Europäische Union. Europäischer Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro regionální rozvoj.

SN CZ
Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014 – 2020

Skládkový workshop Liberec-Žitava 2016

Skládka jako poslední možnost

Aktuální otázky
vyplývající z hierarchie nakládání s odpady

3.-4. listopadu 2016

Deponieworkshop Liberec-Zittau 2016

Deponie als letzte Möglichkeit

Aktuelle Fragen,
die sich aus der Abfallhierarchie ergeben

03.-04. November 2016

12. Skládkový workshop Liberec-Žitava

Skládka jako poslední možnost

Aktuální otázky vyplývající z hierarchie nakládání s odpady

12. Deponieworkshop Liberec-Zittau

Deponie als letzte Möglichkeit

Aktuelle Fragen, die sich aus der Abfallhierarchie ergeben

Liberec 2016

Podpora

Tato akce je podpořena z prostředků Evropské unie prostřednictvím Programu spolupráce Česká republika-Svobodný stát Sasko 2014-2020 – číslo projektu 100246598.

Förderung

Diese Veranstaltung wird durch das SN-CZ 2014-2020 - Programm der EU zur Förderung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit zwischen dem Freistaat Sachsen und der Tschechischen Republik gefördert – Projektnr.: 100246598.

odborný editor: Lukáš Zedek
technický editor: Kamil Nešetřil
překlady provedl: Sven Dietrich
Sborník byl připraven s využitím typografického systému LaTeX.

Obsah

Účinnost evropských předpisů **7**

Havelka, P.
Odpadové hospodářství v ČR ve světle vyhlášené evropské strategie 9

Stock, U.; Bittrich, S.
Požadavky na zpracování odpadů, především diskuse o spalování odpadů proti mechanicko-biologickému zpracování odpadů z německého pohledu 11

Hráská, D.
Způsoby energetického využívání odpadů 25

Witkowski, W.; Beyer, G.
Plánování, stavba a zprovoznění zařízení pro zpracování odpadu s kompostárnou v Marszowě (Polsko) 31

Využití stavebních materiálů pro stavbu skládek **33**

Egloffstein T.; Sehrbrock, U.
Průkazní zkoušky přírodních, minerálních stavebních materiálů – Požadavky a jejich praktické prosazování v Německu 35

Sandig, F.; Al-Akel, S.; Thiele, R.; Engel, J.
Aplikace technických rekultivačních substrátů - možnosti a hranice 39

Hrabčák, M.
Štvrtý rozmer skládky 55

Schneider, P.; Müller, M.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schrickel, M.; Fabian, H.
Možnosti alternativní izolace skládky pomocí sekundárních minerálních stavebních hmot v tuzemsku a v zahraniční 63

Aplikovaná informatika a měřící technika **77**

Dunger, V.; Müller, M.; Winter, C.; Winter, J.
Hydrologie zajištění povrchu v Sasku a změny klimatu 79

Datel, J. V.
Zásady geotechnického a environmentálního monitoringu odkališť 93

Weber K.
Automatizovaný monitoring skládky během fáze následné péče 111

Kast, G.
Měření objemového obsahu vody při využití kontinuálních a diskontinuálních metod měření v hydrologické vrstvě skládky v Bavorsku 117

Techniky následné péče o skládky **119**

Drews, R.
Nákladově efektivní a nízkoúdržbové systémy odvodnění povrchů skládek s přihlédnutím ke specifickým požadavkům hydrologické vrstvy. 121

Beck-Broichsitter, S.; Fleige, H.; Horner, R.
Dlouhodobá účinnost dočasného minerálního zakrytí povrchu 143

Steinbrecht, D.; Rickert, I.
Likvidace a energetické vvyužívání skládkových plynů 153

Nešetřil, K.
Informační systém pro monitoring skládek 163

Aplikovaná geologie a další témata **165**

Zeman, J.
Geochemie složitých interakcí odpadů a infiltračních vod na skládkách 167

Hrabal, J.; Kovářová, K.; Ambrožová, V.
Čištění skládkových výluhů kombinovanou membránovou technologií s použitím biologických systémů předčištění 179

Gerth, A.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schneider, P.
Následné využití lokality skládky Gò Cát v Ho Či Minově městě 187

Clemenz, P.; Weber, I.; Dedek, M.; Pabel, R.; Schoenherr, J.I.; Dunger, V.; Schulz, R.; Engel, J.
Vývoj environmentálních inženýrských postupů pro udržitelné využití půd 199

Pelantová, V.
Problematika černých skládek 207

Inhaltsverzeichnis

Auswirkung von EU-Richtlinien **7**

Havelka, P.
Abfallwirtschaft in der Tschechischen Republik angesichts der erklärten europäischen Strategie 9

Stock, U.; Bittrich, S.
Anforderungen an die Abfallbehandlung, insbesondere die Diskussion um Abfallverbrennung kontra mechanisch-biologische Abfallbehandlung aus deutscher Sicht 11

Hráská, D.
Möglichkeiten einer energetischen Abfallnutzung 25

Witkowski, W.; Beyer, G.
Planung, Bau und Inbetriebnahme von Abfall-aufbereitungsanlagen und die Abfallanlage mit Kompostierung in Marszow (Polen) 31

Verwendung von Baustoffen im Deponiebau **33**

Egloffstein T.; Sehrbrock, U.
Eignungsnachweise nach BQS für natürliche mineralische Baustoffe – Anforderungen und praktische Umsetzung 35

Sandig, F.; Al-Akel, S.; Thiele, R.; Engel, J.
Anwendungen für technische Rekultivierungs-Substrate – Möglichkeiten und Grenzen 39

Hrabčák, M.
Die vierte Dimension einer Deponie 55

Schneider, P.; Müller, M.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schrickel, M.; Fabian, H.
Möglichkeiten alternativer Deponieabdichtungen mit mineralischen Ersatzbaustoffen im In- und Ausland 63

Angewandte Informatik und Umwelt-Messtechnik **77**

Dunger, V.; Müller, M.; Winter, C.; Winter, J.
Der Wasserhaushalt von Oberflächensicherungen Sachsens im Klimawandel 79

Datel, J. V.
Prinzipien des geotechnischen Monitorings und Umweltmonitorings von Klärteichen . 93

Weber K.
Automatisierte Deponieüberwachung in der Nachsorgephase 111

Kast, G.
Zur Messung des volumetrischen Bodenwassergehaltes bei Einsatz von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Mess-methoden in einer Wasserhaushaltsschicht einer Deponie in Bayern 117

Umwelttechnik bei der Nachsorge von Deponien **119**

Drews, R.
Kostengünstige und nachsorgearme Oberflächenentwässerungs-einrichtungen auf Deponien bei Berücksichtigung der besonderen Anforderungen einer Wasserhaushaltsschicht 121

Beck-Broichsitter, S.; Fleige, H.; Horner, R.
Langzeitwirkung einer temporären mineralischen Oberflächenabdichtung 143

Steinbrecht, D.; Rickert, I.
Entsorgung von und Energiegewinnung aus Deponiegasen 153

Nešetřil, K.
Informationssystem für das Monitorring einer Deponie 163

Angewandte Geologie, Sonstiges **165**

Zeman, J.
Geochemie komplexer Wechselwirkungen des Abfalls und des Sickerwassers auf Deponien 167

Hrabal, J.; Kovářová, K.; Ambrožová, V.
Reinigung des Deponiesickerwassers mit Hilfe einer kombinierten membranengestützten Technologie unter Anwendung biologischer Systeme der Vorbehandlung 179

Gerth, A.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schneider, P.
Nachnutzung des Deponiestandortes Gò Cát in Ho Chi Minh City 187

Clemenz, P.; Weber, I.; Dedek, M.; Pabel, R.; Schoenherr, J.I.; Dunger, V.; Schulz, R.; Engel, J.
Entwicklung umweltingenieurtechnischer Verfahren zur nachhaltigen Bodenressourcennutzung 199

Pelantová, V.
Problematik der illegalen Abfallablagerung 207

Aplikovaná informatika a měřící technika

Angewandte Informatik und Umwelt-Messtechnik

Hydrologie zajištění povrchu v Sasku a změny klimatu

Der Wasserhaushalt von Oberflächensicherungen Sachsens im Klimawandel

Volkmar Dunger[1], Mario Müller[2], Christian Winter[1], Josefin Winter[1]

Abstrakt

Pokračování trendu klimatických změn v minulosti se bude v rozsáhlých částech Saska vyznačovat snížením ročních srážek a zvýšením roční teploty. Pro rekultivační, případně hydrologické vrstvy skládek, jejichž hlavní funkcí je vytvářet příznivé podmínky pro porost za účelem zvýšení výparu za pomoci rostlin a tím snížení množství průsaku, tedy lze v důsledku toho očekávat zhoršení účinnosti jako ochrany.

Za pomoci modelů hydrologie skládek HELP 3.95D a BOWAHALD byly zkoumány hydrologické vlastnosti zajištění povrchů na lokalitách Gröditz, Perno (Pirna) a Oederan, reprezentující různá typická přírodní a klimatická území Saska a to za různých rámcových podmínek z hlediska morfologie a porostu. Porovnávány byly výsledky tří časových období: za minulost (referenční období DWD (německá meteorologická služba) 1981 - 2010), pro blízkou budoucnost 2021 - 2050 a pro vzdálenou budoucnost 2071 - 2100. Pro modelové výpočty byla použita prognostická data globálního klimatického modelu ECHAM5 Ústavu Maxe Plancka v Hamburku, která byla upravena pro období 1961 až 2100 pro menší území za pomoci regionálního klimatického modelu WETTREG2010. Základem je emisní scénář A1B.

Pro tato tři období byly sledovány hydrologické bilance, četnost vyschnutí rekultivační, případně hydrologické vrstvy, které lze považovat za ukazatel stresu v důsledku nedostatku vody a které mají rozhodující vliv na vývoj porostu a vytváření povrchového i drenážního odtoku. Výsledky modelů ukazují pro budoucí klimatické podmínky velký rozsah dramatického zhoršení hydrologické situace mimo jiné v důsledku silného nárůstu četnosti stresu z nedostatku vody, především na jižně exponovaných polohách, ohrožených vysýcháním. Hydrologická situace se přitom nejprve téměř nezmění (období blízké budoucnosti 2021 - 2050 v porovnání 1981 - 2010). Oproti tomu lze pro období vzdálené budoucnosti (2071 - 2100) očekávat dramatické změny.

Modelové výpočty jasně ukazují, že porost, především tehdy, pokud se jedná o křoviny nebo stromy, musí být z hlediska druhů rostlin uzpůsoben sušším klimatickým podmínkám, tzn. ve zvýšené míře by jako porost skládek měly být vybírány rostliny, rezistentní vůči suchu. Stejně tak by proti vyššímu vysýchání rekultivačních, případně hydrologických vrstev mohla v budoucnu pomoci větší mocnost jednotlivých vrstev.

[1]TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Gustav-Zeuner-Straße 12, D-09596 Freiberg; dungerv@geo.tu-freiberg.de

[2]DBI-EWI GmbH, Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg; m.mueller@dbi-ewi.de

Kurzfassung

In Fortführung der Trends der Vergangenheit wird der zukünftig zu erwartende Klimawandel für weite Gebiete Sachsens durch eine Verringerung des Jahresniederschlags und durch eine Erhöhung der Jahrestemperatur gekennzeichnet sein. Für Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten von Deponien, die als eine der Hauptfunktion dem Bewuchs gute Bedingungen bieten sollen, um die Verdunstung durch Pflanzen zu erhöhen und damit die Menge an Sickerwasser zu reduzieren, ist folgerichtig eine Verschlechterung der Schutzwirkung zu erwarten.

Mit Hilfe der Deponiewasserhaushaltsmodelle HELP 3.95D und BOWAHALD ist das wasserhaushaltliche Verhalten von Oberflächensicherungen für die Standorte Gröditz, Pirna und Oederan, die unterschiedliche typische Natur- und Klimaräume Sachsens repräsentieren, für verschiedene Randbedingungen hinsichtlich Morphologie und Bewuchs untersucht worden. Gegenüber gestellt werden die Ergebnisse für drei Zeitscheiben: für die Vergangenheit (DWD-Referenzperiode 1981-2010), für den zukunftsnahen Zeitraum 2021 – 2050 sowie für den zukunftsfernen Zeitraum 2071 – 2100. Für die Modellrechnungen genutzt wurden Prognosedaten des globalen Klimamodells ECHAM5 des Max-Planck-Instituts Hamburg, die unter Zuhilfenahme des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für den Zeitraum 1961 bis 2100 auf kleinere Gebiete herunterskaliert worden ist. Grundlage ist das Emissionsszenario A1B, das als ein moderates Szenario angesehen werden kann.

Für die drei Zeitscheiben betrachtet werden die Wasserhaushaltsbilanzen sowie die Austrocknungshäufigkeiten der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht, die ein Anzeiger für Trockenstress angesehen werden können und folglich maßgeblichen Einfluss auf die Bewuchsentwicklung haben. Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen im großen Ausmaß eine drastische Verschlechterung der wasserhaushaltlichen Situation u. a. durch einen starken Anstieg der Häufigkeit des Trockenstresses für zukünftige Klimaverhältnisse, selbst für nur durchschnittlich austrocknungsgefährdete Westböschungen. Dabei ändert sich die wasserhaushaltliche Situation zunächst kaum (zukunftsnaher Zeitraum 2021 – 2050 vs. 1981 – 2010). Dagegen sind für den zukunftsfernen Zeitraum (2071 – 2100) drastische Veränderungen zu erwarten.

Die Modellrechnungen machen deutlich, dass der Bewuchs, insbesondere dann, wenn es sich um Büsche oder Bäume handelt, hinsichtlich der Pflanzenarten an die trockener werdenden Klimabedingungen angepasst sein muss, d. h. es sollten in zunehmendem Maße trockenstressresistente Pflanzen als Deponiebewuchs gewählt werden. Auch durch größere Schichtmächtigkeiten könnte in Zukunft einer verstärkten Austrocknung von Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten entgegen gewirkt werden.

1 Der Klimawandel in Sachsen

Die Existenz eines vorrangig anthropogen hervorgerufenen Klimawandels wird von den meisten Klimaforschern seit dem dritten IPCC-Bericht [1] anerkannt. Hiernach werden sich die bereits im vergangenen Jahrhundert beobachteten klimatischen Veränderungen in Zukunft verstärken. Global ist bis 2100 eine Erwärmung zwischen 1,5 °C und etwa 4 °C prognostiziert [2]. Die großen Prognoseunsicherheiten ergeben sich vor allem aus den Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Treibhausgasemissionen und aus den Unsicherheiten, die beim Herunterskalieren der globalen Klimamodelle auf kleine regionale Einheiten, wie z. B. Deponien vorhanden sind [3]. In Bezug auf die Treibhausgasemissionen geht man gegenwärtig von vier Szenarien aus [1]:

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

Aus dem Verschnitt der o. g. Szenarien ergeben sich neue Szenarien. Derzeit werden zwei Szenarien favorisiert: das Szenario A2 als pessimistisches, d. h. den Klimawandel deutlich beschleunigendes Szenario und das Szenario A1B, das ein eher moderates Szenario darstellt.

Für Sachsen kann in Bezug auf den Niederschlag für Sachsen von abnehmenden Niederschlägen insbesondere im Frühling und Sommer bei einer gleichzeitigen Häufung von extremen Ereignissen (insbesondere lokalen sommerlichen Starkniederschlägen) ausgegangen werden [4], [5]. Damit setzt sich der bereits seit den 1950-er Jahren insbesondere in Nord- und Ostsachsen beobachtete Trend zu geringeren Niederschlägen fort.

2 Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf Oberflächensicherungen von Deponien

Die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt können sich in recht vielfältiger Art und Weise gestalten (s. u. a. [6], [7], [8] und [9]). In Bezug auf das wasserhaushaltliche Verhalten von Deponie-Oberflächensicherungen sind folgende Auswirkungen relevant:

- geringere Wasserzwischenspeicherung in Form von Schnee,
- Veränderungen bezüglich der schnellen Abflusskomponenten Oberflächenabfluss und Drainwasserabfluss,
- Zunahme der potenziellen (entsprechend der atmosphärischen Bedingungen maximalen) Verdunstung und folglich eine Abnahme der Bodenfeuchte vor allem im hydrologischen Sommerhalbjahr sowie
- Rückgang der Sickerwassermengen.

Insbesondere für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten, die im Zusammenspiel mit dem Bewuchs den Wasserhaushalt einer Oberflächensicherung im Hinblick auf die Oberflächenabflussbildung, die Verdunstung und die Sickerwasserzutrittsmengen zu unterhalb liegenden Schichten maßgeblich beeinflussen, muss unter dem Blickwinkel des Klimawandels die Frage erlaubt sein, ob diese ihre Funktionen auf lange Sicht erfüllen können.

Als wichtige Funktionen, die vor allem den Schutz der darunterliegenden Systemkomponenten (i. d. R. Entwässerungskomponente(n) und Dichtungskomponente(n)) betreffen, sind vor allem zu nennen: die weitestgehende Vermeidung einer Durchwurzelung der Entwässerungsschicht, der Schutz der Abdichtungskomponenten vor Durchwurzelung, vor Frosteinwirkung

und vor Austrocknung sowie die Vermeidung der hydraulischen Überlastung von Kapillarsperren [10], [11], [12], [13] und [14].

Der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht kommt folglich eine besondere wasserhaushaltliche Bedeutung zu. Um insbesondere die Austrocknungsgefährdung darunter liegender Schichten möglichst gering zu halten, gibt es eine Vielzahl möglicher Maßnahmen [15]:

- ausreichende Dimensionierung der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht, so dass diese in den unteren Schichten ganzjährig hohe Wassergehalte aufweist und der Bewuchs in Trockenperioden nicht in Stress gerät,
- damit im Zusammenhang stehend hinsichtlich ausreichend hoher nutzbarer Feldkapazitäten und Luftkapazitäten der zum Aufbau der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht genutzten Substrate sowie
- Realisierung eines an die Standortverhältnisse und die Mächtigkeit der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht angepassten Bewuchses.

Die genannten Eigenschaften der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht sollen über lange Zeiträume (i. d. R. mehrere Jahrzehnte, ggf. ein Jahrhundert lang) erhalten bleiben. Gegenwärtige Planungen sollten diesen Gesichtspunkt berücksichtigen. Zur Quantifizierung des Austrocknungsverhaltens der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht stehen dabei Deponiewasserhaushaltsmodelle wie z. B. HELP [16], [17] und [18] bzw. BOWAHALD [19] und [20] zur Verfügung.

Die Modellierung der Bodenfeuchteentwicklung in der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht während sommerlicher Trockenperioden gestattet dabei eine Abschätzung, in wie weit die Vegetation in Stresssituationen gelangt und wie groß damit die Gefahr ist, dass die Pflanzenwurzeln auf der Suche nach Wasser die Wasservorräte unterhalb gelegener Schichten erschließen.

Will man Trockenstresssituationen charakterisieren und quantifizieren, so sollte man zunächst einmal Grenzwerte festlegen. Nach [21] können Bodenfeuchtewerte über 30 % nFK als ausreichend für eine gute Bewuchsentwicklung angesehen werden (Abbildung 1). Trockenstress spielt bei Bodenfeuchtewerten unterhalb von 30 % nFK eine zunehmende Rolle. Bei Wassergehalten unter 10 % nFK kann von akutem Trockenstress ausgegangen werden. Solch geringe Bodenfeuchtewerte sollten vor allem für höheren Bewuchs (Bäume, Sträucher) nicht oder nur äußerst selten auftreten.

Methodisch kann folglich so vorgegangen werden, dass die für die Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht modellierten Häufigkeiten des Unterschreitens kritischer und sehr kritischer Bodenfeuchtewerte statistisch analysiert werden. Die Häufigkeitsstatistik stellt eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Austrocknungssituation dar und ist neben der Windwurfgefährdung ein wesentliches Kriterium, um Empfehlungen bezüglich eines auf lange Sicht optimalen Bewuchses zu geben.

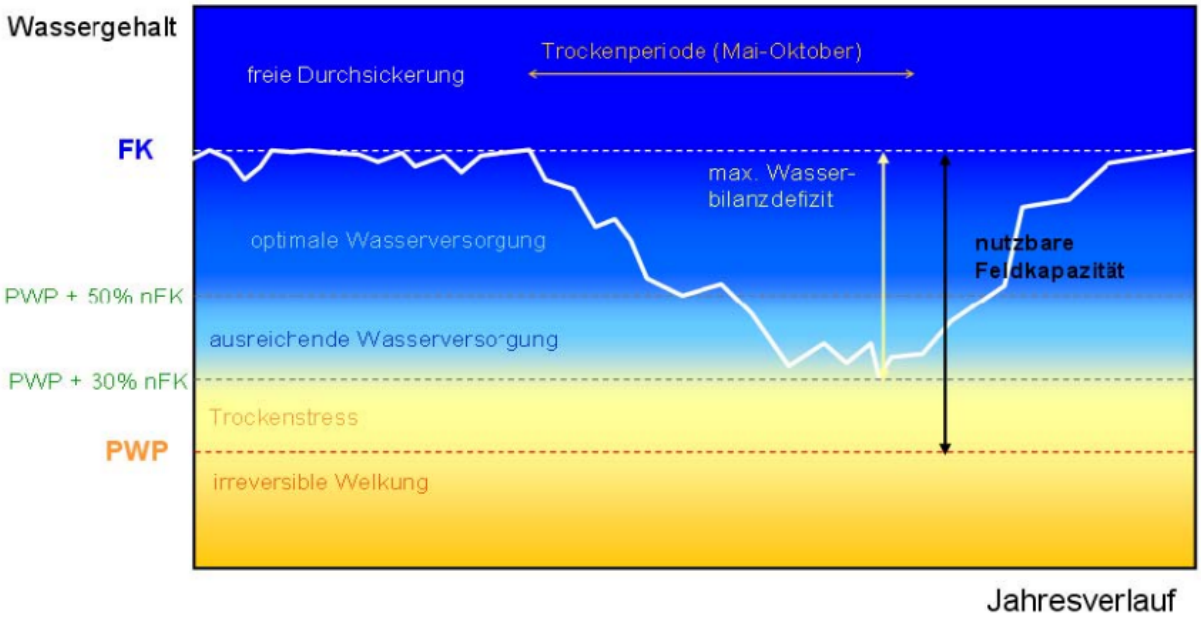

Abbildung 1: Grad der Wasserversorgung mit Bezug zum Pflanzenwachstum (aus [21])

Im Zuge des Klimawandels steht zu befürchten, dass der Bewuchs häufiger und in stärkerem Maße in Trockenstresssituationen gelangt und sich damit auch die Gefahren bezüglich der Austrocknung und Durchwurzelung von Entwässerungs- bzw. mineralischen Dichtungskomponenten erhöhen. Damit würden auch die Werte der auf Basis der aktuellen Klimadaten berechneten Wasserhaushaltsgrößen, vor allem die Restdurchsickerungsmengen, aber auch Oberflächenabflüsse und realen Verdunstungen nicht stimmen.

3 Auswahl und Charakteristik der Untersuchungsstandorte

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sollten möglichst unterschiedliche Naturräume Sachsens, die sich auch aus klimatisch voneinander unterscheiden, abdecken. Ferner sollten die Naturräume durch eine weite Verbreitung charakterisiert sein. Aus diesem Grund wurden die folgenden drei Naturräume ausgewählt, für die jeweils eine Klimastation des Deutschen Wetterdienstes DWD als repräsentativ angesehen wird:

- Elbe-Mulde-Tiefland (typisch für Nordsachsen an der Grenze zu Brandenburg): Station Gröditz (93 m ü. NN),
- Elbtal und Sächsisches Hügelland: Station Pirna östlich von Dresden (123 m ü. NN) und
- Erzgebirgsvorland: Station Oederan zwischen Freiberg und Chemnitz (383 m ü. NN).

Recht ähnliche Klimaräume finden sich auch in Tschechien. Diese können insgesamt gesehen auch für Tschechien als weit verbreitet angesehen werden.

Für die Untersuchungen nicht von Bedeutung war, ob es an den genannten drei Orten tatsächlich Deponien gibt oder nicht.

In der Tabelle 1 sind für die untersuchten Standorte weitere Kennzeichen, die als relevant für das wasserhaushaltliche Verhalten angesehen werden können, aufgeführt.

Tabelle 1: Klimatisch relevante Eigenschaften der betrachteten Standorte

	Gröditz	Pirna	Oederan
Jahresmitteltemperatur [°C]:			
1981 – 2010 (Klimamodell, validierter Messzeitraum)	9,0	9,2	9,3
2021 – 2040 (Klimamodell, zukunftsnaher Zeitraum)	10,2	10,5	9,5
2071 – 2100 (Klimamodell, zukunftsferner Zeitraum)	12,2	12,6	11,7
Langjährig mittlerer Niederschlag (unkorrigiert) [mm]:			
1981 – 2010 (Klimamodell, validierter Messzeitraum)	560	620	826
2021 – 2040 (Klimamodell, zukunftsnaher Zeitraum)	568	633	831
2071 – 2100 (Klimamodell, zukunftsferner Zeitraum)	521	580	744
Klimatische Wasserbilanz [mm]			
1961 – 1990 (Berechnung auf Basis der BOWAHALD-Modellierung)	- 93	- 39	+185
2021 – 2040 (Berechnung auf Basis der BOWAHALD-Modellierung)	-127	- 80	+126
2071 – 2100 (Berechnung auf Basis der BOWAHALD-Modellierung)	-277	-260	- 79

Die in der Tabelle 1 angegebenen Werte machen deutlich, dass infolge der tendenziell zunehmenden Temperaturen und der besonders zum Ende des Jahrhunderts zum Teil merklich abnehmenden Niederschläge zu befürchten ist, dass es zu deutlichen Veränderungen in Bezug auf die klimatische Situation (ausgedrückt durch die klimatische Wasserbilanz) kommt. Für Naturräume, die heute bereits eine negative klimatische Wasserbilanz (Differenz aus Niederschlag und potenzieller Verdunstung) aufweisen, wird sich die Situation noch weiter verschlechtern. Selbst für das Erzgebirgsvorland mit einer derzeit noch deutlich positiven klimatischen Wasserbilanz ist damit zu rechnen, dass diese bis Ende des Jahrhunderts negativ wird.

In Bezug auf die Gestaltung des Bewuchses wurden drei Varianten betrachtet:

- Gras-/Krautbewuchs,
- primärer Strauchbewuchs mit sekundärem Grasbewuchs und
- primärer Baumbewuchs (voll ausgebildete Nadelbäume) mit sekundärem Grasbewuchs.

Hinsichtlich des Deponiekörpers wurde ein Idealkörper angenommen, der sich durch eine allseitig 50 m lange Böschung (Neigung 1:3) und durch eine ebenfalls 50 m lange, 5 % geneigte Plateaufläche auszeichnet. Der Schichtenaufbau soll den Mindestanforderungen einer Oberflächenabdichtung entsprechend Deponieklasse I [10] genügen (Schichten von oben nach unten):

- 1,0 m Rekultivierungsschicht (in Kombination mit dem Gras-/Krautbewuchs) bzw. mindestens 1,5 m Wasserhaushaltsschicht (d. h. 1,5 m für den Fall des Buschbewuchses bzw. 2,5 m für den Fall der Nadelbäume), davon 0,3 m humoser Oberboden
- 0,3 m Drainschicht und
- 0,5 m mineralische Dichtschicht.

Die Wasserspeicherparameter der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht wurden entsprechend Mindestanforderungen nach Deponieverordnung [10], GDA-Empfehlungen [11] und [12] bzw. Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards [13] und [14] festgelegt.

Als meteorologische Daten dienten standortbezogene Daten des Klimamodells WETTREG2010 [22], die für den Zeitraum 1961 – 2100 als Tageswerte vorliegen. Zugrunde liegt das vergleichsweise moderate Emissionsszenario A1B. Alle Daten wurden dankenswerter Weise von LfULG Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie zur Verfügung gestellt. Aus der Gesamtreihe sind drei Zeiträume extrahiert worden:

- Zeitraum der unmittelbaren Vergangenheit: 1981 – 2010 (entspricht der 30-jährigen Referenzreihe des DWD),
- zukunftsnaher Zeitraum: 2021 – 2050 sowie
- zukunftsferner Zeitraum: 2071 – 2100.

4 Modellergebnisse

Zunächst werden die klimatisch bedingten Veränderungen der langjährigen Mittelwerte für die wesentlichen Wasserhaushaltsgrößen betrachtet. Die entsprechenden Ergebnisse, die mit den beiden verwendeten Modellen erhalten wurden, sind in den nachfolgenden Tabellen 2 (BOWAHALD-Ergebnisse) und 3 (HELP-Ergebnisse) enthalten. Exemplarisch werden die Werte für eine mit 1:3 geneigte Westböschung aufgeführt.

Tabelle 2: Prozentuale Veränderungen der langjährig mittleren Jahresbilanzen der Zeitreihen 2021 – 2050 bzw. 2071 – 2100 verglichen mit der Reihe 1981 – 2010 für die betrachteten Standorte (BOWAHALD-Ergebnisse)

Standort Gröditz (Elbe-Mulde-Tiefland)					
Zeitraum	Niederschlag (korrigiert) P [mm/a]	Reale Verdunstung ETR [mm/a]	Oberflächenabfluss RO [mm/a]	Drainabfluss RH [mm/a]	Restdurchsickerung RU [mm/a]
2021 - 2050 vs. 1981 - 2010	+0	+6 +3	-16 -23	-22 -71	-17 -50
2071 - 2100 vs. 1981 - 2010	-6	+2 -4	-48 -46	-43 -100	-25 -100
Standort Pirna (Elbtal und Sächsisches Hügelland)					
Zeitraum	Niederschlag (korrigiert) P [mm/a]	Reale Verdunstung ETR [mm/a]	Oberflächenabfluss RO [mm/a]	Drainabfluss RH [mm/a]	Restdurchsickerung RU [mm/a]
2021 - 2050 vs. 1981 - 2010	+2	+8 +5	+0 +0	-24 -55	-25 -67
2071 - 2100 vs. 1981 - 2010	-6	+4 -0	-55 -57	-45 -100	-25 -100
Standort Oederan (Erzgebirgsvorland)					
Zeitraum	Niederschlag (korrigiert) P [mm/a]	Reale Verdunstung ETR [mm/a]	Oberflächenabfluss RO [mm/a]	Drainabfluss RH [mm/a]	Restdurchsickerung RU [mm/a]
2021 - 2050 vs. 1981 - 2010	+0	+8 +8	-0 +10	-15 -27	-9 -22
2071 - 2100 vs. 1981 - 2010	-9	+8 +13	-46 -65	-41 -78	-22 -78

grün: Rekultivierungsschicht mit Gras-/Krautbewuchs
braun: Wasserhaushaltsschicht mit Baumbewuchs (volle Bewuchsentwicklung)

Tabelle 3: Prozentuale Veränderungen der langjährig mittleren Jahresbilanzen der Zeitreihen 2021 – 2050 bzw. 2071 – 2100 verglichen mit der Reihe 1981 – 2010 für die betrachteten Standorte (HELP-Ergebnisse)

Standort Gröditz (Elbe-Mulde-Tiefland)					
Zeitraum	Niederschlag (unkorrigiert) P [mm/a]	Reale Verdunstung ETR [mm/a]	Oberflächen-abfluss RO [mm/a]	Drainab-fluss RH [mm/a]	Restdurchsickerung RU [mm/a]
2021 - 2050 vs. 1981 - 2010	+1	+7 +2	-60 -67	-32 -0	-14 -0
2071 - 2100 vs. 1981 - 2010	-7	+2 -7	-100 -100	-61 -100	-41 -100
Standort Pirna (Elbtal und Sächsisches Hügelland)					
Zeitraum	Niederschlag (unkorrigiert) P [mm/a]	Reale Verdunstung ETR [mm/a]	Oberflächen-abfluss RO [mm/a]	Drainab-fluss RH [mm/a]	Restdurchsickerung RU [mm/a]
2021 - 2050 vs. 1981 - 2010	+2	+6 +4	-75 -80	-30 -83	-16 -75
2071 - 2100 vs. 1981 - 2010	-6	+1 -4	-100 -100	-61 -100	-45 -100
Standort Oederan (Erzgebirgsvorland)					
Zeitraum	Niederschlag (unkorrigiert) P [mm/a]	Reale Verdunstung ETR [mm/a]	Oberflächen-abfluss RO [mm/a]	Drainab-fluss RH [mm/a]	Restdurchsickerung RU [mm/a]
2021 - 2050 vs. 1981 - 2010	+1	+8 +10	-50 -44	-19 -67	-3 -20
2071 - 2100 vs. 1981 - 2010	-10	+6 +12	-93 -100	-49 -92	-28 -84

grün: Rekultivierungsschicht mit Gras-/Krautbewuchs
braun: Wasserhaushaltsschicht mit Baumbewuchs (volle Bewuchsentwicklung)

Zunächst einmal ist festzustellen, dass die generellen Tendenzen bezüglich der wesentlichen Wasserhaushaltsgrößen von beiden Modellen recht ähnlich wiedergegeben werden. Bei dieser Aussage ist in Rechnung zu stellen, dass die Zuwächse bzw. Rückgänge hinsichtlich der Zahlenwerte durchaus hohe Unterschiede aufweisen können. Dies betrifft vor allem die Abflussmengen (Oberflächenabflüsse, Drainwassermengen und Restdurchsickerungen) und ist dem Umstand geschuldet, dass die Absolutwerte für diese Größen zum Teil nur wenige mm/a (oder gar 0 mm/a) betragen und folglich Änderungen im Bereich weniger mm/a hohe prozentuale Änderungen bewirken.

Die Wasserhaushaltsgrößen, die durch beide Modelle erzeugt werden, zeigen hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs folgende klimatisch bedingte Tendenzen:

- Für weite Teile von Sachsen verändern sich die Bilanzen zunächst nur wenig. Diese Aussage betrifft den zukunftsnahen Zeitraum 2021 – 2050 im Vergleich zum Zeitraum 1981 – 2010. Deutlich größere Veränderungen ergeben sich für den zukunftsfernen Zeitraum (2071 – 2100). Verursacht wird dies dadurch, dass die Änderungen bezüglich der maßgebenden Größen Niederschlag (vgl. Tabellen 1 bis 3) und potenzielle Verdunstung (in den Tabellen 1 – 3 nicht enthalten, indirekt ableitbar aus der klimatischen Wasserbilanz, vgl. Tabelle 1) zunächst moderat ausfallen und sich erst gegen Ende des Jahrhundert deutlich verändern.

- Die Niederschläge sind zunächst, d. h. für den zukunftsnahen Zeitraum, gegenüber den heutigen Werten weitgehend unverändert. Eine Tendenz einer leichten Zunahme ist mit Sicherheit nicht signifikant. Zum Ende des Jahrhunderts wird seitens des Klimamodells eine spürbare Abnahme der Niederschläge prognostiziert. Diese Abnahme ist vor allem für den Bereich des Erzgebirgsvorlandes markant. Die geringen Unterschiede der prozentualen Veränderungen bezüglich der Niederschläge zwischen den beiden Modellen

trotz Verwendung übereinstimmender Datenreihen ergibt sich im Übrigen aus dem Umstand, dass HELP für unkorrigierte Niederschlagswerte validiert ist, BOWAHALD dagegen für messfehlerkorrigierte Werte. Zur Messfehlerkorrektur wird im Modell BOWAHALD das Verfahren nach Richter (Richter, 1995) verwendet. Die Korrekturfaktoren sind dabei u. a. abhängig von der Temperatur (Art des Niederschlages: Schnee, Regen) und von der Windgeschwindigkeit. Je nach meteorologischen Randbedingungen ergeben sich folglich unterschiedliche Korrekturfaktoren.

- Bezüglich der realen Verdunstung berechnen beide Modelle für den zukunftsnahen Zeitraum für den Gras-/Krautbewuchs eine Zunahme der Verdunstung an allen Standorten. Die Zuwächse fallen für den zukunftsfernen Zeitraum geringer aus. Dies hängt eng mit dem Zusammenspiel von Wasser- und Energiedargebot (repräsentiert durch Niederschlag und potenzielle Verdunstung) zusammen. Für den zukunftsnahen Zeitraum ist noch genügend Bodenwasser (trotz zum Teil negativer klimatischer Wasserbilanz) vorhanden, das seitens des Grasbewuchses in die reale Verdunstung umgesetzt wird. Zum Ende des Jahrhunderts werden die Bodenwasservorräte jedoch zunehmend knapper, was zu einer Verdunstungslimitierung führt. Dies ist auch der Grund dafür, dass der Verdunstungszuwachs für den vergleichsweise feuchten Standort Oederan (Erzgebirgsvorland) auch für das Ende des Jahrhunderts immer noch hoch ist.

- Für den Baumbewuchs, der prinzipiell, so genügend Bodenwasser zur Verfügung steht, zu wesentlich höheren Verdunstungsleistungen fähig ist, gestalten sich die Verhältnisse für die trockeneren Standorte Gröditz (Elbe-Mulde-Tiefland) und Pirna (Elbtal und Sächsisches Hügelland) anders. Hier bewirken die klimagetriebenen Veränderungen hinsichtlich der Verknappung der Bodenwasservorräte schon zur Mitte des Jahrhunderts einen tendenziellen Rückgang der realen Verdunstung.

- Bezüglich der gebildeten Abflüsse werden fast ausschließlich tendenzielle Rückgänge modelliert. Teilweise kommt die Abflussbildung ganz zum Erliegen. Diese Aussage ist jedoch insofern mit Vorsicht zu genießen, weil bei allen Modellrechnungen davon ausgegangen worden ist, dass die Oberflächenabdichtung langfristig ihre Dichtfunktion erfüllen kann und es nicht zu Schädigungen der mineralischen Dichtschicht infolge von Austrocknungsprozessen kommt, in deren Folge ein verstärktes Durchsickern der Dichtschicht stattfindet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Austrocknungsproblematik vorgestellt. Methodisch ist entsprechend Abschnitt 2 vorgegangen worden, in dem die Häufigkeiten des Unterschreitens kritischer Bodenfeuchtegehalte innerhalb der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht als Maß bezüglich einer Gefährdung unterhalb liegender Schichten herangezogen worden ist. Im Rahmen dieses Beitrages werden ausschließlich die mittels des Modells BOWAHALD gewonnenen Ergebnisse vorgestellt. In der Tabelle 4 sind die Modellergebnisse für die Westböschung aufgeführt. Wegen seiner Brisanz bezüglich möglicher Gefährdungen von unterhalb liegenden Schichten sind die Werte für den Unterboden unterhalb des humosen Oberbodens aufgelistet.

Tabelle 4: Häufigkeiten des Unterschreitens kritischer bzw. sehr kritischer Bodenfeuchtewerte im Unterboden beispielhaft für eine Westböschung in deren zeitlichen Entwicklung von 1981 bis 2100

Standort Gröditz (Elbe-Mulde-Tiefland)				
Zeitraum	Unterschreitungshäufigkeit eines kritischen Bodenfeuchtegehalts [%]		Unterschreitungshäufigkeit eines sehr kritischen Bodenfeuchtegehalts [%]	
1981 – 2010	0,0	4,4	0,0	0,0
2021 – 2050	0,0	7,1	0,0	0,0
2071 – 2100	0,0	33,4	0,0	5,3
Standort Pirna (Elbtal und Sächsisches Hügelland)				
Zeitraum	Unterschreitungshäufigkeit eines kritischen Bodenfeuchtegehalts [%]		Unterschreitungshäufigkeit eines sehr kritischen Bodenfeuchtegehalts [%]	
1981 – 2010	0,0	1,3	0,0	0,0
2021 – 2050	0,0	1,7	0,0	0,0
2071 – 2100	0,0	29,1	0,0	2,8
Standort Oederan (Erzgebirgsvorland)				
Zeitraum	Unterschreitungshäufigkeit eines kritischen Bodenfeuchtegehalts [%]		Unterschreitungshäufigkeit eines sehr kritischen Bodenfeuchtegehalts [%]	
1981 – 2010	0,0	0,0	0,0	0,0
2021 – 2050	0,0	0,0	0,0	0,0
2071 – 2100	0,0	4,7	0,0	0,0

grün: Rekultivierungsschicht mit Gras-/Krautbewuchs
braun: Wasserhaushaltsschicht mit Baumbewuchs (volle Bewuchsentwicklung)

Zunächst einmal kann festgehalten werden, dass für den Gras-/Krautbewuchs keine kritischen Austrocknungsbeträge für den Unterboden modelliert werden. Dies hängt vordergründig mit der Modellparametrisierung zusammen. Das Modell ist derart parametrisiert worden, als dass angenommen worden ist, dass die Masse der Graswurzeln im Oberboden zu finden sind und nur einige wenige Kräuter tiefer wurzeln. Zudem verdunsten Gräser weniger Wasser als höhere Bewuchsarten, wodurch der Rekultivierungsschicht weniger Wasser entzogen wird. Das Modellergebnis stützt die These, dass Grasbewuchs relativ problemlos mit den Folgen des Klimawandels zurechtkommen dürfte.

Etwas anders gestaltet sich die Situation für den Baumbewuchs. Für diesen ist vor allem für die niederschlagsärmeren Standorte Gröditz und Pirna damit zu rechnen, dass Trockenstressphasen in Zukunft und da wiederum gegen Ende dieses Jahrhunderts häufiger auftreten und sich die Austrocknungsbeträge erhöhen. Selbst sehr kritische Bodenfeuchtezustände nahe am permanenten Welkepunkt, die praktisch das Aus für höhere Bewuchsarten (hier: Nadelbäume) bedeuten, sind dann nicht auszuschließen. Und: im vorliegenden Fall ist eine Westböschung und keine Südböschung betrachtet worden. Außerdem wurden Werte des vergleichsweise moderaten Emissionsszenarios A1B verwendet und nicht des Extremszenarios A2.

Dies ist für die Begrünung von Deponien mit Bäumen insbesondere deshalb von Bedeutung, weil ein voll ausgebildeter Baumbewuchs viele Jahrzehnte Entwicklungszeit braucht. Planungen von heute, bei denen höherer Bewuchs (Bäume, aber auch Büsche) vorgesehen ist, sollten diesem Umstand Rechnung tragen und folglich quantitative Betrachtungen zu den Auswirkungen des Klimawandels einschließen.

Literaturverzeichnis

[1] IPCC: *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*. 2001

[2] IPCC: *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*. 2013

[3] KLIWA KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT: *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte, Heft 9, ISBN 3-88251-305-5*. 2006

[4] BERNHOFER, C. ; FRANKE, J. ; FISCHER, S. ; KIRSTEN, P. L.and K. L.and Körner ; KOSTROWSKI, D. ; PRASSE, H. ; SCHALLER, A. ; DONIX, T.: *Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Schriftenreihe des LfULG Sachsen, Heft 3/2015*. 2015

[5] HÄNSEL, S.: *Changes in Saxon Pricipitation Charactersitics: Trends of Extreme Precipitation and Drought. Cuvillier Verlag Göttingen*. 2009

[6] LAHMER, W.: *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*. 2004

[7] LAHMER, W.: *Klimaänderung – Mögliche Folgen auf hydrologische Prozesse im Land Brandenburg. – UMWELTPanorama, Heft 7, 2005, Berliner Umweltagentur, Berlin, ISSN 1612-5061: S. 5–7*. 2005

[8] SCHERZER, J. ; WRIEDT, G. ; SAMES, D. ; MÜLLER, M. ; HESSER, F. ; JASPER, K. ; PÖHLER, H.: *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 Partheeinzugsgebiet. Abschlussbericht KliWEP Teil 3 (Vorstudie) für das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Forschungs- und Entwicklungsvorhabens Nr. 13-8802.3529/39*. 2006

[9] ZEIBISCH, M. ; GROTHMANN, T. ; SCHRÖTER, D. ; HASSE, C. ; FRITSCH, U. ; CRAMER, W.: *Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht 20141253, UBA-FB 000844*. 2005

[10] DEPONIEVERORDNUNG, DepV: *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27.04.2009. Erlass der Bundesregierung und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. 2009

[11] GDA E2-31: *Rekultivierungsschichten. DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, AK 6.1: Geotechnik der Deponiebauwerke, UG 7: Oberflächenabdichtungssysteme. Im Internet verfügbar unter* `http://www.gdaonline.de/downloads.htm` *(Stand: Juni 2010).* 2010 a

[12] GDA E2-32: *Gestantung des Bewuchses auf Deponien. DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, AK 6.1: Geotechnik der Deponiebauwerke, UG 7: Oberflächenabdichtungssysteme. Im Internet verfügbar unter* `http://www.gdaonline.de/downloads.htm` *(Stand: Januar 2010).* 2010 b

[13] LAGA: *Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1 „Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“ vom 13.04.2016. LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik.* 2016 a

[14] LAGA: *Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-2 „Wasserhauhaltsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“ vom 13.04.2016. LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik.* 2016 a

[15] RAMKE, H.-G. ; MELCHIOR, S. ; MAIER-HARTH, U. ; GARTUNG, E. ; WITT, K.-J. ; HEILBROCK, G. ; BOHNE, K.: *Ergebnisse des Status-Workshops Äustrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen”. In: Ramke, H.-G. u.a.: Tagungsband zum Status-Workshop Äustrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen”vom 31.01. bis 01.02.2002 in Höxter, Höxeraner Berichte zu angewandten Umweltgeowissenschaften. Band 3, S. 9 – 52.* 2002

[16] BERGER, K.: *Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushaltes von Deponien für deutsche Verhältnisse. Schlussbericht. Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde. Herausgeber: Umweltbundesamt Berlin.* 1998

[17] BERGER, K. ; SCHROEDER, P.R.: *Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance HELP Modell. Benutzerhandbuch für HELP-D (Version 3.95 D), 6. überarbeitete Auflage. Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg.* 2013

[18] SCHROEDER, P.R. ; DOZIER, T.S. ; ZAPPI, P. A. ; MCENROE, B.M. ; SJOSTROM, J.W. ; PEYTON, R.L.: *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.* 1994

[19] DUNGER, V.: *Dokumentation des Modells BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von wasserungesättigten Deponien/Halden und deren Sicherungssystemen. Nutzerhandbuch, Version 04/2002.* 2002

[20] DUNGER, V.: *Entwicklung und Anwendung des Modells BOWAHALD zur Quantifizierung des Wasserhaushaltes oberflächengesicherter Deponien und Halden. Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau.* 2006

[21] LANUV NRW – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN, HRSG: *Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungs-systeme – Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung. LANUV Arbeits-blatt 13, Eigenverlag, Recklinghausen.* 2010

[22] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: *Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Climate & Environmental Consulting Potsdam GmbH.* 2010

[23] RICHTER, D.: *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194 (1995), 93 S.* 1995