskreises 6.1 – Geotechnik der Deponiebauwerke – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik [34] anzulehnen.

Hinsichtlich der Nachsorge ist anzumerken, dass mit der Wismut GmbH (wie auch mit Deponiebetreibern) finanziell grundsätzlich leistungsfähige Eigentümer vorhanden sind, die auch die Nachsorge sicherstellen können. Dennoch sind selbstverständlich nachsorgearme Lösungen zu favorisieren.

Bei Wismut-Altstandorten ist die Forderung nach nachsorgearmen Lösungen noch weitaus stärker zu stellen. Selbst unter der Bedingung sehr geringer Nachsorgekosten ist es schwierig, von den Flächeneigentümern (i. W. Kommunen, Firmen, Privatpersonen) eine Zusage für die Nachsorge der sanierten Flächen zu erreichen. Aus Sicht dieser Interessengruppen ist eine langzeitstabile Haldenoberflächenabdichtung einer ggf. kurzfristig kostengünstigen, aber langfristig an Dämmwirkung wieder verlierenden Lösung vorzuziehen.

Auf Basis der langjährigen Erfahrungen und in Anlehnung an die seit Jahrzehnten bewährten Vorgehensweisen im Dichtungsbau, insbesondere bei Fragen der Deponieoberflächenabdichtung, soll im Folgenden eine ergänzende Sichtweise zum aktuellen Berg- und Strahlenschutzrecht gegeben werden. Dies ermöglicht einen neuen bzw. erweiterten Blickwinkel auf die langzeitsichere Sanierung von Halden mit bergbaulichen Rückständen.

3.1.3 Planungshilfe aus radiologischer Sicht

Die Planung und Umsetzung eines Dichtsystems auf einer konkreten Halde ist immer standortspezifisch und muss an die jeweiligen Verhältnisse durch den Planer angepasst werden. Jedoch können allgemeine Empfehlungen für eine schrittweise Vorgehensweise gegeben werden:

- Der Ist-Zustand der Radonsituation im Umfeld der Halde ist insbesondere an Punkten zu ermitteln, an denen für die allgemeine Bevölkerung eine Radonexposition derzeit oder in absehbarer Zukunft realistisch abzusehen ist (Wohn- oder Gewerbebebauung). In ausgeprägten Tallagen kann durch den bevorzugten Radontransport vom Haldenfuß entlang der Talsohle auch in mehreren 100 m Abstand noch eine deutlich erhöhte Radonaktivitätskonzentration zu beobachten sein [45].
- Bei der Ermittlung des Istzustandes ist zu berücksichtigen, dass neben der betrachteten Halde auch andere Radonquellen relevant sein können, insbesondere weitere Bergbauhalden in der unmittelbaren Umgebung.
- Durch geeignete Abdichtungsmaßnahmen ist vorrangig der konvektive Radontransport aus der Halde zu minimieren. Der diffusive Anteil spielt demgegenüber in der Regel nur eine untergeordnete Rolle.
- Für die Planung der Oberflächenabdichtung der Halde ist ein Zielwert vorzugeben, auf den die jahresgemittelte Radonaktivitätskonzentration am Bezugspunkt reduziert werden soll. Für die Erreichung einer durch die Halde bedingten zusätzlichen effektiven jährlichen Dosis von 1 mSv bei einer Expositionsdauer von 7000 h/a und einem Gleichgewichtsfaktor von 0,4 beträgt die zu erreichende Radonaktivitätskonzentration im Freien im Jahresmittel etwa 50 Bq/m³ zusätzlich zum natürlichen Untergrund.
- Die durch Bergbauhalden erhöhte Radonaktivitätskonzentration am Haldenfuß wird durch die Exhalationsrate vor allem im Sommer bestimmt, da sich im Winter der Temperaturgradient zwischen Halde und Außenluft umkehrt und die radonhaltige Porenluft dann vorzugsweise auf dem Haldenplateau ausströmt.
- Es kann auf mit KDB- oder Asphaltichtungssystemen sachgerecht abgedichteten Böschungsbereichen davon ausgegangen werden, dass die Radonexhalation während der garantierten Funktionsdauer der Systeme null ist. Eine Radonexhalation ist somit erst ab der Höhe auf der Böschung zu berücksichtigen, bei der das aufgebrauchte Dichtungssystem endet.

- Es sollte als Ausgangspunkt bei der Planung zunächst konservativ angenommen werden, dass auf der Böschung ein Kaltluftabstrom das gesamte im nichtabgedichteten Bereich exhalierende Radon bis zum Haldenfuß transportiert. Unter dieser Annahme muss die Exhalationsrate auf dem nicht abgedeckten oberen Böschungsbereich während des Sommerhalbjahres so reduziert werden, dass im Jahresmittel die angestrebte Radonaktivitätskonzentration am Bezugspunkt erreicht wird.
- Die Exhalationsrate auf der nichtabgedeckten Fläche muss im Einzelfall anhand der Geometrie und der Materialparameter der Halde, dem Temperaturverlauf im Haldeninneren und der Außenluft, der aufgetragenen Abdeckung einschließlich Bewuchs und ggf. weiteren Parametern ermittelt werden.
- Konservativ kann zunächst davon ausgegangen werden, dass sich die aus der Halde konvektiv ausgetragene Radonfracht proportional zum Verhältnis der abgedichteten zur nichtabgedichteten Böschungslänge verringert.
- Es ist zu beachten, dass ab einer (haldenspezifisch zu ermittelnden) Höhe auf der Böschung unterhalb des Haldenplateaus keine effektive Konvektion mehr stattfindet, da im oberen Bereich die Triebkräfte (Druckunterschiede der Haldenluft gegenüber der Außenluft) abnehmen.
- Kann bei der Charakterisierung der Haldengeometrie und der Strömungsverhältnisse entlang der Böschung nachgewiesen werden, dass kein signifikanter Kaltluftabfluss zu erwarten ist, kann mit einer stärkeren Verdünnung des auf der Böschung austretenden Radons gerechnet werden. Diese Verdünnung trägt zur Reduzierung der Radonaktivitätskonzentration am Bezugspunkt (Haldenfuß) bei. Die Höhe auf der Böschung, bis zu der die Oberflächenabdichtung aufgebracht werden muss, verringert sich dementsprechend.

3.1.4 Qualitätssicherung und -prüfung

Die Gewährleistung der Langzeitsicherheit im Deponiebau ist charakterisiert durch ein 3-stufiges Qualitätssicherungsprinzip. Dabei sind insbesondere die spezifischen Inspektionen und Prüfungen durch die qualitätssichernden Institutionen (EP - Eigenprüfung und FP - Fremdprüfung) für ausgewählte Komponenten der Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme auf der Baustelle von wesentlicher Bedeutung für die langzeit-spezifische Sicherung.

In der DepV [17] ist geregelt, dass für jede Maßnahme in Bezug auf die Abdichtung von Deponien (Basis- und Oberflächenabdichtungen) ein Qualitätsmanagement zu erarbeiten ist. Dabei charakterisiert folgendes Qualitätsmanagementsystem den Stand der Technik:

- Vorfertigung von Materialien/Komponenten/Systemen:
 - Eigenüberwachung (EÜ) der Herstellung durch den Hersteller,
 - Fremdüberwachung (FÜ) der Herstellung durch einen beauftragten Dritten,
- Bauausführung auf der Baustelle (inkl. Probefeld):
 - Eigenprüfung (EP) der ausführenden Baufirma,
 - Fremdprüfung (FP) durch einen beauftragten Dritten (vom Auftraggeber beauftragt), der durch die zuständige Fachbehörde zu bestätigen ist,
 - Behördliche Überwachung erfolgt durch die zuständige Fachbehörde (FB).

Für jede Deponiebaustelle ist im Rahmen der Qualitätssicherung ein standort- und projektbezogener Qualitätsmanagementplan (QMP) zu erarbeiten, welcher das zentrale qualitätsdefinierende und -bestimmende Element für die jeweilige Baustelle ist. Inhaltlich ist der QMP bzgl. folgender Kernaspekte zu erarbeiten:

- Qualitätssicherung in der Eignungsprüfung bzw. Eignungsnachweisführung (Phase 1 - Laborprüfungen),
- Qualitätssicherung in der Eignungsprüfung bzw. Eignungsnachweisführung (Phase 2 - Probefeld),
- Qualitätssicherung im Baufeld.

Dabei fungiert das Probefeld als Instrument für die Nachweisführung bzgl. der baupraktischen und qualitätsgerechten Umsetzbarkeit unter den standortspezifischen Randbedingungen und unter Beachtung der material-, komponenten- und/oder systemspezifischen Anforderungen. Die spezifischen Ausführungen und Details zum Aufbau und der Wirkungsweise des QMP sind in [4] ausgewiesen.

Jede Baumaßnahme (Dichtungsbau) auf Basis der DepV [17] wird mit einem spezifischen Abschlussbericht der Fremdprüfung an die Fachbehörde dokumentiert. Dieser endet mit einer entsprechenden fachtechnischen Freigabeempfehlung (auf Basis des Standes der Technik, den Anforderungen der jeweiligen Genehmigung sowie des QMP) zur Abnahme der Baumaßnahme (unter Beachtung der jeweiligen objektspezifischen Genehmigungen). Das LfULG als zuständige Strahlenschutzbehörde prüft, ggf. unter Hinzuziehung externer Sachverständiger, die konforme Umsetzung der Haldensanierungsmaßnahme.

Eine genehmigungsrechtlich und umsetzungsspezifisch einheitliche Regelung für die Qualitätssicherung bei der langzeitspezifischen Sicherung von Deponien wurden u. a. über die Erarbeitung der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) durch die LAGA sowie die Zulassungen von Geokunststoffen zur Sicherung von Deponien und Altlasten durch die BAM geschaffen. Dabei sind Langzeiterfahrungen sowie aktuelle Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung eingeflossen bzw. fließen in den ständigen Fortschreibungen der Papiere mit ein. Dadurch wird u. a. der aktuelle Stand der Technik aktuell definiert.

Über die BQS, die Güterichtlinie "Abdichtungskomponenten aus Deponieasphalt" und die LAGA-Eignungsbeurteilungen (für die mineralischen Baustoffe inkl. die Deponieasphalte sowie die Geosynthetischen Tondichtungsbahnen) sowie die BAM-Richtlinien, die BAM-Zulassungen, die Standards zur Qualitätsüberwachung (SQÜ) für die Geokunststoffe werden die komponentenspezifischen Mindestprüfumfänge und Inspektionsvorgaben für die Eignungs-, Probefeld- und Baufelduntersuchungen definiert.

Die getroffene Auswahl potenzieller Abdichtungskomponenten bzw. -systeme hinsichtlich einer langzeitsicheren Oberflächenabdichtung von Uranhalden ist sehr detailliert in [2] formuliert und begründet. Daraus lässt sich nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik ableiten, dass die spezifischen Dichtungskomponenten konvektionsdicht sein müssen. Nur so kann ein langzeitspezifischer Schutz vor Radonaustritten sichergestellt werden.

Die aktuellen Anforderungen an die Prüfungen (Labor und Inspektion) für die relevanten Komponenten bzgl. eines konvektionsdichten Abdichtungssystems (Radondichtigkeit) für Halden des Uranbergbaus nach aktuellem Stand der Technik sind nachfolgend ausgewiesen. Dies betrifft im Detail folgende Komponenten:

- Trag- und Ausgleichschicht (Auflager für das konvektionsdichte Element),
- Kunststoffdichtungsbahn (KDB) → konvektionsdichtes Dichtungselement,
- Deponieasphaltabdichtung → konvektionsdichtes Dichtungselement,
- Schutzsystem,
- Mineralische Entwässerungsschicht (EWS),
- Kunststoffdränelement (KDE),
- Trenn- und Filtervlies,
- Rekultivierungsschicht (Unterboden) bzw. Wasserhaushaltsschicht (Unterboden),
- Rekultivierungsschicht (Oberboden) bzw. Wasserhaushaltsschicht (Oberboden).

Die langzeitspezifische Funktionalität der beiden o. g. konvektionsdichten Abdichtungselemente kann nur durch ein qualitätsgerechtes Auflager sowie eine qualitätsgerechte Überbauung von weiteren Systemelementen erreicht werden.

Zusätzlich werden noch die Anforderungen (bzgl. der Prüf- und Inspektionsleistungen) für potenzielle (ggf. notwendige) Hilfselemente beschrieben:

- Dichtungskontrollsystem (DKS),
- Bewehrungsgitter aus Kunststoff (BGK).

Die Detektion einer Anomalie mittels Dichtungskontrollsystem (DKS) erfolgt durch Messungen von Spannungsfelder über ein Potenzialelektroden-Raster. Beim Vorhandensein einer Fehlstelle in der Konvektionsdichtung kann das Wasser im Abdichtungssystem lateral/vertikal durchsickern und somit den Stromkreis schließen.

Die jeweiligen komponentenspezifischen Detailausführungen sind in [4] ausgewiesen.

In den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten hat sich erwiesen, dass der Einsatz derartiger deutschlandweit zugelassener Materialien, Komponenten und Systeme eine einheitliche und rechtssichere Genehmigungspraxis zulässt. Durch den Einsatz der o. g. Komponenten bzw. Systeme und unter Berücksichtigung der o. g. notwendigen Zulassungen bzw. Eignungsfeststellungen kann bei Einhaltung der Qualitätssicherungsmaßnahmen eine langzeitsichere Haldenoberflächenabdichtung (mindestens 100 a) gewährleistet werden.

Nachfolgend werden beispielhaft Prüfkriterien für die Feststellung des Abschlusses der Nachsorgephase ausgewiesen [27]:

- Umsetzungs- und Reaktionsvorgänge im Zusammenhang mit Emissionen,
- Setzungen,
- Oberflächenabdichtungssystem → Prüfung u. a. über:
 - Bilanzierung und Beurteilung des Wasserhaushalts,
 - Kontrolle der Oberflächenabdichtung einschließlich des Bewuchses sowie ggf. Schäden durch Tiere,
 - Bewertung der Horizontal- und Vertikalbewegungen der Oberflächenabdichtung,
 - Kontrolle des Emissionszustandes (z. B. durch spez. Radonmessungen im direkten Umfeld) und
 - ggf. Beurteilung der Messergebnisse von Dichtungskontrollsystemen (DKS).

Einer detaillierten Prüfung sind des Weiteren u. a. folgende Kriterien zu unterziehen:

- Setzungsschäden,
- Funktionstüchtigkeit der Abdichtungskomponenten,
- Bewuchs,
- Standsicherheit.

Die detaillierten und faktenbezogenen Ausführungen zu den einzelnen o. g. Sachverhalten und Bewertungskriterien bzgl. der Nachsorge sind in [4] ausführlich beschrieben und erläutert. Nachfolgend beispielhaft ausgewiesene, i. d. R. nicht haldenspezifische Kontroll- und Unterhaltungsmaßnahmen oder Aspekte sind auch nach Beendigung der Nachsorge erforderlich:

- Bewuchspflege,
- Kontrollbegehungen,
- Kontrolle und Pflege von oberirdischen Entwässerungseinrichtungen,
- Nutzungsbeschränkungen.

- Um eine langzeitsichere Funktionalität der Oberflächenabdichtung sicherzustellen wird empfohlen, dass der Zustand der Oberflächenabdichtung (insbesondere der Komponenten oberhalb der Dichtungsschicht) einer regelmäßigen Inspektion bzgl. visuell wahrnehmbarer Anzeichen von Rutschungen, Windbruch, Erosion, Wühltätigkeit (Wildschweine etc.) unterzogen wird. Im Ergebnis dessen sind ggf. notwendige weiterführende Maßnahmen rechtzeitig vorzubereiten und durchzuführen. Entsprechende Pflege- und Ausbesserungsmaßnahmen dienen dabei dem Schutz der Überdeckung der Dichtschicht und damit der Vermeidung ihrer Beschädigung (UV-Strahlung, mechanische Beschädigung, Vandalismus).

3.2 Vertikale Abdichtung

Die vertikale Abdichtung am Böschungsfuß ist ein wichtiges Systemelement um die Migration von Radon aus der Halde in den Baugrund zu verhindern. Die in Tabelle 2 ausgewiesenen vertikalen Abdichtungen wurden untersucht und die Auswahlkriterien in den Berichten zu den Arbeitspaketen 2 [3] und 3 [4] präzisiert. Die Vertikalabdichtungssysteme Dichtwandsuspension und Dichtwandsuspension kombiniert mit HDPE-Folien sind am besten für die Erfüllung der abdichtenden Funktion gegen Radonmigration im Baugrund geeignet. Weitere bautechnische Parameter wie Platzbedarf und Anpassungsfähigkeit an begrenzten Arbeitsräumen sind in [4] und [5] dargestellt.

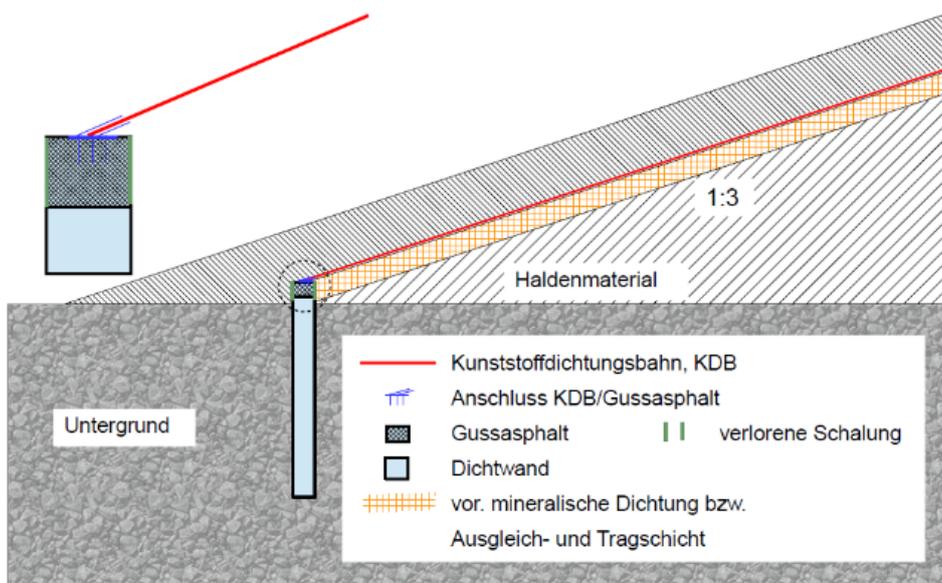


Abbildung 4: Anschlussausbildung Kunststoffbahn / vertikale Abdichtung, Herstellung und Qualitätsmanagement des Gussasphaltes laut [6]

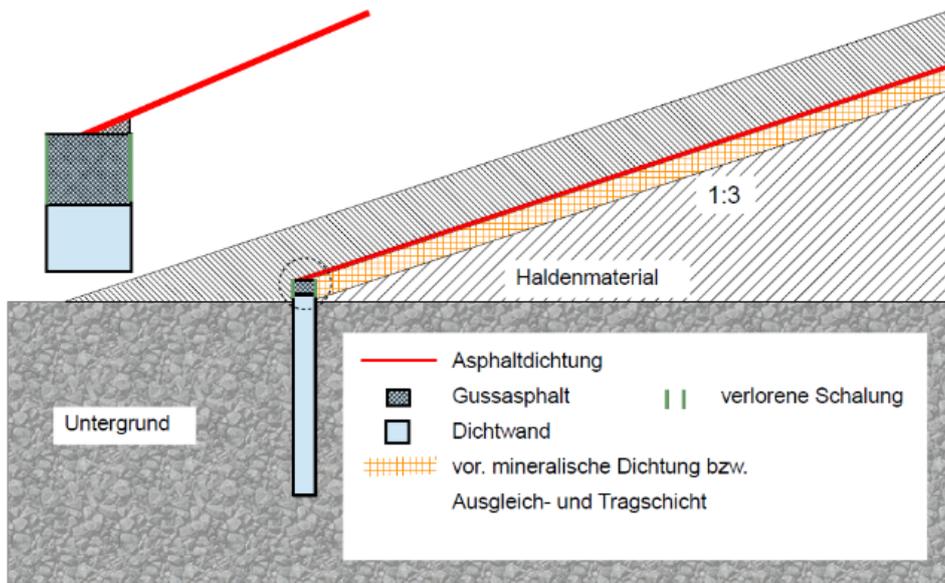


Abbildung 5: Anschlussausbildung Asphaltdichtung / vertikale Abdichtung, Herstellung und Qualitätsmanagement des Gussasphaltes laut [6]

Die erforderliche Einbindetiefe im Baugrund ist abhängig von den Baugrundverhältnissen und kann nicht auf Grund von theoretischen Ansätzen festgelegt werden. Diese sind im Wesentlichen wie folgt zu definieren:

- Einbindung des Wandfußes in einer dichten Schicht (Ton, Fels bzw. stark bindigen Felsersatz) von min. 0,7 m. Der gasdichte Horizont muss eine Permeabilität von $< 10E-12 \text{ m}^2$ aufweisen.
- Die qualifizierte Herstellung der Anschlüsse zwischen der Oberflächenabdichtung und der vertikalen Dichtung, Abbildung 4 und Abbildung 5, zur Sicherung der Dichtigkeit gegen Radonaustritt wird nach den Vorgaben der Güterichtlinie Abdichtungskomponenten aus Deponieasphalt [6] hergestellt. Der Vorteil liegt darin, dass langjährige Erfahrungen mit den Bauweisen vorhanden sind und das Qualitätsmanagement ausgereift ist.

4 Modellhalde

4.1 Geometrie

Die Durchführung der numerischen Untersuchung der Fließprozesse und der Nachweis der Tragfähigkeit sowie die Bewertung der Sanierungsvarianten gemäß Anlage 0 einer Halde des Uranerzbergbaues erfolgte an einer Modellhalde, die ein synthetisches Modell darstellt. Die Modellhalde hat eine Aufstandsfläche von 25 ha und eine maximale Höhe von 50 m ab der Oberkante des umgebenden Geländes bis zum Mittelpunkt des Plateaus. Die Geometrie der Halde orientiert sich an vorhandenen Halden im Untersuchungsgebiet [11], [13], [14] und [41]. Besonderheiten wie z.B. radioaktives Sickerwasser und/oder mit anderen Schadstoffen kontaminierte Sickerwasser werden nicht berücksichtigt, da sie im zu betrachtenden Kontext eine untergeordnete Bedeutung haben [41]. Im Grundriss wurde die Form eines Kreises zur Vereinfachung der Darstellung gewählt. Diese Form stellt eine Idealisierung der Form der vorhandenen Halden dar.

Die langfristige Sickerwasserbildung in den konvektionsdichten Systemen wurde beispielhaft anhand dieser Modellhalde berechnet. Für die Modellhalde wurden die Ergebnisse für Asphalt und KDB mit der bisherigen mineralischen Dichtschicht verglichen. Die vorgeschlagenen Oberflächenabdichtungssysteme gemäß Abschnitt 3.1.1 wurden auf ihre Anwendbarkeit mit Hilfe der Modellhalde geprüft. Der Variantenvergleich erlaubt im weiteren Schritt eine verbesserte Optimierungsbetrachtung und Bewertung der Sanierungsvarianten.

Bei der Modellhalde wurden folgende Szenarien zugrunde gelegt:

- Freistehende Halde, Abbildung 7,
- Angelehnte Halde an einer natürlichen Böschung, Abbildung 7,
- Böschungsneigung der Halde ($1:n \rightarrow 1:2,0, 1:2,5$ und $1:3,0$),
- Neigung der Plateauoberfläche $5:100$ zur Reduzierung der Sickerwassermenge in Haldenkörper, Abbildung 8,
- Anordnung von 2 bzw. 3 Bermen in der Haldenböschung, Abbildung 8 und Abbildung 9,
- Teilabdeckung einer Halde. Bermen stellen eine Begrenzung der Teilabdeckung dar.

Die erforderlichen geometrischen Angaben für die weiteren Betrachtungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Die vorgestellte Modellhalde ist mit den Parametern so nutzbar, dass im Rahmen des Vergleichs der Abdeckvarianten auch der Vergleich mit der mineralischen Dämmung gemäß Abbildung 6 erfolgen kann.

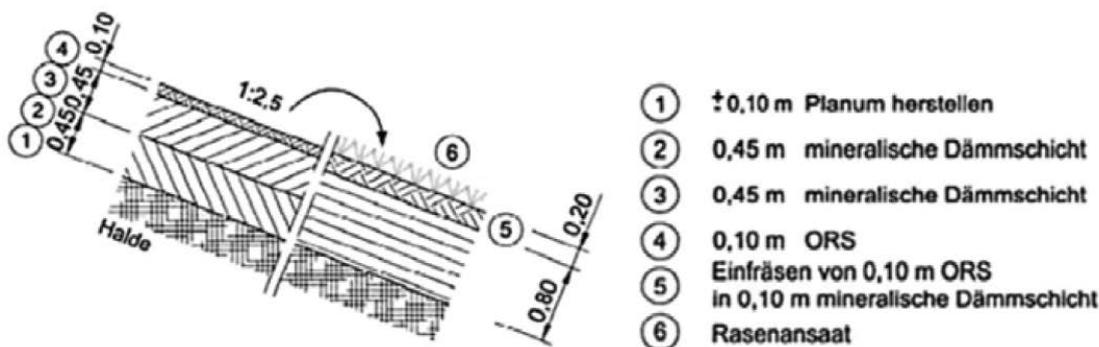


Abbildung 6: Abdecksystem der Wismut für Halden im Erzgebirge [3]

Die Standsicherheitsuntersuchungen im Abschnitt 6 und die darauf aufbauende Schlussfolgerung zur Auswahl einer empfohlenen Vorzugsvariante erfolgt zum einen in Bezug auf eine Sanierung und zum anderen auf eine Nachsanierung (Nachbesserung bereits sanierter Halden).

Die Untersuchungen erfolgen für zweidimensionale Schnitte im Haldenkörper und Oberflächenabdichtungssystem sowie für eine volle bzw. teilweise Abdeckung des Haldenmaterials. Daher sind die zugrundeliegenden Berechnungsquerschnitte für eine freistehende bzw. angelehnte Halde aus statischen Gesichtspunkten gleichwertig.

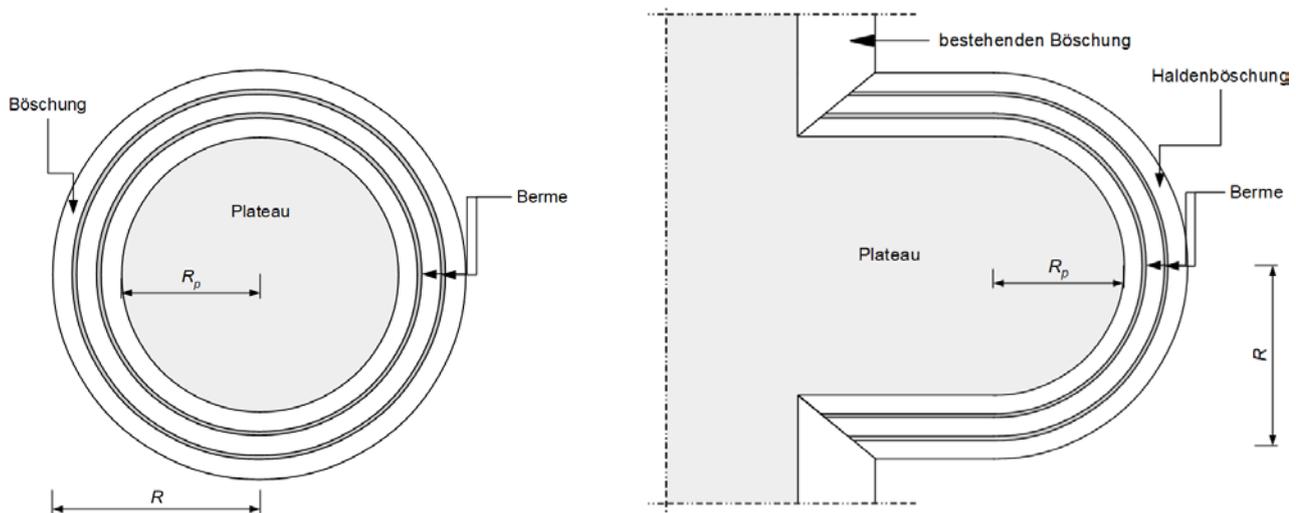


Abbildung 7: Grundriss einer freistehenden Modellhalde und angelehnten mit zwei Bermen

Die Bermen erfüllen folgende Funktionen:

- Erhöhung der Standsicherheit der Böschungen,
- Erleichterung der Zugänglichkeit der Böschung für Inspektions-, Wartungs- und Landschaftspflege,
- Reduzierung der Böschungslängen für die Ableitung des Sickerwassers aus der Flächendrainage der Böschungen und Einleitung in Sickerrohre im Bermenbereich,
- Schnittstellen für die teilabgedichteten Böschungen, Abbildung 3.
- Bei einem erforderlichen Einbau von Geogittern zur Gewährleistung der Sicherheit gegen Gleiten eignen sich die Bermen als Verankerungsstrecke.
- Die Bermenbreite für alle untersuchten Varianten betrug 6,0 m. Die Breite der Bermen und der vertikale Abstand sowie die Böschungslängen zwischen zwei Bermen wurden in [11] behandelt und optimiert. Der gewählte vertikale Bermenabstand erhöht die Erosionssicherheit und die Sicherheit gegen Gleiten der Oberflächenabdichtung. Kürzere Böschungslängen verringern zudem die Häufigkeit einer Wasser-sättigung der Rekultivierungsschicht und damit die Wahrscheinlichkeit von Erosionen und Rutschungen [11]. Der vertikale Bermenabstand wurde auf zehn bis max. 15 m begrenzt [41].

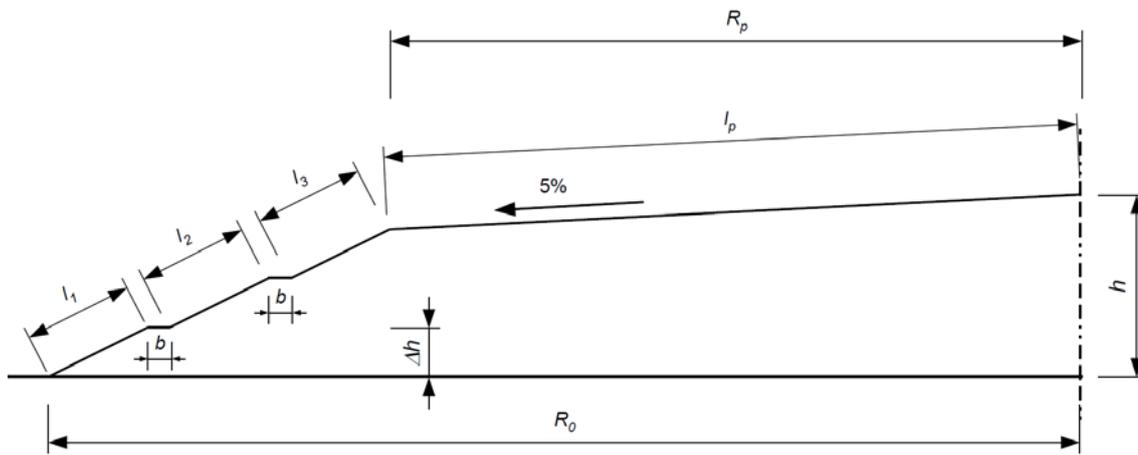


Abbildung 8: Querschnitt einer Halde mit zwei Bermen

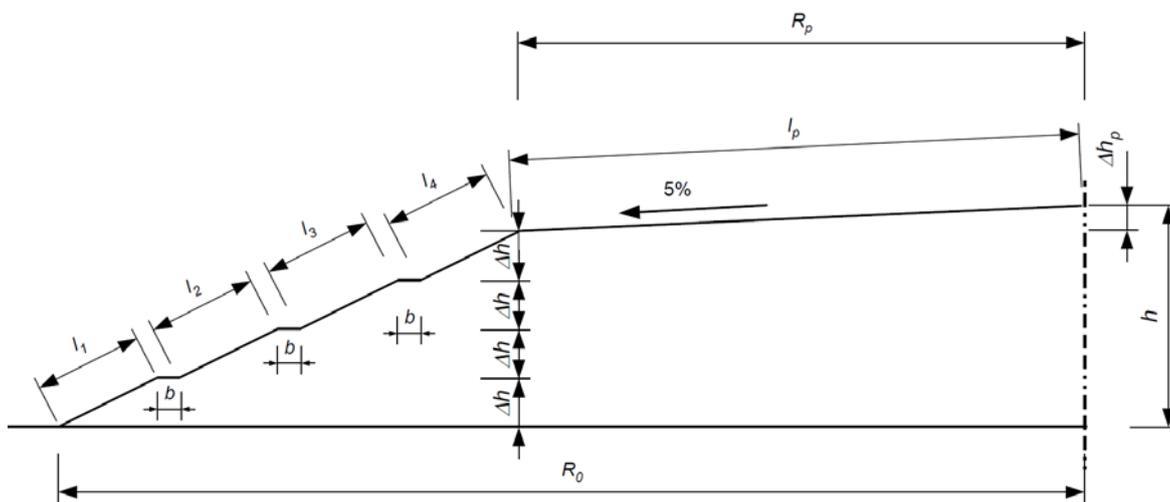


Abbildung 9: Querschnitt einer Halde mit drei Bermen

Tabelle 4: Zusammenfassung der Geometrie der Modellhalde

1:n [*]	β [°]	β_p [°]	B [-]	Δh [m]	l_i [m]	l [m]	Δh_p [m]	l_p [m]
1:2,0	26,565	2,862	2	13,517	30,224	90,673	9,45	189,23
1:2,0	26,565	2,862	3	10,221	22,855	91,419	9,116	182,555
1:2,5	21,801	2,862	2	13,903	37,435	112,305	8,291	166,03
1:2,5	21,801	2,862	3	10,513	28,307	113,228	7,948	159,164
1:3,0	18,435	2,862	2	14,312	45,258	135,774	7,064	141,464
1:3,0	18,435	2,862	3	10,822	34,223	136,89	6,711	134,397

*) Symbolerklärung, s. Abbildung 8 und Abkürzungsverzeichnis

4.2 Parametrisierung des Oberflächenabdichtungssystems

Für die Festlegung der bodenkundlichen, bodenmechanischen Kennwerte wurde eine weiterführende Literaturrecherche sowie die Auswertung der vorliegenden bodenmechanischen und bodenphysikalischen Untersuchungsergebnisse an verschiedenen Standorten durchgeführt. Die Kennwerte der verwendeten Geokunststoffe und Asphalt sind aus Datenblättern verschiedener Hersteller sowie Prüfberichte entnommen worden.

Des Weiteren wurde für die Festlegung der Wertespanne der bodenkundlichen Parameter die Datenbank des HELP-Modells, insbesondere für die Parametrisierung der KDB verwendet. Die bodenphysikalischen Werte wurden mit Angaben aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung [1] verifiziert. Die verwendeten Wertespannen für die Untersuchungen in Abschnitt 5 sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Übersicht der bodenkundlichen Parametrisierung der Schichtelemente der Modelhalde

Materialart	Porenvolumen in Vol%	Nutzbare Feldkapazität in Vol%	Permanenter Welkepunkt in Vol%	Hydraul. Leitfähigkeit in m/s	Durchwurzelungstiefe in cm
Oberboden	35 bis 55	> 25 (bis 35, mindestens 14)	15 bis 25	1E-4 bis 1E-6 m/s möglich, wahrscheinlicher Wert 1E-5 m/s	bis 30 (Materialart lässt mehr zu, Schichtdicke aber nicht)
Unterboden	30 bis 45	>15 (bis 25, mindestens 14)	15 bis 25	1E-5 bis 1E-8 m/s möglich, wahrscheinlicher Wertebereich 5E-6 bis 5E-7 m/s	bis 100 cm
Kunststoffdrän-elemente (KDE)	40	6	2	5E-0 bis 6E-1, wahrscheinlicher Wert 1E-1	-
Kunststoffdichtungsbahn (KDB)	-	-	-	2E-13	-
Haldenmaterial	30	3 bis 10	4	5E-3 bis 1E-5 möglich, wahrscheinlicher Wert 2E-4	-
Trenn-/Filtervlies 300 g/m ²	40	4	2	1E-2	-
Mineralische Entwässerung 16/32	39	40	13	1E-2	-
Schutzvlies 1200 g/m ²	40	4	2	1E-2	-
Deponieasphalt dichtungsschicht	≤3	-	-	1E-17	-
Deponieasphalt tragschicht	≤3	-	-	1E-13	-

Zur Durchführung der Standsicherheitsuntersuchungen im Abschnitt 6 wurden die nachstehenden spezifischen geotechnischen und bodenmechanischen Parameter für die verwendeten Materialien eingesetzt.

Tabelle 6: Bodenkennwerte, mineralische Böden

Schicht	φ'_k [°]	c'_k [kN/m ²]	γ_k [kN/m ³]	γ'_k [kN/m ³]	$\gamma_{r,k}$ [kN/m ³]	Bodenart
Rekultivierungsboden	22 ... 35	2 ... 15	15 ... 19	9 ... 11	16 ... 21	Schluff, sandig, kiesig (U, s, g) Sand, schluffig, kiesig (S, u, g)
Entwässerungsschicht	32 ... 36	0,0	16 ... 20	9,5 ... 11	17 ... 22	Kies 32/16
Dämmschicht / mineralische Dichtung	27 ... 31	0 ... 20	19 ... 22	-	-	leicht bis mittel plastischer Ton (TL - TM)
Trag- und Ausgleichsschicht	25 ... 35	0 ... 15	17 ... 21	-	-	Sand-Schluff-Gemische, kiesig, (U, S, u, s, g)
Haldenmaterial	35 ... 43	0 ... 7	19 ... 24	-	-	Abraummaterial (Blöcke bis Ton)

φ'_k Wirksamer Reibungswinkel

c'_k Wirksame Kohäsion

γ_k Wichte des Bodens

γ'_k Wichte des Bodens unter Auftrieb

$\gamma_{r,k}$ Wassergesättigte Wichte des Bodens

Tabelle 7: Kennwerte, Geokunststoffe und Asphalt

Material	δ'_k [°]	a'_k [kN/m ²]	$R_{B,k0}$ [kN/m] bei $\varepsilon_1=2,0$ %	$R_{B,k0}$ [kN/m] bei $\varepsilon_1=8,0$ %
KDB (glatt)	15 ... 17	0 ... 2	-	-
KDB (strukturiert) gegen Mineralische Dichtung	20 ... 31	5 ... 40	-	-
KDB gegen Sandschutzschicht	30 ... 33	0 ... 2	-	-
KDB gegen Schutzvlies	25 ... 33	0 ... 10	-	-
Geogitter	30 ... 37	0 ... 2	18 ... 140	40 ... 400
Dränmatte gegen Unterboden	25 ... 33	0 ... 10	-	-
Dränmatte gegen KDB (strukturiert)	20 ... 31	0 ... 10	-	-
Asphalt (AC 11)	30 ... 33°	18 ... 21	-	-

δ'_k Wirksamer Reibungsbeiwert des Geokunststoffes

a'_k Wirksame Adhäsion des Geokunststoffes

$R_{B,k0}$ Kurzzeitfestigkeit des Geokunststoffes

ε_1 Dehnung eines Geogitters

4.3 Abschätzung des Radonaustrages aus der Modellhalde

Im Folgenden wurde die Radonfreisetzung aus der Modellhalde anhand der vorgegebenen Modellparameter aus Abschnitt 4.1 für verschiedene Szenarien, Tabelle 8, abgeschätzt.

Für die Abschätzung des Radonaustrages auf abgedichteten Böschungsflächen ist es unerheblich, ob die Abdichtung durch KDB oder Asphalt realisiert wird, da beide Varianten die Konvektion auf den abgedichteten Bereichen unterbinden, sofern der Einbau qualitätsgesichert und defektfrei erfolgt ist. Ein konvektiver Radonaustrag kann deshalb nur noch auf den nichtabgedichteten Bereichen erfolgen.

Tabelle 8: Betrachtete Szenarien zum Radonaustrag

Szenario Nr.	Kurzbeschreibung
0	Nullzustand, Keine Abdichtung
C1	Abdichtung über 25% der Böschungslänge vom Haldenfuß aufwärts
C2	Abdichtung über 50% der Böschungslänge vom Haldenfuß aufwärts
C3	Abdichtung über 75% der Böschungslänge vom Haldenfuß aufwärts

Für die Abschätzung wurden die im Zwischenbericht zu AP 2 beschriebenen bzw. in Abschnitt 2.1 zusammengefassten physikalischen Grundlagen, Modellansätze und Gleichungen verwendet. Auf Modellparameter wird, soweit sie für die Berechnungen bzw. das Verständnis der Ergebnisse besonders relevant sind, nachfolgend eingegangen. Zur Bewertung des Radonaustrags wurde der gesamte über die Mantelfläche der Modellhalde freigesetzte Aktivitätsstrom (diffusive und konvektive Komponente) unter typischen sommerlichen Bedingungen (Außentemperatur höher als die Temperatur im Inneren des Haldenmaterials) betrachtet. Bei Vorliegen eines Kaltluftabflusses kann konservativ angenommen werden, dass die gesamte aus der Böschungslänge austretende Radonfracht zum Haldenfuß transportiert wird und dort zur Exposition der Bevölkerung beiträgt (siehe Zwischenbericht zu AP 3.1).

Es ist auf die in Feldversuchen beobachtete Bandbreite der an verschiedenen Punkten auf der Böschung gemessenen Exhalationsrate aufgrund von Inhomogenität im Haldenmaterial hinzuweisen (siehe auch Literaturswertung im Zwischenbericht zu AP 1 [2] sowie AP 2 [3]), sodass im Rahmen des Vorhabens lediglich eine größenordnungsmäßige Abschätzung erfolgt. Auf geometrische Besonderheiten (Bermen, Abweichung der „angelehnten Modellhalde“ von der Form eines Kegelstumpfes) wird aus diesem Grunde ebenso nicht weiter eingegangen.

Tabelle 9: Verwendete Modellparameter

Parameter	Wert
Aufstandsfläche (ha)	25, kreisrund
Radius der Aufstandsfläche (m)	280
Radius der Plateaufläche (m)	130 (bei Böschungsneigung 1:2)
Geodätische Höhendifferenz zwischen Haldenfuß und -plateau (m)	50
Böschungslänge zwischen Haldenfuß und -plateau bei Vernachlässigung der Bermen (m)	110
Länge des Stromfadens für Konvektionsströmung zwischen Haldenfuß und -plateau (m)	120
Temperaturdifferenz zwischen Haldeninnerem und Außenluft (K)	10
Spezifische Aktivität des Haldenmaterials (Bq/g Ra-226)	1
Schüttdichte des Haldenmaterials (kg/m ³)	2000
Luftpermeabilität des Haldenmaterials (m ²) entsprechend der vorgegebenen hydraulischen Durchlässigkeit von 1E-4 m/s	2E-10
Diffusionskonstante des Haldenmaterials (m ² /s)	5E-7
Porosität des Haldenmaterials (%)	31
Wassersättigung des Porenraums im Haldenmaterial in unabgedichteten Bereichen	50 Vol-% entsprechend Wasserhaushaltsmodell (Massenbezogener Wassergehalt 15 Massen-%)

Die Strömungsgeschwindigkeit der Konvektion liegt bei der zugrunde gelegten Luftpermeabilität des Haldenmaterials bei ca. 3E-6 m/s. Damit ist der Quotient der Strömungsgeschwindigkeit $v_B/(\lambda \varepsilon) \sim 5$ m

deutlich kleiner als die Länge L des Stromfadens von 120 m. Dies bedeutet, dass bei den gewählten Parametern der Modellhalde die konvektive Strömung „langsam“ ist und ein Teil des im Haldenmaterial produzierten und entlang des Stromfadens transportierten Radons vor dem Verlassen des Haldenkörpers bereits wieder zerfallen ist. Der bereits zerfallene Anteil des Radons trägt nicht zum konvektiven Austrag bei. Eine Teilabdichtung vom Haldenfuß aufwärts verringert deshalb im Wesentlichen die zum Austritt der konvektiven Strömung verfügbare Fläche auf der Haldenböschung, was der wesentliche Beitrag zur Reduzierung der Radonfracht ist. Die mit der Oberflächenabdichtung ebenfalls einhergehende Verkürzung des Stromfadens liefert demgegenüber keinen Beitrag zur Reduzierung des Radonaustrages, da nur der auf dem letzten Abschnitt des Stromfadens vom Haldenmaterial produzierte Radon ausgetragen wird.

Es wurde angenommen, dass in den abgedichteten Böschungsbereichen sowohl der diffusive als auch der konvektive Radonaustrag gegenüber den nicht abgedichteten Bereichen vernachlässigbar sind. Eine zusätzliche mineralische Schicht auf der Dichtschicht hat damit auch keinen Einfluss auf den Radonaustrag und wird deshalb nicht gesondert betrachtet.

Es wurde, wie in Abschnitt 2.5.1 bereits beschrieben, konservativ davon ausgegangen, dass Kaltluftabflüsse die gesamte austretende Radonfracht auf der Böschungsfäche zum Haldenfuß transportieren. Diese Annahme ist jedoch im Einzelfall anhand der meteorologischen und topographischen Bedingungen zu prüfen.

Die Ergebnisse der Abschätzung der gesamten aus der Halde ausgetragenen Radonfracht sind in Abbildung 10 zusammengestellt, es sind jeweils der konvektive und der diffusive Anteil des Radonaustrages gegenübergestellt.

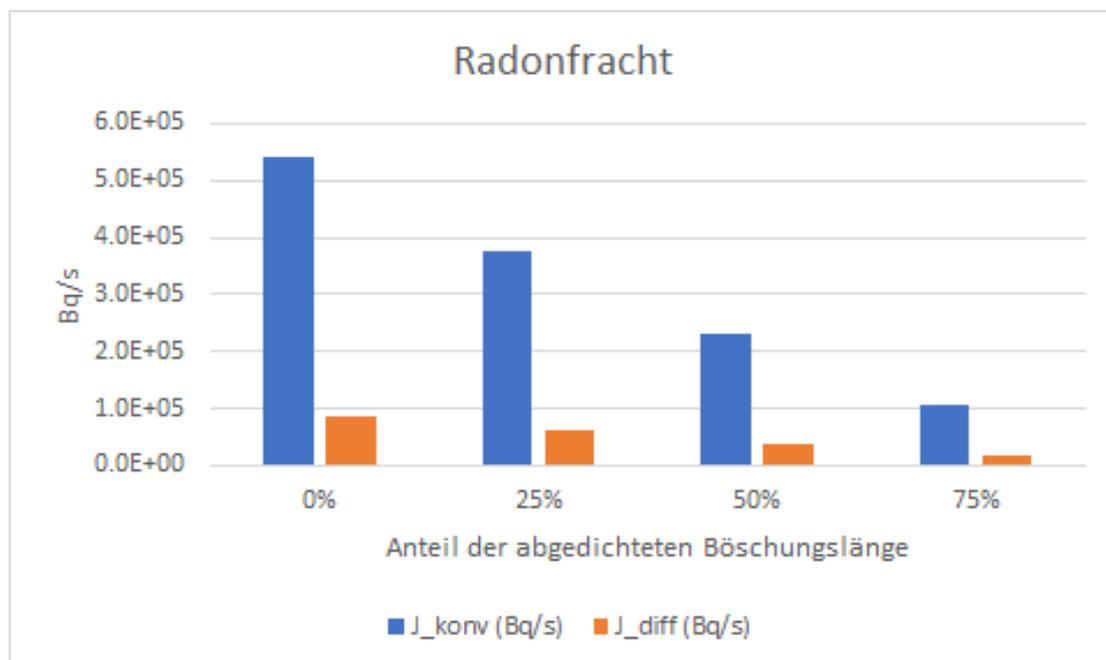


Abbildung 10: Abschätzung des gesamten Radonaustrages aus der Modellhalde in Abhängigkeit vom Anteil der abgedichteten Böschungslänge

Zunächst ist festzustellen, dass der konvektive Aktivitätsstrom den diffusiven Aktivitätsstrom erwartungsgemäß deutlich überwiegt. Wird die Höhe der auf der Böschung aufgetragenen Oberflächenabdichtung schrittweise erhöht, nimmt die für den Radonaustritt wirksame Fläche ab. Aufgrund der Kegelform ist die Reduzierung der Radonfracht bei der Oberflächenabdichtung bei gleicher abgedichteter Böschungslänge im unteren Böschungsbereich anteilig größer als im oberen Bereich. Anhand der auf starken Vereinfachungen basierenden Modellrechnungen lässt sich schlussfolgern, dass für eine Reduzierung der Radonfracht um eine Größenordnung eine nur zu 25- oder 50 % abgedeckte Böschung nur dann ausreichend sein kann, wenn der Kaltluftabfluss gering genug ist und damit eine ausreichende Dispersion oberhalb der Oberflächenabdichtung erfolgt.

5 Wasserhaushalt von Halden – Simulation der Sickerwasserbildung

5.1 Theoretische Grundlagen

Wie ein Deponiekörper ist auch ein Haldenkörper kein homogenes Gemisch und besteht nicht aus einheitlichen Schichten. Bei einer Deponie wird zudem der Wasserhaushalt durch die Einbauweise des Abfalls, die Art des eingebauten Abfalls und eine eventuelle Vorbehandlung der Abfälle beeinflusst. Ein wesentliches Merkmal von Halden ist die Schüttung anorganischen Bergematerials, wodurch biochemische Umsetzungsprozesse praktisch ausgeschlossen sind. Inhomogene Schüttstrukturen spielen aber auch bei Halden eine Rolle und können zu hydrodynamischen Kleinstrukturen führen.

Ein häufig auftretendes Phänomen sowohl in Deponiekörpern als auch Halden sind periphere und präferenzielle Fließwege des Wassers. Je nach Beschaffenheit des Abfalls/Abraums und der Art des Einbaus kommt es zur Ausbildung von Makroporen. Setzungs- und Abbauprozesse sind in Deponien im Vergleich zu Halden aufgrund des organischen Anteils in deutlich größerem Umfang ausgebildet und führen dazu, dass großporige horizontale und vertikale Fließwege im Deponiekörper ausgebildet werden können, in denen das versickernde Wasser sehr schnell versickert und somit bei einer geringen Kontaktzeit mit den Abfallstoffen in das Sickerwasserableitungssystem überführt wird. Die daraus resultierende mangelnde Verweilzeit des Wassers in dem Abfallkörper führt ggf. zur Verzögerung der Abbauprozesse in einer Deponie. In Haldenkörpern liegen generell präferenzielle Fließwege vor, da es sich um grobstückigen Abraum handelt, dessen Wasserhaltekapazität begrenzt ist und der daher die Sickerwasserbildung beeinflusst. Das entscheidende Kriterium ist die effektive Permeabilität, welche sowohl für den Gas- als auch den Wasserhaushalt relevant und eine Funktion des Sättigungsgrades der porenraumerfüllenden Fluidphase ist.

Der Wasserhaushalt von Abfallkörpern wird von externen und internen Prozessen beeinflusst, wie oberirdisch (Niederschlag) oder seitlich (laterale Zuflüsse) zutretendes Wasser sowie der Eigenfeuchte des Materials. Neben den Wasserzuflüssen beeinflussen Faktoren wie Evaporation und Transpiration der Haldenoberfläche und der Bewuchs den Wasserhaushalt. Die entscheidende Komponente ist die Sickerwasserbildung.

Generell wird unter Sickerwasser unterirdisches Wasser verstanden, das sich unter Einwirkung der Schwerkraft abwärts bewegt (Sickerströmung). Im Fall von Halden und Deponien können an zwei Stellen Sickerwasserbildungen auftreten:

- Beim Durchsickern des Haldenkörpers. Es handelt sich um die Flüssigkeit, die durch Abfallschichten / Schichten des Haldenmaterials gesickert ist und in der Regel die geochemische Signatur des Abfalls bzw. des Haldenmaterials annimmt. Sickerwasser kann sich daher aus Flüssigkeiten unterschiedlichen Ursprungs zusammensetzen, wie Niederschlag, Grundwasser, Flüssigkeit, die bei der Einlagerung im Material vorhanden war und durch Konsolidierung abgegeben wurde. Die chemische Zusammensetzung des Sickerwassers hängt von der Herkunft des Haldenmaterials und der radiologischen Kontamination sowie der Belastung durch nicht radiochemisch relevante Metalloide oder andere Störstoffe wie Sulfat ab.

- Bei Sickerprozess in der Abdeckung bzw. Oberflächenabdichtung des Haldenmaterials. Hier kann es entweder wegen nicht vorhandener hydraulischer Barrieren zur Durchsickerung der Abdeckung oder zu einer Ansammlung des Sickerwassers oberhalb des Dichtungselements (KDB- bzw. Asphalt-Abdichtung) kommen. Der wesentliche Unterschied in der Folge ist, dass durch Abdeckungen Sickerwasser in den unterlagernden Haldenkörper eintreten können (wenn auch im Idealfall in geringer Menge), während es bei der Oberflächenabdichtung auf Grund der sehr geringen Permeabilität des Dichtungselements nicht zu einer Durchsickerung oder einem Gasaustausch kommt. Dafür kann es zu einem Wasser-Aufstau oberhalb des Dichtungselements kommen, sodass in diesem Fall die überlagernden Entwässerungssysteme nötig werden, damit die überlagernde Rekultivierungsschicht nicht in Stau-nässe versetzt wird.

Die Menge des anfallenden Sickerwassers im Oberflächenabdichtungssystem ist von der Korngrößenzusammensetzung und dem Feuchtigkeitsgehalt beim Einbau abhängig, hauptsächlich wird sie jedoch durch den Wasserzufluss von außen bestimmt. Daher ist ein erster wichtiger Schritt bei der Kontrolle der Sickerwasserströme die möglichst weitgehende Verhinderung des Eintrages von Wasser in die Abfallschichten bzw. in die Schichten des Haldenmaterials. In einem zweiten Schritt muss das anfallende Sickerwasser gesammelt, abgeleitet und entsorgt werden. Entscheidend ist somit das Verständnis der Prozesse, die die Sickerwasserbildung bestimmen, d.h. des Bodenwasserhaushaltes.

Die Spezifik des Wasserhaushaltes von Halden ist durch folgende Charakteristika gekennzeichnet [23]:

- der Wasserhaushalt von wasserungesättigten Bergehalden ist nicht generalisierbar,
- die wasserhaushaltliche Wirkung unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren,
- den atmosphärischen Bedingungen im Bereich der zu untersuchenden Halde,
- der Haldenmorphologie (ggf. beachtliche Hangneigungen),
- den pedologischen Eigenschaften des Haldenmaterials (Schütttechnologie, teilweise breites Kornspektrum) und deren Abdeckung sowie die Art der Begrünung,
- der Pedologie und Geologie des Untergrundes.

Die Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Bodenwasserhaushalts von Oberflächenabdichtungen betreffen den Schichtaufbau und die Schichtmächtigkeiten, Abdeck-/Abdichtsubstrate und Bewuchs, sowie das Vorhandensein eines Dichtungselements.

Bei der Sickerwasserprognose von Oberflächenabdichtungssystemen 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. Abbildung 11 zeigt ein schematisches Profil zum Aufbau einer Oberflächenabdichtung.

In rein mineralischen Abdeckschichten wirken ähnliche physikalische Prozesse wie in der ungesättigten Bodenzone. Die Kräfte, die eine gerichtete Bewegung des Wassers hervorrufen, sind:

- die senkrecht nach unten gerichtete Gravitationskraft (Gravitationspotenzial),
- die nach oben gerichtete kapillare Saugspannung (Matrixpotenzial).

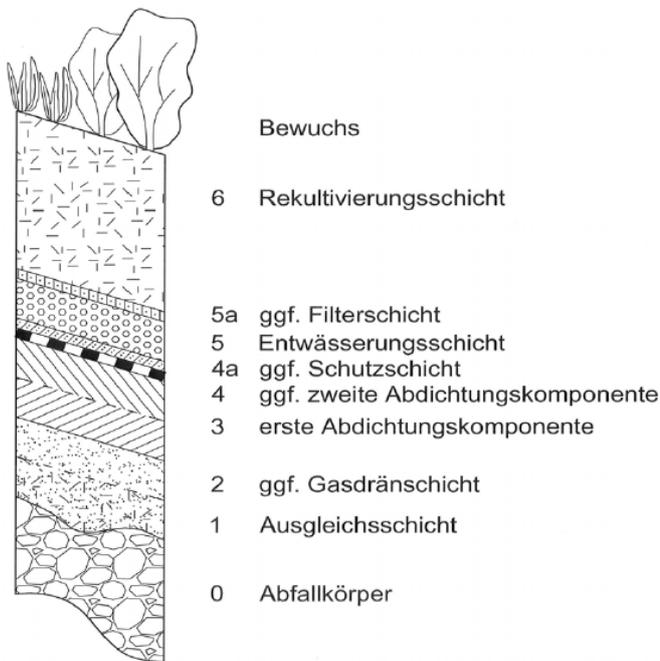


Abbildung 11: Schematisches Profil zum Aufbau einer Oberflächenabdichtung [29]

Trifft Niederschlagswasser auf ein Oberflächenabdichtungssystem, erfolgt zunächst eine Aufsättigung der oberen Bodenzonen. Eine weitere Wasserzufuhr bedingt ein Vorrücken der Befeuchtungsfront in größere Tiefen. Maßgeblich für den Wassertransport sind die hydraulischen Leitfähigkeiten bei dem jeweiligen Sättigungsgrad der Bodenzone. Trifft das Sickerwasser auf eine Schicht geringerer hydraulischer Leitfähigkeit wie beispielsweise ein Dichtungselement, so verlangsamt sich die Sickerbewegung und es kann zur Bildung von Stauwasser kommen. Sind die Niederschlagsmengen größer als der Anteil, der in den Boden infiltrieren kann, fließt das Wasser oberirdisch ab.

Bedeutung für die Wasserbewegung in Oberflächenabdichtungssystemen hat der kapillare Aufstieg, ein Wassertransport entgegen der Schwerkraft bedingt durch Saugspannungsdifferenzen. Verstärkt wird dieser Effekt infolge des Wasserentzugs durch Pflanzenwurzeln (Transpiration).

Prozesse der Boden- und Vegetationsentwicklung sind langfristiger Natur. Auf Grund der Tatsache, dass die Verwahrung von Halden und Deponien mittels Abdeckungen/Oberflächenabdichtungen erst in den letzten Jahrzehnten erfolgte, kann die Ermittlung der Zeitskalen, in denen Veränderungen in den Abdeck- bzw. Oberflächenabdichtungssystemen erfolgen, nur anhand von wenigen langfristig bekannten Deponieabdichtungen sowie auf der Basis von Analogieschlüssen natürlicher Entwicklungsprozesse erfolgen. Die bisherigen wasserhaushaltlichen Untersuchungen, insbesondere an Halden des Uranerzbergbaues, zeigen, dass die Veränderlichkeit des Wasserhaushaltes von Abdeck- bzw. Oberflächenabdichtungssystemen im Wesentlichen durch drei Komponenten bestimmt wird:

- das standortbezogene Klima,
- die Vegetation und
- die bodenkundlich-bodenphysikalischen Eigenschaften, die sich im Idealfall langfristig unter Einwirkung der zwei erstgenannten Einflussfaktoren von einem technogen geprägten Ausgangszustand in ein naturnahes Bodenprofil umwandeln.

Die komplexen Zusammenhänge zwischen Wasser- und Luftgehalt des Bodens werden in der Praxis mittels Bodenwasserhaushaltsbilanzierung diagnostiziert und prognostiziert. Die Bestimmung der aktuellen und zukünftigen Sickerwassermenge ist hierbei eine wichtige Zielgröße. Somit bildet die langzeitliche Sickerwasserprognose einen wesentlichen Bestandteil der wirtschaftlichen Bewertung und Optimierung von standortbezogenen geeigneten Oberflächenabdichtungssystemen, und hier insbesondere beim Einsatz von Wasserhaushaltsschichten als Deponieoberflächenabdichtungssysteme [38]. Die derzeit in Deutschland gebräuchlichen Modelle für die Bilanzierung des Wasserhaushaltes von Oberflächenabdichtungen sind:

- Modell HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model) der U.S. Environmental Protection Agency, Modifikation für Deutschland durch die Universität Hamburg und
- Modell BOWAHALD (Bodenwasserhaushaltsmodell für Halden und Deponien), Spezifikation des Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM.

Im aktuellen Projekt erfolgt die geplante Modellierung mit dem Modell HELP, da dieses sowohl Asphaltabdichtungen als auch eine Bildung von Rissen bzw. Löchern in einer Kunststoffdichtungsbahn berücksichtigen kann.

5.2 Vorgehensweise bei der Simulation der Sickerwasserbildung

5.2.1 HELP-Modell

Das Modell "Hydrologic Evaluation of Landfill Performance" (HELP) ist das weltweit gebräuchlichste praktische Modell zur Berechnung des Wasserhaushalts von Abdeckungen und Bodenabdichtungen für Deponien und kontaminierte Standorte. Das Modell 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. Das HELP-Modell ist ein "quasi-zweidimensionales" Schichtenmodell zur Abschätzung des Wasserhaushalts von offenen und geschlossenen Deponien und insbesondere von Bodenabdichtungssystemen und Abdecksystemen. Hauptzweck ist der Vergleich von Auslegungsalternativen, die anhand des Wasserhaushalts für das Klima des jeweiligen Standorts beurteilt werden. Mit HELP können mehrere hydrologische Prozesse mit einem eintägigen Zeitschritt modelliert werden. Vertikale und laterale Prozesse werden kombiniert, eine zweidimensionale Strömung wird jedoch nicht modelliert. Erforderliche Eingabedaten sind Tageswerte des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung von 1 bis 100 vollständigen Kalenderjahren, Parameter zur Berechnung der Verdunstung, Daten der Boden- und Materialeigenschaften sowie Daten des Schichtaufbaus und des Standortes. Ausgabeparameter des HELP-Modells sind die potentiellen und realen Verdunstungsmengen, der Oberflächenabfluss, die seitliche Drainagemenge des Sickerwassers und die Leckage bzw. Versickerung des Sickerwassers durch die Deponie- oder Haldenabdichtung. Hauptzweck des Modells ist es, die hydrologische Charakteristik eines Standorts zu erfassen. Darüber hinaus kann das Modell sowohl auf vollständig geschlossene, teilweise geschlossene als auch auf offene Standorte angewendet werden.

Um die Anwendung zu erleichtern, enthält HELP eine Datenbank mit Standard-Bodendaten und den Wettergenerator WGEN sowie eine Datenbank mit Parametern zur Berechnung der Verdunstung und zur Generierung von täglichen Wetterdaten für Standorte in den USA und in Deutschland. Im vorliegenden Fall wurden meteorologische Messwerte für den Raum Aue verwendet.

5.2.2 Grundlagendaten

In diesem Abschnitt werden Anforderungen an die Eingabedaten dargestellt. Die Eingabedaten können in vier Gruppen eingeteilt werden (Abbildung 12):

- Geographische und geometrische Parameter: Name des Standorts, geographische Breite, Fläche, Böschungsnäigung und Länge, Dränschichtnäigung und Länge,
- Wetterdaten für vollständige Kalenderjahre (1-100 Jahre): Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit,
- Bewuchsparameter zur Berechnung der Verdunstung: maximaler Blattflächenindex, maximale Durchwurzelungstiefe, Beginn und Ende der Vegetationsperiode, Vegetationsarten und Vegetationsbedeckungsgrad,
- Bodendaten: Schichttyp, Schichtmächtigkeit, Gesamtporenvolumen, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und Wasserleitfähigkeit (kf-Wert).

In dieser Studie wurden 11 Fälle berücksichtigt:

- Nullmodell: ist eine Vergleichsvariante. Halde ohne Abdeckung bzw. Oberflächenabdichtung.
- 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 eine BAM-zugelassene KDB.
- B1-B4: sind Abdicht-Szenarien. Das konvektionsdichte Element ist Asphaltabdichtung (LAGA-eignungsbeurteilt).

Für die generellen A (KDB als Dichtungselement)- und B (Asphalt als Dichtungselement)-Varianten wurden weitere Variationen des Schichtaufbaues 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) - Rekultivierungs-Boden (mind. 0,8 m Unterboden + 0,2 m Oberboden),
- A2 -KDB (2,5 mm) - KDE (ca. 8 mm) - Rekultivierungs-Boden (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) - Rekultivierungs-Boden (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) - Rekultivierungs-Boden (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) - Rekultivierungs-Boden (mind. 0,8 m Unterboden + 0,2 m Oberboden),

- 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).

Anmerkung: Im Rahmen der Konfiguration der Dichtungssysteme wurden auch Alternativen zur mineralischen Entwässerung (Kunststoffdränelemente KDE) betrachtet, die im Deponiebau Stand der Technik und auch für die Haldensanierung geeignet sind. Deren Anforderungen sind in der BAM- Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen niedergelegt [10].

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. Diese Fehlstellen bilden praktisch Löcher mit einem Durchmesser von maximal 1 mm und können daher in der Praxis fluid- und somit auch radondurchgängig sein. 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.

In den Ergebnistabellen sind jeweils folgende Zustände als meteorologische Szenarien dargestellt (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.

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 W/m²) als RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 bezeichnet werden. Dabei stellt RCP 2.6 ein Szenarium mit maximalen Klimaschutz-Anstrengungen dar, während RCP8.5 einem „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario entspricht (sog. Baseline).



Abbildung 12: Schema für die Datenverarbeitung, Modellierung und Liste der Ausgangsdaten.
 RCP = repräsentativer Konzentrationspfad; FKF = Fabrikationsfehlstellendichte; EBF = Einbaufehlstellendichte

5.2.2.1 Meteorologische Parameter

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.

Die verwendeten Klimavariablen im HELP-Modell waren: Niederschlag (Tagessummen), Temperatur (Tagesmittelwerte), Globalstrahlung (Tagessummen), Luftfeuchtigkeit (Tagesmittelwerte) und Windgeschwindigkeit (Tagesmittelwerte). Die täglichen Wetterdaten für Niederschlag, Temperatur und Globalstrahlung werden im HELP-Modell benötigt. Für die relative Feuchte wurden jedoch nur die Quartalsmittelwerte und für die Windgeschwindigkeit nur der durchschnittliche jährliche Wert benötigt. Die mittlere Niederschlags-summe pro Jahr im Messzeitraum 1999 – 2020 beträgt 838 mm.

5.2.2.2 Geographische und geometrische Parameter

Die Modellhalde wurde an die Halde 38 neu/208 angelehnt, die sich in Aue- Bad Schlema, Sachsen befindet. Daher wurden für die Simulation auch die meteorologischen Daten dieses Standorts verwendet, welche vom LfULG sowohl als historische Daten als auch als Prognosedaten für verschiedene Prognoseszenarien, d.h. Emissionsszenarien, zur Verfügung gestellt wurden. Die geometrischen Parameter stellen mittlere Werte dar, die ebenfalls an die Halde 38 neu/208 angelehnt sind.

Tabelle 10: Geographische- und Bewuchseigenschaften der Modellhalde und Eigenschaften der KDB über den Betrachtungszeitraum

Kategorie	Parameter	Nullmodell	Istzustand1	Istzustand2	Rekultivierung styp 1	Rekultivierung styp 2
Fall	Fall	Keine Abdeckung	Einschichtabdeckung	Zweischichtabdeckung	A1, A3, B1, B3	A2, A4, B2, B4
Geographisch	Fläche	25 ha	25 ha	25 ha	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
	Einbaufehlstellendichte_1999-2020	-	-	-	0	0
	Einbaufehlstellendichte_2021-2050	-	-	-	0	0
	Einbaufehlstellendichte_2051-2100_Normal	-	-	-	0	0
	Einbaufehlstellendichte_2051-2100_Worst	-	-	-	2	2

5.2.2.3 Bewuchsparameter

Zwei Hauptzwecke der Verwendung von Vegetationsparametern sind 1) die Abschätzung der potenziellen und realen Verdunstung; und 2) die Bestimmung der Kurvenzahl für den Oberflächenabfluss (Runoff Curve Number).

Evapotranspiration (ET) ist der Prozess der Wasserabgabe durch Verdunstung aus dem Bodenprofil und anderen Oberflächen sowie durch Transpiration von Pflanzen. Die reine Verdunstung erfolgt von offenen Wasseroberflächen oder von Bodenoberflächen und Vegetation, während der Prozess der Transpiration die Entnahme von Wasser aus dem Boden durch die Wurzeln von Pflanzen ist, das dann über die Blätter der Pflanze in die Atmosphäre verdunstet. Die potentielle Evapotranspiration (PE) ist die maximale Verdunstungsmenge, die während eines Tages auftritt, da die Atmosphäre dem Boden unbegrenzt viel Wasser entzieht. Im HELP-Modell wird die potenzielle Evapotranspiration auf der Grundlage einer modifizierten Penman-Gleichung berechnet.

Mit Hilfe des HELP-Modells wurden die potenzielle und die reale Evapotranspiration auf der Grundlage der folgenden erforderlichen Informationen berechnet:

- Im Untersuchungsgebiet beträgt die Tiefe der Verdunstungszone 100 cm (Rekultivierungstyp 1, Grasbewuchs + 20 cm Oberboden + 80 cm Unterboden) bzw. 300 cm (Rekultivierungstyp 2, Baumbewuchs + 30 cm Oberboden + 270 cm Unterboden).
- Der maximale Indexwert der Blattfläche (Fläche/Fläche) beträgt 5 für Rekultivierungstyp 1 und 7 für Rekultivierungstyp 2.
- Das Datum für den Starttag der Vegetationsperiode in Aue ist der 16. April, das Datum für den letzten Tag der Vegetationsperiode ist der 18. Oktober.

5.2.2.4 Pedologische Parameter

Mit HELP können 1 bis 20 Schichten in einem Halden- oder Deponieprofil modelliert werden. Insgesamt gibt es vier Schichttypen:

- *Perkolationsschichten* (vertical percolation layer, abgekürzt VPL): Der Fluss in Perkolationsschichten wird als vertikaler, abwärts gerichteter, ungesättigter oder gesättigter Fluss, der nur durch die Gravitation oder einen Aufstau angetrieben wird, modelliert.
- *Drain-/Entwässerungsschichten* (lateral drainage layer, abgekürzt LDL): sind Schichten direkt über Dichtungen, die lateralen Abfluss (Drainage) in ein Entwässerungssystem ermöglichen.
- *Mineralische Dichtschichten* (barrier soil layer, abgekürzt BSL): sollen die vertikale Versickerung (Durchsickerung, Perkolation oder Leckage) begrenzen.
- *Kunststoffdichtungsbahnen* (geomembrane layer, abgekürzt GML): sind praktisch undurchlässige synthetische Membranen, die die Fläche, durch die Wasser versickern kann, auf einen sehr kleinen Anteil der Gesamtfläche in der Umgebung von Fabrikations- und Einbaufehlstellen (Einstiche, Risse, fehlerhafte Nähte) reduzieren.

Tabelle 11 zeigt die Beschreibung der Parametrisierung der Schichtprofile für die betrachteten Szenarien.

Für die Modell-Parametrisierung wurden die Werte des Schichttyps, der Schichtmächtigkeit, des Gesamtporenvolumens, der Feldkapazität, des permanenten Welkepunkts und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) für VPL, LDL und BSL berücksichtigt. Außerdem werden die Werte des Schichttyps, der Schichtmächtigkeit und der gesättigten Wasserleitfähigkeit für GML benötigt.

Außerdem benötigt das Programm die Werte für die Dichte von Fabrikations- (FBF) und Einbaufehlstellen (EBF) der Kunststoffdichtungsbahnen und die Verlegequalität. Diese Parameter stellen potenzielle Anomalien (Löcher) dar, die durch verschiedene Prozesse entstehen könnten. Aufgrund der strengen Qualitätskontrolle in Deutschland sollten sowohl FKF als auch EBF Null sein. Durch Alterung der Kunststoffdichtungsbahn wird jedoch die Störungsdichte mit der Zeit zunehmen. Um diesen Prozess zu simulieren, wurden zwei EBF zwischen 2051 und 2100 zugeordnet, dies ist der sogenannte "Worst Case". Die durchschnittliche Dimension derartiger Löcher (pinholes) beträgt 1 mm. Für den Zeitraum davor sind derartige Anomalien auf Grund der Qualitätssicherungsmaßnahmen ausgeschlossen. Für die Verlegequalität der Kunststoffdichtungsbahn stehen sechs Werte (perfekt, ausgezeichnet, gut, mangelhaft, schlecht und geotextile) zur Verfügung, wobei durch die Qualitätssicherungsmaßnahmen nur die ersten drei Qualitäten auftreten. In dieser Studie wurde der Wert „gut“ benutzt, d. h. es wird von einem guten Einbau mit einer sorgfältig vorbereiteten, glatten Oberfläche ausgegangen, außerdem erfolgt eine Kontrolle der KDB-Verlegequalität, um einen guten Kontakt zwischen der Kunststoffdichtungsbahn und der angrenzenden, die Versickerung steuernden Schicht zu erreichen.

Tabelle 11: Beschreibung der Parametrisierung der Schichtprofile für die Szenarien

Variante	Nr.	Schicht	Schichttyp	Dicke (cm)	Porenvolumen (vol/vol)	Feldkapazität (vol/vol)	Welkepunkt (vol/vol)	Kf-Wert (cm/s)
Nullmodell	1	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
Istzustand	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	20	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	80	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
Königstein	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	45	0.314	0.283	0.118	3.70E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	45	0.313	0.264	0.128	4.39E-04
	3	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
A1	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	20	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	80	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	KDE (Kunststoffdränelement)	LDL: Lateral drainage layer	8	0.4	0.06	0.02	1.00E+01
	4	KDB (Kunststoffdichtungsbahn)	GML:Geomembrane	2.5	-	-	-	2.00E-11
	5	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
A2	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	30	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	270	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	KDE (Kunststoffdränelement)	LDL: Lateral drainage layer	8	0.4	0.06	0.02	1.00E+01
	4	KDB (Kunststoffdichtungsbahn)	GML:Geomembrane	2.5	-	-	-	2.00E-11
	5	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
A3	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	20	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	80	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	Trenn-Filtervlies 300 g/m2	LDL: Lateral percolation layer	0.3	0.4	0.04	0.02	1.00E+00
	4	Mineralische Entwässerung	LDL: Lateral percolation layer	30	0.39	0.3	0.13	1.00E+00
	5	Schutzvlies 1200g/m2	LDL: Lateral percolation layer	0.8	0.4	0.04	0.02	1.00E+00
	6	KDB (Kunststoffdichtungsbahn)	GML:Geomembrane	2.5	-	-	-	2.00E-11
	7	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
A4	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	30	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	270	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	Trenn-Filtervlies 300 g/m2	LDL: Lateral percolation layer	0.3	0.4	0.04	0.02	1.00E+00
	4	Mineralische Entwässerung	LDL: Lateral percolation layer	30	0.39	0.3	0.13	1.00E+00
	5	Schutzvlies 1200g/m2	LDL: Lateral percolation layer	0.8	0.4	0.04	0.02	1.00E+00
	6	KDB (Kunststoffdichtungsbahn)	GML:Geomembrane	2.5	-	-	-	2.00E-11
	7	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
B1	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	20	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	80	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	KDE (Kunststoffdränelement)	LDL: Lateral drainage layer	8	0.4	0.06	0.02	1.00E+01
	4	Asphaltdichtung	GML:Geomembrane	4	-	-	-	1.00E-15
	5	Asphalttragschicht	VPL: Vertical percolation layer	6	0.01	0.0011	0.001	1.00E-11
	6	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
B2	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	30	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	270	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	KDE (Kunststoffdränelement)	LDL: Lateral drainage layer	8	0.4	0.06	0.02	1.00E+01
	4	Asphaltdichtung	GML:Geomembrane	4	-	-	-	1.00E-15
	5	Asphalttragschicht	VPL: Vertical percolation layer	6	-	-	-	1.00E-11
	6	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
B3	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	20	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	80	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	Trenn-Filtervlies 300 g/m2	LDL: Lateral drainage layer	0.3	0.4	0.04	0.02	1.00E+00
	4	Mineralische Entwässerung	LDL: Lateral drainage layer	30	0.39	0.3	0.13	1.00E+00
	5	Asphaltdichtung	GML:Geomembrane	4	-	-	-	1.00E-15
	6	Asphalttragschicht	VPL: Vertical percolation layer	6	0.01	0.0011	0.001	1.00E-11
	7	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02
B4	1	Oberboden	VPL: Vertical percolation layer	30	0.45	0.3	0.2	1.00E-03
	2	Unterboden	VPL: Vertical percolation layer	270	0.375	0.21	0.2	2.75E-04
	3	Trenn-Filtervlies 300 g/m2	LDL: Lateral drainage layer	0.3	0.4	0.04	0.02	1.00E+00
	4	Mineralische Entwässerung	LDL: Lateral drainage layer	30	0.39	0.3	0.13	1.00E+00
	5	Asphaltdichtung	GML:Geomembrane	4	-	-	-	1.00E-15
	6	Asphalttragschicht	VPL: Vertical percolation layer	6	0.01	0.0011	0.001	1.00E-11
	7	Haldenmaterial	VPL: Vertical percolation layer	1500	0.3	0.065	0.04	2.00E-02

5.3 Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung

5.3.1 Klimavariablen

Die langfristigen Muster von vier ausgewählten klimatischen Variablen (d. h. Temperatur, Niederschlag, Strahlung und Luftfeuchtigkeit) unter drei Emissionsszenarien (d. h. RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5) wurden analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Temperatur unter RCP 4.5 und RCP 8.5 über den Untersuchungszeitraum kontinuierlich anstieg, wobei RCP 8.5 eine höhere Anstiegsamplitude aufwies. Dagegen blieb die Temperatur unter RCP 2.6 auf einem ähnlichen Niveau. Im Gegensatz dazu nahm die relative Luftfeuchtigkeit unter RCP 4.5 und RCP 8.5 ab und blieb unter RCP 2.6 auf einem ähnlichen Niveau. Die zeitlichen Trends von Niederschlag und Strahlung waren nicht eindeutig, und in den 102 untersuchten Jahren wurden ähnliche Werte beobachtet (**Abbildung 13**).

Die zeitlichen Muster der ausgewählten vier klimatischen Variablen wurden dann über die vier Quartale analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die 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 relative Luftfeuchtigkeit nahm im zweiten und dritten Quartal unter RCP 4.5 und RCP 8.5 im Zeitverlauf signifikant ab (Abbildung 14).

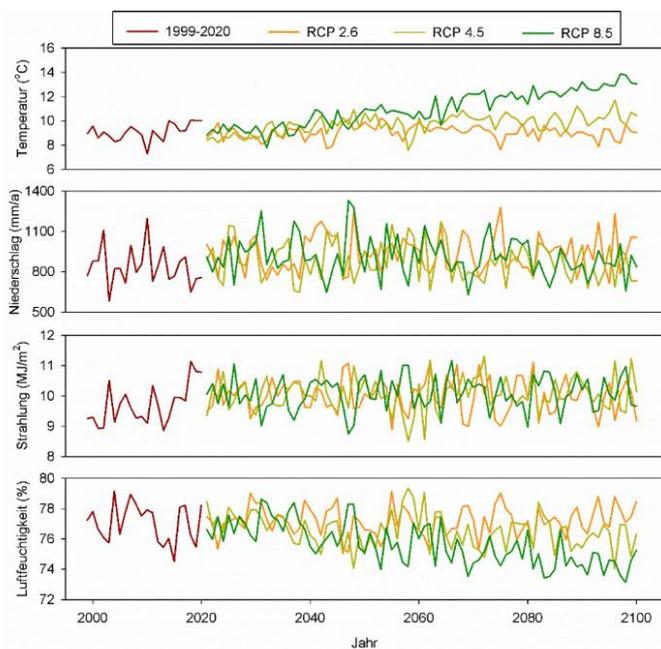


Abbildung 13: Zeitliche Muster von vier klimatischen Variablen zwischen 1999 und 2100 unter drei Emissionsszenarien

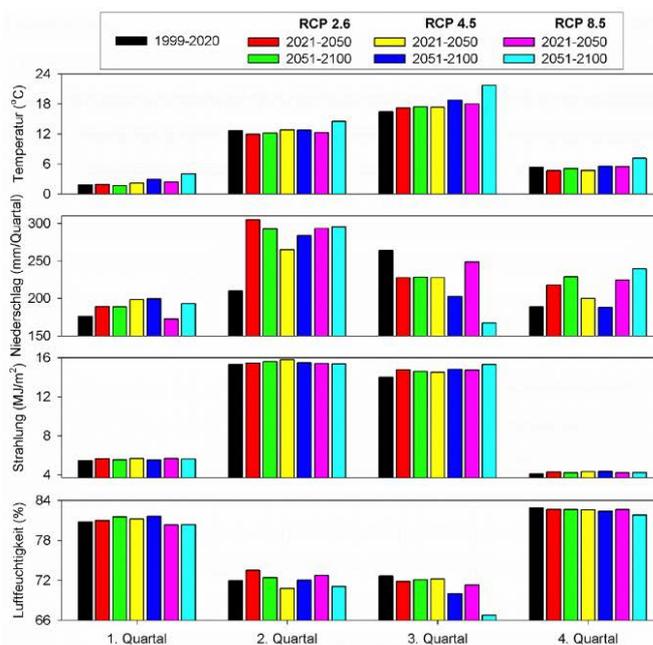


Abbildung 14: Vergleiche von vier klimatischen Variablen im Quartal zwischen sieben Zeiträumen

5.3.2 Langjährige mittlere Verhältnisse

Insgesamt sind die Werte des Oberflächenabflusses und der realen Verdunstung zwischen den Szenarien von A und B identisch und die Werte der Durchsickerung gingen bei allen vier Fällen der Gruppe B gegen Null. Daher wurden die Muster des Oberflächenabflusses, der realen Verdunstung und der Durchsickerung nicht für alle vier Fälle der Gruppe B grafisch dargestellt. Die gemittelten Werte für jeden Zeitraum werden für alle vier Fälle der Gruppe B in den folgenden Tabellen gezeigt.

Die Niederschlagsmenge beeinflusst das Verhalten des 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 Perkolation. Die Menge der Versickerung war beim Nullmodell geringfügig höher als bei den anderen beiden Vergleichsfällen. Mit zunehmender Mächtigkeit des Oberbodens (d. h. im Fall Königstein) 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 der nachstehenden Tabelle 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 <10mm nicht sehr sensitiv reagiert.

Tabelle 12: Verteilung der Niederschlagsmenge in der Haldenschicht für den Nullzustand, Istzustand 1 (Einschichtabdeckung) und Istzustand 2 (Zweischichtabdeckung) in mm/a

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

Im Istzustand gibt es keine Dichtungselemente. Im Nullmodell ist auf Grund der hohen Durchlässigkeiten des Untergrundes im Istzustand von einer praktisch vollständigen Versickerung des Niederschlagswassers in den Untergrund auszugehen. 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 pro Jahr weniger Versickerung in den Haldenkörper.

Die Verdunstung nimmt 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 Oberflächenabdichtung) 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 Oberflächenabdichtungssystem erbringen erwartungsgemäß Versickerungsraten um Null. Die nachstehenden Tabellen zeigen die Ergebnisse der Verteilung der Niederschlagsmenge in Oberflächenabdichtung und Halde für die Abdicht-Szenarien des Typs A. Die Werte des Sickerwassers bezeichnen das lateral auf der Drainageschicht über der Dichtungskomponente abfließende Wasser. Versickerung_Halde bezeichnet die Wassermenge, die an der Unterkante des Haldenkörpers anfällt. 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.

Tabelle 13: Verteilung der Niederschlagsmenge in Oberflächenabdichtung und Halde für die Oberflächenabdicht-Szenarien A, in % des Niederschlages und in mm/a

Variante	Szenario	Zeitraum	Oberfläche abfluss	Reale Verdunstung	Drainwasser r	Versickerung _Abdichtung	Versickerun g_Halde	Wasserspei cherung	
A1	Historisch	1999-2020	0.7%	52.0%	47.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	48.3%	51.6%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.2%	46.4%	53.4%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.2%	46.4%	53.4%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.3%	48.6%	51.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	49.7%	50.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	49.7%	50.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.1%	48.1%	51.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	50.1%	49.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
A2	Historisch	1999-2020	0.4%	57.5%	42.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	53.0%	46.9%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.1%	51.3%	48.6%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.1%	51.3%	48.6%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.2%	53.9%	45.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	54.6%	45.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	54.6%	45.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.0%	53.5%	46.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	55.2%	44.8%	0.0%	0.0%	0.0%	
A3	Historisch	1999-2020	0.8%	52.7%	46.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.2%	48.9%	50.9%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.3%	46.9%	53.0%	0.0%	0.0%	-0.1%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.3%	46.9%	52.8%	0.1%	0.1%	0.0%	
		2021-2050	0.4%	49.1%	50.4%	0.0%	0.0%	0.1%	
		2051-2100	0.2%	50.1%	49.7%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.2%	50.1%	49.5%	0.1%	0.1%	0.1%	
		2021-2050	0.2%	48.8%	51.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	50.6%	49.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
A4	Historisch	1999-2020	0.4%	57.0%	42.6%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	52.9%	47.0%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.1%	51.2%	48.7%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.1%	51.2%	48.6%	0.1%	0.1%	0.0%	
		2021-2050	0.2%	53.9%	45.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	54.6%	45.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	54.6%	45.2%	0.1%	0.1%	0.0%	
		2021-2050	0.0%	53.5%	46.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	55.1%	44.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
RCP 8.5	W2051-2100	0.0%	55.1%	44.8%	0.1%	0.1%	0.0%		

Wert	Variante	Szenario	Zeitraum	Oberfläche abfluss	Reale Verdunstung	Drainwasser	Versickerung_ Abdichtung	Versickerung _Halde
Wert [mm/a]	A1	Historisch	1999-2020	5,83	436,34	396,44	0,00	0,00
		RCP 2.6	2021-2050	1,07	453,74	484,12	0,00	0,00
			2051-2100	1,90	435,36	500,93	0,00	0,00
			W2051-2100	1,90	435,36	500,71	0,22	0,04
		RCP 4.5	2021-2050	2,28	432,86	454,92	0,00	0,00
			2051-2100	1,25	433,87	438,37	0,00	0,00
			W2051-2100	1,25	433,87	438,17	0,20	0,03
		RCP 8.5	2021-2050	0,88	451,00	486,60	0,00	0,00
			2051-2100	0,29	448,24	445,80	0,00	0,00
	W2051-2100		0,29	448,24	445,60	0,20	0,04	
	A2	Historisch	1999-2020	3,12	482,51	353,15	0,00	0,00
		RCP 2.6	2021-2050	0,76	497,47	440,56	0,00	0,00
			2051-2100	1,27	481,01	455,84	0,00	0,00
			W2051-2100	1,27	481,01	455,63	0,22	0,04
		RCP 4.5	2021-2050	1,47	480,16	408,34	0,00	0,00
			2051-2100	0,95	477,15	395,41	0,00	0,00
			W2051-2100	0,95	477,15	395,21	0,20	0,03
		RCP 8.5	2021-2050	0,15	501,78	436,61	0,00	0,00
			2051-2100	0,07	493,85	400,43	0,00	0,00
	W2051-2100		0,07	493,85	400,23	0,20	0,03	
	A3	Historisch	1999-2020	6,85	442,02	389,77	0,01	0,00
		RCP 2.6	2021-2050	1,75	459,47	477,64	0,01	0,00
			2051-2100	2,40	439,68	496,79	0,01	0,00
			W2051-2100	2,40	439,68	495,64	1,15	0,87
		RCP 4.5	2021-2050	3,16	437,21	448,94	0,01	0,00
			2051-2100	1,40	437,95	433,70	0,01	0,00
			W2051-2100	1,40	437,95	432,67	1,05	0,78
		RCP 8.5	2021-2050	1,44	458,05	478,99	0,01	0,00
			2051-2100	0,61	452,91	440,82	0,01	0,00
	W2051-2100		0,61	452,91	439,77	1,05	0,79	
	A4	Historisch	1999-2020	3,08	478,32	357,40	0,01	0,00
		RCP 2.6	2021-2050	0,82	496,95	440,97	0,01	0,00
			2051-2100	1,26	479,91	456,96	0,01	0,00
			W2051-2100	1,26	479,91	455,71	1,24	0,95
		RCP 4.5	2021-2050	1,45	479,59	408,96	0,01	0,00
			2051-2100	0,95	476,57	395,99	0,01	0,00
W2051-2100			0,95	476,57	394,86	1,13	0,86	
RCP 8.5		2021-2050	0,15	501,66	436,75	0,01	0,00	
		2051-2100	0,07	492,85	401,42	0,01	0,00	
	W2051-2100	0,07	492,85	400,30	1,12	0,85		

Die nachstehenden Tabellen zeigen die Ergebnisse der Verteilung der Niederschlagsmenge in Oberflächenabdichtung und Halde für die Abdicht-Szenarien des Typs B, für die die gemachten Aussagen ebenfalls zutreffend sind. Jeweils etwa 50% des Niederschlagswassers fließen in der Drainageschicht ab, die somit eine zentrale Entwässerungsfunktion hat. Das HELP Modell reagiert bei Oberflächenabflüssen <10 mm modellbedingt nicht sehr sensitiv. Auch findet Erosion im Modell keine Berücksichtigung.

Tabelle 14: Verteilung der Niederschlagsmenge in Oberflächenabdichtung und Halde für die Oberflächenabdichtungs-Szenarien B, in % des Niederschlages und in mm/a

Variante	Szenario	Zeitraum	Oberfläche abfluss	Reale Verdunstung	Drainwasser r	Versickerung _Abdichtung	Versickerun g_Halde	Wasserspei cherung	
B1	Historisch	1999-2020	0.7%	52.0%	47.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	48.3%	51.6%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.2%	46.4%	53.4%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.2%	46.4%	53.4%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.3%	48.6%	51.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	49.7%	50.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	49.7%	50.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.1%	48.1%	51.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	50.1%	49.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
B2	Historisch	1999-2020	0.4%	57.5%	42.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	53.0%	46.9%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.1%	51.3%	48.6%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.1%	51.3%	48.6%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.2%	53.9%	45.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	54.6%	45.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	54.6%	45.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.0%	53.5%	46.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	55.2%	44.8%	0.0%	0.0%	0.0%	
B3	Historisch	1999-2020	0.7%	51.8%	47.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	48.1%	51.7%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.2%	46.3%	53.5%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.2%	46.3%	53.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.3%	48.4%	51.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	49.6%	50.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	49.6%	50.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.1%	47.9%	52.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	50.1%	49.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
B4	Historisch	1999-2020	0.4%	57.5%	42.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
		RCP 2.6	2021-2050	0.1%	53.0%	46.9%	0.0%	0.0%	0.0%
			2051-2100	0.1%	51.3%	48.6%	0.0%	0.0%	0.0%
	RCP 4.5	W2051-2100	0.1%	51.3%	48.6%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.2%	53.9%	45.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.1%	54.6%	45.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
	RCP 8.5	W2051-2100	0.1%	54.6%	45.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2021-2050	0.0%	53.5%	46.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
		2051-2100	0.0%	55.2%	44.8%	0.0%	0.0%	0.0%	
RCP 8.5	W2051-2100	0.0%	55.2%	44.8%	0.0%	0.0%	0.0%		

Wert	Variante	Szenario	Zeitraum	Oberfläche abfluss	Reale Verdunstung	Drainwasser	Versickerung _Abdichtung	Versickerung _Halde	
Wert [mm/a]	B1	Historisch	1999-2020	5,83	436,34	396,44	0,00	0,00	
			RCP 2.6	2021-2050	1,07	453,74	484,12	0,00	0,00
				2051-2100	1,90	435,36	500,93	0,00	0,00
		W2051-2100		1,90	435,36	500,93	0,00	0,00	
		RCP 4.5	2021-2050	2,28	432,86	454,92	0,00	0,00	
			2051-2100	1,25	433,87	438,37	0,00	0,00	
			W2051-2100	1,25	433,87	438,37	0,00	0,00	
		RCP 8.5	2021-2050	0,88	451,00	486,60	0,00	0,00	
			2051-2100	0,29	448,24	445,80	0,00	0,00	
	W2051-2100		0,29	448,24	445,80	0,00	0,00		
	B2	Historisch	1999-2020	3,12	482,51	353,15	0,00	0,00	
			RCP 2.6	2021-2050	0,76	497,47	440,56	0,00	0,00
				2051-2100	1,27	481,01	455,84	0,00	0,00
		W2051-2100		1,27	481,01	455,84	0,00	0,00	
		RCP 4.5	2021-2050	1,47	480,16	408,35	0,00	0,00	
			2051-2100	0,95	477,15	395,41	0,00	0,00	
			W2051-2100	0,95	477,15	395,41	0,00	0,00	
		RCP 8.5	2021-2050	0,15	501,78	436,61	0,00	0,00	
			2051-2100	0,07	493,85	400,43	0,00	0,00	
	W2051-2100		0,07	493,85	400,43	0,00	0,00		
	B3	Historisch	1999-2020	6,09	434,17	398,36	0,00	0,00	
			RCP 2.6	2021-2050	1,11	452,05	485,75	0,00	0,00
				2051-2100	1,90	434,19	502,11	0,00	0,00
		W2051-2100		1,90	434,19	502,11	0,00	0,00	
		RCP 4.5	2021-2050	2,33	430,74	457,00	0,00	0,00	
			2051-2100	1,25	433,45	438,78	0,00	0,00	
			W2051-2100	1,25	433,45	438,78	0,00	0,00	
		RCP 8.5	2021-2050	1,06	449,48	487,95	0,00	0,00	
			2051-2100	0,30	448,23	445,81	0,00	0,00	
	W2051-2100		0,30	448,23	445,81	0,00	0,00		
	B4	Historisch	1999-2020	3,08	482,06	353,63	0,00	0,00	
			RCP 2.6	2021-2050	0,76	497,31	440,70	0,00	0,00
				2051-2100	1,26	480,84	456,02	0,00	0,00
		W2051-2100		1,26	480,84	456,02	0,00	0,00	
		RCP 4.5	2021-2050	1,46	480,01	408,50	0,00	0,00	
			2051-2100	0,95	476,93	395,62	0,00	0,00	
W2051-2100			0,95	476,93	395,62	0,00	0,00		
RCP 8.5		2021-2050	0,15	501,61	436,80	0,00	0,00		
		2051-2100	0,07	493,62	400,67	0,00	0,00		
	W2051-2100	0,07	493,62	400,67	0,00	0,00			

Die wesentlichen Ergebnisse der wasserhaushaltlichen Modellrechnungen für die Oberflächenabdicht-Szenarien A und B auf der Modellhalde zeigen, dass im Betrachtungszeitraum bis 2050 etwa die Hälfte des Niederschlagswassers verdunstet und die andere Hälfte in der Entwässerungsschicht abfließt. Im Betrachtungszeitraum nach 2050 nimmt die Verdunstung weiter zu, was zu einer Abnahme des Drainabflusses im Drainelement führt. Die Versickerung im Normalzustand (keine Defekte der Dichtungselemente) bleibt nahezu durchgehend Null, d.h. dass die Dichtungselemente ihre Funktion erfüllen und keine Versickerung stattfindet. Dies ändert sich erst, allerdings geringfügig, wenn in der Langfristbetrachtung der "Worst Case"

mit Fehlstellen im Oberflächenabdichtungselement berücksichtigt werden. In einem solchen Fall können unter der KDB bis zu 8 mm Versickerung auftreten, was letztlich ebenfalls als sehr geringe Versickerungsrate zu bewerten ist. Die Abbildungen 24 a bis n im Anhang 0 illustrieren die Simulationsergebnisse. Sie zeigen die Ergebnisse der jährlichen Daten für Niederschlag, Oberflächenabfluss, reale Verdunstung und die Durchsickerung für jedes Jahr von 1999 bis 2100. Für alle Fälle nahm der Oberflächenabfluss mit der Zeit ab, und dieser Trend war unter dem RCP 8.5-Szenario besonders deutlich. Für die drei Vergleichsfälle gab es keine klaren Trends für die reale Verdunstung und die Durchsickerung im Laufe der Zeit. Allerdings waren die Durchsickerung unter dem Worst Case deutlich höher als unter den Normalfällen. 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 (Abbildung 24).

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 im Jahr 2065 ein Gleichgewicht (Abbildung 24).

5.4 Auswertung der Ergebnisse

Das Versickerungsverhalten von drei Vergleichsvarianten im Istzustand und acht Oberflächenabdicht-Szenarien wurden mit Hilfe des HELP-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 zwischen 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 Durchsickerung 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 Regenerignissen 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 besser als die der KDB (wegen der geringfügig niedrigeren Permeabilität des KDB-Dichtungselements, der Unterschied ist aber eher akademischer Natur), 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. Hierauf wurde im Kapitel 4 nochmals eingegangen.

Ergebnisse für Klimawandelzustände

- Insgesamt stieg die Temperatur unter RCP 4.5 und RCP 8.5 kontinuierlich an. Jedoch war der zeitliche Trend des Niederschlags nicht eindeutig.
- 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, allerdings nach wie vor auf sehr niedrigem Niveau, an. 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% (kritisch: 39,8 %). Der Anteil des nassen Bodens nahm in der Zukunft dagegen um 27,7 % ab.

Beide Oberflächenabdichtkonfigurationen, 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. Die weiterführende Eignung der Oberflächenabdichtungssysteme ist 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. In diesem Zusammenhang ist die Widerstandsfähigkeit der Asphaltabdichtung auf Grund der höheren Schichtdicke als höher zu bewerten.

6 Standsicherheitsuntersuchung

In diesem Kapitel werden die Uranbergbauhalden als ein technisches Bauwerk betrachtet. Dabei werden folgende Standsicherheitsaspekte diskutiert:

Innere Standsicherheit:

Die Setzungen und Querverformungen des Haldenmaterials können die äußere Standsicherheit der Halde beeinträchtigen. Die Sichtung der Unterlagen bzw. der Schadensbilder der Uranbergbauhalden in Sachsen ergibt keine Hinweise auf großräumige unzulässige Setzungen bzw. Sackungsproblematik. Daher wird der Fokus bei der weiteren Betrachtung auf die Untersuchung der äußeren Standsicherheit gelegt, da die innere Standsicherheit als gegeben gilt.

Tagesbrüche als Folge von Verbrüchen im Haldenmaterial auf Grund von Inhomogenität und Hohlräumen sind im begrenzten Maße bei den Uranbergbauhalden beobachtet worden. Dieses Phänomen kann die Dichtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems beeinträchtigen und wird im Abschnitt 6.7 behandelt.

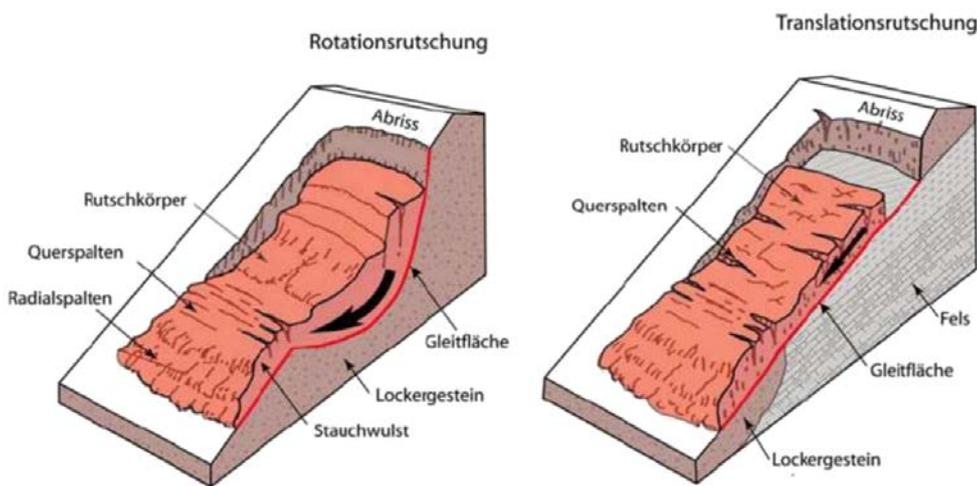


Abbildung 15: Grundformen der Böschungsversagensmechanismen

Äußere Standsicherheit:

Bei der äußeren Standsicherheit werden der Böschungsbruch, die Gleitsicherheit und die Standsicherheit der Umgebung der Halde als gesamtes geotechnisches Bauwerk betrachtet. Im Detail betrifft dies:

Böschungsbruch: Die Grundformen der Böschungsversagensmechanismen sind in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt. In dieser Betrachtungsweise werden das Haldenmaterial und das Oberflächenabdichtungssystem untersucht. Für die Standsicherheitsnachweise der Translations- und Rotationsrutschungen sollen die in der DIN 4084 [19] beschriebenen Verfahren nach Janbu und Bishop ihre Anwendung finden. Die Gleitrutschung wird nach dem Verfahren laut GDA-Empfehlung E2-07 [30] durchgeführt. Im Abschnitt 6.3 werden mögliche Gleitflächen im Haldenkörper geprüft, wie auch des Oberflächenabdichtungssystems. Festgestellte tiefe Gleitflächen (Abbildung 16, links) geben Hinweise auf eine Ausschöpfung der inneren Festigkeit des Haldenmaterials und Beeinträchtigung der Funktion des Oberflächenabdichtungssystems.

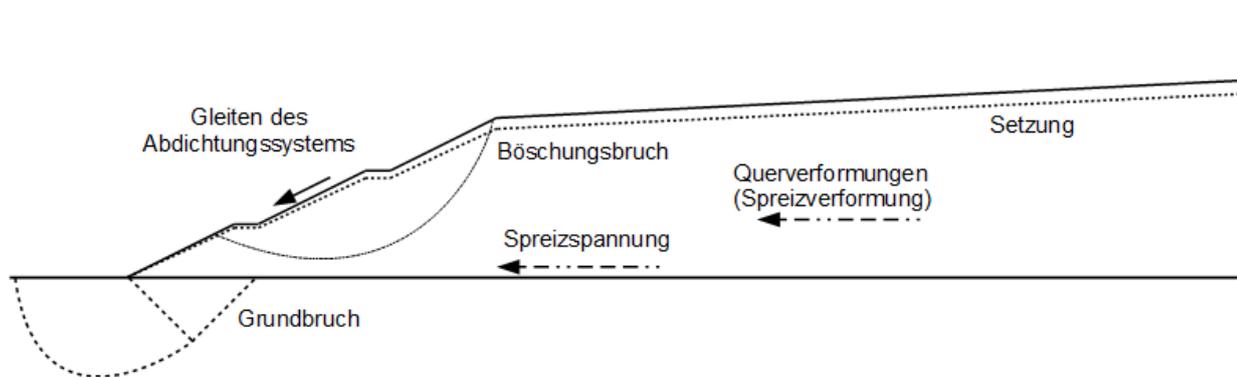


Abbildung 16: Innere und äußere Standsicherheitsbetrachtung einer Halde

- Grundbruch: Die Standsicherheit der Haldenaufstandsfläche und der unmittelbaren Umgebung vor der Halde ist analog einer Böschungsbruchuntersuchung nach DIN 4017 [18] nachzuweisen. Auf die Untersuchung des Grundbruchs wurde verzichtet, da bei allen Halden in Sachsen keine Anzeichen für das Auftreten von Grundbruch vorliegen. Grundbruch zeichnet sich durch sehr große Setzungen, i.d.R. im Meterbereich, in der Aufstandsfläche einer Halde aus.
- Gleiten von Oberflächenabdichtungssystemen: Bei diesem Rechenszenario wird nur das Oberflächenabdichtungssystem gemäß der Vorgehensweise der GDA-Empfehlung 2.7 Standsicherheit und Erosionsschutz [30] untersucht. Die Standsicherheit des Haldenkörpers wird dabei als gegeben vorausgesetzt.
- Spreizen: Die Standsicherheit einer Böschung kann dadurch gefährdet sein, dass insbesondere im Bereich der Aufstandsfläche der Halde erhebliche Schubspannungen (Spreizspannungen) infolge der Spreizverformung des Haldenmaterials auftreten können. Der Nachweis wird für die Kontaktfläche zwischen dem Haldenmaterial und der Aufstandsfläche durchgeführt. Der Nachweis gegen Spreizen ist bei den Halden nicht maßgebend, da keine Schadensbilder dieser Art bei den Halden in Sachsen bekannt sind.

6.1 Untersuchungsszenarien

In diesem Kapitel werden die untersuchten Bau- und Endzustände der Oberflächenabdichtungen an der Modellhalde dargestellt. Die geometrischen Angaben sind der Tabelle 4 sowie Abbildung 8 und Abbildung 9 zu entnehmen. Die Standsicherheit wird gemäß DIN 1997-1 [22] unter Einbeziehung folgender Bemessungssituationen untersucht:

- BS-P (persistent situations): Planmäßige Nutzung, regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkungen.
- BS-T (transient situations): Vorübergehende Einwirkungen aus Bauzuständen oder zeitlich begrenzter Nutzung.
- BS-A (accidental situations): Außergewöhnliche Bedingungen, Sonderlasten, teilweiser Ausfall oder Ermüdung von Tragelementen oder Teilausfall von Bodenwiderständen wie Adhäsion/Kohäsion in Schichtfugen bei Kriechen oder Zwangsverformungen.

Die Standsicherheitsuntersuchung wird in Hauptuntersuchungsgruppen unterteilt:

- Profilierung der Oberfläche des Haldenmaterial gemäß den geometrischen Angaben der Tabelle 4 und Herstellung der erforderlichen Bermen mit einer Breite von 6,0 m.
- Herstellung einer Trag- und Ausgleichsschicht als Basis des Oberflächenabdichtungssystems.

- Herstellung des Oberflächenabdichtungssystems als Vollabdeckung bzw. Teilabdeckung (Voll- bzw. Teilsanierung) nach Auswahl des gewünschten Querschnittes A1 ... B4.
- Untersuchung der Standsicherheit für die Bauzustände und den kurzfristigen sowie langfristigen Endzustand.

Nachsanierung von abgedeckten Halden:

- Die vorgefundenen geometrischen Verhältnisse, soweit sie den Angaben zur Modellhalde entsprechen, werden beibehalten. Dies betrifft insbesondere die Neigung der Böschungen, den vertikalen Abstand zwischen zwei Bermen und die Bermenbreite.
- Entfernung der vorhandenen Vegetation.
- Aushub und Verwahrung der organischen Rekultivierungsschicht ORS und der mineralischen Dämmschicht bis auf die untersten 0,2 m. Beispiel des vorhandenen Abdecksystems ist in Abbildung 6 dargestellt.
- Die Funktion der hergestellten Oberkante der mineralischen Dämmschicht ist äquivalent mit der Funktion der Trag- und Ausgleichsschicht bei der Sanierung nicht abgedeckter Halden.
- Weitere Schritte sind analog zu den Arbeitsschritten der Sanierung nicht abgedeckter Halden.

Untersuchung des Ist-Zustandes gemäß Abbildung 6

Die Standsicherheit für das vorhandene System und die geometrischen Verhältnisse der Modellhalde werden untersucht und mit den optimierten Oberflächenabdichtungssysteme A1 ... B4 verglichen.

Tabelle 15: Einwirkungen der Bemessungssituationen zum Gleitsicherheitsnachweis gemäß [30]

Bemessungssituation*	Einwirkungen
BS-P, ständig, persistent situations	<ul style="list-style-type: none"> ■ Eigengewicht der Oberflächenabdichtung und der Überlagerung inkl. tolerierbarem Überprofil ■ Einstau der Drainage ■ Schneelast **) ■ Baumgewicht und Windlast im Endzustand 2 (A2, A4, B2 und B4)
BS-T, vorübergehend, transient situations	<ul style="list-style-type: none"> ■ Eigengewicht der Oberflächenabdichtung und der Überlagerung ■ Einstau Drainage ■ Verkehrslasten aus Baustellenverkehr
BS-A, außergewöhnlich, accidental situations	<ul style="list-style-type: none"> ■ Eigengewicht Oberflächenabdichtung und Überlagerung ■ Einstau Drainage, ggf. Teileinstau Rekultivierungsschicht ■ Standortspezifische Schneelast ■ Verkehrslasten ■ Zusatzlasten, z. B. Erdbeben

- Die Zusatzlast Erdbeben gemäß Tabelle 19 wurde bei den Untersuchungsszenarien der Oberflächenabdichtungssysteme nicht angesetzt. Falls die Erdbebengefährdung an bestimmten Standorten zu betrachten ist, so ist diese Einwirkung bei der Planung einer Sanierung zu berücksichtigen. Die Wellenausbreitung und Austritt an der Oberkante der Aufstandsfläche einer Halde kann vereinfacht in eine vertikale und horizontale Ebene unterteilt werden. Die vertikalen Wellen führen zur Kompressionsvorgängen im Haldenmaterial und sind weitestgehend unbedenklich. Dagegen können die horizontalen Wellen zur Kornumlagerung im Haldenmaterial und ggf. zum Verlust der Scherfestigkeit führen.
- Der wahrscheinlichste Versagensmechanismus ist im Haldenkörper in Form von tiefen Gleitflächen gemäß Abbildung 15 (links) zu finden. Bei großräumigen Massenbewegungen wird die Funktion des Oberflächenabdichtungssystems beeinträchtigt und im Extremfall vollständig verloren werden. Dieses betrifft alle optimierten Querschnitte der Oberflächenabdichtungssysteme (A1 ... B4) gleichermaßen.

Parameter der Untersuchung:

- Die Oberflächenabdichtungssysteme bestehen aus verschiedenen Materialien. Eine Parameterübersicht der verwendeten Materialien ist in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt. Dabei handelt es sich um typische Spannweiten der Materialkennwerte. Da das Scherverhalten der Materialien in der maßgebenden Gleitfuge die möglichen Neigungen und den Abstand zwischen den Bermen bestimmt, wird dieser Einfluss auf die Standsicherheit untersucht.
- Die statischen Berechnungen erfolgen für die Grundbrucharten, Gleitrrutschung und Translationsrrutschung gemäß Abbildung 15.
- Einwirkungen:
 - Eigengewicht des Oberflächenabdichtungssystems,
 - Porenwasserdruck,
 - Verkehrslasten in der Bauphase und im Endzustand in den Bemessungssituationen BS-T und BS-A,
 - Schneelast wird für die Schneelastzone 3 auf Grund der geografischen Lage der Halden in Sachsen gemäß DIN EN 1991-1-3/NA [20] gewählt,
 - Baumgewicht und ggf. Windlast bei der Begrünung mit Sträuchern und Bäumen der Oberflächenabdichtungssysteme: Typ A2, A4, B2 und B4,
 - Nachweise: alle Trenn- und Grenzflächen des Oberflächenabdichtungssystems sowie mögliche Gleitflächen innerhalb einer Schicht,
 - Kombination der Einwirkungen gemäß Tabelle 15.
- Widerstände:
 - Scherfestigkeit in der maßgebenden Gleitfuge,
 - beim Einsatz von Geotextilen: Materialwiderstand flexibler Bewehrungselemente (Geogitter).
- Zustände:
 - Bauzustände gemäß Tabelle 15,
 - Endzustand 1: Begrünung mit Grasbewuchs.
 - Endzustand 2: Begrünung mit Sträuchern und Bäumen.
 - Für den Bau- und Endzustand werden folgende Situationen untersucht:
 - alle potenziellen Gleitfugen gemäß Tabelle 15.
 - Insbesondere werden folgende Extremzustände berücksichtigt:
 - Defekt der Drainage und Wasseraufstau in der Rekultivierungsschicht,
 - Verlust der Kohäsion auf Grund von Durchnässung der Rekultivierungsschicht,
 - Wasseraufstau in einem oberflächennahen Horizont auf Grund eines Extremniederschlags.

Eine ausführliche Darstellung der Zwischenbauzustände ist der Tabelle 36 in [5] zu entnehmen.

6.2 Kennwerte der Standsicherheitsberechnungen

Im Vorfeld der Standsicherheitsuntersuchungen wurden die Eingangsparameter festgelegt. Die detaillierte Ermittlung bzw. Abschätzung dieser Parameter ist im Abschnitt 5.2 des Berichtes zum Arbeitspaket 3.2 [5] zu finden.

Eigengewicht der Baumaterialien

Das Eigengewicht der Konstruktion wird für die Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände benötigt. Aus der Schichtmächtigkeit und der Wichte des Bodens bzw. Geokunststoffes gemäß Tabelle 6 und Tabelle 7 wird das Eigengewicht ermittelt.

Verkehrslasten

In der Bauphase wird die Oberfläche der Böschungen und der Bermen mit Baufahrzeugen befahren. Zur Herstellung der Oberflächenabdichtungssysteme werden die Böden häufig per Vorkopf-Einbau mit Hilfe von Planiertraupen eingebracht. Laut Herstellerangaben von Caterpillar/Zeppelin und Komatsu haben die Bulldozer ein Einsatzgewicht von 9,0 t bis 113,0 t mit unterschiedlich hohen Planier- und Verdichtungsleistungen. Somit ist ein Ansatz für die Verkehrslast von mind. 30 kN/m² vertretbar.

Bei den Standsicherheitsuntersuchungen wird für alle Bauzustände das Eigengewicht der Baufahrzeuge mit max. 32 kN/m² als Flächenlast bzw. Gesamtgewicht des Baufahrzeugs von max. 128 t als Einzellast berücksichtigt.

Schneelast

Die Ermittlung der flächigen Schneelast auf der Geländeoberfläche erfolgt gemäß DIN EN 1991-1-3/NA [20] in Abhängigkeit von der jeweiligen Schneelastzone für die Bemessungssituation BS-P. Da die meisten Uranbergbauhalden in Sachsen sich in der Schneelastzone 2 bis 3 befinden, wurde als konservativer Wert die Zone 3 für die Modellhalde mit einer angenommenen Geländehöhe über dem Meeresniveau von 370 m festgelegt. Dieses ergab eine Flächenlast von 1,62 kN/m².

Eigengewicht der Bewaldung

Für die Querschnittsvarianten A2, A4, B2 und B4, Anhang 0, ist die Begrünung durch Sträucher und Bäume vorgesehen. Für diese Belastungsart wurden keine Angaben in der Literatur gefunden. Für die Ermittlung der Baumlast wurden Überschlagsberechnung mit den nachfolgenden Annahmen durchgeführt.

- Das Eigengewicht eines Baumes mit Stamm, Krone und Blattwerk wurde geschätzt. Nach Angaben des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft kommen flächenmäßig am häufigsten Fichten, Kiefern und Buchen in den deutschen Mischwäldern vor.
- Für die Stammdichte pro Ar Waldfläche wurde eine Zählung in einem Thüringer Forst durchgeführt und als Grundlage für die Ermittlung des Eigengewichts der Bewaldung festgelegt.
- Das Eigengewicht wurde mit Hilfe der beschriebenen Vorgehensweise ermittelt und als Flächenlast mit 5,09 kN/m² in den Berechnungen berücksichtigt

Windlast

Das Vorhandensein der Bäume ergibt neben dem Eigengewicht einen Widerstand gegen den Wind. Die Einwirkungen werden in das Wurzelwerk übertragen und sorgen beim hangabwärts gerichteten Wind für die Entstehung von destabilisierenden Kräften. Daher wird die Windlast im Endzustand 2 und der Bemessungssituation BS-P berücksichtigt. Die Berechnungsansätze wurden unter Beachtung der Angaben in der DIN EN 1991-1-4/NA [21] und der statischen Betrachtung zu Gehölzen auf Dammbauten [36] entwickelt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 16 dargestellten böschungsp parallelen Windlasten.

Tabelle 16: Ermittelte böschungsparelle Windlasten F_W

Böschungsneigung	Windlast F_W [kN]	Horizontale Windlast $F_{W,h}$ [kN]	Horizontale Flächenlast $P_{W,h}$ [kN/m ²]	Vertikale Windlast $F_{W,v}$ [kN]	Vertikale Flächenlast $P_{W,v}$ [kN/m ²]
1:2,0	220,125	196,886	1,97	98,443	0,98
1:2,5	212,052	196,886	1,97	78,753	0,79
1:3,0	207,536	196,886	1,97	65,629	0,66

Die Windlast ist relevant für die Oberflächenabdichtungssysteme A2, A4, B2 und B4 mit Baumbewuchs. Das Vorhandensein von Bäumen ergibt wiederum eine hohe Wurzeldichte. Diese kann als eine Bewehrung des Bodens betrachtet werden. Damit kann erfahrungsgemäß eine Erhöhung der Kohäsion im Ober- und Unterboden um 5,0 bis 10,0 kN/m² angenommen werden.

6.3 Standsicherheit der Haldenböschungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungszenarien präsentiert, die gemäß Abschnitt 6.1 rechnerisch mittels der Software GGU-stability durchgeführt wurden. Dafür werden zwei mathematische Modelle nach *Bishop* und *Janbu* verwendet.

Einsatzmöglichkeiten der mathematischen Modelle:

- Verfahren nach *Bishop*: Das Verfahren ist gut geeignet für die Untersuchung von tiefen Gleitfugen (Rotationsrutschung), die das Haldenmaterial und/oder das Oberflächenabdichtungssystem erfassen.
- Verfahren nach *Janbu*: Wenn sich im Ergebnis der Berechnungen nach *Bishop* eine Ausbildung der maßgebenden (ungünstigsten) Gleitfläche im Oberflächennahen Bereich ergibt, dann ist die Untersuchung der Translationsrutschung beim mehrschichtigen Oberflächenabdichtungssystem mit überwiegend böschungsparellen Gleitlinien eher sinnvoll. Das Verfahren erlaubt die Untersuchung zahlreicher Fugen im vermuteten Versagenskörper. Damit kann die maßgebende Gleitfuge definiert werden.

Die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen für die Untersuchungsszenarien werden im Abschnitt 6.1 dokumentiert. Die erforderlichen Kennwerte sind im Abschnitt 6.2 angegeben.

Auf Grund der möglichen Geometrien, Lasten, Bauzustände, Endzustände und Oberflächenabdichtungssysteme sind zahlreiche Berechnungsvariationen entstanden. Die Ergebnisse wurden in Tabellenform zusammengefasst und im Bericht zum Arbeitspaket 3.2 [5] detailliert vorgestellt und diskutiert. In der Tabelle 17 sind die Systeme dargestellt, die einen Ausnutzungsgrad $\mu > 1,0$ aufweisen. Somit gelten die Nachweise dafür nach DIN EN 1997-1 [22] als nicht erfüllt.

Diskussion der Ergebnisse:

- In der Bauphase bei einer Böschungsneigung von 1:2 kam es häufig auf Grund der Befahrung der Rekultivierungsschicht zu lokalen Oberflächenrutschungen, Abbildung 17. Diese Situation wird als irrelevant für die Auswahl des optimierten Oberflächenabdichtungssystems betrachtet und in Tabelle 17 nicht berücksichtigt. Im konkreten Fall in der Praxis kann diese Situation durch die Nutzung von kleineren Baumaschinen vermieden werden.
- In keinem Untersuchungsfall waren tiefe Gleitflächen im Haldenmaterial maßgebend. Die ungünstigsten Gleitflächen entstanden hauptsächlich in der Oberflächenabdichtung.
- Bei der Untersuchung der Teilsanierung einer Halde wurde davon ausgegangen, dass die Oberflächenabdichtung zwischen dem Böschungsfuß und der 1. Berme gemäß Abbildung 22 installiert wird. Die Standsicherheitsuntersuchung ergab keine Vor- bzw. Nachteile der Teilsanierung gegenüber der Volldeckung der Haldenböschungen aus statischer Sicht.

- Die Scherfestigkeit der Ausgleichs- und Tragschicht hat einen Einfluss auf die Lage der maßgebenden Gleitfuge und des Ausnutzungsgrades. Bei der Nachsanierung abgedeckter Halden und Nutzung der vorhandenen mineralischen Dämmschicht als Ausgleich und Tragschicht ist die Scherfestigkeit des Materials zu überprüfen. Bei schlechter Eignung muss die mineralische Dämmschicht vollständig entfernt und durch geeignetes Material ersetzt werden.
- Die Berechnungsergebnisse zeigen entsprechend der Erfahrungen mit Oberflächenabdichtungssystemen im Deponiebau, dass die Bodenschichten bzw. die Grenzfuge mit der geringsten Scherfestigkeit die maßgebende Gleitfuge bildet.

Tabelle 17: Versagenszustände der Haldenoberflächenabdichtung

lfd-Nr.	System ¹⁾	BS ²⁾	Bermenanzahl	Böschungsneigung 1:n	Ungünstigste Gleitfläche ³⁾	Ausnutzungsgrad μ [-]
1	A3	BS-P, BS-A	2	1:2	Mineralische Entwässerung - KDB	1,12 ... 1,14, 1,02 ... 1,03
2	A3	BS-T	2	1:2 1:2,5	Baustraße ⁴⁾	1,11 ... 1,59, 1,1 ... 1,59
3	A3	BS-T	2	1:3	Baustraße ⁴⁾	1,06 ... 1,27
4	A3	BS-T	2	1:3	Baustraße ⁴⁾	1,06 ... 1,27
5	A3	BS-T	3	1:2	Baustraße ⁴⁾	1,36 ... 1,67
6	A3	BS-T	3	1:2	Mineralische Entwässerung - KDB	1,11 ... 1,13
7	A3	BS-T	3	2,5	Baustraße ⁴⁾	1,22 ... 1,71
8	A3	BS-T	3	1:3	Baustraße ⁴⁾	1,12 ... 1,28
9	A4	BS-T	2	1:2, 1:2,5	Baustraße ⁴⁾	1,3 - 1,7, 1,14 - 1,53
10	A4	BS-T	2	1:3	Baustraße ⁴⁾	1,06 ... 1,33
11	A4	BS-T	3	1:2	Mineralische Entwässerung - KDB	1,09 ... 1,1
12	B3	BS-T	2	1:2, 1:2,5	Baustraße ⁴⁾	1,37 ... 1,8, 1,20 ... 1,60
13	B3	BS-T	2	1:3,0	Baustraße ⁴⁾	1,07 ... 1,33
14	B3	BS-T	3	1:2	Mineralische Entwässerungsschicht	1,38 ... 1,72
15	B3	BS-T	3	1:2,5	Baustraße ⁴⁾	1,29 ... 1,41
16	B3	BS-T	3	1,3	Baustraße ⁴⁾	1,16 ... 1,30
17	B4	BS-T	2	1:2, 1:2,5	Baustraße ⁴⁾	1,32 ... 1,73, 1,18 ... 1,44
18	B4	BS-T	2	1:3	Baustraße ⁴⁾	1,13 ... 1,44

¹⁾ Oberflächenabdichtungssystem gemäß Anlage 0

²⁾ BS: Bemessungssituation nach [22]

³⁾ In dieser Spalte wird die Bodenschicht angegeben, die den maximalen Ausnutzungsgrad liefert. Eine Schicht wird angegeben → Die Gleitfläche verläuft innerhalb dieser Schicht. Werden zwei Schichten angegeben → Die Gleitfläche verläuft entlang der Schichtgrenze beider Schichten.

⁴⁾ Baustraße (Material: mineralische Entwässerungsschicht)

- Die Bauzustände liefern die größte Ausnutzung der Sicherheitsreserven auf Grund der Befahrung mit schweren Baufahrzeugen und der geringen Normalspannung aus der Gewichtskraft des eingebauten Bodens.
- Bei Böschungsquerschnitten, die eine ausreichende Standsicherheit in der Bauphase (BS-T) und im Endzustand (BS-P) aufweisen, wurde festgestellt, dass die außergewöhnlichen Situationen (BS-A) auch erfüllt sind. Diese Aussage ist auf Grund der Untersuchungen in den Abschnitten 6.4 und 6.5 noch zu präzisieren. Im Programm GGU-stability kann der Einstau in der Drainage nicht ausreichend genau simuliert werden. Dieses kann zur Verfälschung der Ergebnisse führen.

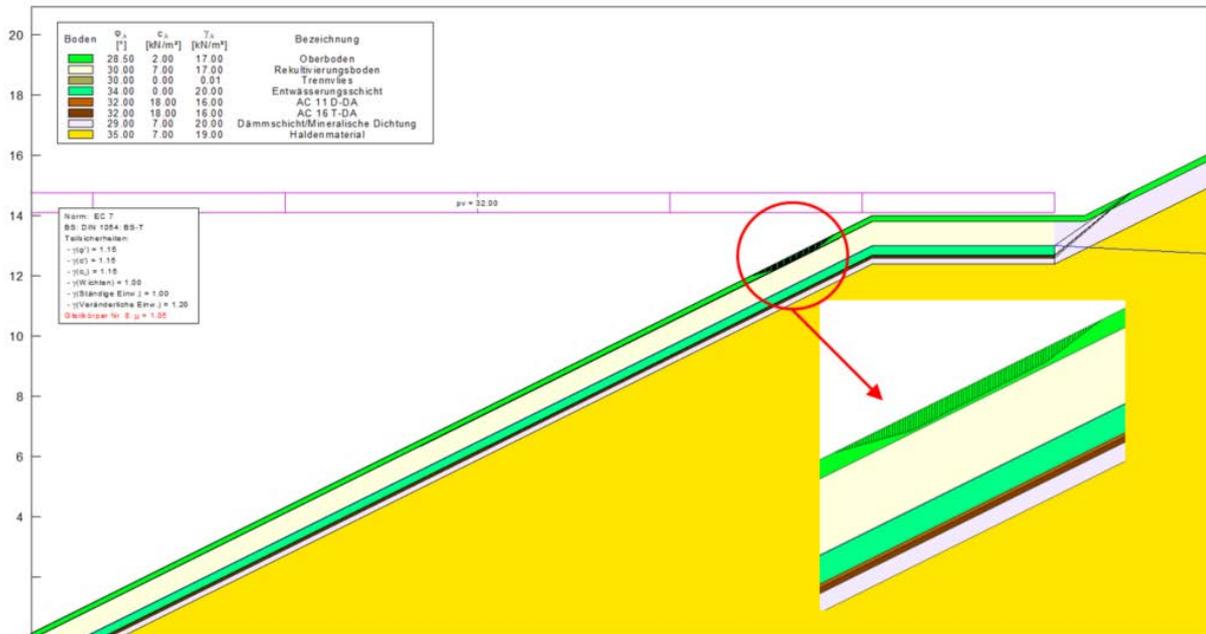


Abbildung 17: Oberflächenrutschungen in der Bauphase auf Grund der schweren Verkehrslast

- Bei den Oberflächenabdichtungssystemen A2, A4, B2 und B4 wurde von einer Bewaldung der Böschungen ausgegangen. In der Literatur wurden keine Angaben zur Lasterhöhung auf Grund der Bewaldung gefunden. Des Weiteren kommt zusätzlich zum Baumgewicht in der Bemessungssituation BS-P die Windlast, welche auf die Bäume einwirkt, hinzu. Die Standsicherheitsnachweise für die Oberflächenabdichtungssystemen A2, A4, B2 und B4 wurden für die folgenden Endzustände ermittelt:
 - Endzustand 1: Begrünung mit Grasbewuchs, unmittelbar nach Beendigung der Sanierungsmaßnahme,
 - Endzustand 2: Begrünung mit Sträuchern und Bäumen, 60 - 80 Jahre nach der Sanierung.
- Im Endzustand 2 wurde festgestellt, dass keine nennenswerte Erhöhung der Ausnutzungsgrade im Vergleich zum Endzustand 1 vorhanden ist. Abbildung 18 zeigt am Beispiel des Oberflächenabdichtungssystems A4 mit einer Böschungsneigung von 1:3 und 2 Bermen die Ausnutzungsgrade für die Teilböschungen.

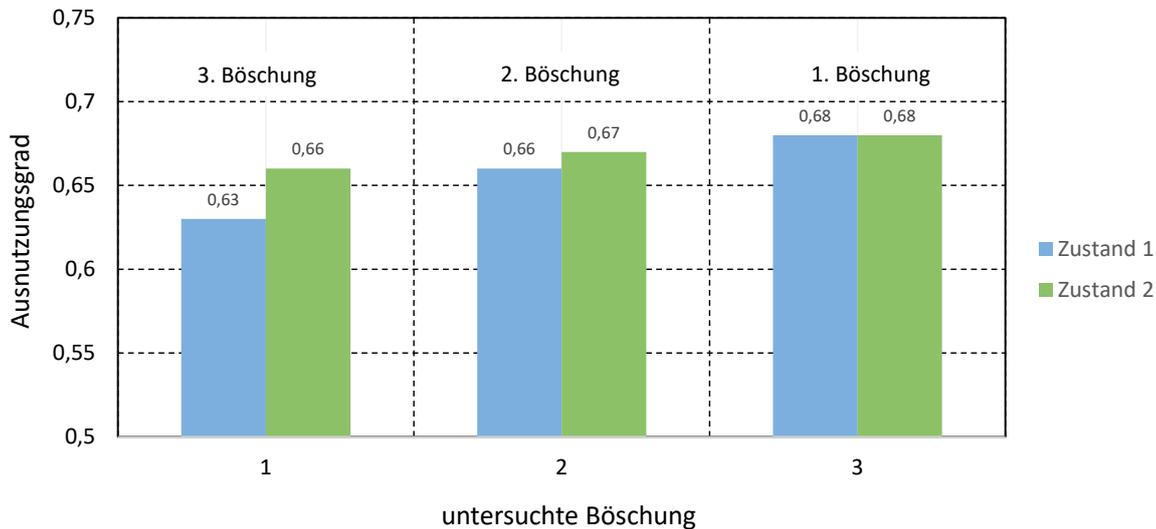


Abbildung 18: Vergleich der Ausnutzungsgrade für die Endzustände 1 und 2

- Die dargestellten Versagensszenarien in der Tabelle 17 zeigen, dass der Bauzustand bei den untersuchten Systemen meistens der maßgebende Zustand ist. Damit lassen sich folgende Systemeinschränkungen darstellen:
 - die ungünstigste Gleitfläche verläuft in der mineralischen Entwässerungsschicht bzw. in der Schichtgrenze zur mineralischen Entwässerungsschicht der Oberflächenabdichtungssysteme A3; A4, B3 und B4. Auf Grund der fehlenden Kohäsion in dieser Schicht und der geringen Normalspannung in der Bauphase kann es zum Versagen des Systems kommen. Laut der GDA-Empfehlung E 2-1 [30] muss die Entwässerungsschicht die Anforderungen der GDA E 2-20 [32] erfüllen. Das Material besitzt keine Kohäsion und besteht vorwiegend aus Rundkorn.
 - Oberflächenabdichtungssysteme mit einem Kunststoff-Dränelement liefern bessere Standsicherheitsergebnisse als Systeme mit einer mineralischen Entwässerungsschicht. Dies ergibt sich aus dem einsetzbaren Adhäsionsanteil der Scherfestigkeit bei Kunststoff-Dränelementen. Jedoch muss der Einsatz von Kunststoff-Dränelementen bei den Oberflächenabdichtungssystemen A2 und B2 labortechnisch geprüft werden, da diese Elemente gemäß der BAM-Zulassung [10] eine max. Auflast von 50 kPa bzw. eine Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungs- oder Funktionsschicht von 2,5 m nicht überschreiten darf.
- Systeme mit drei Bermen weisen geringfügig größere Sicherheitsreserven gegenüber Systemen mit zwei Bermen, Abbildung 19, auf. Erwartungsgemäß hat die Neigung der Böschung einen großen Einfluss auf die Standsicherheit. Die Anzahl der Bermen ändert die geometrischen Verhältnisse (Höhe / Breite der Böschung), Tabelle 4, und somit den Ausnutzungsgrad. Jedoch erhöht die Anordnung von drei Bermen den Material- und Flächenbedarf gegenüber einer Böschung mit zwei Bermen. Im Einzelfall ist der Verbesserungsgrad der Standsicherheit einer Böschung mit drei Bermen gegenüber einer Böschung mit zwei Bermen in Hinblick auf Flächen- und Materialbedarf kritisch zu betrachten.

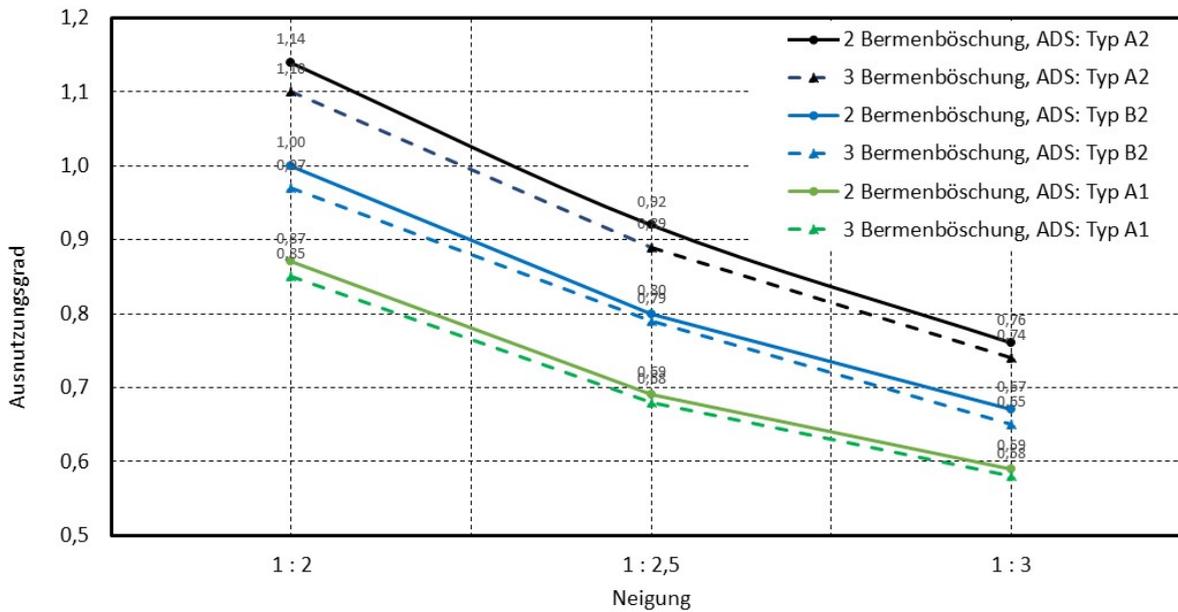


Abbildung 19: Einfluss der Bermenanzahl auf den Ausnutzungsgrad

Die Böschungsstandsicherheit der ersten Teilböschung ist maßgebender als die der darüber liegenden Böschungen, Abbildung 18. Die Ausnutzungsgradreduzierung der zweiten und dritten Böschungsabschnitte ist zwar geringfügig, jedoch bei einer festgestellten hohen Ausschöpfung der Reserven sind die Nachweise für die erste Böschung maßgebend.

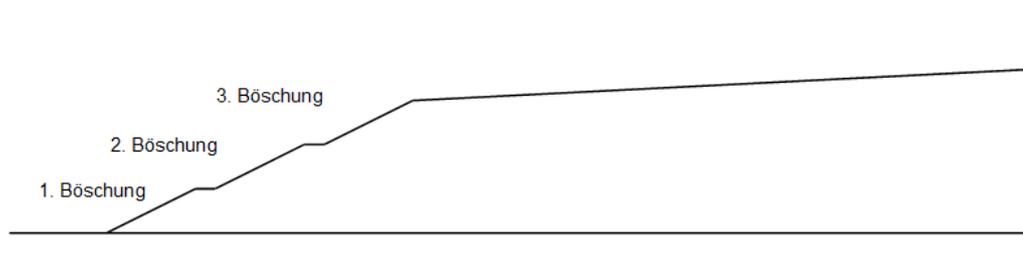


Abbildung 20: Definition der Teilböschungsbereiche der Modellhalde

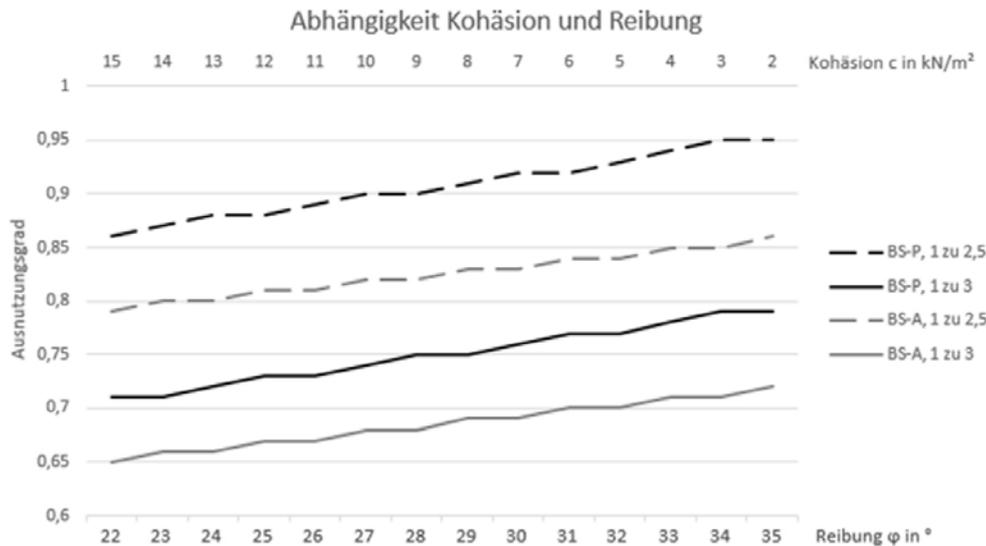


Abbildung 21: Abhängigkeit Kohäsion und Reibungswinkel des Bodens

- Bei der Untersuchung der Kennwertspannweiten der Tabelle 6 und Tabelle 7 wird deutlich, dass die Kohäsion bzw. Adhäsion für die Erfüllung der Standsicherheitsanforderungen maßgebender ist als der Reibungsanteil, Abbildung 21.

6.4 Nachweis der Gleitsicherheit nicht bewehrter Systeme

Bei der verwendeten Software GGU-stability ist die Untersuchung von Wassereinstau in der Drainage und Strömungskräften nicht einwandfrei modellierbar. Deswegen wurde die Translationsrutschung der Oberflächenabdichtung gemäß der Vorgehensweise der GDA-Empfehlung E2-07 [30] für nicht bewehrte Systeme untersucht. Beim Einsatz von Geogittern zur Bewehrung der ungünstigsten Gleitfläche wurden die Berechnungsansätze gemäß EBGEO [25] zugrunde gelegt.

Es wurden die gleichen Untersuchungsszenarien wie im Abschnitt 6.3 durchgeführt. Die Lage der böschungparallelen Gleitfläche wurde solange variiert bis der maximale Ausnutzungsgrad gefunden wurde. Auf Grund der großen Datenmenge wurden die wesentlichen Ergebnisse der Berechnungen zusammenfassend in der Anlage A 1 des Berichtes zum Arbeitspaket 3.2 [5] dargestellt und im vorliegenden Kapitel diskutiert.

Untersuchte, außergewöhnliche Situationen:

Hier handelt es sich um eine getrennte Betrachtung des Endzustands ohne und mit Schneelast.

- Defekt der Drainage und Wasseraufstau in der Rekultivierungsschicht: Kunststoff-Dränelement (KDE) voll + untere 15% des Unterbodens.
- Wassereinstau in einem oberflächennahen Horizont:
 - obere 15% des Unterbodens,
 - obere 15% des Unterbodens und untere 25% des Oberbodens.

Auswertung der Ergebnisse:

- Auf Grund der Ähnlichkeit der mathematischen Modelle sind die festgestellten Ergebnisse im Abschnitt 6.3 hier übertragbar.
- Die maßgebenden Zustände sind die Bauzustände.
- Maßgebende Gleitfuge ist die Schichtgrenze zur Drainschicht.

Angaben zur Mindestscherfestigkeit in der Gleitfuge nicht bewehrter Systeme:

- Für die zukünftige Sanierung der Uranbergbauhalden in Sachsen wurden Wertepaare der Reibungswinkel φ'_k und die Kohäsion c'_k des Bodens sowie der Reibungsbeiwert δ'_k und Adhäsion a'_k des Geokunststoffes in der maßgebenden Gleitfläche in Hinblick auf die Erfüllung der Standsicherheit ($\mu \leq 1,0$) der Böschung untersucht. Diese Systeme erfüllen die Anforderungen der Standsicherheit ohne Einsatz von Geokunststoffbewehrung.
- Die Wertepaare der Tabelle 18 stellen die erforderlichen Mindestscherfestigkeiten in der Fuge KDB / KDE bzw. KDE / Unterboden dar. Diese resultieren aus der Untersuchung der Standsicherheit gemäß der o.g. außergewöhnlichen Situationen.
- Die Werte der Tabelle 18 können auf Systeme mit einer mineralischen Entwässerungsschicht bei entsprechender Erhöhung des Reibungswinkels verwendet werden.

Tabelle 18: Mindestscherfestigkeit des Bodens / des Geokunststoffes für die Erfüllung des Standsicherheitsnachweises

System	Ungünstigste Gleitfläche	φ'_k [°] bzw. δ'_k [°]	c'_k [kN/m ²] bzw. a'_k [kN/m ²]
A1	KDB/KDE	20,0	5,5
A2	KDB/KDE	25,5 29,0	10,0 5,0
A3	KDB/KDE	25,0	5,0
A4	KDB/KDE	25,0 29,0	10,0 5,0
B1	KDE/Unterboden	25,0	5,0
B2	KDE/Unterboden	25,0	5,0
B3	KDE/Unterboden	25,0	5,0
B4	KDE/Unterboden	25,0	5,0

- Bei der Planung der Sanierung von Halden und der Suche nach geeigneten Materialien können die ausgewiesenen Scherfestigkeiten in Tabelle 18 als Zielvorgabe definiert werden. Damit ist die Herstellung nicht bewehrter Oberflächenabdichtungssysteme möglich.
- Erfüllen die vorhandenen Baumaterialien im Gegensatz zum vorherigen Punkt die angegebenen Mindestscherfestigkeiten der Tabelle 18 nicht, so wird der Einsatz von Geokunststoffbewehrung höchstwahrscheinlich erforderlich.

6.5 Nachweis der Gleitsicherheit geokunststoffbewehrter Systeme

Auf Grund der in der Praxis komplexen Haldengeometrie und verfügbaren Baumaterialien kann der Einsatz von Geokunststoffbewehrung erforderlich werden, wenn beim Nachweis der Standsicherheit nicht bewehrter Systeme gemäß Abschnitt 6.4 sich ein Ausnutzungsgrad $\mu > 1$ ergibt.

Der Einsatz von Geokunststoffbewehrung ist in folgenden Fällen erforderlich:

- Bei Ausschöpfung der Scherfestigkeit des Bodens in der maßgebenden Gleitfläche.
- Zur Gewährleistung der Standsicherheit gegen Gleiten bei oberflächenparallelen geschichteten Systemen (z.B. Oberflächenabdichtung).

- Die konvektiven Oberflächenabdichtungselemente (Kunststoffdichtungsbahnen und Asphalt) sowie Kunststoff-Dränelemente dürfen planmäßig nicht mit Zugkräften beansprucht werden. Wenn sich die maßgebende Gleitfläche unmittelbar oberhalb oder unterhalb dieser Schichten befindet und hangabwärts gerichtete Defizitkraft vorhanden ist, ist der Einbau von Geokunststoffbewehrung in dieser Fuge erforderlich.

In diesem Abschnitt werden Oberflächenabdichtungssysteme, die im Rahmen der Untersuchungen im Abschnitt 6.4 ohne Geokunststoffbewehrung einen Ausnutzungsgrad $\mu > 1$ aufweisen, betrachtet.

Anordnung der Bewehrung bei Oberflächenabdichtung:

- Die Bewehrung erfolgt in der maßgebenden/ungünstigsten Gleitfuge, die die geringste Scherfestigkeit aufweist.
- Für Teilbereichssanierung stellt der Bermenbereich die Grenze der Sanierungsmaßnahme dar. Die erforderliche Verankerung wird in diesem Bereich gemäß Abbildung 22 hergestellt.

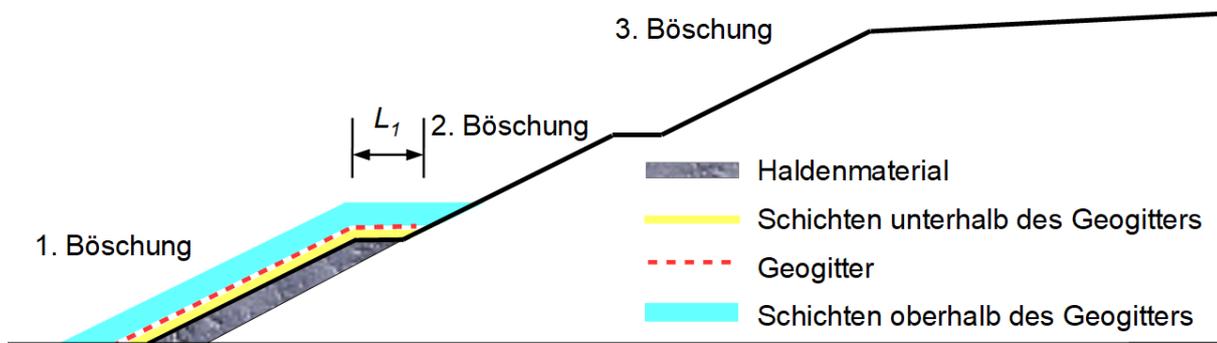


Abbildung 22: Anordnung des Geogitters und Verankerungslänge L_1

Das Ziel der Berechnung war die Ermittlung der Defizitkräfte, die Verankerungslänge der Bewehrung und der erforderliche Materialwiderstand (innere Tragfähigkeit der Bewehrung) für die Auswahl des geeigneten Produktes. Auf Grund der Berechnungsergebnisse in den Abschnitten 6.3 und 6.4 erfolgte die Auswahl der Lage der Bewehrungselemente.

Anordnung des Geogitters für die untersuchten Oberflächenabdichtungssysteme (von unten nach oben betrachtet), Abbildung 22:

- System A1, A2; B1 und B2: KDB bzw. Asphaltabdichtung / KDE / Geogitter / ...
- System A3, A4: KDB / Schutzschicht / Geogitter / Mineralische Entwässerungsschicht / ...
- System B3, B4: ... / mineralische Entwässerungsschicht / Geogitter / Trenn- bzw. Filtervlies / ...

Die Ermittlung der erforderlichen Verankerungslänge am Beispiel einer Teilabdeckung [5] zeigt, dass eine einfache Überschüttung des Geogitters ohne Verankerungsgraben bei einer Bermenbreite von 6,0 m möglich ist. In seltenen Fällen übersteigt die erforderliche Verankerungslänge die Bermenbreite, in diesem Fall ist die Gestaltung eines Verankerungsgrabens erforderlich. Bei einer vollabgedeckten Halde wiederholt sich das System für die zweite und dritte Böschung.

6.6 Standsicherheit vorhandener Haldenabdeckungen am Beispiel der Modellhalde
 Die Standsicherheitsuntersuchung vorhandener Oberflächenabdichtungssysteme der Uranbergbauhalden wird exemplarisch für das Abdeckungssystem gemäß Abbildung 6 und der Lasten gemäß Tabelle 19 am Beispiel der Modellhalde durchgeführt.

Tabelle 19: Lastannahmen der Untersuchungsszenarien vorhandener Haldenabdeckung

Bemessungssituation	Beschreibung	Last [kN/m ²]
BS-P	Schneelast	1,70
BS-A	Schneelast	1,70
	Verkehrslast (Bewirtschaftungsfahrzeug bzw. Havarieeinsatz)	16,00

Für die Durchführung der Standsicherheitsnachweise wurden gängige Mittelwerte der Bodenkennwerte gemäß Tabelle 6 für Rekultivierungsböden und Dämmschichten zugrunde gelegt und in Tabelle 20 präzisiert.

Bei der Auswertung wurden die Geometrien der Modellhalde zugrunde gelegt und die Untersuchung auf die nachfolgenden Systeme begrenzt:

- Anzahl der Bermen: zwei. Das System mit drei Bermen liefert kleinere Ausnutzungsgrade. Daher wird der ungünstigste Fall untersucht.
- Neigung: 1:n → 1:2,5 und 1:3. Die Standsicherheitsnachweise in den Abschnitten 6.3 und 6.4 zeigten, dass das System mit einer Neigung von 1:2 große Ausnutzungsgrade liefert. Die Abdecksysteme der Halden im Erzgebirge haben eine Neigung von 1:2,5 bis 1:3, daher wurde bei dieser Untersuchung auf das Nachrechnen eines Abdecksystems mit einer Neigung von 1:2 verzichtet.

Die Standsicherheitsnachweise wurden für tiefe Gleitfugen mit dem Verfahren nach *Bishop* und flache, oberflächenparallele Gleitfugen mit dem Verfahren nach *Janbu* durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 21 zusammengestellt und in der Anlage A1.3 des Berichtes zum Arbeitspaket 3.2 [5] ausführlich dargestellt.

Tabelle 20: Bodenkennwerte, mineralische Böden der vorhandenen Haldenabdeckung

Datensatz	Beschreibung	Schicht	φ'_k [°]	c'_k [kN/m ²]	γ_k [kN/m ³]	γ'_k [kN/m ³]
1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Übliche Nutzung ■ Boden natürlich feucht ■ Bodenkennwerte der Ausgangsberechnung 	Oberboden	28,50	2,00	17,0	-
		Dämmschicht	29,0	7,0	20,0	-
		Haldenmaterial	35,0	7,0	19,0	-
2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Übliche Nutzung ■ Kohäsion der Dämmschicht nicht wirksam (z.B. wegen Bodeninhomogenität) 	Oberboden	28,50	2,00	17,0	-
		Dämmschicht	29,0	0,0	20,0	-
		Haldenmaterial	35,0	7,0	19,0	-
3	<ul style="list-style-type: none"> ■ Außergewöhnliche Einwirkung ■ Oberboden und Dämmschicht, durchnässt (z.B. nach einer langen Regenperiode) 	Oberboden	28,50	2,00	-	9,0
		Dämmschicht	29,0	3,5	-	10,0
		Haldenmaterial	35,0	7,0	19,0	-

Daten-satz	Beschreibung	Schicht	φ'_k [°]	c'_k [kN/m ²]	γ_k [kN/m ³]	γ'_k [kN/m ³]
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Reduzierung der Kohäsion in der Dämmschicht ■ Oberboden und Dämmschicht stehen unter Auftrieb 					
4	<ul style="list-style-type: none"> ■ Außergewöhnliche Einwirkung ■ Oberboden und Dämmschicht, stark durchnässt (z.B. nach einem extremen Regenereignis) → Ausfall der Kohäsion in der Dämmschicht ■ Oberboden und Dämmschicht stehen unter Auftrieb 	Oberboden	28,50	2,00	-	9,0
		Dämmschicht	29,0	0,0	-	10,0
		Haldenmaterial	35,0	7,0	19,0	-

Oberboden= ORS (organische Rekultivierungsschicht, Abbildung 6)

In Abbildung 23 ist der Ausnutzungsgrad der berechneten Systeme gemäß Tabelle 21 dargestellt. Zusammenfassend kann das System wie folgt bewertet werden:

- Das System unter normalen Bedingungen, auch im Falle des Wegfalls der Kohäsion bei den untersuchten Böschungsneigungen, ist standsicher.
- Die Nachweisverfahren nach *Bishop* und *Janbu* liefern ähnliche Ergebnisse trotz häufiger Wechsel der Lage der ungünstigsten Gleitfläche.
- Der Einfluss der Kohäsion ist erfahrungsgemäß sehr groß. Der Vergleich der Berechnungsgruppe 1-4 mit 5-8 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Die Lage der ungünstigsten Gleitfläche wird dadurch maßgebend beeinflusst.
- Böschungsneigung von 1:3 liefert viel größere Sicherheitsreserven als die Böschungsneigung 1:2.5.

Die Lastannahme gemäß BS-A (außergewöhnlich) in Verbindung mit den Bodenkennwerten gemäß Datensatz 4 stellt eine Extremsituation dar, die sehr unwahrscheinlich ist. Die Rechenbeispiele, Tabelle 20; Datensatz 4, liefern hohe Ausnutzungsgrade, die teilweise leicht über 1,0 liegen. Bei einer Nachsanierung bereits abgedeckter Halden dient die vorhandene bindige Dämmschicht als Ausgleichs- und Tragschicht der konvektiven Dichtung und wird weitestgehend von den Wettereinflüssen geschützt sein. Die dargestellte Situation ist dann nicht mehr vorhanden.

Tabelle 21: Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchung der vorhandenen Haldenabdeckung

Datensatz ^{*)}	BS	lfd-Nr.	Berechnungsverfahren	Böschungsneigung 1:n	Ungünstigste Gleitfläche ^{**)}	Ausnutzungsgrad μ [-]
1	BS-P	1	Bishop	1:2,5	Haldenmaterial	0,53
		2	Janbu	1:2,5	mineralische Dämmschicht - Haldenmaterial	0,51
		3	Bishop	1:3,0	Haldenmaterial	0,46
		4	Janbu	1:3,0	Haldenmaterial	0,43
2	BS-P	5	Bishop	1:2,5	mineralische Dämmschicht	0,80
		6	Janbu	1:2,5	mineralische Dämmschicht	0,82
		7	Bishop	1:3,0	mineralische Dämmschicht	0,73
		8	Janbu	1:3,0	mineralische Dämmschicht	0,74
3	BS-A	9	Bishop	1:2,5	Oberboden - mineralische Dämmschicht	0,75
		10	Janbu	1:2,5	mineralische Dämmschicht	0,90
		11	Bishop	1:3,0	Oberboden	0,72
		12	Janbu	1:3,0	Oberboden - mineralische Dämmschicht	0,83
4	BS-A	13	Bishop	1:2,5	mineralische Dämmschicht	1,07
		14	Janbu	1:2,5	mineralische Dämmschicht	1,11
		15	Bishop	1:3,0	mineralische Dämmschicht	0,99
		16	Janbu	1:3,0	mineralische Dämmschicht	1,02

*) Erläuterung in Tabelle 20

***) In dieser Spalte wird die Bodenschicht angegeben, die den maximalen Ausnutzungsgrad liefert. Eine Schicht wird angegeben → Die Gleitfläche verläuft innerhalb dieser Schicht. Werden zwei Schichten angegeben → Die Gleitfläche verläuft entlang der Schichtgrenze beider Schichten.

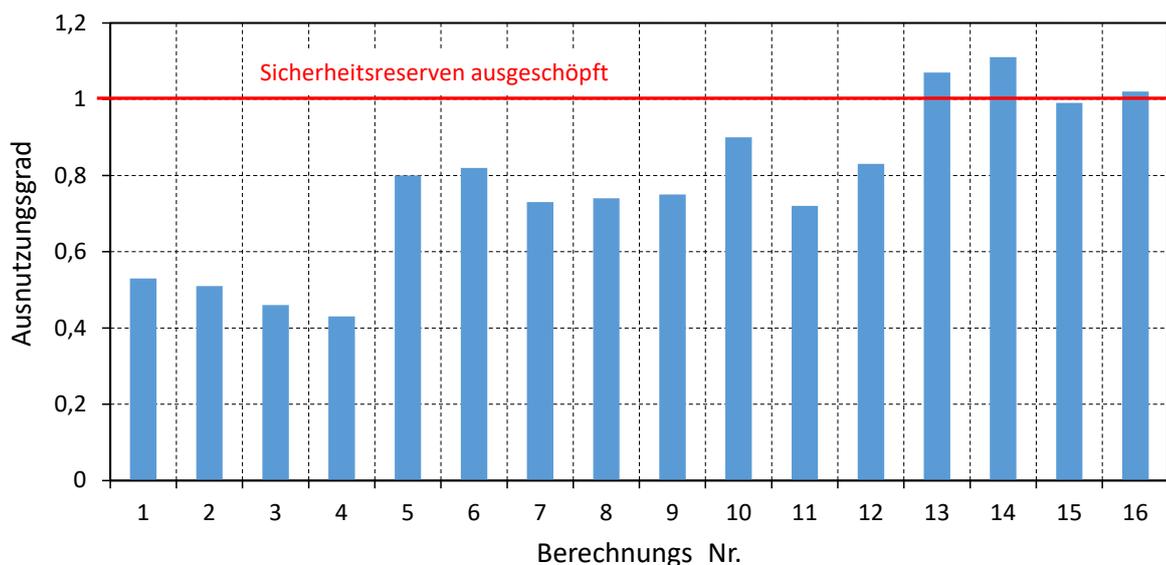


Abbildung 23: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Böschungsbruchberechnungen, Berechnungsnummer aus Spalte 3 der Tabelle 21 zu entnehmen

6.7 Präzisierung der Anwendungsgrenzen der Oberflächenabdichtungssysteme

Aus den durchgeführten Berechnungen zur Standsicherheit der Oberflächenabdichtungssysteme können folgende Punkte zur Präzisierung der Anwendungsgrenzen der optimierten Oberflächenabdichtungssysteme angegeben werden:

- Böschungsneigungen von 1:2,5 bzw. 1:3 in Verbindung mit gängigen Bodenarten, Geokunststoffen und Asphalt gemäß Tabelle 6 und Tabelle 7 liefern standsichere Systeme.
- Steile Böschungen mit einer Neigung von 1:2 sind nicht zu empfehlen. Ist die Gestaltung einer Böschung mit der Neigung 1:2 für Teilbereiche aus Platzverhältnissen erforderlich, so ist der Einsatz von geokunststoffbewehrten Systemen zur Gewährung einer langfristigen Standsicherheit zu empfehlen.
- Die Schichtgrenze zwischen Ober- und Unterboden der Rekultivierungsschicht ist nicht maßgebend und hat demzufolge keinen negativen Einfluss auf die Standsicherheit der Böschungen, s. Tabelle 17 und Tabelle 18.
- Der Einbau einer Dränschicht ist erforderlich. Mineralische Dränschichten liefern geringere Standsicherheiten als Kunststoff-Dränelemente. Jedoch muss der Einsatz von Kunststoff-Dränelementen bei den Oberflächenabdichtungssystemen A2 und B2 labortechnisch weiter geprüft werden, da diese Elemente gemäß der BAM-Zulassung [10] eine max. Auflast von 50 kPa bzw. eine Gesamtdicke der Rekultivierungs- oder Funktionsschicht 2,5 m nicht überschreiten dürfen.
- Die Bewaldung einer Böschung ist möglich. Baum- und Windlast haben einen geringen Einfluss auf die Standsicherheit. Die Bewaldung bedingt die Herstellung einer mächtigen Rekultivierungsschicht als Trag-schicht für die Vegetation. Bei engen Platzverhältnissen (unmittelbare Nähe zu Wohnhäusern) ist der Einbau einer Stützkonstruktion gemäß den Angaben in dem Bericht zum Arbeitspaket 3.1 [4] vorzusehen.
- Die vorhandene Haldenabdeckung aus einer mineralischen Dämmschicht und einer organischen Re-kultivierungsschicht zeigt in den ersten Jahren nach der Herstellung eine gute Wirksamkeit. Nach fünf bis zehn Jahren treten die im Abschnitt 6.6 beschriebenen negativen Einflüsse auf und verringern die Wirksamkeit gegen Radonaustritt dauerhaft. Diese Erfahrungen wurden bei der Herstellung der Ober-flächenabdichtung im Deponiebau gemacht, sodass ab Deponieklasse 2 (Haus- und hausähnliche Ge-werbeabfälle) der Einbau einer konvektiven Dichtung (KDB oder Asphalt) nun gesetzlich gefordert ist. Bei einer Sanierung vorhandener Oberflächenabdichtungssysteme aus mineralischen Dämmschichten bzw. einer Errichtung einer Oberflächenabdichtung von nicht abgedeckten Halden ist der Einsatz der optimierten Oberflächenabdichtungssysteme im Rahmen dieser Studie dringend zu empfehlen.

7 Bewertung der Sanierungsvarianten

Der im Strahlenschutz zentrale Optimierungsgrundsatz ALARA ("As Low As Reasonably Achievable") besagt, dass unterhalb der Einhaltung von Dosisgrenzwerten für die Bewertung von Maßnahmen neben der Strahlenexposition weitere Aspekte einbezogen werden, wie beispielsweise:

- Erzielbare Wirksamkeit,
- Zu erwartende Langzeitstabilität,
- Kurzfristige Kosten (Baukosten),
- Langfristige Erhaltungskosten,
- Geotechnische Aspekte,
- Beeinflussung des Wasserpfades (Sickerwasserqualität und -menge),
- Unsicherheiten (z.B. bezüglich der wasserrechtlichen Genehmigungsfähigkeit),
- Öffentliche Akzeptanz (Lärm und Staubentwicklung während der Baumaßnahmen, Bauzeit).

Bei der Bewertung der Sanierungsansätze wird durch die Integration und Wichtung von Untersuchungskriterien eine Entscheidungshilfe für konkrete Sanierungsmethoden entwickelt. Für die Prüfung der in Frage kommenden Lösungsansätze bei einer konkreten Sanierungsmaßnahme kann der analytische Hierarchieprozess (AHP) zur Anwendung kommen. Der AHP ist eine systematische Methode zur strukturierten Lösung von Entscheidungsproblemen mit vielen Kriterien. Dieser dient dazu, komplexe Entscheidungen zu vereinfachen und rationaler zu treffen. Insbesondere bietet das Verfahren bei veränderten Randbedingungen die Möglichkeit, die Kriterien untereinander zu vergleichen, um Unstetigkeit/ Überbewertung eines Kriteriums festzustellen und zu diskutieren. Im Bericht zum Arbeitspakt 3.1 [4] wurde das Verfahren ausführlich vorgestellt und angewandt. Ziel ist es, die vorgeschlagenen Sanierungsverfahren mit einer fundierten Wichtung der Untersuchungsparameter zu bewerten.

Die Bewertung erfolgt in der Regel in Matrixform, da diese Darstellung eine hohe Transparenz des Prozesses gewährleistet. Das Ergebnis der vergleichenden Bewertung hängt naturgemäß von der relativen Wichtung der Bewertungskriterien ab. Diese wurde zur Erzielung eines konsensfähigen Ergebnisses mit dem Auftraggeber abgestimmt. Die Wichtung der Parameter der Einzelkriterien kann variiert werden, um die Auswirkungen auf die Stabilität der abgeleiteten Vorzugsvariante bei sich verändernden Randbedingungen zu untersuchen. Diese Herangehensweise hat sich bei der Optimierung von Sanierungslösungen im internationalen Maßstab bewährt und folgt dem Optimierungsgrundsatz (ALARA).

Die zugrundeliegende Wichtung der Untersuchungskriterien und Parameter sowie die Randbedingungen wurden im Bericht zum Arbeitspakte 3.2 [5] vorgestellt und für die verschiedenen Varianten der Sanierungsverfahren verwendet.

Die ermittelten Wichtungen der Kriterien und Parameter mit dem AHP-Verfahren im Rahmen des Arbeitspaketes 3.1 [4] wurden für die praktische Nutzung in [5] geglättet, s. Tabelle 22.

Tabelle 22: Wichtung der Untersuchungskriterien zur Auswahl von optimierten Lösungsansätzen

Kriterium-Nr.	Beschreibung	Wichtung W_i
1	Wirksamkeit bzgl. Radonaustrag, einschließlich Langzeitfunktionalität	25%
2	Baukosten	13%
3	Qualitätssicherung	10%
4	Baupraktische Umsetzbarkeit	10%
5	Umweltverträglichkeit	7%
6	Reparierbarkeit des Systems	13%
7	Aktualität und Machbarkeit	5%
8	Nachsorgekosten	12%
9	Akzeptanz der Bevölkerung	5%
-	Summe	100%

Kurze Beschreibung der verwendeten Kriterien:

- **Wirksamkeit bzgl. Radonaustrag, einschließlich Langzeitfunktionalität:** Dieses Kriterium beinhaltet Aspekte wie die Langzeitstabilität und den Ausschluss von Schwachstellen, Auswirkungen von / auf Bewuchs, Auswirkung auf Sickerwasser (Radionuklidgehalte, Mengen), Gashaushalt / -transport, Einfluss von Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Austrocknung und extreme Niederschlagsereignisse (Folgen des Klimawandels). Weiterhin wird von einer Langzeitfunktionalität von mindestens 100 Jahren für die Oberflächenabdichtung auf Grundlage des Einsatzes von BAM-zugelassenen bzw. zertifizierten Baustoffen ausgegangen.
- **Baukosten:** Die Baukosten sind prinzipiell volatil und marktabhängig. Unabhängig davon werden sie in starken wie in schwachen Marktzeiten vom Wettbewerb der Baufirmen und den eigentlichen Materialkosten bestimmt.
- **Qualitätssicherung:** Dies ist der entscheidende Steuerungsparameter für die Gewährleistung der Langzeitfunktionalität. Dieses Kriterium definiert die Kontrollfähigkeit der Qualität der Bauteile, der Bauprozesse und des Endproduktes.
- **Baupraktische Umsetzbarkeit:** Hier wird einerseits die bautechnische Machbarkeit, und zum anderen die praktische Umsetzbarkeit (insbesondere auf der Baustelle) berücksichtigt. Dies beinhaltet Aspekte wie die Größe der Baustelleneinrichtung, Lagerplatzbedarf, Maschineneinsatz (Größe und Anzahl), im Verhältnis zum vorhandenen Platz.
- **Umweltverträglichkeit:** Das vorgeschlagene System hat Auswirkungen auf Umweltbelange, z.B. durch die Nutzung von Primärrohstoffen (abiotischer Ressourcenverbrauch) und die Umweltauswirkungen beim Einbau. Die Umweltverträglichkeit bezieht sich auf den gesamten Lebenszyklus der Sanierungslösung, d.h. von der Einbau- bis zur Betriebsphase und berücksichtigt einerseits Materialaspekte, aber auch potenzielle Umweltauswirkungen der Baustelle.
- **Reparierbarkeit des Systems:** Bei der Feststellung einer Schadstelle, oder Wegfall einer Funktion der Abdichtung, sind nicht alle Systeme mit dem gleichen Aufwand reparierbar. Dieses Kriterium beinhaltet auch die Verfügbarkeit geeigneter Überwachungsmethoden, um die Funktionsfähigkeit der Lösung langfristig zu prüfen. Das Kriterium gehört im eigentlichen Sinne zum Kriterium Nachsorgekosten, wurde aber zu Wahrung der Übersichtlichkeit getrennt betrachtet.

- **Aktualität und Machbarkeit:** Beschreibt die vorhandenen Erfahrungen mit der untersuchten Sanierungsvariante sowie die Einhaltung der einschlägigen Normen, Empfehlungen und Standards. In diesem Zusammenhang wird in der Regel der Stand der Technik berücksichtigt, neue Entwicklungen werden aber auch nach Praxisprüfung einbezogen. Limitierend ist hier die Marktreife der betrachteten Methode, die sichergestellt werden muss bzw. die Verfügbarkeit und Anbieter.
- **Nachsorgekosten:** Dieser Parameter beschreibt die weiteren Kosten, die im Beobachtungszeitraum nach der Herstellung entstehen. Nachsorgekosten können bei einer Betrachtung über sehr lange Zeiträume eine erhebliche Dimension annehmen. Im Fall der betrachteten konvektionsdichten Systeme KDB und Asphalt sind sie zwar prinzipiell vergleichbar, unterscheiden sich aber standortspezifisch bzgl. Größe und Geländemerkmale.
- **Akzeptanz der Bevölkerung:** Bei diesem Kriterium wurde ein evtl. Widerstand der Bevölkerung gegen die Sanierungsmaßnahme nicht berücksichtigt, da dieser alle Sanierungsvarianten betrifft. Jedoch ist der Belästigungsgrad der Bevölkerung je Sanierungsvariante während der Bauausführung unterschiedlich. Dieser wird hier berücksichtigt. Das Kriterium hat eine Querbeziehung mit der Umweltverträglichkeit, bezieht sich aber letztlich auf die Sozialverträglichkeit der Baumaßnahme.

7.1 Oberflächenabdichtungssystem

Die untersuchten Abdichtungssysteme sind in der Anlage A1 dargestellt. Bei den Oberflächenabdichtungssystemen wurde die Vollabdeckung der Halde detailliert untersucht und Vergleiche zur Teilabdeckung vorgenommen. So ergeben sich für die Oberflächenabdichtung die in Tabelle 25 dargestellten Systeme und Bewertungen.

Diskussion der Bewertungsergebnisse für vollabgedeckte Halden:

- Abgesehen von der Höhe der Bewertungspunkte der Systeme erfüllen alle untersuchten Systeme die Funktion der Konvektionsdichtung für die garantierte Wirksamkeit von min. 100 Jahren.
- Die volle Abdeckung bedeutet, dass die Böschungen, die Bermen und das Plateau der Halde abgedeckt sind.
- Das System 23 (Typ B3, unbewehrtes System mit Leckortung), Tabelle 25, erreichte die beste Bewertung mit 93,34%. Das System 12 (Typ A4, bewehrtes System ohne Leckortung) belegte mit 81,74 % den letzten Platz.
- Die Systeme mit einer 1,0 m starken Rekultivierungsschicht haben eine bessere Bewertung, da sie den geringsten Bedarf an primären Baustoffen haben.
- Die Vegetation bei den Typen A2, A4, B2 und B4 besteht aus Bäumen und Sträuchern. Im Fall von Reparaturbedarf ist das Erreichen der Schadstelle aufwendiger als bei den weiteren Querschnittstypen. Dagegen sind die Nachsorgekosten der Typen A1, A3, B1 und B3 höher, da das Gras mindestens zweimal im Jahr gemäht werden muss.
- Das Vorhandensein einer Geokunststoffbewehrung, insbesondere bei steilen Böschungen, erschwert das Erreichen einer möglichen Schadstelle und somit auch den Aufwand der Reparaturen.

Tabelle 23: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Anwendung eines Dichtungskontrollsystems (DKS) bei der Sanierung von Uranbergbauhalden

Vorteile	Nachteile
Nachweisführung der Funktionstüchtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems	Bislang keine Erfahrungen zur Funktionstüchtigkeit des Dichtungskontrollsystems bei der Sanierung von Uranbergbauhalden.
kurzfristige Detektion der Entstehung von Löchern bzw. Risse während der Nachsorgezeit	Keine kontinuierliche Überwachung. Die Messungen werden zu festgelegten Zeiten durchgeführt. Dafür ist die Anwesenheit des Fachpersonals vor Ort erforderlich.
Hochauflösende Lokalisierung von Fehlstellen und ggf. geringer Aufwand bei Instandsetzung der Fehlstellen aufgrund der guten Lokalisierung	In Trockenperioden können die Messungen verfälscht werden, da das Messprinzip einen Wassertransport durch die Fehlstelle erfordert.
	Garantierte Funktionsdauer laut BAM-Zulassung ist 30 Jahre. Die garantierte Funktionsdauer ist bei Anwendungen im Strahlenschutzbereich als kurzfristig zu bezeichnen.
	Löcher mit einem Durchmesser kleiner als fünf mm in der Dichtschicht können mit dem DKS nicht detektiert werden. Es ist somit grundsätzlich denkbar, dass kleinere Löcher eine unakzeptabel hohe Permeabilität der Dichtschicht verursachen, jedoch mit dem Leckortungssystem nicht erkannt werden.

- Eine 1,0 m starke Rekultivierungsschicht reagiert empfindlicher auf Umwelteinflüsse als eine 3,0 m Rekultivierungsschicht.
- Der Widerstand einer KDB gegen Freiliegen bei Windwurf sowie gegen Vandalismus ist bei allen Systemen geringer als bei einer Asphaltabdichtung.
- Durch das Vorhandensein von Leckortungssystemen ist der Kontrollaufwand bei Radonmonitoring in der Nachsorgephase geringer als bei Systemen ohne Leckortung. Die Möglichkeit einer genaueren Lokalisierung von Schadstellen reduziert den Reparaturaufwand erheblich. Allerdings sind bislang keine Erfahrungen zum Einsatz von Leckortungssystemen bei der Sanierung von Uranbergbauhalden vorhanden, s. Tabelle 23. Die Kosten für die Anschaffung des Systems und die periodische Auswertung der Messdaten sind nicht unerheblich und müssen bei einer Kosten-Nutzen-Analyse bei der konkreten Sanierungsmaßnahme berücksichtigt werden.

Vergleich zwischen Teil- und Vollabdeckung der Halden

Der Vergleich erfolgt für eine Halde mit einer Neigung von 1:3 (übliche Böschungsneigung bei Haldensanierung). Weiterhin sind drei Berme vorhanden. Damit entspricht die Halde den Angaben der Abbildung 9. Für die Festlegung des Wirksamkeitsgrades gegen Radonaustrag werden die Vorgaben in Abschnitt 2.5.2 berücksichtigt. Daraus ergeben sich für die untersuchte Modellhalde die in Tabelle 24 angegebenen Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom Anteil der abgedichteten Böschungslänge.

Tabelle 24: Wirksamkeit gegen Radonaustrag in Abhängigkeit vom Anteil der abgedichteten Böschungslänge der Modelhalde

Abdeckung ab Böschungsfuß	Anteil der Böschung	Wirksamkeit
keine	0,0%	0,0%
bis zur 1. Berme	25,0%	31,0%
bis zur 2. Berme	50,0%	57%
bis zur 3. Berme	75,0%	81%

Die Teilabdeckung stellt eine interessante Alternative zur Vollabdeckung dar. Bereits ab einer Abdeckung von 50 % der Böschungslänge ist die Bewertung der meisten Systeme unter Einbeziehung aller untersuchten Kriterien und Parametern [5] mit einer Vollabdeckung vergleichbar. Die Gründe dafür können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Wirksamkeit gegen Radonaustrag beträgt 57% gegenüber der Vollabdeckung.
- Die Umweltverträglichkeit wird auf Grund der Ressourcenschonung stark verbessert, da die mögliche Nutzung von regional verfügbaren Böden fokussiert wird und somit eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes erfolgt.
- Enorme Ersparnis an Baukosten.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Bewertung der Oberflächenabdichtungssysteme für vollabgedeckte Halden

System-Nr.	Typ gemäß Anlage 0	Kurzbeschreibung	Bewertung
nicht bewehrte Systeme ohne Leckortung			
1	A1	KDB / KDE / Reku*: 1,0 m	89,65%
2	A2	KDB / KDE / Reku: 3,0 m	84,82%
3	A3	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	89,34%
4	A4	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	84,64%
5	B1	Asphalt / KDE / Reku: 1,0 m	91,96%
6	B2	Asphalt / KDE / Reku: 3,0 m	86,79%
7	B3	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	92,36%
8	B4	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	87,66%
Geokunststoffbewehrte Systeme ohne Leckortung			
9	A1	KDB / KDE / Reku: 1,0 m	86,76%
10	A2	KDB / KDE / Reku: 3,0 m	81,93%
11	A3	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	86,44%
12	A4	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	81,74%
13	B1	Asphalt / KDE / Reku: 1,0 m	89,07%
14	B2	Asphalt / KDE / Reku: 3,0 m	83,89%
15	B3	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	89,46%
16	B4	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	84,76%
nicht bewehrte Systeme mit Leckortung			
17	A1	KDB / KDE / Reku*: 1,0 m	90,74%
18	A2	KDB / KDE / Reku: 3,0 m	86,11%
19	A3	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	90,43%
20	A4	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	85,92%
21	B1	Asphalt / KDE / Reku: 1,0 m	92,94%
22	B2	Asphalt / KDE / Reku: 3,0 m	87,97%
23	B3	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	93,34%
24	B4	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	88,84%
Geokunststoffbewehrte Systeme mit Leckortung			
25	A1	KDB / KDE / Reku: 1,0 m	87,72%
26	A2	KDB / KDE / Reku: 3,0 m	82,89%
27	A3	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	87,41%
28	A4	KDB / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	82,71%
29	B1	Asphalt / KDE / Reku: 1,0 m	89,93%
30	B2	Asphalt / KDE / Reku: 3,0 m	84,75%
31	B3	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 1,0 m	90,32%
32	B4	Asphalt / Mineralische Entwässerung / Reku: 3,0 m	85,62%

*) Reku: Rekultivierungsboden

Tabelle 26: Vergleich der Bewertungsergebnisse für Voll- und Teilabdeckung der Halden

System-Nr.	Vollabdeckung	Abdeckung 25%	Abdeckung 50%	Abdeckung 75%
nicht bewehrte Systeme ohne Leckortung				
1	89,65%	77,49%	84,61%	87,50%
2	84,82%	75,84%	83,12%	86,07%
3	89,34%	77,43%	84,86%	87,87%
4	84,64%	75,90%	83,49%	86,57%
5	91,96%	80,24%	87,64%	90,65%
6	86,79%	78,23%	85,80%	88,87%
7	92,36%	80,13%	87,84%	90,97%
8	87,66%	78,60%	86,47%	89,67%
Geokunststoffbewehrte Systeme ohne Leckortung				
9	86,76%	75,91%	82,78%	85,57%
10	81,93%	74,26%	81,28%	84,14%
11	86,44%	75,86%	83,02%	85,94%
12	81,74%	74,33%	81,65%	84,11%
13	89,07%	78,66%	85,81%	88,72%
14	83,89%	76,65%	83,97%	85,96%
15	89,46%	78,55%	86,01%	89,04%
16	84,76%	77,02%	84,64%	86,93%
nicht bewehrte Systeme mit Leckortung				
17	90,74%	80,19%	87,18%	90,02%
18	86,11%	78,68%	85,86%	88,59%
19	90,43%	80,13%	87,43%	90,39%
20	85,92%	78,75%	86,23%	87,97%
21	92,94%	82,94%	90,22%	93,17%
22	87,97%	81,07%	88,55%	89,65%
23	93,34%	82,83%	90,41%	93,49%
24	88,84%	81,44%	89,22%	90,63%
Geokunststoffbewehrte Systeme mit Leckortung				
25	87,72%	78,49%	85,22%	87,96%
26	82,89%	76,83%	83,73%	85,10%
27	87,41%	78,43%	85,47%	88,33%
28	82,71%	76,90%	84,10%	84,47%
29	89,93%	81,23%	88,26%	91,11%
30	84,75%	79,23%	86,41%	86,15%
31	90,32%	81,13%	88,45%	91,43%
32	85,62%	79,60%	87,08%	87,13%

7.2 Vertikale Abdichtung

Analog zur Bewertung der Oberflächenabdichtungssysteme erfolgt die Bewertung der vertikalen Abdichtungssysteme gemäß dem Optimierungsgrundsatz ALARA. Die detaillierten Ergebnisse sind in Anhang A 3.3 des Berichtes zum Arbeitspaket 3.2 zu finden und zusammengefasst in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Zusammenfassung der Bewertung der vertikalen Abdichtungssysteme

Variante-Nr.	Kurzbeschreibung	Bewertung
1	Spundwand	89,90%
2	Unbewehrte überschnittene Bohrpfahlwand	84,25%
3	Schlitzwand, Zweiphasensystem	88,13%
4	Schlitzwand, Einphasensystem (Dichtwandsuspension)	94,63%
5	Dichtwandsuspension kombiniert mit HDPE-Folien	95,19%

Diskussion der Bewertungsergebnisse:

- Die Variante 5, Dichtwand kombiniert mit HDPE-Folien, hat die beste Bewertung mit 95,19 % erreicht. Diese ist mit der sehr hohen Wirksamkeit gegen Radonaustrag und niedrigem Baupreis sowie geringer Empfindlichkeit gegen Baufehler im Vergleich zu den Varianten 1 und 2 begründet.
- Die Variante 2, unbewehrte überschnittene Bohrpfahlwand, erhielt die geringste Bewertung mit 84,25 %. Die Dichtheit des Systems reagiert empfindlich auf Baufehler, was einen großen Aufwand bei der Bauausführung, Überwachung und Qualitätssicherung verursacht.
- Die Variante Zweiphasensystem-Schlitzwand ist preisintensiv bzgl. Baustelleneinrichtung und hat den größten Platzbedarf für die Baustelleneinrichtung.

8 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt werden die Anwendungs- und Herstellungsgrenzen der optimierten Sanierungsvarianten zusammenfassend beschrieben.

8.1 Oberflächenabdichtung

Die unterste Schicht im Oberflächenabdichtungssystem wird als Konvektionssperre aus einer Kunststoffdichtungsbahn mit BAM-Zulassung gemäß Deponieverordnung [17] bzw. aus Asphalt mit LAGA-Eignungsbeurteilung [46] gebildet. Weitere Kriterien und Hinweise:

- Die Permeabilität der Oberflächenabdichtung muss um mehrere Größenordnungen niedriger als die des Haldenmaterials sein, um eine wirkungsvolle Reduzierung des dominierenden konvektiven Radonaustrages zu gewährleisten. Bei für Wismut- und Altstandorte typischen Haldenmaterialien bedeutet dies für die Abdeckung eine Permeabilität von höchstens $1\text{E-}12\text{ m}^2$. Beide Konvektionsdichtungen erfüllen diese Anforderung vollumfänglich.
- Beide Konvektionsdichtungen können im Böschungsbereich bis zu einer maximalen Neigung von 1:2 bei Kunststoffdichtungsbahnen und 1:1,5 bei Asphaltdichtung eingebaut werden. Asphalteinbau bei Neigungen von 1:1,5 bedarf jedoch eines erhöhten Aufwandes an Arbeitssicherheit und speziellem Maschineneinsatz (Böschungs- oder Brückenfertiger) [24].
- Wetterbedingt können beide Konvektionsdichtungen bei Temperaturen unter 5 C° und bei starkem Regen nicht eingebaut werden. Geokunststoffdichtungen können dazu bei starker Sonnenstrahlung wegen Wellenbildung nicht verlegt werden. Die Schweißnähte können bei Nässe nicht ordnungsgemäß hergestellt werden. Im standortspezifischen Qualitätsmanagementplan (QMP) werden diese Punkte geregelt.

- Die Standsicherheit ist bis zu Böschungsneigungen von 1:3 bei KDB mit strukturierter Oberfläche oder Asphalt in der Regel gegeben. Bei der Planung einer Haldensanierung ist stets ein objektspezifischer Standsicherheitsnachweis erforderlich.
- Die Standsicherheit bei Böschungsneigungen von 1:2,5 ohne Bewehrung ist erreichbar, wenn die entsprechenden Reibungsparameter des Systems entsprechend aufeinander abgestimmt sind.
- Die Konvektionsdichtung aus Asphalt kann in zwei Varianten eingebaut werden:
 - Die Variante A besteht aus einer 6 cm dicken Deponieasphalttragschicht (AC 16 T-DA) und einer darüber angeordneten 4 cm dicken Deponieasphaltdichtungsschicht (AC 11 D-DA). Grundvoraussetzung für den Einbau der Variante A ist eine Tragfähigkeit des Auflagers von $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$.
 - Variante B ist eine 1-lagige Schicht mit mindestens 8 cm mächtiger kombinierter Deponieasphalttragschicht (AC 16 TD-DA). Grundvoraussetzung für den Einbau der Variante B ist eine Tragfähigkeit des Auflagers von $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$.
- Bei steilen Böschungsbereichen, s. Abschnitt 6.5, können Zugkräfte in der ungünstigsten Scherfuge des Oberflächenabdichtungssystems entstehen. Da weder die mineralische Systemkomponente noch die Konvektionssperre auf Zug beansprucht werden dürfen, müssen diese Kräfte von einem Zuelement (Geogitter) aufgenommen werden. Die Einsatzgrenze des Geogitters ist durch den charakteristischen Wert der Langzeitfestigkeit und den Herausziehungswiderstand des Geokunststoffs definiert. Die Einhaltung beider Werte muss objektspezifisch nachgewiesen werden.
- In Bezug auf die Menge der Versickerung durch den Haldenkörper war die Qualität der Asphaltdichtung sehr geringfügig besser als die der KDB (wegen der unerheblich geringeren Permeabilität des Dichtungselements). Praktisch sind die Unterschiede aber vernachlässigbar. Aus wasserhaushaltlicher Sicht werden die günstigsten Ergebnisse mit den Abdeck-Szenarien B1 oder B2 (Asphaltdichtung als Dichtelement) erzielt, während geringfügig schlechtere Ergebnisse mit den Abdeck-Szenarien A3 oder A4 (KDB als Dichtelement) erzielt werden.
- Beide Oberflächenabdichtungsanordnungen, d.h. Asphaltdichtung und KDB, können im wasserhaushaltlichen Sinne kurz- und langfristig und auch im "Worst Case" als dicht bezeichnet werden. Im Umkehrschluss sind sie somit praktisch konvektionsdicht. Die weiterführende Eignung der Oberflächenabdichtungssysteme ist daher nicht auf der Basis von wasserhaushaltlichen Anforderungen, sondern geometrischen und ökonomischen Aspekten zu entscheiden.
- Für die Überprüfung der Funktionalität der Konvektionsdichtung können BAM-zugelassene Dichtungskontrollsysteme (DKS) [10] analog zum Anwendungsbereich im Deponiebau eingesetzt werden. Dabei erfolgt die Detektion einer möglichen Fehlstelle in der Konvektionsdichtung und demzufolge einer möglichen Austrittsstelle von Radon indirekt durch die Auswertung von gemessenen Anomalien im Potentialfeld. Der Aufwand bei der Installation des Dichtungskontrollsystems bei Asphaltdichtung ist höher als bei einer KDB, da die Sensoren während des Einbaus des Asphaltes vor extremer Hitze kurzfristig geschützt werden müssen. Ungünstig in der Bewertung wirken sich die Anschaffungskosten und die laufenden Kosten in der Nachsorgephase in Form von Wartungs- und Auswertungsaufwand aus.
- Die Entwässerungsschicht unterhalb der Rekultivierungsschicht kann aus zertifiziertem Kies 16/32, oder zugelassenen RC-Material bzw. durch die Verlegung von Kunststoff-Dränelementen (KDE) hergestellt werden. Die Einsatzgrenze der KDE ist durch die Zulassungsbedingungen der BAM definiert [9]. Der Einsatz von KDE als Entwässerungsschicht sollte schwerpunktmäßig bei den geplanten Sanierungen der Uranbergbauhalden in Sachsen geprüft werden. Die KDE reagiert empfindlicher als die mineralische Entwässerungsschicht auf unsachgemäßen Einbau. Detaillierte Angaben zum sachgemäßen Einbau sind dem Bericht zum Arbeitspaket 3.1 [4], Anhang A2.2.6, zu entnehmen.

- Die Rekultivierungsschicht hat eine Schutzfunktion für die Konvektionsdichtung zur Vermeidung ihrer Beschädigung durch UV-Strahlung, mechanische Beschädigung und Vandalismus. Ausführungsvarianten:
 - Variante 1: Rekultivierungsschicht, 1 m dick, Typ A1, A3, B1 und B3:
 - Sie erfordert i. d. R. einen Mehraufwand in der Nachsorgephase, da das Gras regelmäßig gemäht werden muss. Bäume und Sträucher dürfen nicht gepflanzt werden. Die natürliche Sukzession muss verhindert werden.
 - Diese Rekultivierungsschicht hat den Vorteil, dass der Mengenbedarf an qualifizierten Böden geringer ist als bei einer 3 m dicken Schicht.
 - Bei beengten Platzverhältnissen zwischen Haldenfuß und Nachbarbebauung ist der Geländesprung einfacher zu gestalten als bei Variante 2.
 - Variante 2: Rekultivierungsschichten, 3 m dick, Typ A2, A4, A2 und B4:
 - Sie bedarf i.d.R. keiner dauerhaften Bewuchspflege. Allerdings ist die Gefahr des Freilegens der Konvektionsdichtung durch Windwurf vorhanden. Schäden durch Windwurf müssen zeitnah behoben werden, da die KDB und Asphalt dichtungen nicht für lange Zeiten den UV-Strahlen ausgesetzt werden dürfen.
 - Der Mengenbedarf an qualifizierten Böden ist 3-fach höher als bei Variante 1.
- Bei beengten Platzverhältnissen zwischen Haldenfuß und Nachbarbebauung sind spezielle Lösungen – wie der Bau einer Stützmauer – zur Sicherung des Geländesprungs erforderlich. Der Geländesprung ist möglichst durch den Einsatz von Geokunststoffstützkonstruktion zu gestalten. Die Vorteile davon sind u.a.:
 - keine besonderen Entwässerungseinrichtungen des Hangwassers erforderlich,
 - sehr gute Anpassungsfähigkeit an die örtlichen Gegebenheiten und gute Integration ins Landschaftsbild (naturnahe Bauweise),
 - keine Gründungselemente in einem sensiblen Bereich (Anschlussstelle der Oberflächen- und Vertikalabdichtung) erforderlich,
 - zahlreiche Referenzen zur Bauweise sind vorhanden.
- Kontroll- und Unterhaltungsmaßnahmen während der Nachsorgephase:
 - Bewuchspflege,
 - Kontrollbegehungen: Überwachung der Standsicherheit (insbesondere bei steilen Böschungen), lokaler Rutschungen und Windwurfschäden,
 - Kontrolle und Pflege von oberirdischen Entwässerungseinrichtungen,
 - Radonmonitoring,
 - Nutzungsbeschränkungen in sensiblen Bereichen (insbesondere bei Teilsanierung).

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Teilabdeckung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Radonfreisetzung durch diffusiven Radontransport aus abgedeckten in nicht abgedeckten Bereiche der Haldenoberfläche kann gegenüber dem konvektiven Transport vernachlässigt werden, [4], Abschnitt 2.2.
- Es kann bei mit KDB- oder Asphalt dichtungssystemen sachgerecht abgedichteten Böschungsbereichen davon ausgegangen werden, dass die Radonexhalation während der garantierten Funktionsdauer der Systeme null ist. Eine Radonexhalation ist somit erst ab der Höhe der Böschung zu berücksichtigen, bei der das aufgebraute Dichtungssystem endet [4].

- Die Wirksamkeit der Teilabdeckung gegenüber dem Radonaustrag wurde in [4] und in Kapitel 7.1 dieses Berichtes diskutiert und zahlenmäßig beschrieben. Je nach Sanierungsziel in Bezug auf die Reduzierung des Radonaustrages aus der Halde sind entsprechende Anteile der Haldenböschung abzudichten, Abbildung 10. Aus technischen Gründen sollen die Teilbereiche der Böschungen und der Bermbereich abgedichtet werden. Das Grundprinzip ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Teilabdeckung sollte sich vom Haldenfuß über den unteren Teil der Böschung erstrecken. Daraus ergibt sich die Anteil der abgedichteten Böschungslänge laut Tabelle 4.
- Im Abschnitt 7.1 wurde die Teilabdeckung bewertet und mit der Variante Vollabdeckung verglichen. Die Teilabdeckung bietet eine interessante Alternative zur Vollabdeckung und weist eine große Wirksamkeit auf. Bei der Eignungsuntersuchung der Teilabdeckung sind weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen wie:
 - erhöhte Radonexhalationsrate und Sanierungsziel, s. Abbildung 10,
 - Kaltluftabfluss, s. Abschnitt 2.5.1.
- Die Standsicherheitsuntersuchungen der Oberflächenabdichtung in Abschnitt 6 zeigten weder Vor- noch Nachteile der Teilabdeckung gegenüber der Vollabdeckung im Hinblick auf statische Gesichtspunkte.
- Bei Betrachtung der Bewertung im Abschnitt 7.1 können die Unterschiede zwischen der Voll- und Teilabdeckung wie folgt angegeben werden:
 - Wirksamkeit bzgl. Radonaustrag, einschließlich Langzeitfunktionalität: Das ausgewählte Sanierungsziel bestimmt die Auswahl der Art der Abdeckung. Qualitativ und quantitativ sind keine Vergleiche zwischen Voll- und Teilabdeckung möglich.
 - Baukosten: Die Auswahl einer Teilabdeckung bzw. Vollabdeckung beeinflusst die Baukosten stark. Im Bericht zum Arbeitspaket 3.2, Tabelle 95, wurden die Flächenanteile in Abhängigkeit vom gewählten Abdeckungsanteil der Halde angegeben. Das Verhältnis zwischen dem abgedeckten Flächenanteil zur Vollabdeckung unter Einbeziehung der Herstellungskosten in Tabelle 62 des gleichen Berichtes spiegelt den finanziellen Bedarf je Abdeckungsvariante wieder.
 - Qualitätssicherung: Es sind keine besonderen Anforderungen an die Teilabdeckung im Vergleich zur Vollabdeckung der Halde vorhanden.
 - Baupraktische Umsetzbarkeit und Umweltverträglichkeit: Die Teilabdeckungsvariante bietet eine diskutierbare Alternative bei Materialknappheit und beengten Platzverhältnissen in Bezug auf den Platzbedarf für die Baumaterialien und Baustelleneinrichtungen.
 - Reparierbarkeit des Systems sowie Aktualität und Machbarkeit: Es sind keine besonderen Unterschiede zwischen Teil- und Vollabdeckung zu benennen.
 - Nachsorgekosten: Es sind keine besonderen Unterschiede zwischen Teil- und Vollabdeckung festzustellen.
 - Akzeptanz der Bevölkerung: Es sind keine Besonderheiten vorhanden.

Die Eignung der Oberflächenabdichtungssysteme für die Sanierung von Uranbergbauhalden ist in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Zusammenfassende Darstellung der Eignung der Oberflächenabdichtungssysteme

Element	Parameter	Oberflächenabdichtungssystem*							
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Rekultivierungsschicht	Umwelteinflüsse	-	+	-	-	-	+	-	+
	Materialbedarf	+	-	+	-	+	-	+	-
	Schstellenerreichbarkeit	+	-	+	-	+	-	+	-
	Platzbedarf	+	-	+	-	+	-	+	-
	Austrocknungsgefährdung	-	+	-	+	-	+	-	+
KDE / mineralische Entwässerung	Materialbedarf	+	+	-	-	+	+	-	-
	Platzbedarf	+	+	-	-	+	+	-	-
	Belastung durch Rekultivierungsschicht	+	-	+	+	+	-	+	+
KDB / Asphalt	Materialbedarf	+	+	+	+	-	-	-	-
	Empfindlichkeit gegen mechanischer Beschädigung	-	-	-	-	+	+	+	+
	Empfindlichkeit gegen UV-Strahl	-	-	-	-	+	+	+	+
	Empfindlichkeit gegen Verformung	+	+	+	+	+	+	+	+
	Austrocknungsgefährdung	+	+	+	+	+	+	+	+
Vegetation	Pflegeaufwand	-	+	-	+	-	+	-	+

*) gemäß Anhang 0

+ / - direkter Vergleich zwischen den optimierten Oberflächenabdichtungssystemen (+) günstiger / (-) ungünstiger

Für die optimierten Oberflächenabdichtungssysteme gelten im Allgemeinen neben den Angaben in der Tabelle 28 folgende Ergänzungen:

- Die konvektive Dichtung (KDB und Asphalt) ist bei sachgemäßem Einsatz durchwurzelungs-, chemikalien- und alterungsbeständig sowie umweltverträglich.
- Böschungsneigungen bis max. 1:2,5 in Verbindung mit gängigen Bodenarten, Geokunststoffen und Asphalt sind ohne Einsatz von Geogittern standsicher.
- Der Einsatz von Geokunststoffbewehrung bei steilen Böschungen erschwert das Erreichen einer möglichen Schadstelle und erhöht somit auch den Aufwand für evtl. Reparaturen.

Vorhandene mineralische Abdecksysteme in Sachsen:

Über mehrere Jahrzehnte war die bindige, tonmineralische Dichtung eines der wesentlichen Dichtungselemente im Deponie- und Wasserbau. Auch im Bereich der Haldenabdeckung wurde verstärkt auf den Einsatz von bindigen mineralischen Dichtungen gesetzt.

Die bislang realisierten Oberflächenabdichtungssysteme aus reinen mineralischen Materialien haben anfangs die Radonemissionen stark reduziert. Die Leistungsfähigkeit hat nach 5 bis 15 Jahren an vielen Standorten, national und international, stark nachgelassen. Die unvermeidbare Entstehung von Makroporen bedingt die Erhöhung der Gaspermeabilität um mindestens eine bis zwei Größenordnungen. Das hat zur Folge, dass die Unterdrückbarkeit des konvektiven Radontransports erheblich reduziert wird, die Emissionen wieder ansteigen und eine nicht akzeptable Radonaktivitätskonzentration in der bodennahen Luft resultiert. Diesbezüglich konnten in den letzten Jahren eine Vielzahl von Erfahrungen gesammelt werden (aus Wissenschaft und Praxis), die es nicht mehr erlauben, von einem konvektionsdichten Abdichtungsmaterial zu sprechen. Selbst bei qualitätsgerechter Ausführung der Herstellung der eigentlichen Oberflächenabdichtungselemente können aufgrund von spezifischen Einwirkungen (Austrocknung → Rissbildung) keine langzeitsicheren Abdichtungswirkungen gewährleistet werden. Wesentliche Ursache für Schäden waren insbe-

sondere Durchwurzelungseinflüsse und/oder ein Wasserentzug aufgrund einer standortspezifisch zu geringen wasserspeichernden Überdeckung. Die mineralische Dichtung kann demnach nicht als Konvektionsperre definiert werden, da ihre Durchflussrate größer Null ist [60].

Die gestellte Forderung nach einer niedrigen Permeabilität einer Haldenabdeckung muss langfristig erfüllt werden. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese Forderung bei mineralischen Abdeckungen mit natürlichen Böden nicht erreichbar ist:

- Die Prozesse, die zu einem Ansteigen insbesondere des konvektiven Radontransports durch Haldenabdeckungen führen, werden in ähnlicher Form auch bei hydraulischen Eigenschaften in Abdeckungen von Halden, industriellen Absetzanlagen und Deponien sowie bezüglich des Gastransports durch Deponie Oberflächenabdichtungen beobachtet. Ihnen liegen im Wesentlichen Bioturbations- und Bodenbildungsprozesse sowie grabende Tiere und Frost-Tau-/Feucht-Trocken-Wechsel zugrunde.
- Die von Mende [52] durchgeführte Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) stuft die Durchwurzelung einer bodenartigen Abdeckschicht und den damit einhergehenden Verlust ihrer Wirksamkeit auf einer Skala von „gering“ bis „kritisch“ als "kritisch" („mit Sicherheit zu erwartendes, dauerhaftes Versagen“) ein. Die Erhöhung der Permeabilität bei Frost-Tau-Wechsel und Feucht-Trocken-Wechsel beträgt im Mittel zwei Größenordnungen. Gleichzeitig wird das Risiko eines erosionsbedingten Versagens durch das Fehlen von Vegetation als "hoch" eingestuft.
- Die Durchlässigkeit wird von Makroporen entscheidend beeinflusst, welche sich in gesunden Böden bis in Tiefen von einigen Metern (mindestens 2-3 m) entwickeln. Natürliche Böden der Rekultivierungsschicht sind in der Sanierung von Bergbauhalden erwünscht, bringen aber unvermeidlich die entsprechende Ausbildung von Makroporen mit sich.
- Bereits die Bildung einer einstelligen Zahl von Makroporen je Quadratmeter Haldenabdeckung erhöht die Permeabilität auf ein unakzeptables Maß. Beispielsweise entspricht die Permeabilität der Hagen-Poiseuille-Strömung durch zylindrische Poren mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Flächendichte von $1/\text{m}^2$ einer Permeabilität von $1\text{E}-12 \text{ m}^2$, wie im Bericht zu AP 2 Abschnitt 2.2.2 (insbesondere Gleichung 8) detailliert dargestellt wurde.
- Baum- und Strauchbewuchs auf einer bodenartigen Haldenabdeckung führt erwartungsgemäß zu einer stärkeren Bildung von Makroporen als Gras- und Kräuterbewuchs und damit zu einem konvektiven Radonaustrag.
- Wurzeln trocknen zusätzlich die beim Einbau verdichteten Schichten aus, was zur verstärkten Rissbildung führt, auch wenn darüber eine dauerhaft gesättigte Schutzschicht liegt. In Trockenzeiten führt der Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln zu einer zusätzlich erhöhten Makroporendichte.
- Wurzelexsudate tragen durch geochemische Prozesse zusätzlich zu einer erhöhten Permeabilität verdichteter mineralischer Bodenschichten bei.
- Die natürliche, langfristig unkontrollierbare Sukzession der Pflanzen und standortspezifische Entwicklung des Systems Boden und Wurzelraum lassen sich unter realistischen Bedingungen nicht steuern und unterbinden.
- Die sich verändernden klimatischen Bedingungen in Sachsen sind mit negativer Beeinflussung (Schrumpfen, Risse und Durchwurzelung) von unzureichend geschützten mineralischen Oberflächenabdichtungen verbunden. Die letzten 7 Jahre sind im Vergleich zum 150-jährigen Jahresdurchschnitt als trockene Jahre zu bezeichnen. Die Globalstrahlung hat sich in den letzten drei Jahren um durchschnittlich 25 % erhöht. Die Folge ist ein Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur in Sachsen um 2,2 Grad. Die veränderte Lufttemperatur in Verbindung mit dem Anstieg der Sonnenstunden erhöhen die Verdunstungsleistung und die Wasseraufnahmekapazität der Luft. Das Ergebnis ist Trockenstress für die Pflanzen. Die Wurzeln wachsen weiter in die Tiefe und entziehen der mineralischen Dichtungsschicht mehr Wasser.

8.2 Vertikale Abdichtung

Zur Verhinderung von Radonaustritt aus dem Fußbereich der Böschung ist der Bau einer vertikalen Abdichtung erforderlich. Die Mindesteinbindetiefe wird durch zwei Kriterien definiert:

- Einbindung des Wandfußes in einer dichten Schicht (Ton, Fels bzw. stark bindigen Felsersatz) von min. 0,7 m.
- Einbindung des Wandfußes im Grundwasser von min. 1,0 m.

Die möglichen geeigneten Herstellungsverfahren sind wie folgt:

- Spundwand: Die Ausführung bedingt eine genaue Untersuchung des Baugrundes im Vorfeld der Ausführung. Das Vorhandensein von Steinen im Baugrund erschwert die Ramm- bzw. Rüttelarbeiten der Spundwände stark. Insbesondere bei Uranbergbauhalden stellen die breite Spannweite der Korndurchmesser (Ton bis Geröll) und die starke Inhomogenität des Haldenmaterials Problemfelder dar, die vertiefte Kenntnisse des Baugrundes erfordern. Die Baugrunduntersuchung ist in der geotechnischen Kategorie GK3 nach DIN EN 1997-1 einzustufen. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Entfernung von Bauwerken zum Einsatzort. Das Einbringen der Spundbohlen im Baugrund erzeugt große Erschütterungen, die negative Auswirkungen auf Nachbarbauten verursachen. Durch Messungen vor Ort sollen bestimmte Größenordnungen der Schwinggeschwindigkeiten, verursacht durch das Erschüttern gemäß Abbildung 41 im Bericht zum Arbeitspaket 3.2, nicht überschritten werden.

Mindestabstände von baulichen Anlagen können in Abhängigkeit folgender Faktoren ermittelt werden:

- Bodenart,
 - Einbringverfahren,
 - Gründungstiefe des Bauwerkes sowie Art und Zustand der Fundamente.
- Des Weiteren soll im Zuge der Langzeitfunktionalität die Rostproblematik von Stahl untersucht werden. Es ist bekannt, dass die Abrostungsgeschwindigkeit an der Atmosphäre und in natürlich gewachsenen Böden ohne Einwirkung von Wasser ca. 0,01 mm/a beträgt. Die Schlösser zwischen den Bohlen sind nicht ohne weitere technische Maßnahmen dicht, jedoch existieren erprobte Verfahren zur Gewährleistung der Dichtigkeit der Schlösser.
- Unbewehrte überschnittene Bohrpfehlwand: Das Verfahren ist erschütterungsarm und im Rahmen der Qualitätssicherung kann die Dichtigkeit der Fugen zwischen den benachbarten Pfählen gesichert werden.
 - Schlitzwand (Zweiphasensystem): Das Verfahren ist erschütterungsarm. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Herstellung quasi fugenfrei ist. Der umgebende Boden bleibt weitgehend ungestört.
 - Schlitzwand, Einphasensystem (Dichtwandsuspension mit und ohne HDPE-Folien): Das Verfahren ist erschütterungsarm. Beide Varianten bieten sich als gut geeignete Ausführungsvarianten an. Der Einsatz der HDPE-Folien sichert eine luftdichte Verbindung zwischen der Oberflächenabdichtung und der vertikalen Abdichtung, s. Abbildung 4 und 5 [4].
 - Nachteilig präsentieren sich die Varianten Bohrpfehlwand, Schlitzwand und Dichtwand in Bezug auf die Entsorgung von Aushubmaterialien. Wenn das Material radiologisch relevant ist, sind besondere Schutzmaßnahmen erforderlich.
 - Bei allen Varianten der vertikalen Abdichtung soll die konvektionsdichte Einbindung der Oberflächenabdichtung (KDB oder Asphalt) in die vertikale Dichtung gemäß Abbildung 4 und 5 [4] erfolgen.

Folgende bautechnischen Parameter wie Flächenbedarf für die Baustelleneinrichtungen und Platzbedarf für die Baumaschinen sind insbesondere in der Nähe der Wohnbebauung und bei Herstellung einer vertikalen Abdichtung zu berücksichtigen:

- Spundwand: Die Planumbreite für die Baumaschinen zum Einrammen der Spundbohlen in den Baugrund beträgt min. 8,0 m. Das Vorhandensein von Grundwasser erfordert besondere Maßnahmen. Sollte eine Grundwasserabsenkung erforderlich werden, so ist der Aufwand einer eventuell notwendigen Reinigung des Grundwassers oder ggf. Versickerung im Baufeld aus finanziellen und umwelttechnischen Aspekten zu bewerten. Da die Qualitätsanforderungen hinsichtlich Gasdichtheit sehr hoch sind, sind die Schlösser zwischen den Spundbohlen abzudichten. Der Einsatz von PVC-Dichtung oder bituminöser Masse ermöglichen eine hohe Dichtheit der Schlösser. Die Anforderungen an die Bauausführung und Bauüberwachung müssen im Vorfeld detailliert festgelegt werden. Das gasdichte Einbinden im Fels bzw. sehr dichten Felsersatz ist mit vertretbarem finanziellen Aufwand nicht möglich.
- Überschnittene Bohrpfahlwände: Wie bei Spundwänden beträgt die Planumbreite für die Baumaschinen zur Herstellung der Bohrpfähle im Baugrund min. 8,0 m. Das Verfahren ist erschütterungsarm und eignet sich für die Herstellung der vertikalen Dichtung in der Nähe von Wohnbebauung. Nachteilig ist der hohe Aufwand bei der Qualitätssicherung der Fugen. Direkte Verfahren zur Kontrolle der Gasdichtheit der Fugen sind nicht bekannt.
- Schlitzwand (ein- und Zweiphasensystem), Dichtwandsuspension mit und ohne HDPE-Folien: Die Herstellung ist sehr erschütterungsarm. Jedoch sind die Baustelleneinrichtungskosten sehr hoch. Bei kleinen Abschnitten (< 3.000 m²) und geringer Einbindetiefen (<10,0 m) im Baugrund wird das Verfahren sehr unwirtschaftlich. Die Planumbreite für die Baumaschinen zur Herstellung der Dichtwand beträgt min. 12,0 m. Zusätzlich wird noch Platz für die Silos und Mischanlage benötigt. Beim Einbau einer speziellen HDPE-Folie muss die Dichtheit im Vorfeld geprüft werden.
- Die Anwendungsgrenzen und Eignung der vertikalen Abdichtungssysteme für die Sanierung von Uranbergbauhalden ist in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Eignung der vertikalen Abdichtungssysteme zur Sicherung der Dichtheit des Systems

Verfahren	Baustoff	Wandstärke	Erreichbare Tiefe	Eignung
Stahl- oder Kunststoffspundwand	Stahl bzw. Kunststoff	1 ... 3 cm	15 ... 20 m	geeignet
Überschnittene Bohrpfahlwand	Beton	40 ... 120 cm	25 ... 30 m	wenig geeignet
Schlitzwand, Zweiphasensystem	Beton, Dichtungssuspension	40 ... 120 cm	bis 120 m	geeignet
Schlitzwand, Einphasensystem (Dichtwandsuspension)	Dichtungssuspension	40 ... 120 cm	bis 30 m	gut geeignet
Dichtwandsuspension kombiniert mit HDPE-Folien	Dichtungssuspension und HDPE-Folien	bis 120 cm	bis 25 m	sehr gut geeignet

In Hinblick auf das aktuelle Projekt und die Luftdurchlässigkeitsproblematik ist insbesondere für den Bereich des Böschungfußes, Abbildung 4 und 5 [4], die Dichtwandanordnung und Einbindung in die Oberflächenabdichtung von großer Bedeutung. Als gute Variante bietet sich die Dichtwandsuspension an. Das System mit HDPE-Folien sichert einen luftdichten Übergang zwischen der vertikalen Abdichtung und der Oberflächenabdichtung, da die Folie an der Oberfläche mit der Folie innerhalb der Dichtwand verschweißt werden kann.

8.3 Ausblick

Die konvektiv wirksame Dichtungsschicht der Halden ist die wesentliche Komponente des gewählten Isolationsverfahrens im Rahmen dieser Studie. Das Einkapseln des Schadensherdes bewirkt eine Unterbrechung des Emissionspfades von der Schadenquelle zum Schutzgut. Im Deponiebau und in der Altlastensanierung ist das Verfahren bekannt und wurde erfolgreich mehrfach umgesetzt.

In der vorliegenden Studie wurden weitere Möglichkeiten zur Reduzierung des konvektiven Radontransports aus Halden nicht weiterverfolgt. Diese können im Rahmen weiterer Studien auf ihre Umsetzbarkeit und Wirksamkeit geprüft werden. Insbesondere sind Varianten wie mechanische Barrieren zur Reduzierung von Kaltluftabflüssen oder das gezielte Ableiten von Radon aus der Halde zu diskutieren. Beide Varianten sollten über Langzeitstudien getestet und optimiert werden. Dabei sind Feldversuche und ggf. Feldmessungen als wesentlicher Bestandteil dieser Untersuchungen zu betrachten.

Literaturverzeichnis

- [1] AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN: Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5, Hrsg. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. verbesserte u. erweiterte Auflage, 2005
- [2] AL-AKEL, S.; KUNZE, C., MÜLLER, M., SCHNEIDER, P.: Langzeitstabilität sanierter Halden des Uranbergbaus - Bericht zum Arbeitspaket 1. LFULG (HRSG.), Dresden, September 2020
- [3] AL-AKEL, S.; KUNZE, C., MÜLLER, M., SCHNEIDER, P.: Langzeitstabilität sanierter Halden des Uranbergbaus - Bericht zum Arbeitspaket 2. LFULG (HRSG.), Dresden, Juni 2021
- [4] AL-AKEL, S.; KUNZE, C., MÜLLER, M., SCHNEIDER, P.: Langzeitstabilität sanierter Halden des Uranbergbaus - Bericht zum Arbeitspaket 3.1. LFULG (HRSG.), Dresden, März 2022
- [5] AL-AKEL, S.; KUNZE, C., MÜLLER, M., SCHNEIDER, P.: Langzeitstabilität sanierter Halden des Uranbergbaus - Bericht zum Arbeitspaket 3.2. LFULG (HRSG.), Dresden, Juni 2022
- [6] ARBEITSKREIS 2.3 DER DGGT: Güterichtlinie für Abdichtungskomponenten aus Deponieasphalt. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Arbeitskreis 2.3 – Asphaltbauweisen im Wasserbau und der Geotechnik, 1. Ausgabe, 2015
- [7] ARGENTINA: Uranium mining Environmental restoration Project Environmental assessment – Executive Summary, Republic of Argentina national nuclear energy commission (CNEA), 2006
- [8] BALDAUF, S.; TARNOWSKI, C.: Beurteilung des Langzeitverhaltens von Dichtungsbahnen aus PEHD auf der Grundlage von projektbezogenen Erfahrungen und Nachweisen. In: SKZ-ConSem GmbH & AK GWS (Veranstalter): 21. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 10./11.02.2005
- [9] BAM: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (2019). Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen herausgegeben vom Fachbereich 4.3 „Schadstofftransfer und Umwelttechnologien“, überarbeitete 10. Auflage, Mai 2019, veröffentlicht: März 2020 verfügbar online:
https://tes.bam.de/TES/Content/DE/Downloads/rili_zul_kunststoffdichtungsbahnen.pdf?__blob=publicationFile.
- [10] BAMZRDKS (2019): BAM FB 4.3 "Schadstofftransfer und Umwelttechnologien" - Richtlinie für die Zulassung von Dichtungskontrollsystemen für Konvektionssperren in Deponieoberflächenabdichtungen.
Stand: 4. Auflage 05/2019, veröffentlicht 03/2020, verfügbar online:
https://tes.bam.de/TES/Content/DE/Downloads/rili_zulassung_konvektionssperren.pdf?__blob=publicationFile
- [11] BARTHEL, R.: Gutachterliche Stellungnahme zur Optimierung von Böschungsprofilen bei Haldensanierungen am Standort Schlema-Alberoda, Brenk Systemplanung GmbH, 1999
- [12] 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
- [13] BIELE, H., HURST, S.: Long-term Aspects of Uranium Mining Remediation. In: B. Merkel, A. Hasche-Berger (Eds.): Uranium in the Environment – Mining Impact and Consequences, Springer Verlag, Berlin, New York, Tokyo (2006)
- [14] BRENK SYSTEMPLANUNG (B): Gutachten zur Optimierung der Haldenabdeckung und Profilierung des BA4 für die Sanierung und Wiedernutzbarmachung der Halde 366 mit Umfeld, BS-Proj.-Nr. 9604- 1, 1998
- [15] BRENK SYSTEMPLANUNG (1998): Zur Abschätzung von Bodenluftströmungen in Halden des Standortes Schlema-Alberoda. BMU-Vorhaben St.Sch. 4012-2, Aachen, 20.11.1998
- [16] DEPV (2009): Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), 2009

- [17] DEPV (2017): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27.04.2009 – Bundesgesetzblatt I, Nr. 22, S. 900, die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (Bundesgesetzblatt, S. 3465) geändert worden ist, 2017
- [18] DIN 4017: Baugrund - Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen, Beuth Verlag, 2006
- [19] DIN 4084: Baugrund - Geländebruchberechnungen, Beuth Verlag, 2009
- [20] DIN EN 1991-1-3/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten, Beuth Verlag, 2019
- [21] DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, Beuth Verlag, 2010
- [22] DIN EN 1997-1: Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung, Beuth Verlag, 2014
- [23] Dunger, V. (2020): Boden-, Halden und Deponiewasserhaushaltsmodellierung – Grundlagen, Berechnungsmodelle, Anwendungsbeispiele, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Computerkurs, Leipzig, 19. November 2020
- [24] EAAW: Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), 2008
- [25] EBGEO: Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) - 2. Aufl. Verlag Ernst und Sohn, ISBN: 9783433029503, 2010
- [26] Environmental Activities in Uranium Mining and Milling, A Joint NEA/IAEA Report, OECD, 1999
- [27] FABIAN, F.: Eckpunkte Zur Entlassung von Deponien aus der Nachsorge - was ist zu beachten? In: HTWK Leipzig (2019): 15. Leipziger Deponiefachtagung - Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. PRESSEL Digitaler Produktionsdruck, Remshalden, 03/2019
- [28] FERREZ ESTEVEZ, C.: Decommissioning of uranium mill facilities, Planning and management of uranium mine and mill closures, IAEA, Vienna, Austria, 1994
- [29] GDA E 2-4: GDA-Empfehlungen der Fachsektion 6 - AK6.1, E 2-4 Oberflächenabdichtungssysteme, DGGT e.V., 2010
- [30] GDA E 2-7: GDA-Empfehlungen der Fachsektion 6 - AK6.1, E 2-7 Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen, DGGT e.V., 2015
- [31] GDA E 2-17: GDA-Empfehlungen der Fachsektion 6 - AK6.1, E 2-17 Sicherheitsbetrachtungen bei Abdichtungssystemen, DGGT e.V., 2010
- [32] GDA E 2-20: GDA-Empfehlungen der Fachsektion 6 - AK6.1, E 2-20 Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen, DGGT e.V., 2015
- [33] GDA E 3-8: GDA-Empfehlungen der Fachsektion 6 - AK6.1, E 3-8 Reibungsverhalten von Geokunststoffen, DGGT e.V., 2015
- [34] GDA E 5-1: GDA-Empfehlungen der Fachsektion 6 - AK6.1, E 5-1 Grundsätze des Qualitätsmanagements, DGGT e.V., 2016
- [35] Handbuch für die Einkapselung von Altablagerungen, Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1. Auflage, 1990
- [36] HASSELSTEINER, R.: Statische Betrachtungen zu Gehölzen auf Dammbauten, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 4. JUWI – Treffen, TU München, 2002
- [37] HARTLEY, J. N. ET. AL.: Field Testing of Asphalt-Emulsion Radon-Barrier System, Presented at the Fourth Symposium on Uranium Tailings Management Fort Collins, Colorado, 1981

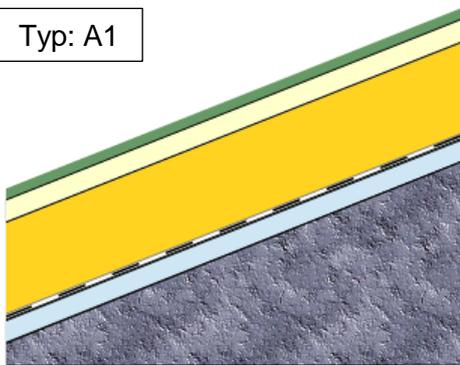
- [38] HÜBNER, J.-K., SCHNEIDER, P.: Practical Approach to the Alternative Evapotranspiration Landfill Cover, In: Vilnius Gedeminas Technical University (Hrsg.): Conference Proceedings "Environmental Engineering", Vilnius, 2005.
- [39] IAF-RADIOÖKOLOGIE GMBH/WISUTEC UMWELTECHNIK GMBH (2017): Recherche und Machbarkeitsstudie zur Unterbindung konvektiver Strömungen radonhaltiger Luft in Haldenabdeckungen mittels technischer Barrieren (3199573-U09), Arbeitsgemeinschaft IAF-Radioökologie/WISUTEC, Auftraggeber: Wismut GmbH (2016-2017), Teil 1 - Literaturrecherche.
- [40] IAF-RADIOÖKOLOGIE GMBH/WISUTEC UMWELTECHNIK GMBH (2017): Recherche und Machbarkeitsstudie zur Unterbindung konvektiver Strömungen radonhaltiger Luft in Haldenabdeckungen mittels technischer Barrieren (3199573-U09), Arbeitsgemeinschaft IAF-Radioökologie/WISUTEC, Auftraggeber: Wismut GmbH (2016-2017), Teil 2 - Machbarkeitsstudie.
- [41] JAKUBICK: Grundsätze und Lösungen für die Haldenabdeckungen an den Standorten Schlemma-Alberoda/Pohla zur Reduzierung der Umweltbeeinflussungen, Wismut GmbH, Technisches Ressort, Abteilung Engineering T 1.2, Chemnitz, 1996
- [42] KAHNT, R., MARTIN, M. PINKA, J.: Untersuchungen zu singulären Radonfreisetzungen aus bergbaulichen Hinterlassenschaften und ihre Auswirkungen auf die Radonkonzentration im Freien - Vorhaben 3609S10005, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, März 2012
- [43] KAHNWALD, S.; UHLIG, L.; SEELIG, C., DU PUIITS, M.; BRÖSE, S.: Optimierung von Sanierungslösungen für Halden des ehemaligen Uranerzbergbaus in Sachsen (Altstandorte), Teilvorhaben Modul 1, Überarbeitete Version vom 28.02.2014. Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden/Pillnitz, 2014
- [44] KUNZE, C.: Insurability of Unknown Post-Closure Liabilities. Journal of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Vol. 4, No. 4, pp. 257-264, 2013
- [45] KUNZE, C., ETENHUBER, E., SCHELLENBERGER, A.: Ermittlung von potentiellen Strahlenexpositionen durch Ableitungen aus NORM-Industrien. Endbericht zum Forschungsprojekt FKZ 3615S12232, Bundesamt für Strahlenschutz, Oktober 2018.
- [46] LAGA ASPHALT: LAGA ad-hoc-AG Deponietechnik: Eignungsbeurteilung von Deponieasphalt zur Basis- und Oberflächenabdichtung von Deponien vom 02.03.2015. Fortschreibung am 03.12.2019, veröffentlicht am 02.03.2020
- [47] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (LUBW): Leitfaden zur Beurteilung von TA Luft Ausbreitungsrechnungen in Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2004
- [48] LANUV (2015): Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme – Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung. LANUV-Arbeitsblatt 13. Dritte aktualisierte Neuauflage, Recklinghausen 2015
- [49] LEFEBVRE, R., LAHMIRA, B., LÖBNER, W.: Numerical modeling of gas flow to select a radon emission control method in waste rock dump 38neu. GeoHydro 2011.
- [50] LÖBNER, W., REGNER, J.: Einfluss von Kaltluftströmungen auf die Radonsituation im Umfeld von Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus. In: Strahlenschutzaspekte bei natürlicher Radioaktivität. 38. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dresden, 18. bis 22. September 2006, Hrsg. E. Ettenhuber, R. Giessing, E. Beier, A. Bayer.
- [51] MCLEARY, M. B.: Striving for 'walk-away'—Focusing an expert group on the 'holy grail' of mine closure. In A. B. Fourie & M. Tibbett (Eds.), Mine closure 2009 (pp. 359–373). Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2009
- [52] MEND (2012): Cold regions cover system design, Technical Guidance Document, MEND Report 1.61.5c, OKC Report No. 817/2-01, 117 p.
- [53] MÜLLER, W.: Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik, Springer Basel AG, ISBN: 978-3-0348-8305-4, 2001.

- [54] MÜLLER, W.: Dichtungsbahnen zur Abdichtung von Deponien und Altlasten. In: SKZ-ConSem GmbH & AK GWS (Veranstalter): 25. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 26./27.02.2009
- [55] PAUL, M.; BARNEKOW, U.; DULLIES, F.; HILLER, A.; METSCHIES, T.; SCHMIDT, P.: Innovationen und Langzeiterfahrungen bei der Sanierung der Hinterlassenschaften des ostdeutschen Uranbergbaus. Proceedings des Internationalen Bergbausymposiums WISSYM_2019, Chemnitz, 9. bis 11. Oktober 2019
- [56] PETRICH, R. (2021): Internetpublikation – Kaltluftabflüsse bei Immissionsprognosen – Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen bei Immissionsprognosen im Rahmen der TA Luft. Schriftenreihe des LfULG, Heft 27/2012, Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> (24.04.2021)
- [57] RICHTER, C.; SPERRHACKE, A.; HURST, S.: Monitoring und Langzeitaufgaben bei der Haldensanierung - Herausforderungen aus Sicht der Strahlenschutzbehörde. In: Zukunft gestalten: Langzeiterfahrungen und Innovationen in der Bergbausanierung. Proceedings des Internationalen Bergbausymposiums WISSYM_2019, Chemnitz, 9. bis 11. Oktober 2019, 2019
- [58] SCHMIDT, P.: Sanierung von Hinterlassenschaften des Uranerz-Bergbaus nach neuem Strahlenschutzrecht. StrahlenschutzPraxis, S. 30, 2021
- [59] SCHWEIZER, A.: Internetpublikation – Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau. <https://www.schweizer-fn.de/stroemung/druckverlust/druckverlust.php>, 10.11.2020
- [60] TU FREIBERG(2020): Komponenten der Abdichtungssysteme – Wirkungsweise, Anforderungen, Qualitätssicherung. <https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/professur-fuer-ingenieurgeologie-6559/dep02.pdf> recherchiert am 08.06.2020
- [61] VÁRHEGYI, A., SOMLAI, J., SAS, Z. (2013): Radon migration model for covering U mine and ore processing tailings, Paper presented at the First East European Radon Symposium – FERAS 2012, September 2–5, 2012, Cluj-Napoca, Romania; Rom. Journ. Phys., Vol. 58, Supplement, S298–S310, Bucharest
- [62] WISMUT GMBH (1998): Stellungnahme zum Einfluß konvektiver Bodenluftströmungen auf die Radonexhalation der Halden im Gebiet Schlema-Alberoda. Chemnitz, 06.12.1998.
- [63] KLINGER UND PARTNER: Machbarkeitsstudien zu Photovoltaikanlagen auf Deponien in der Nachsorge. Studie im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. 27.11.2012
- [64] BÜRO FÜR STÄDTEBAU GMBH: Bebauungsplan Nr. 16/01 Solarpark Altendorfer Straße - Begründung. Stadt Chemnitz, Entwurf, Fassung vom 22.05.2017.

A 1 Oberflächenabdichtungssystem

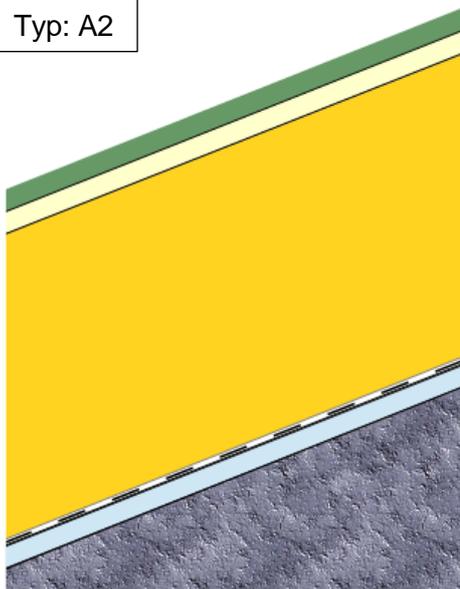
A 1.1 konvektionsdichtes Element Typ A: Kunststoffdichtungsbahn

Typ: A1



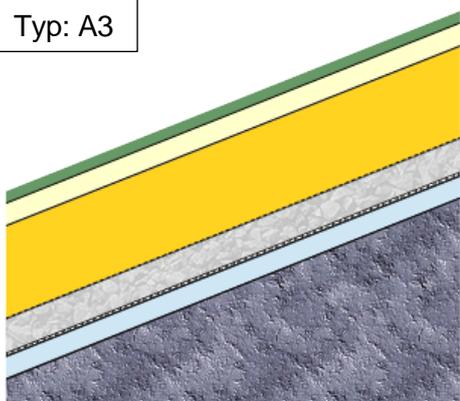
- Begrünung (Gras)
- 0,20 m Oberboden
- 0,80 m Unterboden
- 8,00 mm Kunststoffdränelement (KDE)
- 2,50 mm Kunststoffdichtungsbahn (KDB)
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

Typ: A2



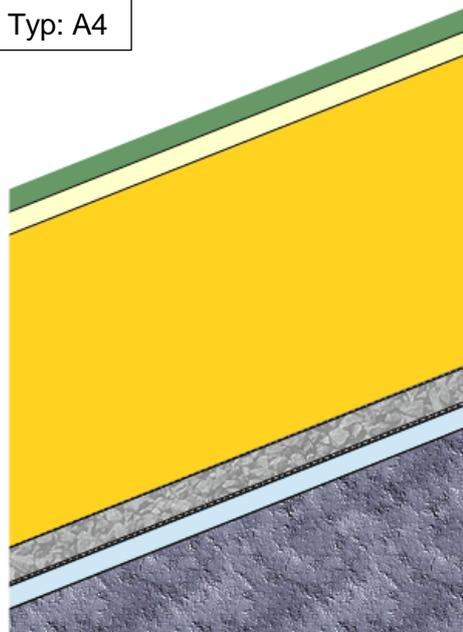
- Begrünung (Gras/Sträucher/Bäume)
- 0,30 m Oberboden
- 2,70 m Unterboden
- 8,00 mm Kunststoffdränelement (KDE)
- 2,50 mm Kunststoffdichtungsbahn (KDB)
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

Typ: A3



- Begrünung (Gras)
- 0,20 m Oberboden
- 0,80 m Unterboden
- 3,00 mm Trenn-/Filtervlies $\geq 300 \text{ g/m}^2$
- 0,30 m mineralische Entwässerungsschicht, Kies 16/32
- 8,00 mm Schutzvlies $\geq 1200 \text{ g/m}^2$
- 2,50 mm Kunststoffdichtungsbahn (KDB)
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

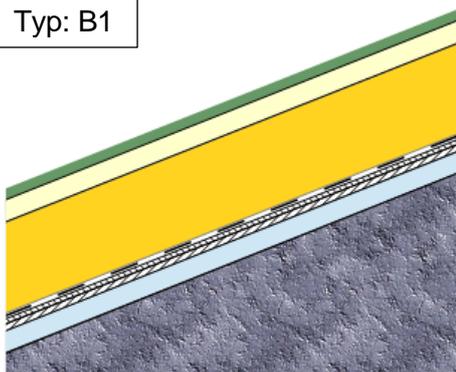
Typ: A4



- Begrünung (Gras/Sträucher/Bäume)
- 0,30 m Oberboden
- 2,70 m Unterboden
- 3,00 mm Trenn-/Filtervlies $\geq 300 \text{ g/m}^2$
- 0,30 m mineralische Entwässerungsschicht, Kies 16/32
- 8,00 mm Schutzvlies $\geq 1200 \text{ g/m}^2$
- 2,50 mm Kunststoffdichtungsbahn (KDB)
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

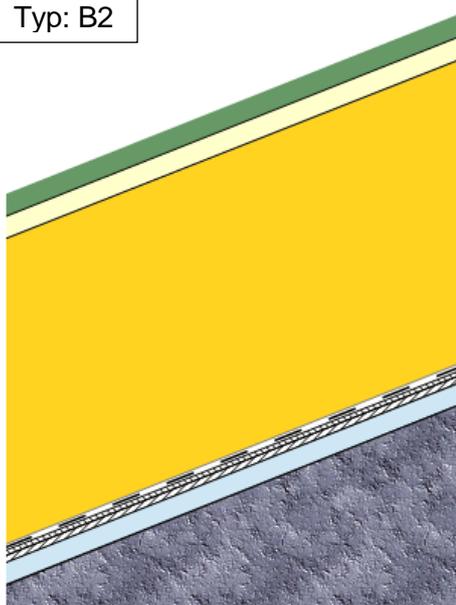
A 1.2 konvektionsdichtes Element Typ B: Asphaltabdichtung

Typ: B1



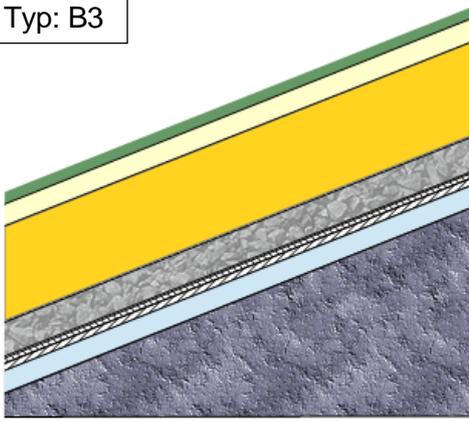
- Begrünung (Gras)
- 0,20 m Oberboden
- 0,80 m Unterboden
- 8,00 mm Kunststoffdränelement (KDE)
- $\geq 0,04 \text{ m}$ Deponieasphaltdichtungsschicht - AC 11 D-DA
- $\geq 0,06 \text{ m}$ Deponieasphalttragschicht - AC 16 T-DA
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

Typ: B2



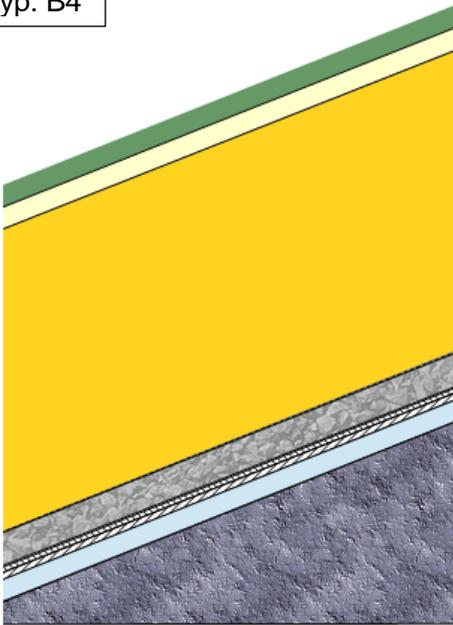
- Begrünung (Gras/Sträucher/Bäume)
- 0,30 m Oberboden
- 2,70 m Unterboden
- 8,00 mm Kunststoffdränelement (KDE)
- $\geq 0,04 \text{ m}$ Deponieasphaltdichtungsschicht - AC 11 D-DA
- $\geq 0,06 \text{ m}$ Deponieasphalttragschicht - AC 16 T-DA
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

Typ: B3



- Begrünung (Gras)
- 0,20 m Oberboden
- 0,80 m Unterboden
- 3,00 mm Trenn-/Filtervlies $\geq 300 \text{ g/m}^2$
- 0,30 m mineralische Entwässerungsschicht, Kies 16/32
- $\geq 0,04 \text{ m}$ Deponieasphaltdichtungsschicht - AC 11 D-DA
- $\geq 0,06 \text{ m}$ Deponieasphalttragschicht - AC 16 T-DA
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht
bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

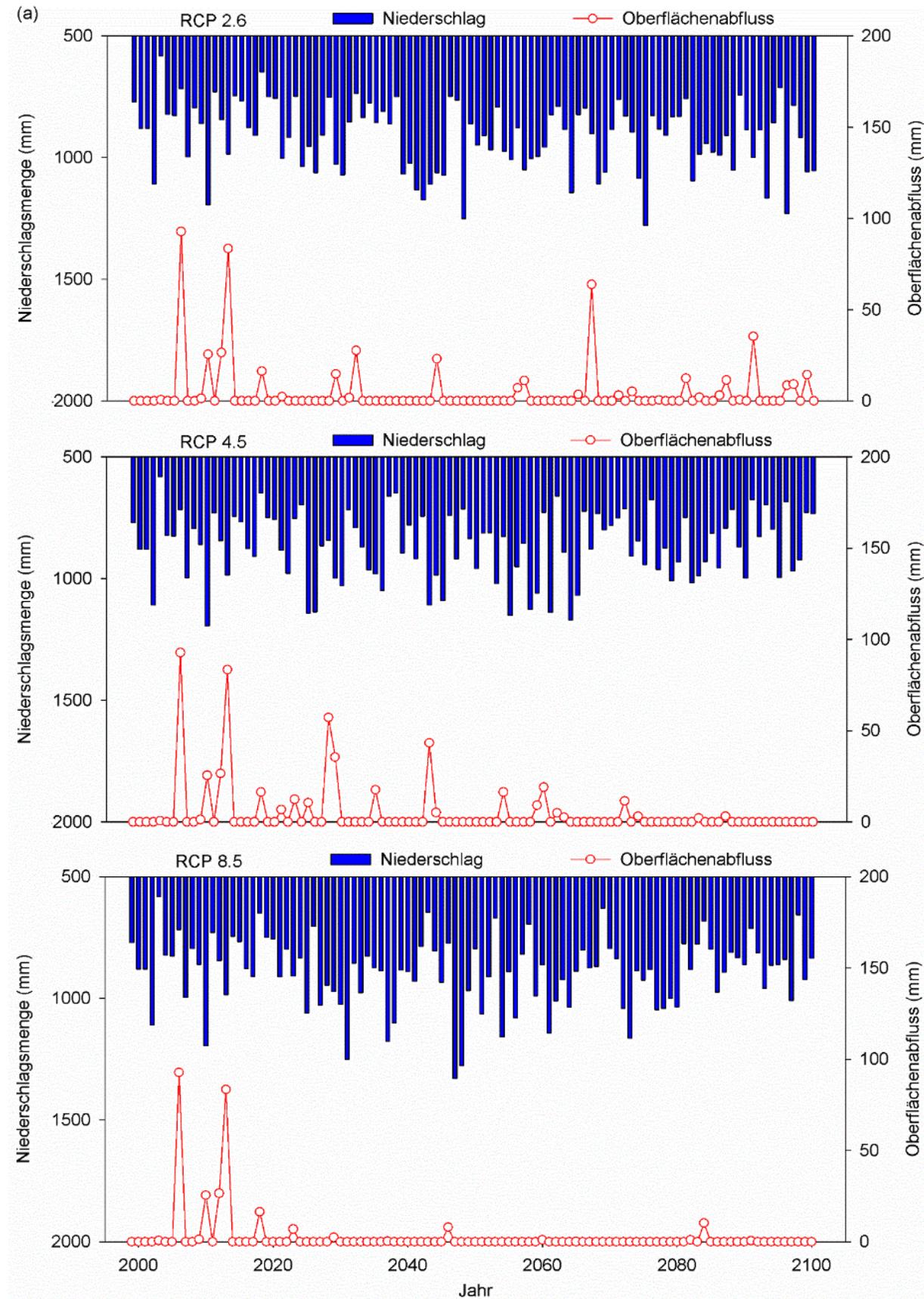
Typ: B4



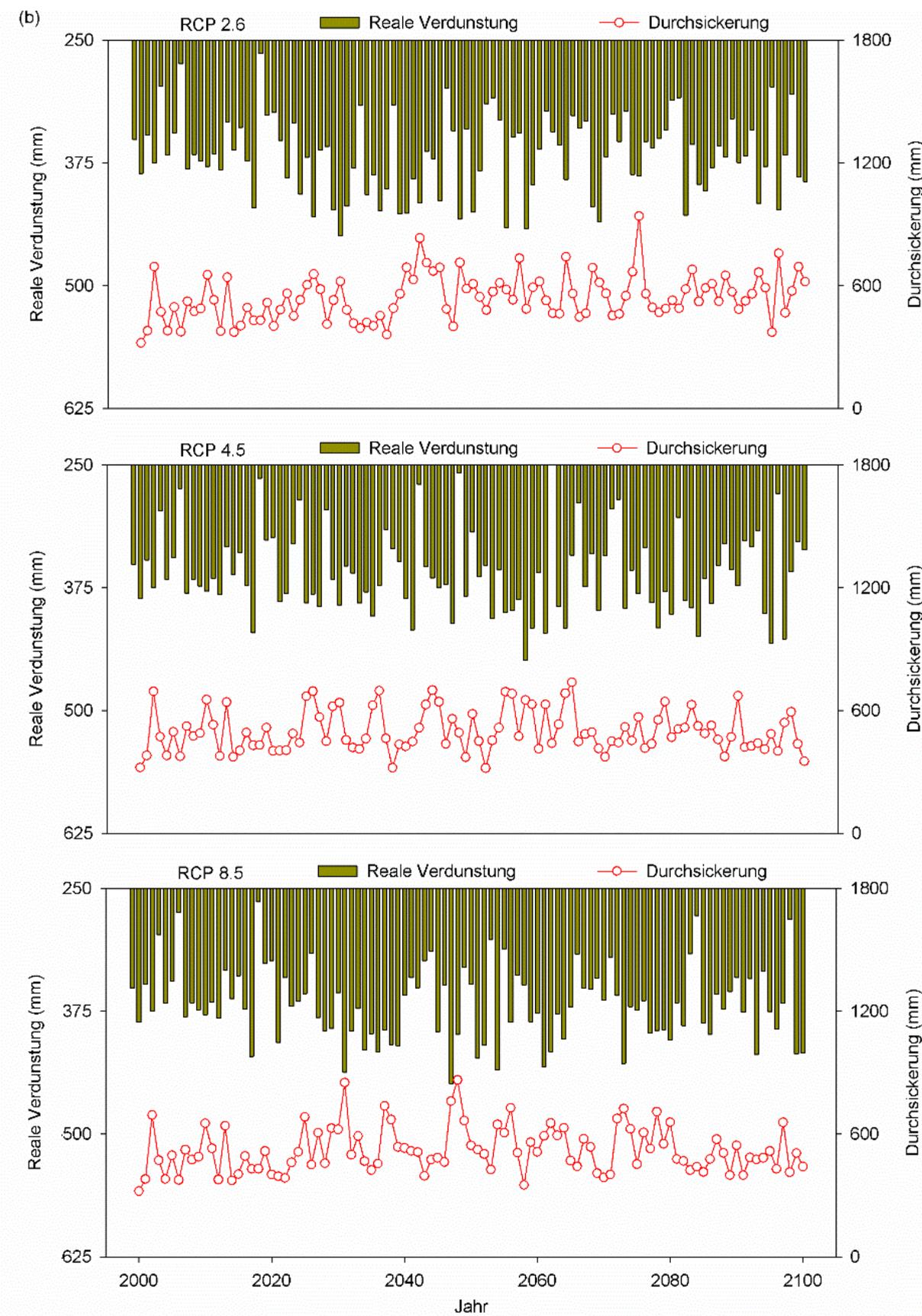
- Begrünung
(Gras/Sträucher/Bäume)
- 0,30 m Oberboden
- 2,70 m Unterboden
- 3,00 mm Trenn-/Filtervlies $\geq 300 \text{ g/m}^2$
- 0,30 m mineralische Entwässerungsschicht, Kies 16/32
- $\geq 0,04 \text{ m}$ Deponieasphaltdichtungsschicht - AC 11 D-DA
- $\geq 0,06 \text{ m}$ Deponieasphalttragschicht - AC 16 T-DA
- 0,20 m vorh. mineralische Dämmschicht
bzw. Trag- und Ausgleichsschicht
- Haldenmaterial

A 2 Wasserhaushaltsmodellierung

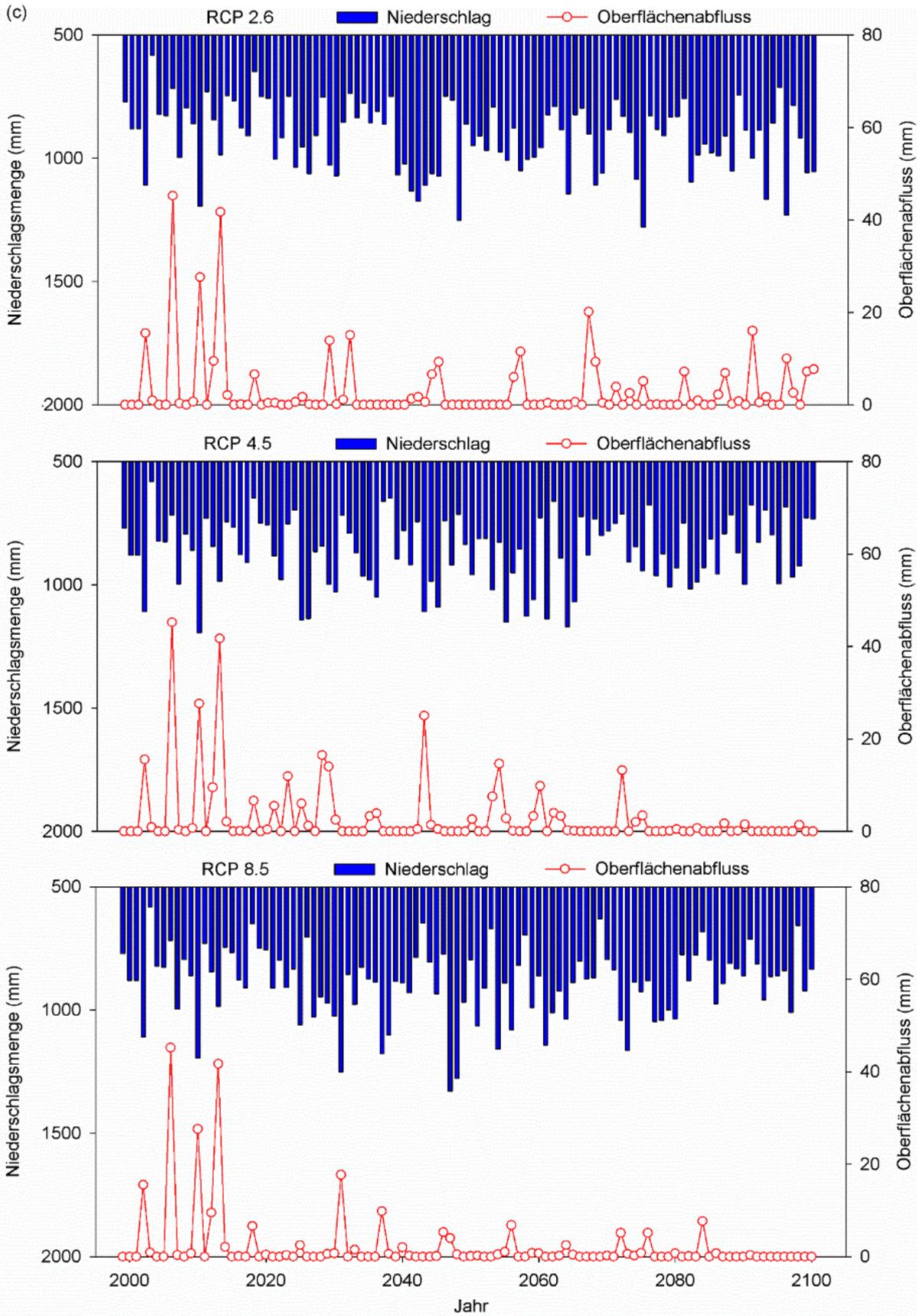
(a) Nullmodell: Niederschlag und Oberflächenabfluss



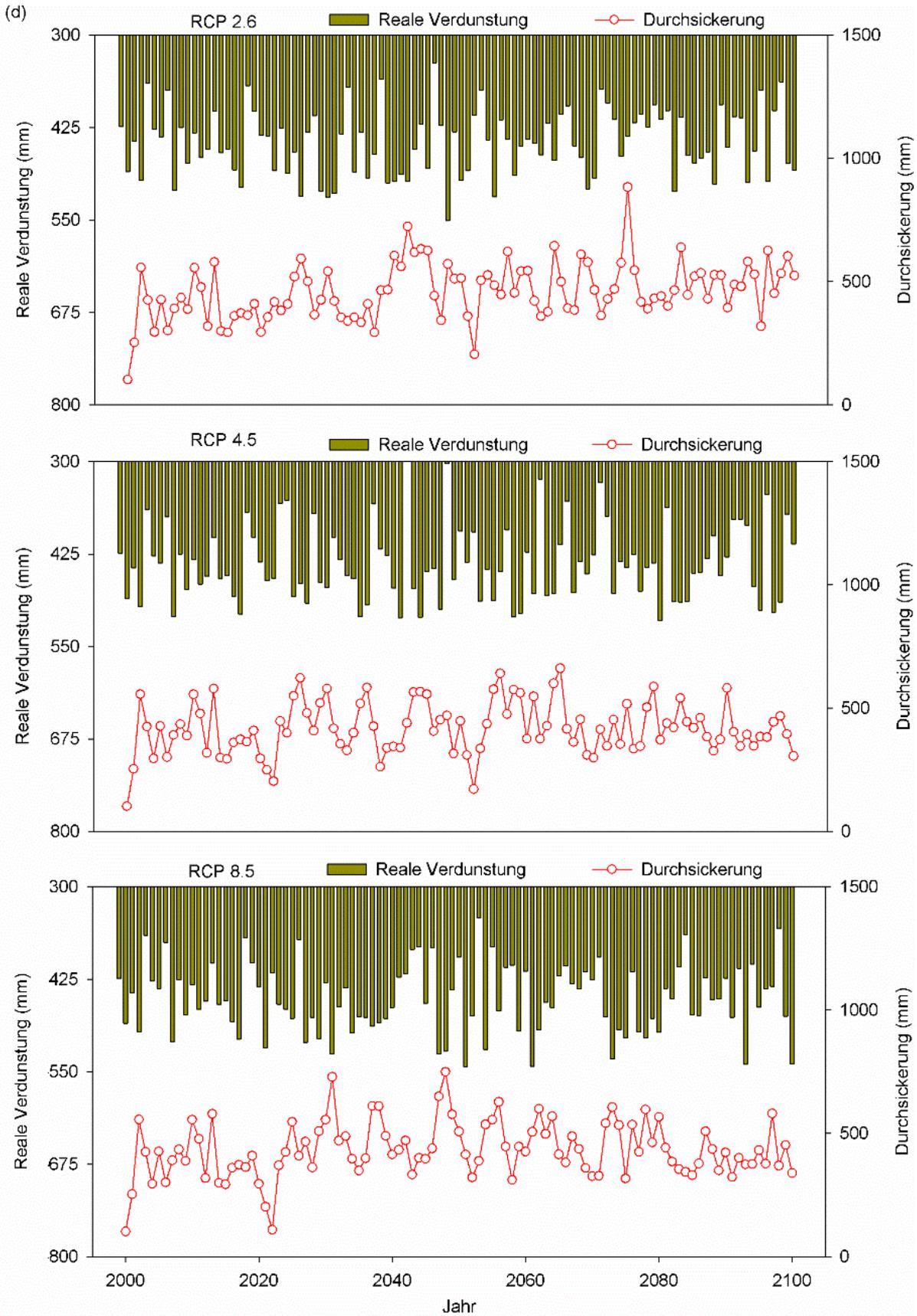
(b) Nullmodell: reale Verdunstung und Durchsickerung



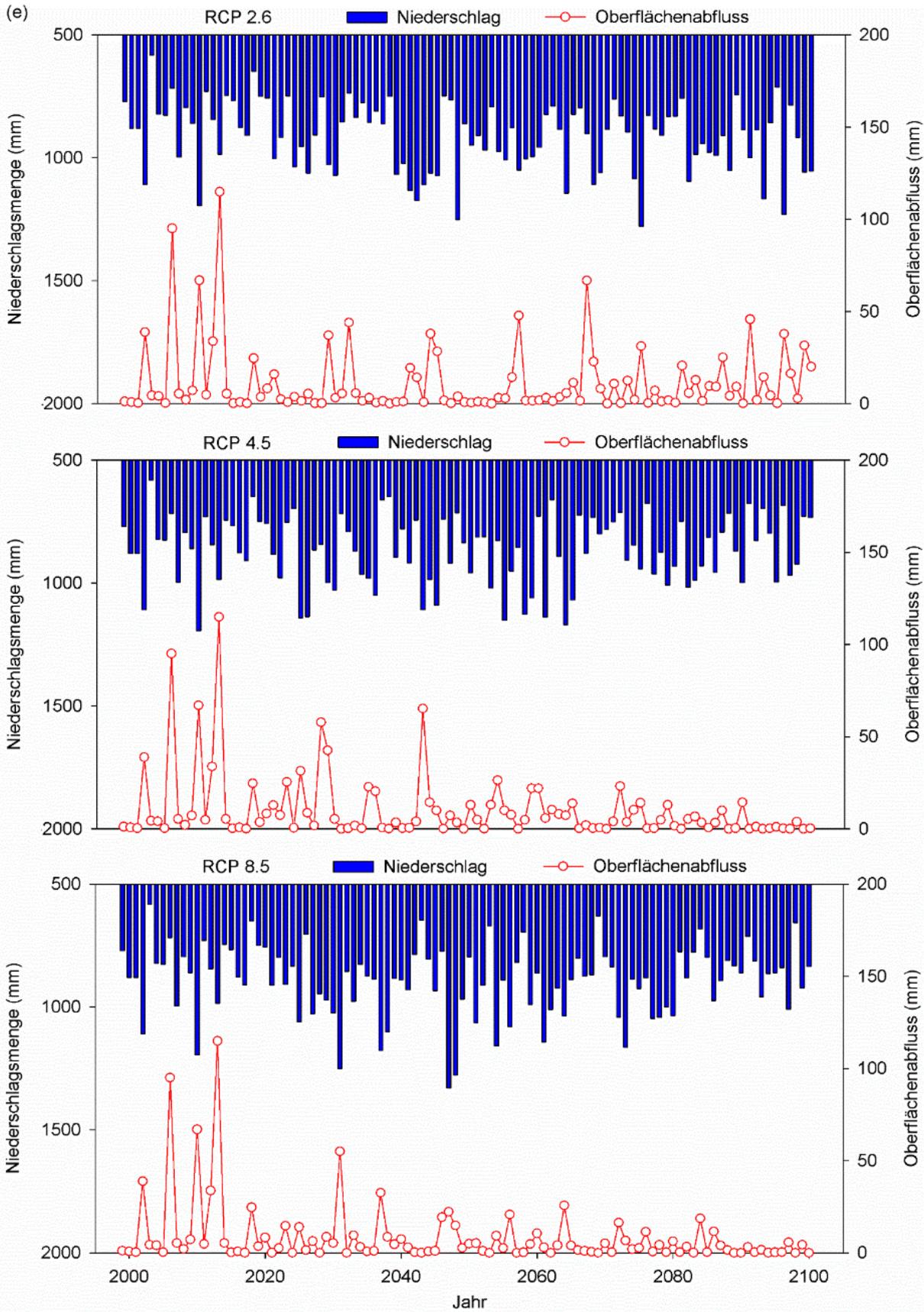
(c) Istzustand: Niederschlag und Oberflächenabfluss



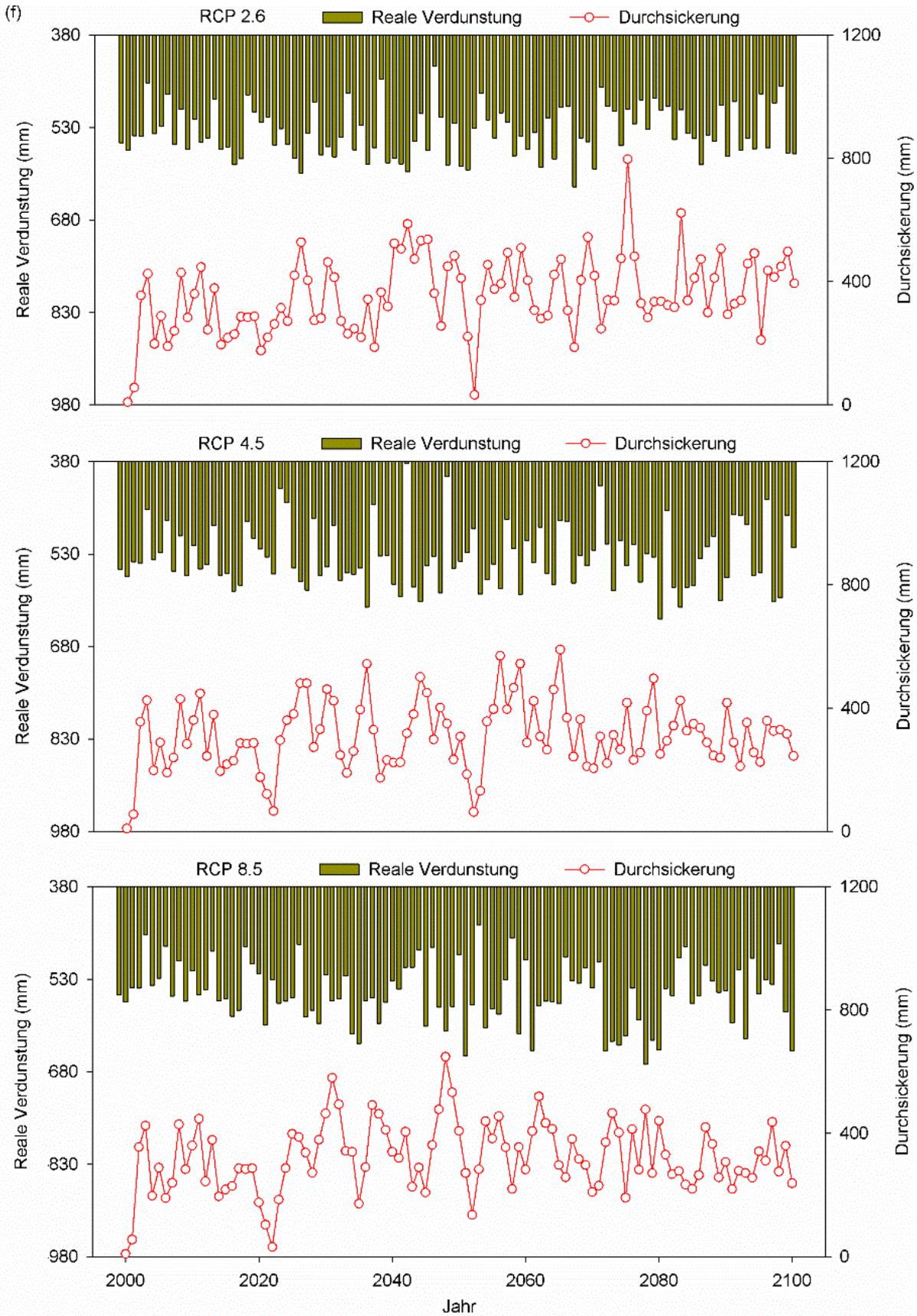
(d) Istzustand: reale Verdunstung und Durchsickerung



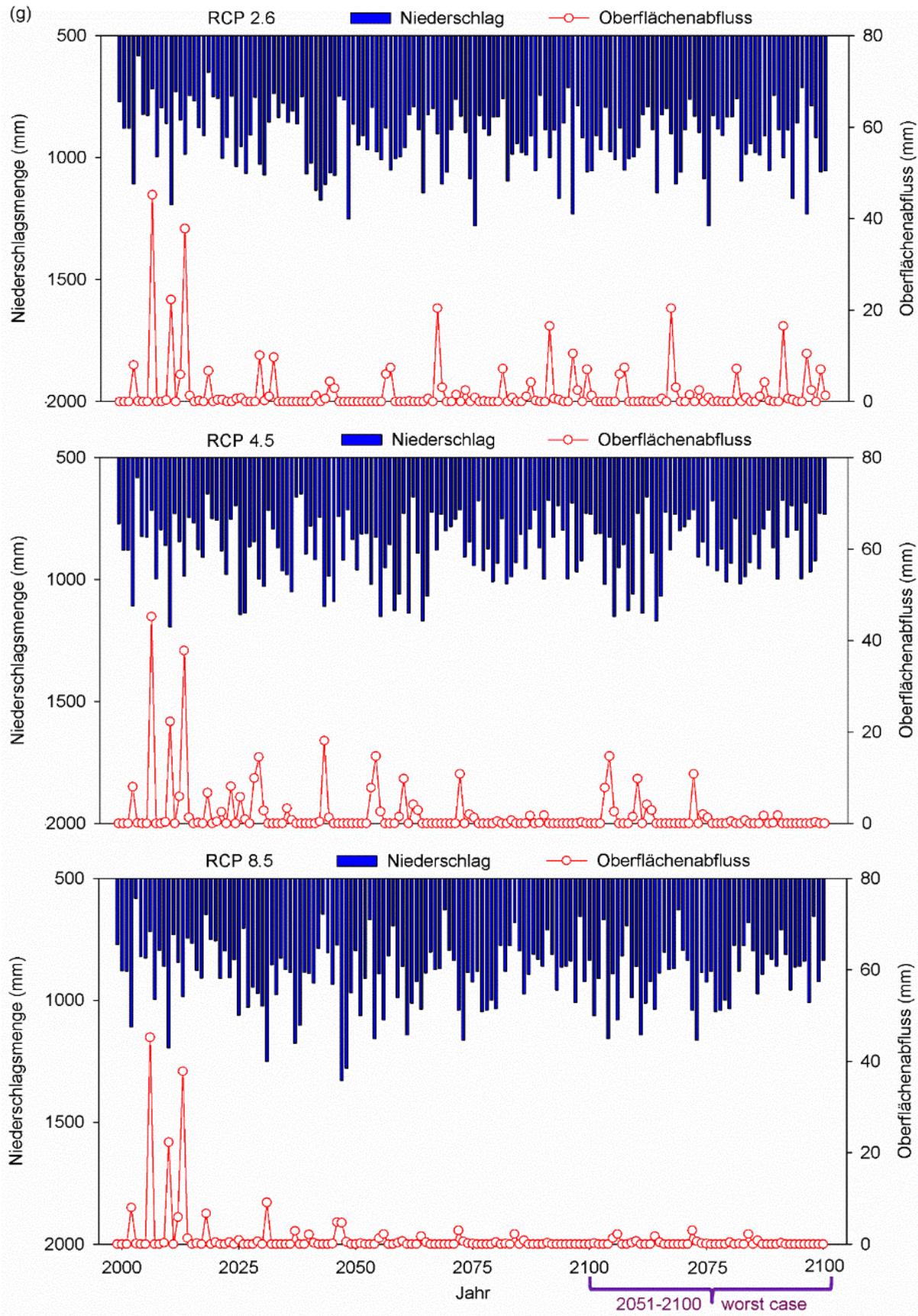
(e) Königstein: Niederschlag und Oberflächenabfluss



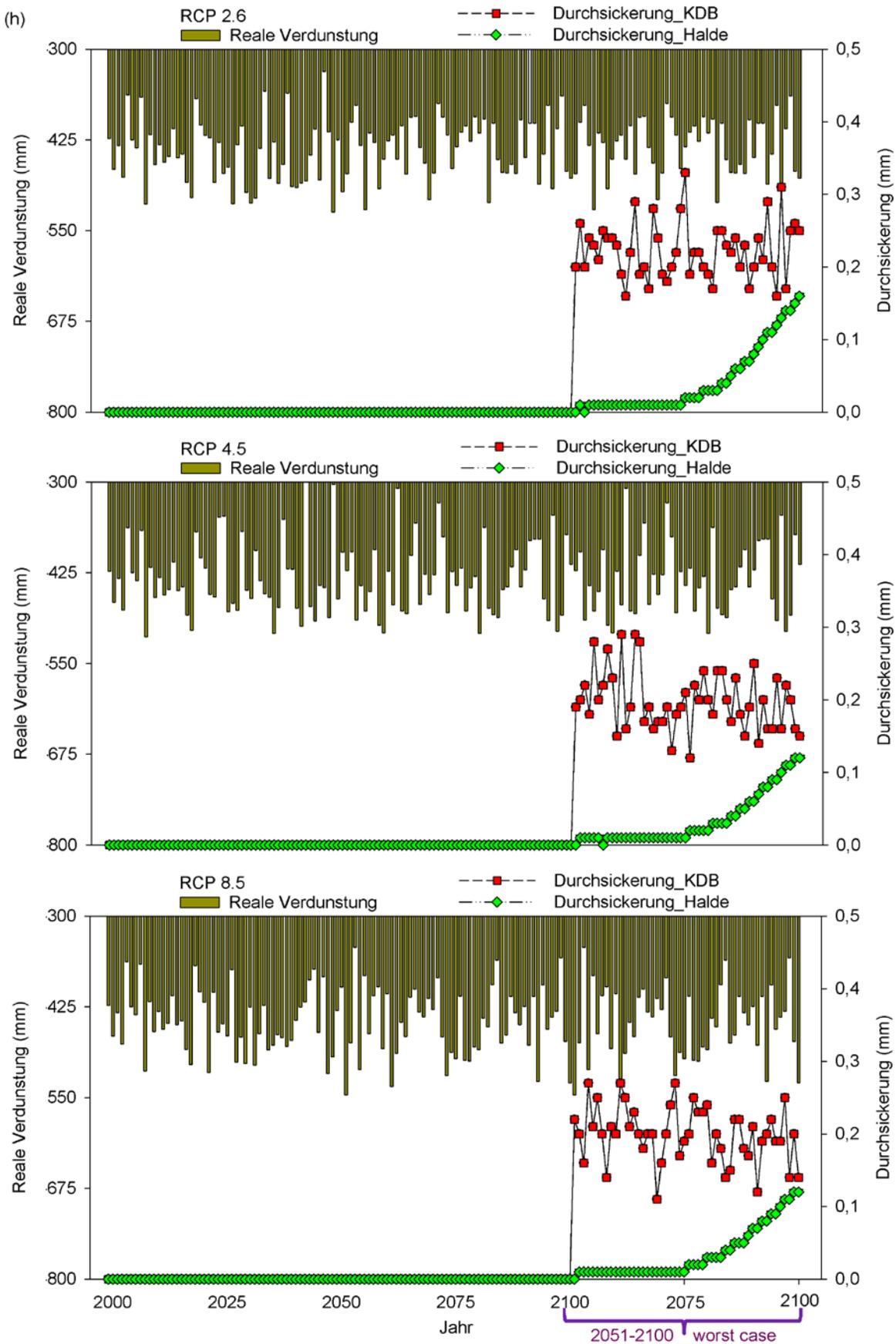
(f) Königstein: reale Verdunstung und Durchsickerung



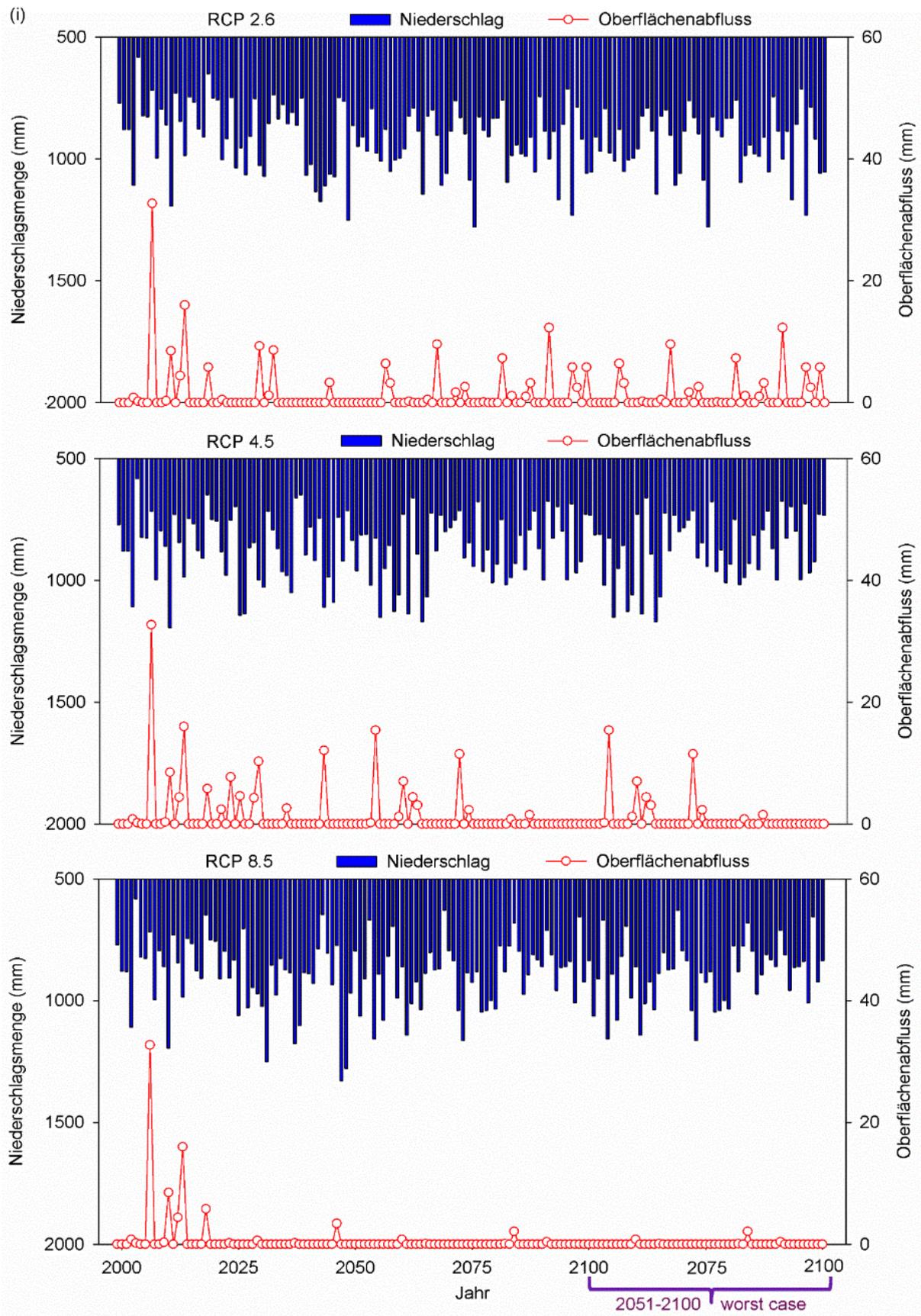
(g) A1: Niederschlag und Oberflächenabfluss



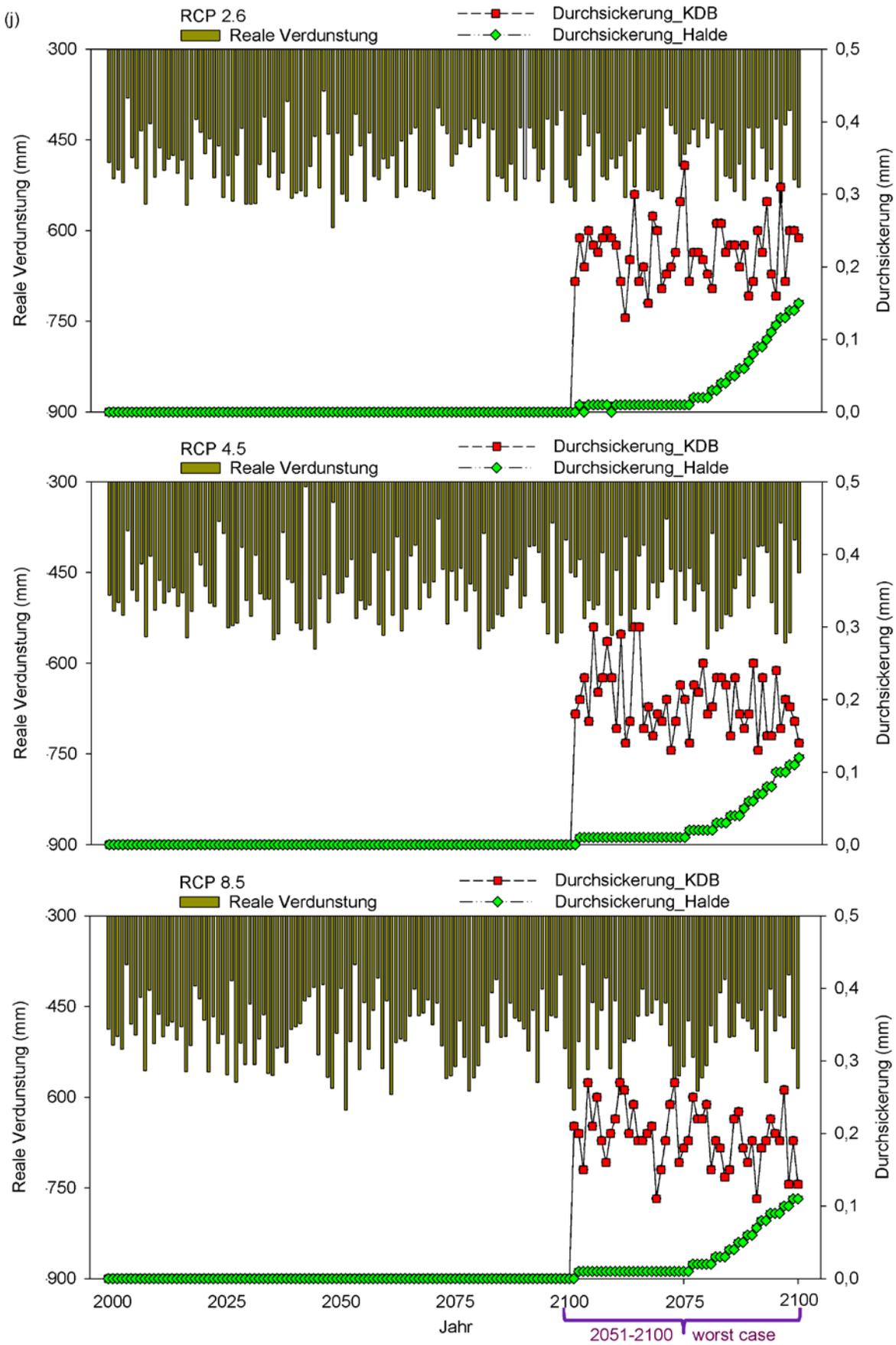
(h) A1: reale Verdunstung und Durchsickerung



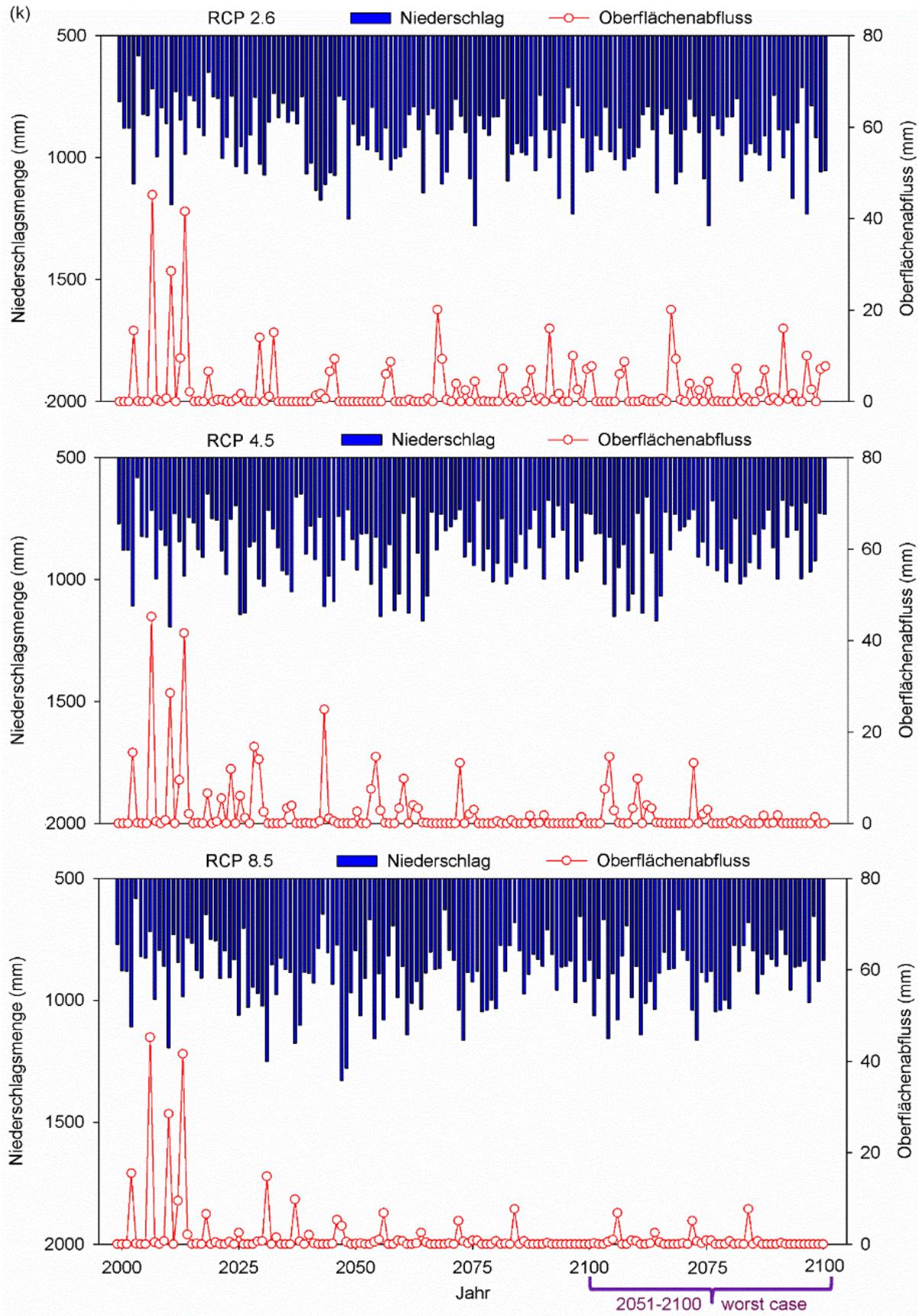
(i) A2: Niederschlag und Oberflächenabfluss



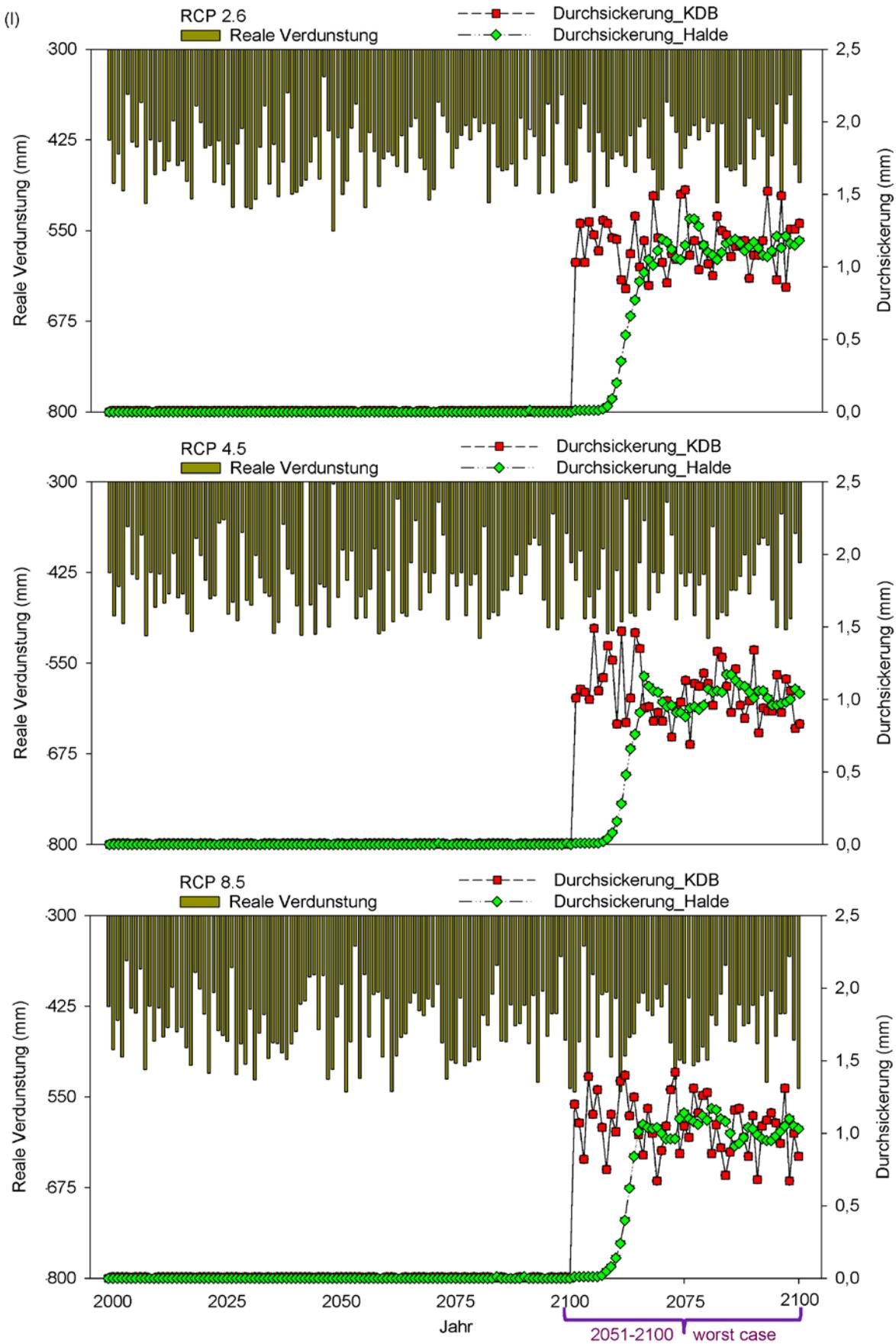
(j) A2: reale Verdunstung und Durchsickerung



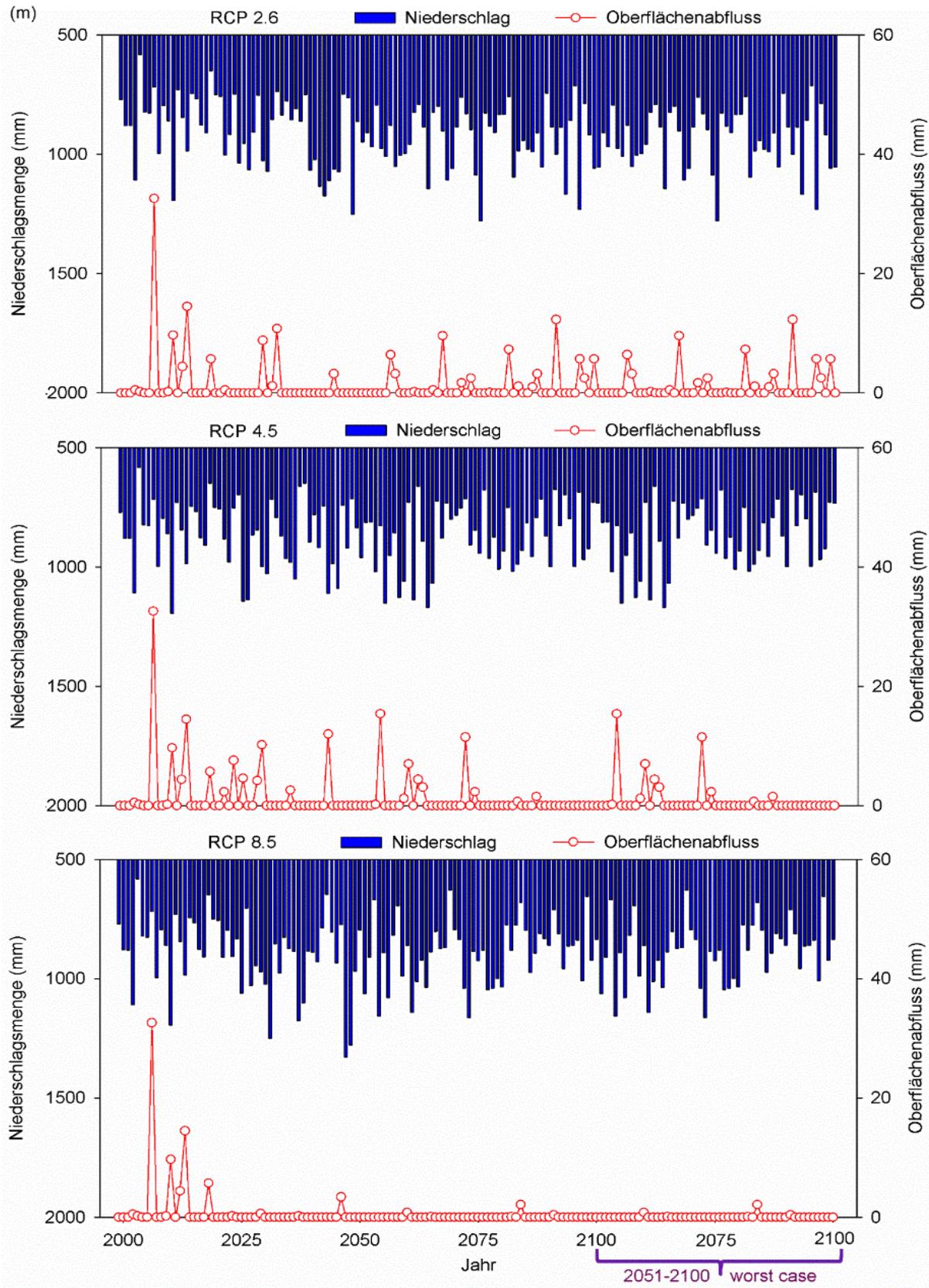
(k) A3: Niederschlag und Oberflächenabfluss



(I) A3: reale Verdunstung und Durchsickerung



(m) A4: Niederschlag und Oberflächenabfluss



(n) A4: reale Verdunstung und Durchsickerung

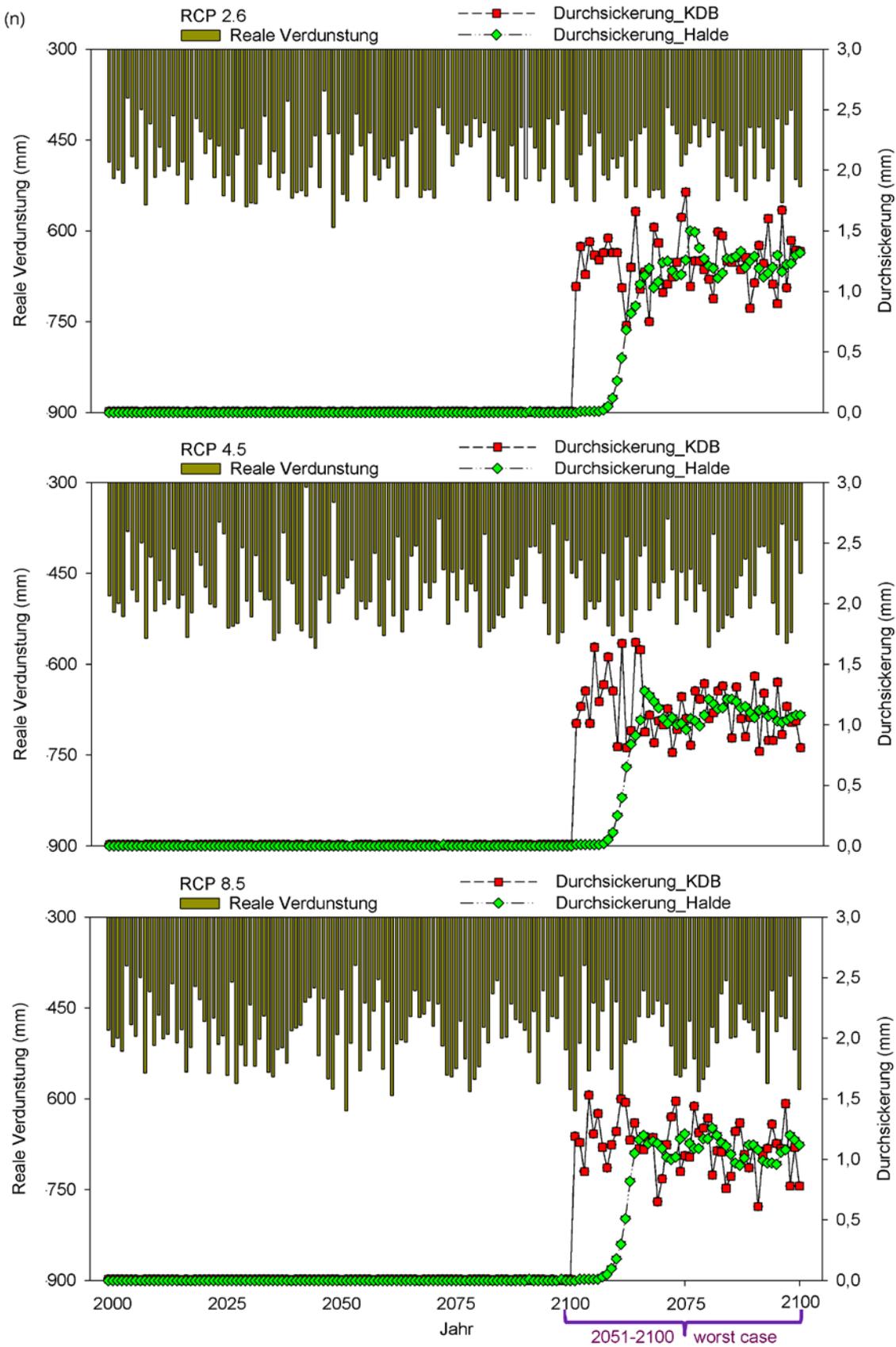


Abbildung 24: Langjährige Muster von Niederschlag, Oberflächenabfluss, realer Verdunstung und Durchsickerung für sieben Fälle

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft
und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smekul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Said Al-Akel, Forschungs- und Transferzentrum
Leipzig e.V.
Dr. Christian Kunze, IAF-Radioökologie GmbH
Dr.-Ing. Mario Müller, DBI-EWI GmbH
Prof. Dr. Petra Schneider, DBI-EWI GmbH
Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.
an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Karl-Liebknecht-Str. 143, 04277 Leipzig
Telefon: +49 341 3076 1191
Telefax: +49 341 3076 1187
E-Mail: grundbau.fb@htwk-leipzig.de

Fotos:

Titelbild: Wismut GmbH, <https://www.wismut.de/de/pressefotos.php>

Redaktionsschluss:

11.07.2022

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de