

# Konsequenzen des Klimawandels aus Sicht des Wasserhaushaltes von Deponieoberflächensicherungen

Volkmar Dunger<sup>1</sup> (TU Bergakademie Freiberg)

**Zusammenfassung:** Die Gefährdung von mineralischen Dichtschichten innerhalb von Oberflächensicherungen ist in entscheidendem Maße von der wasserhaushaltlichen Wirksamkeit der ober- und unterhalb liegenden Schichten abhängig. Die Gefahren lassen sich u.a. durch eine gut speicherfähige Rekultivierungsschicht minimieren, in der die Pflanzen auch in Trockenperioden so viel Bodenwasser erschließen können, dass sie nicht in tiefere Bereiche wurzeln. Mittels geeigneter Wasserhaushaltsmodelle (HELP, BOWAHALD [2, 5, 27]) sind austrocknungsrelevante Zustände für die Rekultivierungsschicht quantifizierbar. Im vorliegenden Beitrag wird dargestellt, wie sich solche Zustände infolge der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen bis 2050 für Beispielsstandorte in drei klimatischen Regionen Sachsens häufen.

## 1 Problemstellung

Mineralische Dichtschichten, wie sie entsprechend Technischer Anleitung Siedlungsabfall [29] bzw. Deponieverordnung [3] für Siedlungsabfalldeponien der Deponieklassen II und III vorgeschrieben sind, unterliegen vielfachen Gefährdungen. Im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt sind folgende Risiken von besonderer Bedeutung [24]:

- Austrocknung infolge Evapotranspiration und Durchwurzelung von oben
- Kapillarwasseraufstieg aus der Dichtschicht in darüber liegende Schichten (insbesondere bei fehlender Entwässerungsschicht [31]) infolge niedrigem Matrixpotenzials oberhalb der Dichtschicht
- Wasserdampftransport aus der Dichtschicht in darüber oder darunter liegende sehr gut durchlässige (und dadurch gut ventilierende) wasserdampfengesättigte Schichten
- Wasserdampfdiffusion infolge Temperaturgradienten
- negative Beeinflussung des Quell-Schrumpfungsverhaltens von Tonmineralen infolge Ionenaustausch bzw. Ausfällung durch im Sickerwasser gelöste Stoffe

Innerhalb von mineralischen Dichtschichten kann es wegen des hohen Anteils an Feinkorn schon bei Wassergehaltsabnahmen von nur 1 oder 2 Vol.-% zu einer Veränderung des Korngefüges in der Art kommen, dass die Dichtung aufreißt. Meist bilden sich keine großen Risse, dafür aber ein ausgeprägtes Netz von Haarrissen, die kaum nennenswert verheilen (s. z.B. [19, 20]).

---

<sup>1</sup> Gustav-Zeuner-Str. 12, D-09596 Freiberg, Tel.: ++49 / 3731 / 393227, dungerv@geo.tu-freiberg.de

Hinzu kommt, dass der Bewuchs infolge Austrocknung der Rekultivierungsschicht in eine Stresssituation gerät. Um ihren Stoffwechsel weiter aufrecht erhalten zu können, und sei es mit eingeschränkter Intensität, sind die Pflanzen gezwungen, ihr Wurzelsystem (insbesondere die Feinwurzeln) tiefer auszubilden. Dabei kann es bei unzureichender Dichtschichtüberdeckung (bei zu geringen Rekultivierungs- und ggf. auch Drainschichtstärken) zu einer Durchwurzelung der Dichtschicht kommen, wobei bereits vorhandene Haarrisse (s.o.) genutzt werden. Selbst wenn nach dem Ende der Austrocknungsperiode wieder verstärkt die weiter oben liegenden Wurzelbereiche in Aktion treten und die unteren Wurzelbereiche teilweise sogar absterben, so bleiben in dem bindigen Dichtungsmaterial doch die Wurzelkanäle zurück, die zu einer rapiden Zunahme der Wasserwegsamkeit führen können (s. z.B. [21]).

Die Austrocknungsproblematik stellt sich folglich als außerordentlich komplex dar. Um die Austrocknungsgefährdung möglichst gering zu halten, gibt es eine Vielzahl möglicher Maßnahmen [24]. Zweifellos kommt dabei der Rekultivierungsschicht in Kombination mit dem Bewuchs eine besondere Bedeutung zu:

- in Bezug auf eine ausreichende Dimensionierung der Rekultivierungsschicht, so dass diese in den unteren Schichten ganzjährig hohe Wassergehalte aufweist und der Bewuchs in Trockenperioden nicht in Stress gerät,
- hinsichtlich ausreichend hoher nutzbarer Feldkapazitäten und Luftkapazitäten der Rekultivierungsmaterialien sowie
- bezüglich eines an die Standortverhältnisse und die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht angepassten Bewuchses.

Die genannten Eigenschaften der Rekultivierungsschicht sollen über lange Zeiträume (i.d.R. mehrere Jahrzehnte) erhalten bleiben. Gegenwärtige Planungen sollten diese Gesichtspunkte berücksichtigen. Zur Quantifizierung des Austrocknungsverhaltens der Rekultivierungsschicht stehen dabei Deponiewasserhaushaltsmodelle (z.B. HELP [2, 27] bzw. BOWAHALD [5]) zur Verfügung. Gegenwärtige Planungen berücksichtigen dabei im allgemeinen nicht klimatische Veränderungen, die sich für einen Deponiestandort in Zukunft ergeben können.

Im vorliegenden Beitrag soll aufgezeigt werden, wie sich das Austrocknungsverhalten der Rekultivierungsschicht infolge klimatischer Veränderungen gestaltet. Betrachtet werden drei Standorte in Sachsen, die sich hinsichtlich ihrer klimatischen Verhältnisse voneinander unterscheiden.

## **2 Prognostizierte Klimaveränderungen für Sachsen**

Die Existenz eines vorrangig anthropogen bedingten Klimawandels ist spätestens seit dem dritten IPCC-Bericht [15] bekannt. Danach ist die globale Mitteltemperatur seit 1900 bereits um  $0,7 \pm 0,2$  °C angestiegen. Für Europa sind es sogar 0,95 °C [9]. Dieser Trend wird sich in Zukunft verstärken. Für Mitteleuropa ist bis 2100 eine Erwärmung zwischen 1,6 °C und 6,3 °C prognostiziert (s. u.a. [9, 10 und 32]). Die großen Prognoseunsicherheiten resultieren aus den Unsicherheiten der zukünftigen Emissionsentwicklung [15] und den unterschiedlichen Methoden, die beim Herunterskalieren der globalen Klimamodelle Verwendung finden [16]. Für Sachsen ist mit einer Temperaturzunahme um etwa 2,7 °C bis 2050 zu rechnen [10].

Die zukünftige Entwicklung der weltweiten Emissionen ist an die globale Entwicklung gekoppelt. Gegenwärtig geht man von vier Emissionsszenarien aus [15]:

- Szenario A1: global-ökonomisch orientiert
- Szenario A2: regional-ökonomisch orientiert
- Szenario B1: global-ökologisch orientiert
- Szenario B2: regional-ökologisch orientiert

Priorisiert wird derzeit eine eher regional-ökonomisch orientierten Entwicklung (Szenario A2), in deren Folge eine deutliche (bis zu vierfacher) Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emission zu erwarten ist.

Nach [10] kann in Bezug auf den Niederschlag für Sachsen von einer deutlichen Abnahme der mittleren monatlichen Niederschlagssummen insbesondere im Frühling und Sommer bei einer gleichzeitigen Häufung von extremen Ereignissen (insbesondere lokalen sommerlichen Starkniederschlägen) ausgegangen werden. Damit setzt sich der bereits seit den 1950-er Jahren insbesondere in Nord- und Ostsachsen beobachtete Trend zu geringeren Niederschlägen fort.

Die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt können sich in recht vielfältiger Art und Weise gestalten (s. u.a. [17, 18, 26 und 32]). Als deponiewasserhaushaltlich relevant sind zu nennen:

- geringere Wasserzwichenspeicherung in Form von Schnee
- Zunahme der schnellen Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, Drainwasserabfluss)
- Zunahme der Verdunstung und folglich eine Abnahme der Bodenfeuchte vor allem im hydrologischen Sommerhalbjahr
- Zunahme der Jahre, in denen der Bodenwasservorrat im Winter nicht vollständig aufgefüllt wird
- Rückgang der Sickerwassermengen

Es steht zu befürchten, dass die Vegetation folglich häufiger und in stärkerem Maße in Trockenstresssituationen gelangt und sich damit auch die im Abschnitt 1 genannten Gefahren bezüglich der Austrocknung und Durchwurzelung von mineralischen Dichtungskomponenten erhöhen.

### 3 Beispielsgebiete und Schichtenaufbauten

Unter Berücksichtigung der verschiedenen klimatischen Räume [12] wurden folgende Standorte ausgewählt:

- a) Torgau (klimatischer Raum Trocken- und Randgebiete)
- b) Görlitz (klimatischer Raum feucht-mildes Hügelland)
- c) Fichtelberg (klimatischer Raum hohe Berglagen der Mittelgebirge über 500m)

Bei der Auswahl hat keine Rolle gespielt, ob tatsächlich eine Deponie vorhanden ist.

Hinsichtlich der langjährig mittleren klimatischen Wasserbilanzen (Differenz aus Niederschlag und potenzieller Verdunstung) unterscheiden sich die drei Standorte voneinander (Zeitraum 1961 – 1990):

- Torgau: - 81 mm/a (deutlich negative klimatische Wasserbilanz)
- Görlitz: - 27 mm/a (in etwa ausgeglichene klimatische Wasserbilanz)
- Fichtelberg: + 666 mm/a (stark positive klimatische Wasserbilanz)

Für diese drei Standorte sind fiktive Deponieoberflächensicherungen betrachtet worden, die einem Schichtenaufbau nach Deponieklasse I genügen würden:

- 1,5 m Rekultivierungsschicht
- 0,3 m Drainschicht
- 0,5 m mineralische Dichtschicht

#### **4 Modellparametrisierung**

Für die Untersuchungen verwendet wurde das Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodell BOWAHALD. Das Modell BOWAHALD wurde speziell zur Modellierung der wesentlichen hydrologischen Prozesse, die innerhalb von wasserungesättigten Halden bzw. Deponien einschließlich Oberflächensicherungen ablaufen, entwickelt bzw. weiterentwickelt. Auf eine ausführliche Modellbeschreibung wird im Rahmen des Beitrages verzichtet. Verwiesen sei auf die Programmdokumentation [5] sowie auf Publikationen zum Modellinhalt, zur Modellkalibrierung und zur Modellanwendung [4, 6 – 8].

Das Modell BOWAHALD benötigt morphologische, pedologische und Bewuchsparameter sowie meteorologische Daten.

Im Hinblick auf Stresssituationen für den Bewuchs wurde von einer etwa 1 : 3 geneigten Südböschung ausgegangen. Als Bewuchs wurde ein normal entwickelter Grasbewuchs angenommen, dessen Wurzelraum auf die Rekultivierungsschicht beschränkt ist (kein primäres Hineinwurzeln in die unterhalb liegende Drain- bzw. Dichtschicht).

Die wasserhaushaltlich relevanten Eigenschaften der einzelnen Schichten sind als konform zu TA Siedlungsabfall [29] bzw. Deponieverordnung [3] angenommen worden:

- Rekultivierungsschicht:  $k_f$ -Wert:  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s, nutzbare Feldkapazität: 20 Vol.-% (gut Speicherfähigkeit bezüglich pflanzenverfügbarem Wasser)
- Drainschicht:  $k_f$ -Wert:  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (geforderte dauerhaft gute Drainageeigenschaften)
- mineralische Dichtschicht:  $k_f$ -Wert:  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s (geforderte maximale Wasserdurchlässigkeit)

Für die Untersuchungen zum gegenwärtigen wasserhaushaltlichen Verhalten wurden frei verfügbare meteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes DWD verwendet. Diese sind als Tageswerte im Internet abrufbar ([www/dwd.de](http://www.dwd.de)). Entsprechend Empfehlung der WMO (vgl. [13]) wurde wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Bezugszeitraum 1961 bis 1990 verwendet.

Für die Modellrechnungen für den Zeitraum bis 2050 wurden Ergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg genutzt, die für die drei Standorte mittels des regionalen Klimamodells REMO herunterskaliert worden sind (sog. MPI-Modell). Nach [16] bieten sich für das Herunterskalieren prinzipiell folgende Methoden an:

- statistische Methoden
- dynamisch regionale Klimamodelle
- gekoppelte statistisch-dynamische Modelle

Das MPI-Modell ist in die Gruppe der regionalen dynamischen Modelle einzuordnen. Es ist in das globale Klimamodell eingebettet, allerdings wesentlich feiner gerastert als das globale Klimamodell und nutzt die Ergebnisse des Globalmodells als äußere Randbedingung. Zukünftige Klimaänderungen bedingen Änderungen in den Häufigkeiten von Wetterlagen, die Änderungen im Temperatur- und Feuchteregime mit sich bringen. Mittels Zufallszahlengenerator werden Datenreihen synthetisiert, deren Einzeltage bedingt zufällig bestimmten Wetterlagen zugeordnet werden. Im Ergebnis erhält man Zeitreihen, die sich z.B. im Feuchteregime voneinander unterscheiden können. Für die BOWAHALD-Modellierung wurden drei Zeitreihen (trockener, mittlerer und feuchter Zustand) für das A2-Szenario (vgl. Abschnitt 2) ver-

wendet. Diese beinhalten tägliche Werte für die Größen Temperatur, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Niederschlag des Zeitraums 2001 – 2050.

## 5 Modellergebnisse – Wasserbilanzen

Um Änderungen infolge zukünftiger Klimaänderungen abschätzen zu können, sind zunächst die für den Zeitraum 1961 – 1990 modellierten Wasserhaushaltsgrößen von Interesse. Die wesentlichen Größen beinhaltet die Tabelle 1.

Tabelle 1: Langjährig mittlere Jahresbilanzen der Zeitreihe 1961 - 1990 für die betrachteten Standorte

	P [mm/a]	ETR [mm/a]	RO [mm/a]	RH [mm/a]	RU [mm/a]	DSB [mm/a]
Torgau	596	562	9	23	2	0
Görlitz	721	626	13	76	6	0
Fichtelberg	1229	515	45	641	28	0

- P - Niederschlag (messfehlerkorrigiert)
- ETR - reale Evapotranspiration (beachte: 33 % südexponiert)
- RO - Oberflächenabfluss
- RH - Drainwasserabfluss
- RU - Sickerwassermengen an der Basis der Oberflächensicherung
- DSB - Bodenspeicheränderung

Die Modellwerte zeigen, dass das betrachtete Sicherungssystem nach DK I sehr wohl in der Lage ist, die Restdurchsickerungsmengen wirksam zu begrenzen (den langfristigen Erhalt der Dichtungseigenschaften der mineralischen Dichtschicht vorausgesetzt). Wegen des Fehlens einer weiteren nichtmineralischen Dichtungskomponente (z.B. HDPE-Folie) kann die Restdurchsickerung jedoch nicht gänzlich unterdrückt werden.

Die Tabelle 2 enthält die Änderungen, die sich für die betrachteten Wasserhaushaltsgrößen für den Zeitraum 2001 – 2050 (bezogen auf die Reihe 1961 – 1990, vgl. Tabelle 1) ergeben.

Tabelle 2: Änderungen der langjährig mittlere Jahresbilanzen für den Zeitraum 2001 – 2050 bezogen auf die Reihe 1961 – 1990 für die betrachteten Standorte

	P [mm/a]	ETR [mm/a]	RO [mm/a]	RH [mm/a]	RU [mm/a]	DSB [mm/a]
Torgau	- 26 ... + 70	- 7 ... + 42	- 2 ... + 1	- 16 ... + 25	- 1 ... + 2	0
Görlitz	- 73 ... + 8	- 25 ... + 2	- 3 ... + 2	- 41 ... + 5	- 3 ... 0	0
Fichtelberg	- 24 ... + 86	+ 4 ... + 19	- 5 ... + 10	- 33 ... + 77	0 ... + 5	0

Bedeutung der Symbole → s. Tabelle 1

Die in der Tabelle 2 aufgeführten Modellwerte für die zukünftigen Verdunstungs- und Drainwasserabflussmengen lassen deutliche Unterschiede zum gegenwärtigen wasserhaushaltlichen Verhalten erkennen. Die Werte zeigen keinen Trend; vielmehr können sie sowohl über als auch unter den für den Zeitraum 1961 – 1990 modellierten Werten liegen.

Die Hauptursache für dieses Verhalten ist zweifelsfrei in den Differenzen der Niederschläge zu suchen, die sich für die trockene, mittlere bzw. feuchte Zeitreihe des Zeitraums 2001 – 2050 ergeben (s. Abschnitt 4). Die Abbildung 1 zeigt die Niederschlagsdifferenzen an Hand der Dekadenmittel beispielhaft für den Standort Torgau.

Der für Nordsachsen prognostizierte Trend einer Niederschlagsabnahme findet sich ausschließlich in der trockenen Zeitreihe. Ganz ähnlich verhält es sich mit den Trends für die beiden anderen Standorte (s. Abbildung 2). Dies bedeutet für die in der Tabelle 2 angegebenen Modellprognosewerte, dass die jeweils kleineren Werte, die sich für die trockene Zeitreihe ergeben, plausibler erscheinen.

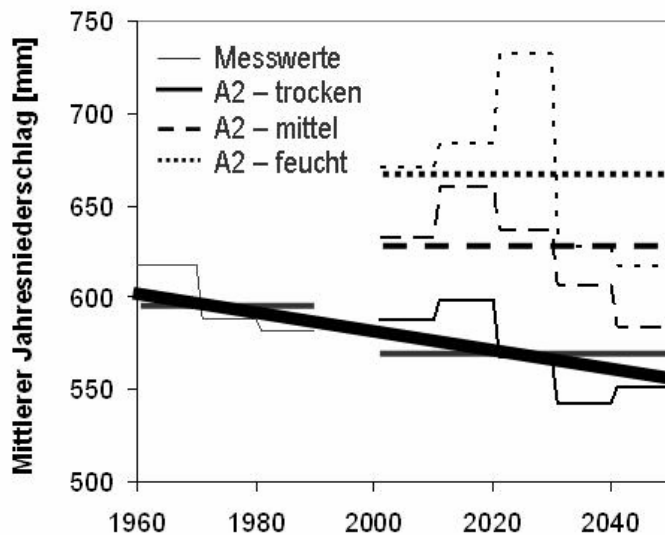


Abb. 1:

Dekaden- und Gesamtmittel des Niederschlages für die Zeiträume 1961 – 90 sowie 2001 – 2050 (Standort Torgau)

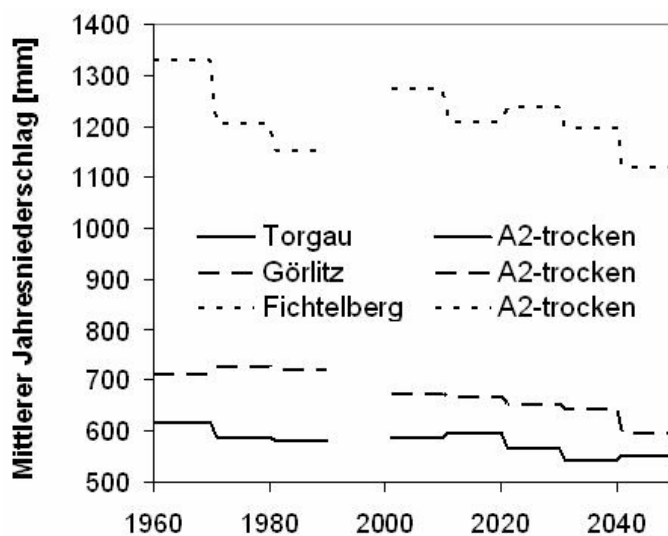


Abb. 2:

Dekadenmittel des Niederschlages der Standorte Torgau, Görlitz und Fichtelberg für die Zeiträume 1961 – 90 sowie 2001 – 2050

## 6 Modellergebnisse – Austrocknung der Rekultivierungsschicht

In der Abbildung 3 sind die Verteilungen der modellierten Bodenfeuchtwerte für die beiden Zustände 1961 – 90 sowie 2021 – 2050 gegenüber gestellt. Die Werte beziehen sich ausschließlich auf die besonders austrocknungsrelevanten Sommermonate Juni bis August.

In der Abbildung 3 sind zwei Bodenfeuchtegrenzwerte besonders hervorgehoben:

- unter 30 Vol.-% nutzbarer Feldkapazität: kritisch bezüglich der Vegetationsentwicklung (dies bedeutet, dass die meisten Bereiche der Rekultivierungsschicht Wassergehalte im Bereich des permanenten Welkepunktes aufweisen), folglich hohe Gefahr für ein Wurzeltiefenwachstum in die Drain- bzw. Dichtschicht hinein

- unter 20 Vol.-% nutzbarer Feldkapazität: sehr kritisch bezüglich der Vegetationsentwicklung (fast die gesamte Rekultivierungsschicht weist Wassergehalte im Bereich des permanenten Welkepunktes auf), folglich sehr hohe Gefahr für ein Wurzeltiefenwachstum in die Drain- bzw. Dichtschicht hinein

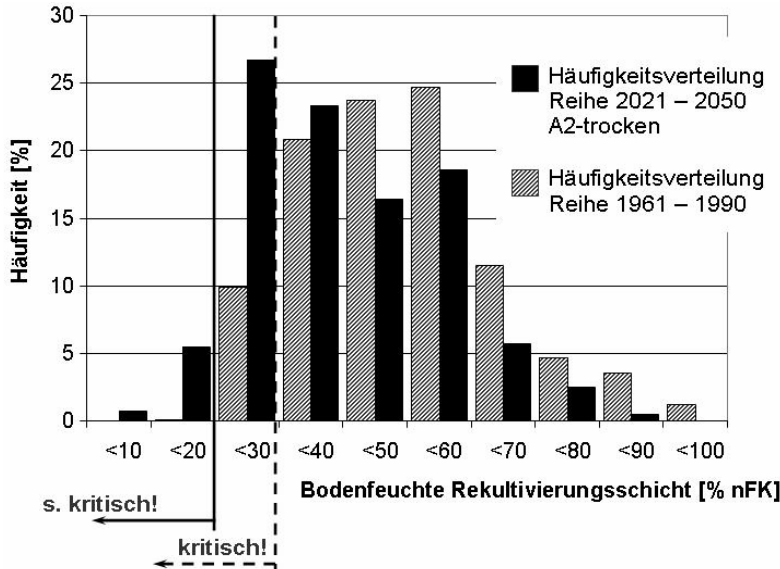


Abb. 3:

Verteilung der Bodenfeuchte für die Rekultivierungsschicht in den Sommermonaten Juni bis August (Standort Torgau), Zeiträume 1961 – 90 sowie 2011 – 2050 (A2-Szenario, trockene Zeitreihe)

Bei o.g. Werten bzw. Wertebereichen handelt es sich um keine willkürlichen Festlegungen, auch wenn die Werte selbst u.U. zu Diskussionen Anlass geben. Unumstritten ist, dass Austrocknungen der Rekultivierungsschicht bis nahe an den permanenten Welkepunkt (hier gewählt: < 20 % über Welkepunkt) für die Pflanzen eine extreme Stresssituation darstellen. Hilfreich ist an dieser Stelle auch ein Vergleich mit transpirativen Entzugsfunktionen, für die es eine Vielzahl von Untersuchungen gibt, die u.a. in [11] und [22] zusammengefasst sind (vgl. Abbildung 4).

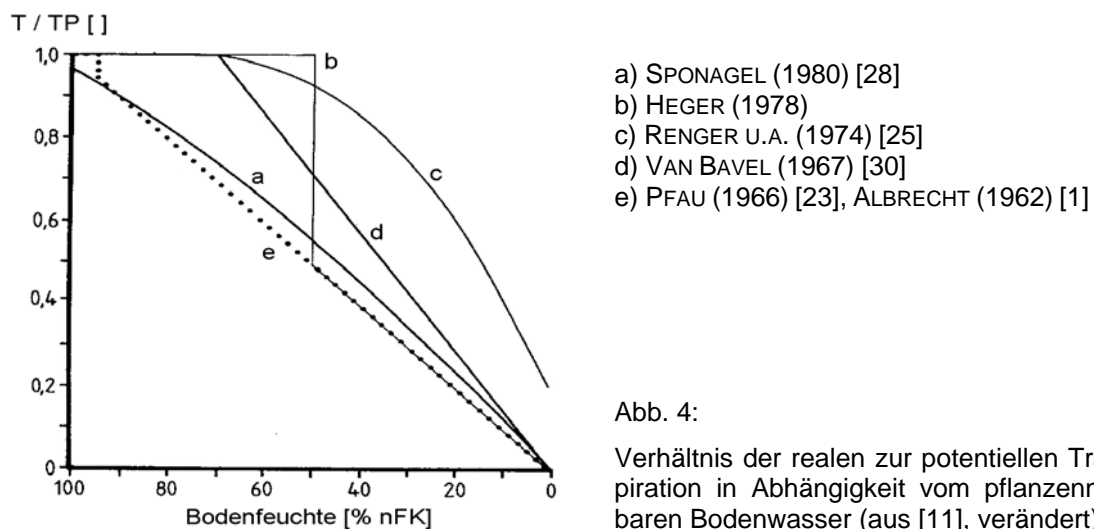


Abb. 4:

Verhältnis der realen zur potentiellen Transpiration in Abhängigkeit vom pflanzennutzbaren Bodenwasser (aus [11], verändert)

So unterschiedlich die Kurven hinsichtlich ihres Verlaufs auch sein mögen, so zeigen sie übereinstimmend, dass die Transpirationsleistung bei Wassergehalten nahe dem permanenten Welkepunktes stark eingeschränkt und folglich der Trockenstress entsprechend hoch ist.

Die in der Abbildung 3 dargestellten Bodenfeuchtwerte lassen für den Zeitraum 2021 – 2050 im Vergleich zur Reihe 1961 – 1990 eine deutliche Zunahme des Auftretens von Bo-

denfeuchtwerten erkennen, die als kritisch bzw. sehr kritisch angesehen werden müssen. In der Abbildung 5 sind die Veränderungen hinsichtlich der Bodenfeuchteverteilung für die Rekultivierungsschicht dargestellt, die sich beim Vergleich der beiden Zeiträume (1961 – 1990 sowie 2021 – 2050) für die drei untersuchten Standorte ergeben.

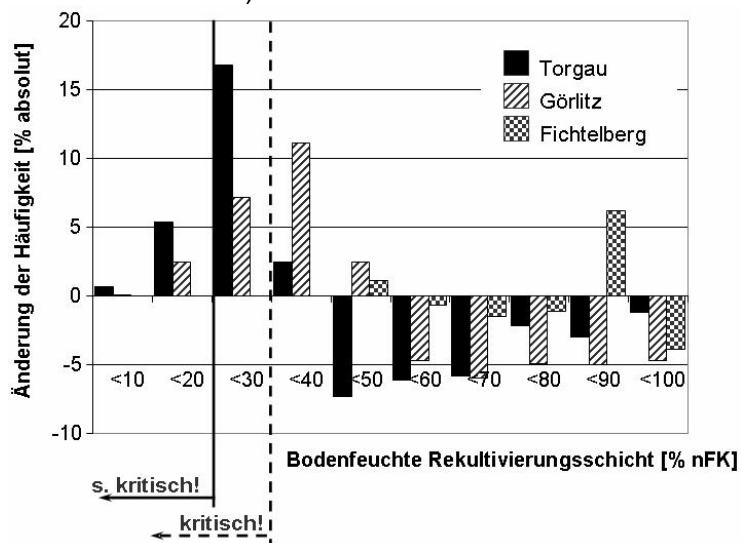


Abb. 5:

Veränderungen der Bodenfeuchteverteilung für die Rekultivierungsschicht in den Sommermonaten Juni bis August (Standorte Torgau, Görlitz und Fichtelberg), Zeiträume 1961 – 90 sowie 2021 – 2050 (A2-Szenario, trockene Zeitreihe)

Für den Standort Görlitz ergibt sich bezüglich der zukünftig zu erwartenden Änderungen der Bodenfeuchteverteilung ein ähnliches Bild wie für den Standort Torgau. Wegen des hohen Wasserdargebots zeigt der Standort Fichtelberg erwartungsgemäß ein weitgehend indifferentes Verhalten.

Um nicht den Eindruck entstehen zu lassen, diese Ergebnisse kämen nur dadurch zustande, weil die trockene Zeitreihe des A2-Szenarios Modellgrundlage gewesen ist, sind gleichartige Untersuchungen für die mittlere und feuchte Zeitreihe durchgeführt worden. Die Abbildung 6 enthält beispielhaft die entsprechenden Ergebnisse für den Standort Torgau. Für den Standort Görlitz ergibt sich ein ganz ähnliches Bild. Der Standort Fichtelberg zeigt wiederum ein indifferentes Bild.

Es fällt auf, dass die Zunahme kritischer bzw. sehr kritischer Bodenfeuchtezustände für die Reihe 2021 – 2050 im Vergleich zur Reihe 1961 – 1990 unabhängig davon modelliert wird, ob die trockene, mittlere oder feuchte Zeitreihe zugrunde gelegt wird. Dieses Modellergebnis ist ein Indiz dafür, dass sich die innerjährliche Niederschlagsverteilung zumindest für die nord- und ostsächsischen Klimaräume Trocken- und Randgebiete sowie feucht-mildes Hügelland hin zu größeren Winter- und kleineren Sommerniederschlägen geändert hat.



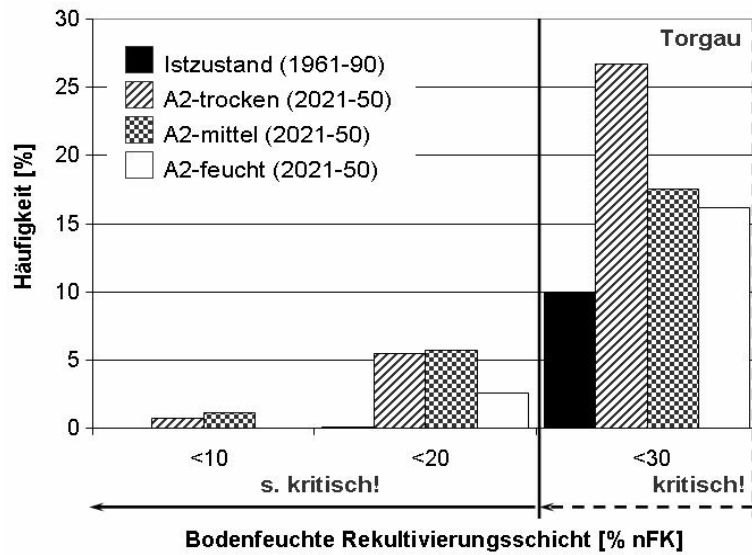


Abb. 6:

Verteilung der Bodenfeuchte für die Rekulivierungsschicht in den Sommermonaten Juni bis August (Standort Torgau), Zeiträume 1961 – 90 sowie 2021 – 2050 (A2-Szenario, trockene, mittlere und feuchte Zeitreihe)

## 7 Schlussfolgerungen

Aus den Modellrechnungen lassen sich eine Reihe von Schlussfolgerungen bezüglich des Langzeitverhaltens von Oberflächensicherungen ableiten, deren Dichtung aus einer rein mineralischen Komponente besteht:

- Änderungen gegenüber dem derzeitigen Zustand betreffen auf der Zeitebene langjähriger Wasserbilanzen vor allem die Größen Niederschlag, Verdunstung und Sickerwasserbildung (hypodermischer Abfluss, Restdurchsickerung).
- Eine Erhöhung der Oberflächenabflussmengen infolge einer künftigen Häufigkeitszunahme von Starkregenereignissen konnte nicht nachgewiesen werden. Hierbei zu beachten ist allerdings, dass die Modellierung lediglich auf der Grundlage von Tageswerten erfolgt ist.
- Spürbare Veränderungen gegenüber dem derzeitigen Zustand betreffen die Austrocknungshäufigkeit und -intensität der Rekultivierungsschicht. Die Vegetation gerät häufiger in Trockenstress. Dieser Effekt wird unabhängig davon modelliert, ob den zukünftigen Klimaszenarien trockene, mittlere oder feuchte Verhältnisse zugrunde gelegt werden. Damit erhöhen sich gleichzeitig die Gefahren für unterliegende Schichten, insbesondere für mineralische Dichtungselemente (Trockenrissbildung, Durchwurzelung).
- Auf dem Istzustand beruhende Aussagen zum Langzeitverhalten von Oberflächensicherungen gehören folglich auf den Prüfstand.

Zu beachten sind allerdings viele Unsicherheiten. Diese beginnen mit den Unsicherheiten bezüglich der globalen Entwicklung der Emissionen von CO<sub>2</sub> und weiteren Treibhausgasen vor allem im Hinblick auf die zeitlich-räumlichen Veränderungen anthropogener Einträge sowie noch weitgehend unerforschter Rückkopplungs-/Verstärkungseffekte z.B. im Zuge der CO<sub>2</sub>- und Methanfreisetzung beim Auftauen von Permafrostböden [15].

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Modellunsicherheit bisheriger globaler Klimamodelle vor allem in Bezug auf den Wärmehaushalt der Weltmeere sowie die Rolle der Wolken. Hinzu kommen Unsicherheiten beim Herunterskalieren globaler Klimamodelle auf kleinere regionale Einheiten.

Die Kette der Unsicherheiten setzt sich mit den Wasserhaushaltsmodellen fort. Häufig werden konzeptionelle, zum Teil empirische Ansätze verwendet, die lediglich an Daten der Vergangenheit kalibriert und validiert sind. Auch die in den Modelldatenbanken hinterlegten Parameter sind i.d.R. starr und nur selten von äußeren Einflussgrößen (Temperatur, Niederschlag, ...) abhängig.

So müssen auch im Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen eine ganze Reihe von Fragen offen bleiben:

- Wie gestalten sich die Verhältnisse in anderen Sicherungssystemen (einfache Abdeckungen, Kapillarsperren ...)?
- Welche Abdeck- und Abdichtungsmaterialien sind in Zukunft noch geeignet?
- Welche Pflanzen sind an die sich ändernden Bedingungen angepasst?
- In wie weit sind die Ergebnisse auf andere Teile Sachsens, Deutschlands und Mitteleuropas übertragbar und damit verallgemeinerbar?
- Kann in Zukunft unter bestimmten Bedingungen (abhängig vom Gefährdungspotenzial) in Gebieten mit höherem Wasserumsatz auf Dichtungskomponenten verzichtet werden?

- Welche Ergebnisse ergeben sich für andere globale Entwicklungs- und damit Klimaszenarien (A1, B1, B2)?

### Literatur

- [1] Albrecht, F. (1962): Die Berechnung der natürlichen Verdunstung (Evapotranspiration) der Erdoberfläche aus klimatologischen Daten. Offenbach: Berichte des Deutschen Wetterdienstes 11 (83), S. 3 –19.
- [2] Berger, K. (1998): Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushaltes von Deponien für deutsche Verhältnisse. Schlussbericht. Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde. Herausgeber: Umweltbundesamt Berlin.
- [3] DepV Deponieverordnung (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 24.07.2002, zuletzt geändert am 26.11.2002.
- [4] Dunger, V. (2001): Modellierung des Wasserhaushaltes von Systemen zur Oberflächensicherung von Deponien mit dem Deponie- und Wasserhaushaltsmodell BOWAHALD. In: Egloffstein, Burkhardt, Czurda: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2001. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Heft 122, Erich Schmidt Verlag Berlin, S. 179 – 212.
- [5] Dunger, V. (2002): Dokumentation des Modells BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von wasserungesättigten Deponien/Halden und deren Sicherungssystemen. Nutzerhandbuch, Version 04/2002.
- [6] Dunger, V., J. Schlykow, C. Loeber und U. Barthel (2004): Alternative Deponiesicherung durch wasserhaushaltsaktive Abdeckung am Beispiel der Deponie Deutzen. Beitragsband, XV. Sächsisches Altlastenkolloquium, 28./29.10.2004 in Dresden, 11/1 – 11/14.
- [7] Dunger, V. (2006): Modeling of a landfill water balance system using the Model BOWAHALD. In: Wissenschaftliche Berichte Landfill Workshop Zittau – Liberec, Heft 86/2006, S. 59 – 80.
- [8] Dunger, V. und M. Schönau (2006): Nutzung von Lysimetermessungen im System der Oberflächensicherung der Kalirückstandshalde Bleicherode (Südharz) zur Modellkalibrierung. In: Wissenschaftliche Berichte Landfill Workshop Zittau – Liberec, Heft 90/2006.
- [9] EEA (2004). Impacts of Europe's changing climate, An indicator-based assessment, Rep. No. 2. European Environment Agency (EEA), Luxembourg.
- [10] Enke, W. (2001): Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. – Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.
- [11] Ernstberger, H. (1987): Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Wasserbilanz: Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration von unterschiedlich genutzten Standorten zur Ermittlung der Wasserbilanz von Einzugsgebieten in unteren Mittelgebirgslagen Hessens. Kirchzarten: Verl. Beiträge zur Hydrologie, XVI, 189 S.
- [12] Goldschmidt, J. (1950): Das Klima von Sachsen, Akademie Verlag Berlin.
- [13] HAD Hydrologischer Atlas von Deutschland (2000): Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn
- [14] Heger, K. (1978): Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration über unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen. Mitt. dt. bodenkdl. Ges.; 26: 5-20; Göttingen.

- [15] IPCC (2001): Climate Change 2001. The IPCC Third Assessment Report. Volumes I (Science), II (Impacts and Adaptation) and III (Mitigation Strategies). Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- [16] KLIWA Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte, Heft 9, ISBN 3-88251-305-5.
- [17] Lahmer, W. (2004): Hydrologische Auswirkungen sich ändernder Klimabedingungen im Land Brandenburg. – GWF Wasser-Abwasser 145, Nr. 6, Oldenbourg Industrieverlag München, ISSN 0016-3651, Juni 2004: S. 400–412.
- [18] Lahmer, W. (2005): Klimaänderung – Mögliche Folgen auf hydrologische Prozesse im Land Brandenburg. – UMWELTPanorama, Heft 7, 2005, Berliner Umweltagentur, Berlin, ISSN 1612-5061: S. 5–7.
- [19] Melchior, S. (1996): Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung - Ergebnisse von mehrjährigen In-situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Altdeponie Hamburg-Georgswerder - In.: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung - Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung. 3. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30. Mai 1996 in Bingen-Büdesheim/Rhein. Selbstverlag, Mainz.
- [20] Melchior, S. (1997): In-situ studies on the performance of landfill caps. Proceedings of the 1997 International Technology Conference, Feb. 9-12, 1997, St. Petersburg, FL, U.S.A., U.S. Department of Energy & U.S. Environmental Protection.
- [21] Melchoir, S. und B. Vielhaber (2002): Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen mit und ohne Entwässerungsschicht. In: Ramke, H.-G. u.a.: Tagungsband zum Status-Workshop "Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen" vom 31.01. bis 01.02.2002 in Höxter, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltgeowissenschaften. Band 3, S. 213 – 223.
- [22] Minhas, B.S., K.S. Parikh & T.N. Srinivasan (1974): Towards the structure of a production function for wheat yield with dated inputs of irrigation water. Water Resour. Res. (6), pp. 383 – 393.
- [23] Pfau, R. (1966): Ein Beitrag zur Frage des Wassergehaltes und der Beregnungsbedürftigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden im Raume der EWG. Offenbach: Meteor. Rdsch., 19, S. 33 – 46.
- [24] Ramke, H.-G., S. Melchior, U. Maier-Harth, E. Gartung, K.-J. Witt, G. Heilbrock, und K. Bohne (2002): Ergebnisse des Status-Workshops "Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen". In: Ramke, H.-G. u.a.: Tagungsband zum Status-Workshop "Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen" vom 31.01. bis 01.02.2002 in Höxter, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltgeowissenschaften. Band 3, S. 9 – 52.
- [25] Renger, M., O. Strebel und W. Giesel (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung H. 15.
- [26] Scherzer, J., G. Wriedt, D. Sames, M. Müller, F. Hesser, K. Jasper und H. Pöhler (2006): KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe - Teil 3: Vorstudie zur Simulation der Stoffflüsse von Stickstoff und Kohlenstoff im Parthe-Einzugsgebiet. Abschlussbericht KliWEP Teil 3 (Vorstudie) für das Sächsische

---

Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Forschungs- und Entwicklungsvorhabens Nr. 13-8802.3529/39.

- [27] Schroeder, P. R., T. S. Dozier, P. A. Zappi, B. M. McEnroe, J. W. Sjoström & R. L. Peyton (1994): The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3, EPA/600/R-94/168b, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington D.C.
- [28] Sponagel, H. (1980): Zur Bestimmung der realen Evapotranspiration landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Geologisches Jahrbuch (Reihe F) 9, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, S. 3 – 87.
- [29] TASI Technische Anleitung Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14.05.1993.
- [30] Van Bavel, C. H. M. (1967): Changes in Canopy Resistance to Water Loss From Alfalfa Induced by Soil Water Depletion. Agricultural Meteorology, Vol. 4, No. 3, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands, May 1967, pp. 165 – 176.
- [31] Wagner J.-F. und C. Schnatmeyer (2002): Großversuche der Universität Trier mit einer mineralischen Abdichtungsschicht. In: Ramke, H.-G. u.a.: Tagungsband zum Status-Workshop "Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen" vom 31.01. bis 01.02.2002 in Höxter, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltgeowissenschaften. Band 3, S. 91 – 105.
- [32] Zeibisch M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Hasse, U. Fritsch, U. und W. Cramer (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht 20141253, UBA-FB 000844.