

## Die Leistungsfähigkeit von Wasserhaushaltsschichten heute und in Zukunft

### Výkonnost hydrologických vrstev dnes a v budoucnu

Wattendorf, P.<sup>1</sup>

**Abstract:** Die neuen Deponierichtlinien stellen hohe Anforderungen an die Funktion von Wasserhaushaltsschichten. Das wirft die Frage auf, ob diese Anforderungen unter realistischen Bedingungen erfüllbar sind. Hierbei spielt neben dem Klima am Standort das Zusammenwirken von Bodeneigenschaften und Bewuchs eine wichtige Rolle. Ergebnisse von Versuchen mit Großlysimetern in Leonberg (Baden-Württemberg) belegen die günstige Wirkung eines bodenschonenden Einbauverfahrens auf den Wasserhaushalt mit einem um 30 % höherem Wirkungsgrad einer Rekultivierungsschicht mit unverdichtetem Boden.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt einer Rekultivierungsschicht werden mit Modellierungen auf der Basis synthetischer Wetterdaten für das 21. Jahrhundert gezeigt. Zukünftig muss trotz steigender Verdunstung mit höheren Absickerungsmengen gerechnet werden, weil für Deutschland eine Verlagerung der Niederschläge in das Winterhalbjahr erwartet wird. Der Bewuchs könnte außerdem mit länger andauernden Trockenphasen konfrontiert werden. Es wird deshalb gefordert, Rekultivierungsschichten möglichst bodenschonend einzubauen, um optimierte Standortbedingungen zu schaffen.

**Abstrakt:** Nové směrnice o skládkování kladou na funkci hydrologických vrstev vysoké požadavky. To vede k otázce, zda jsou tyto nároky za reálných podmínek splnitelné. Kromě klimatu zde hraje důležitou roli i spolupůsobení vlastností půdy a porostu. Výsledky pokusů na velkých lysimetrech v Leonbergu (Bádensko – Württembersko) dokládají příznivý účinek k půdě šetrné aplikace na vodní režim s o 30% vyšším stupněm účinnosti rekultivační vrstvy s nezhutněnou zeminou.

Vlivy klimatických změn na vodní režim rekultivační vrstvy jsou pro 21. století ukázány prostřednictvím modelace na základě syntetických klimatických dat. I přes stoupající výpar je nutno do budoucna počítat s vyšším množstvím vsakovaných srážek, protože pro Německo se očekává přesun srážek do zimního pololetí. Porost by kromě toho mohl být konfrontován s déletrvajícím obdobími sucha. Z těchto důvodů je požadováno vytvářet rekultivační vrstvy postupem šetrným k půdě tak, aby bylo dosaženo optimalizovaných podmínek v dané lokalitě.

---

<sup>1</sup> Dr. Peter Wattendorf, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Landespflege, Tennenbacher Straße 4, D-79106 Freiburg; Tel.: ++49 / 0761 / 2033630, E-Mail: peter.wattendorf@landespflege.uni-freiburg.de

## **1 Einführung und Ausgangslage**

Die wichtigste Aufgabe einer Wasserhaushaltsschicht ist es, möglichst viel Niederschlagswasser auf natürlichem Weg durch Verdunstung abzuführen, um die Absickerung zu minimieren. Hierzu wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Empfehlungen erarbeitet [z.B. 1, 2] Die neuen Deponierichtlinien stellen definierte Anforderungen an die Leistungsfähigkeit einer Wasserhaushaltsschicht. Sie hat nach dem derzeitigen Stand des Rechts folgende Voraussetzungen zu erfüllen [3]:

1. Die Mindestdicke muss 1,50 m betragen.
2. Die Wasserhaushaltsschicht soll eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 220 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Wasserhaushaltsschicht, aufweisen.
3. Die Durchsickerung darf höchstens 10 Prozent vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach Herstellung betragen.

Diese Regelung drückt eine sehr technische Herangehensweise an die Problematik aus. Deshalb wird zuerst der Frage nachgegangen, ob Wasserhaushaltsschichten als quasi-natürliche Systeme mit realisierbarem Aufbau die Anforderung nach Punkt 3. überhaupt erfüllen können. Wichtige Faktoren sind hierbei das regionale Klima beziehungsweise Wetter sowie die Bodeneigenschaften.

Prognosen über Auswirkungen des globalen Klimawandels mit allgemein höheren Temperaturen und hieraus resultierender höherer potentieller Verdunstung könnten dazu verleiten, zukünftig geringere Sickerwassermengen aus Wasserhaushaltsschichten zu erwarten. Es gehen mit dem Temperaturanstieg aber weitere Veränderungen der Wetterelemente einher, so dass differenziertere Projektionen notwendig werden. So soll die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen zunehmen und in vielen Regionen eine Verlagerung der Niederschläge ins Winterhalbjahr stattfinden. Diese Prozesse lassen eher höhere Absickerungsraten erwarten. Weiterhin besteht die Gefahr, dass zunehmende Trockenphasen im Sommer die Vegetation aller Rekultivierungsschichten vor neue Herausforderungen stellt - und damit natürlich auch die Planer! Inzwischen steht eine Reihe von Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert in räumlich hoher Auflösung zur Verfügung, so dass auch konkrete standortbezogene Projektionen möglich sind. Anhand von Wasserhaushaltsmodellierungen mit synthetischen Wetterdaten werden Auswirkungen des Klimawandels auf Rekultivierungsschichten und ihren Bewuchs am Beispiel des Standortes Leonberg bei Stuttgart (Baden-Württemberg) dargestellt.

## **2 Boden und Bewuchs der Wasserhaushaltsschicht**

### **2.1 Wasserverbrauch durch Verdunstung**

Die Rekultivierungsschicht als Standort und der Bewuchs bilden ein funktionales System. Es liegt auf der Hand, dass Systeme, die besondere Leistungen erbringen sollen, auch besondere Qualitätsansprüche erfüllen müssen [4]. Die oben dargestellten Anforderungen sind hinsichtlich der Mindestmächtigkeit zu begrüßen; die Höhe der nutzbaren Feldkapazität der gesamten Rekultivierungs- oder Wasserhaushaltsschicht ist jedoch in der Praxis für die Wasserhaushaltsbilanz und damit die Sickerwassermengen ohne große Bedeutung. Eine

Betrachtung der Bilanzglieder des Wasserhaushalts eines Standortes bei gegebenem Klima zeigt ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren:

- Ein Teil der Evapotranspiration entfällt auf die „passive“ Evaporation von der Bodenoberfläche. Diese reicht wegen der limitierten kapillaren Nachlieferung von Bodenwasser in Abhängigkeit von Bodenart und Struktur jedoch nur 10 - 20 cm (Sandböden) bis höchstens über 50 cm (bindige Böden) in die Tiefe [5] und erreicht nur kurzfristig nach ergiebigeren Niederschlägen die potentielle Verdunstungsrate [6], die Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist hierzu belanglos. Sobald Bewuchs den Boden bedeckt, was aus vielen Gründen für notwendig erachtet wird (siehe z.B. [7]) und auf lange Sicht auch kaum zu verhindern wäre, sinkt der Anteil der Bodenevaporation durch die Beschattung weiter ab.
- Die ebenfalls „passive“ Interzeption, die direkte Verdunstung des Niederschlags von Pflanzenoberflächen, kann man als „Regenschirmeffekt“ der Vegetation bezeichnen. Sie wird unter anderem durch Art und Vitalität des Bewuchses (Stichwort „Blattflächenindex“) beeinflusst, die wiederum auch von Bodeneigenschaften wie Nährstoffgehalten oder Durchwurzelbarkeit, d.h. Möglichkeit der Wasser- und Nährstoffversorgung, abhängen.
- Die Transpiration wird durch aktive physiologische Prozesse in den Pflanzen gesteuert und hängt unter anderem ab von Physiologie und Stoffumsatz. Im Bestand spielen die Artenzusammensetzung, die Struktur, die Menge des Bewuchses und die aktuelle Bodenfeuchte eine wichtige Rolle. Vor allem die gleichmäßige gute Wasserversorgung ist essentiell für hohe Transpirationsleistungen. Hierfür ist aber nicht der Wasserspeicher der Gesamtdicke der Rekultivierungsschicht ausschlaggebend, sondern nur der für die Pflanzen erreichbare Anteil davon, das heißt der Bodenwasserspeicher des Wurzelraumes - plus eines recht geringen Zuschlags für kapillare Nachlieferung.

Eine sehr hohe reale Verdunstung kann also nur durch Steigerung der Interzeption und Transpiration erreicht werden, was zeigt, dass die Aufgabe der Wasserhaushaltsschicht ohne einen vitalen Bewuchs, tiefreichende Durchwurzelung und ein sehr gutes Wasserdargebot im Wurzelraum nicht zu erfüllen ist.

## 2.2 Bodeneigenschaften

Wie bei jedem technischen Bauwerk bestimmen Materialwahl und Ausführung auch die Eigenschaften der Rekultivierungsschicht. Obwohl schon seit Jahren von Forstwissenschaftlern, Bodenkundlern und Ökologen gefordert wird, bei der Herstellung der Rekultivierungsschichten ein Mindestmaß an Sorgfalt einzuhalten [8], zeigen die Erfahrungen in der Praxis, dass hier noch sehr viel Spielraum für Verbesserungen besteht. Höhere Kosten können nur bedingt als Begründung herhalten, denn die Ergebnisse der Leonberger Versuche (siehe 3) belegen, dass eine bodenschonend eingebaute Rekultivierungsschicht bei gleichem Bodenmaterial erheblich leistungsfähiger sein kann als eine konventionell eingebaute. „Bodenschonend“ bedeutet hier zum Beispiel den Verzicht auf unnötige Verdichtungen sowie auf übermäßiges Befahren der Bodenoberfläche beispielsweise zur Herstellung eines ebenso akkuraten wie überflüssigen (Fein-)Planums und ist nicht notwendigerweise mit höheren Kosten verbunden.

Als Konsequenz aus Forschungsergebnissen und praktischen Erfahrungen wurden Grundsätze zur ökonomischen Herstellung leistungsfähiger Rekultivierungsschichten entwickelt [9]. Sie zielen darauf ab, einen gut durchwurzelbaren Boden mit hoher Wasserspeicherkapazität und Luftkapazität für Wasserhaushaltsschichten herzustellen. Die wichtigsten Aspekte sind die Verwendung geeigneten Bodenmaterials (siehe z.B. [10], [11]), das Reduzieren von Störungen wie Umlagern, Befahren und Verdichten auf das unvermeidbare Maß sowie den Einbau des Bodens ohne dabei verdichtete Schichten oder horizontal orientierter Schichtoberflächen zu erzeugen. Diese beeinträchtigen die Prozesse Durchlüftung, Wasserspeicherung und Durchwurzelung. Notfalls besteht fast immer die Möglichkeit, das Bodenmaterial zumindest situationsangepasst, zum Beispiel abhängig von der Hangneigung, mit abgestufter Verdichtung einzubauen. Auch die Beschränkung der konventionellen Verdichtung auf den tieferen Unterboden wurde bereits mit Erfolg praktiziert.

### 2.3 Bewuchs

Die effektivste Bewuchsform zur Reduzierung von Sickerwasser durch Verdunstung ist Wald [12]. Empfehlungen zur Gestaltung eines sogenannten „Deponiewaldes“ [13] legen insbesondere Wert auf Baumartenwahl, Alters- und Bestandesstruktur und Naturverjüngung [14]. Angesichts der Erschwernisse des künstlichen Standortes „Rekultivierungsschicht“ ist in jedem Fall zu einem Vorwald aus Pionierbaumarten zu raten, der nach einem Zeitraum von 15 bis 20 Jahren in den endgültigen Waldbestand überführt wird [14]. In den ersten Jahren der Rekultivierung überragen auch die schnellwüchsigen Pioniergehölze kaum die begleitende Gras-/Krautvegetation und übertreffen sie auch kaum in ihrer Wirkung auf den Wasserhaushalt. Erst mit dem Kronenschluss (siehe Tabelle 1) entwickelt sich ein zweites „Stockwerk“ der Überschirmung und hieraus resultiert eine höhere Verdunstungsleistung. Gleichzeitig entsteht auch im Boden ein zweites „Tiefgeschoss“ von Gehölzwurzeln unterhalb des oberflächennahen Graswurzelfilzes und der tiefer liegende Bodenwasserspeicher kann erschlossen werden.

Tabelle 1: Klassifizierung von Waldbeständen und ihre Interzeptionsleistung (nach [15], dort weiterführende Literatur)

Alter circa	Wuchsklasse	Merkmale	Interzeption [%] von Altholz
< 5	Jungwuchs	noch kein Kronenschluss	45
5 - 10	Dickung	Kronenschluss, Brusthöhen-Ø bis 5 cm	65
10 - 40	Stangenholz	Brusthöhen-Ø bis 20 cm	90
> 40	Altholz	Brusthöhen-Ø > 20 cm	100

Der Zielwaldtyp aus anspruchsvolleren Baumarten wird erst nach circa 100 Jahren erreicht [14]. Forstleute müssen also in längeren Zeiträumen denken und auch die forstliche Rekultivierung benötigt Zeit. Die Zeitspanne von höchstens fünf Jahren nach Herstellung der Rekultivierungsschicht (siehe 1) reicht also kaum aus, einen Waldbestand zu etablieren, der die Wasserhaushaltsfunktion auch nur in annähernd gleichem Maß erfüllt wie ein entwickelter Deponiewald. Hierzu müsste - auch bei der Verwendung schnell wachsender Pionierbaumarten - eine Frist von mindestens 10 - 15 Jahren eingeräumt werden.

### 3 Versuche zur Funktion von Wasserhaushaltsschichten

Die „Leonberger Lysimeterfelder“ (Baden-Württemberg) bestehen im Wesentlichen aus zwei Großlysimetern von je circa 360 m<sup>2</sup> Fläche (siehe Abbildung 1) mit einer unverdichteten einschichtigen sowie einer konventionell in vier Schichten auf circa 0,95  $\rho_{Pr}$  verdichteten Rekultivierungsschicht [4]. In beide Lysimeterfelder wurde das gleiche steinfreie Löss-Unterbodenmaterial (toniger Schluff) eingebaut. Die Rekultivierungsschichten unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren und die daraus resultierenden Bodeneigenschaften. In-situ-Messungen ergaben eine Feldkapazität des Bodenmaterials nach dem Einbau von circa 34 bis 36 % [4]. Hieraus errechnet sich eine nutzbare Feldkapazität von circa 22 - 24 % (= mm/dm), so dass bei der Mächtigkeit von 2,0 m eine nutzbare Feldkapazität von insgesamt 440 - 480 mm angenommen werden kann. In der durchwurzelten Zone von derzeit circa 1 m Tiefe stehen damit mindestens 220 mm zur Verfügung. Der Jahresniederschlag in Leonberg beträgt im langjährigen Mittel 764,2 mm/a (1961 - 1990, DWD-Station Renningen).

Seit Winter 2000/2001 sind die Testfelder mit Aspen (*Populus tremula*) als Vorwald bepflanzt (Abbildung 1). Untersuchungen und Messungen am Gehölzbestand belegen, dass die unverdichtete Rekultivierungsschicht ein deutlich besserer Pflanzenstandort mit geringeren Ausfällen, tieferer Durchwurzelung sowie größerer Zuwachsleistung der Bäume ist [16]. Boden und Bewuchs beeinflussen die Sickerwassermenge aus den Feldern: Zwischen Juni 2003 und Dezember 2008 waren 3723 mm Niederschlag zu verzeichnen. Davon gelangten im verdichteten Feld 712 mm, also circa 19 % zur Absickerung. Der entsprechende Wert des unverdichteten Lysimeterfeldes liegt bei 494 mm, circa 13 % der Niederschlagsmenge. Hieraus ergibt sich ein um fast 1/3 höherer Wirkungsgrad der unverdichteten Rekultivierungsschicht [16].



Abbildung 1: Knapp achtjähriger Vorwaldbestand überwiegend aus Aspe (*Populus tremula*) im Spätsommer 2008 auf den Leonberger Lysimeterfeldern (Baden-Württemberg)

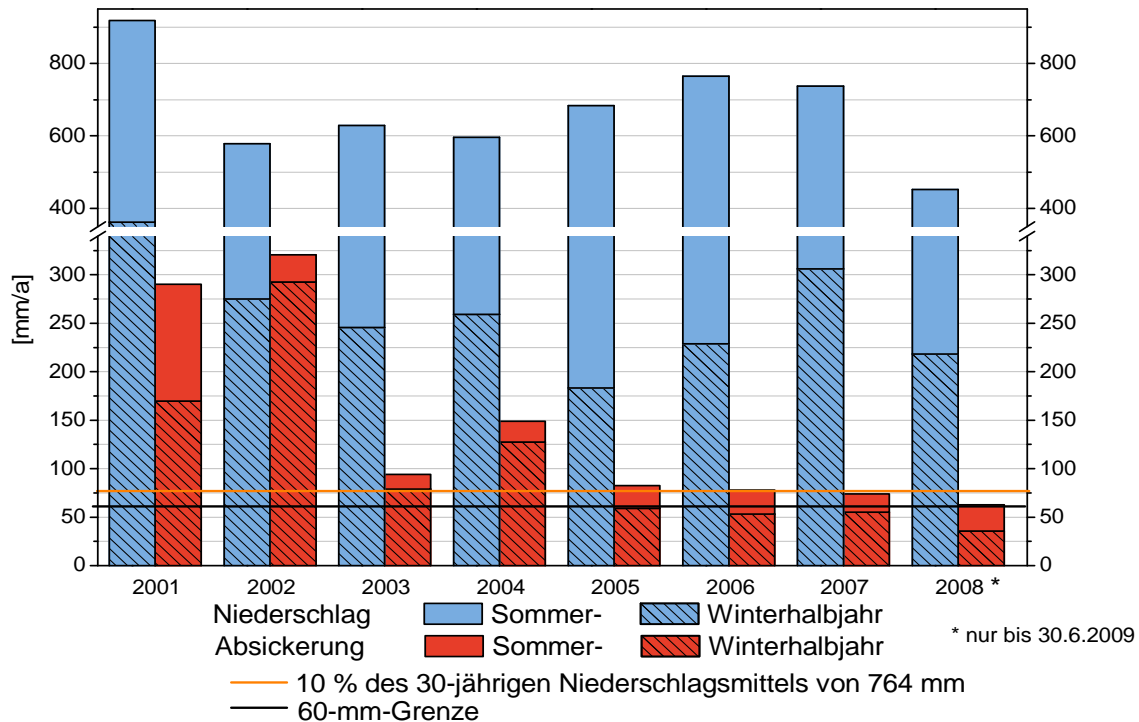


Abbildung 2: Niederschlagssummen und Absickerung des Leonberger Lysimeterfeldes mit unverdichtetem Boden in hydrologischen Jahren vom 1.11.2001 bis 30.06.2009; Wetterdaten: DWD-Station Renningen (2001 - 2004), ab 2005 eigene Wetterstation an der Versuchsanlage

Eine genauere Betrachtung der Sickerwassermengen des Lysimeterfeldes mit unverdichtet eingebauter und wirkungsvollere Wasserhaushaltsschicht seit Sommer 2001 (Abbildung 2) zeigt anfangs sehr hohe Sickerwasserraten. Der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag im hydrologischen Jahr 2001/02 betrug 32 % und 2002/03 sogar 55 %. In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass die absoluten Sickerwassermengen im Prinzip im Lauf der Jahre zurückgehen. Hierbei spielt jedoch die Witterung eine große Rolle. So verursacht der „Jahrhundert-sommer“ 2003 mit hoher Verdunstung und wenig Niederschlag im hydrologischen Jahr 2003/04 stark reduzierte Sickerwassermengen. Der große Bodenwasserspeicher der Rekultivierungsschicht dämpft und verzögert dabei die Sickerwasserbildung. Charakteristisch ist ebenfalls die sehr ungleichmäßige saisonale Verteilung der Sickerwassermengen mit starkem Übergewicht im Winterhalbjahr.

Lässt man das außergewöhnliche Jahr 2003 unberücksichtigt, so zeigen sich bisher zwei Phasen: In den ersten fünf Jahren, bis circa 2004, ist die Absickerung relativ hoch, danach beginnt eine Phase mit geringerer Absickerung, bedingt durch die zunehmende Verdunstungsleistung der Gehölze. Dieses Ergebnis deckt sich gut mit Beobachtungen auf Testfeldern der Deponie Georgswerder [7]. Abbildung 2 zeigt außerdem, dass inzwischen die Sickerwassermengen knapp unterhalb der Grenze von 10 % des Jahresniederschlages liegen. Allerdings ist die Funktion des „natürlichen Dichtungssystems“ der Wasserhaushaltsschicht hierbei stark vom Witterungsgeschehen abhängig, so lässt die Entwicklung für 2008/09 wieder geringfügig höhere Werte erwarten. Die geforderte Obergrenze von jährlich 60 mm konnte bisher jedoch in keinem Jahr eingehalten werden. Hier muss noch abgewartet werden, welche Wirkungssteigerung durch die sich weiter entwickelnden Gehölze erzielt werden kann.

## **4 Die Wasserhaushaltsschicht im Klimawandel**

### **4.1 Klimawandel und Wasserhaushalt**

Prognosen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen IPCC [17] gehen davon aus, dass die globale Erwärmung im Lauf des 21. Jahrhunderts mindestens 1,8 °C betragen wird, hochgreifende Emissionsszenarien berechnen sogar 2,4 - 6,4 °C. Extremwetterereignisse wie Hitzewellen und lokale Starkniederschläge werden zukünftig häufiger auftreten [18]. Differenziertere Aussagen für die Bundesrepublik sind mit Hilfe von Regionalisierungsverfahren möglich. Sie zeigen, dass die durchschnittlichen Jahrestemperaturen in Deutschland je nach Emissionsszenario im Zeitraum 2021 - 2050 um 0,5 - 1,5 °C und im Zeitraum 2071 - 2100 um 1,5 - 3,5 °C gegenüber der letzten Klimanormalperiode (1961 - 1990) ansteigen könnte [18]. Auch das Niederschlagsregime soll durch den Klimawandel beeinflusst werden: Zwar steigen die Jahresniederschlagssummen im Allgemeinen nur geringfügig oder bleiben gleich, aber es ist von einer Verlagerung in den Winter auszugehen. Bundesweit könnten die Sommerniederschläge um bis zu 40 % zurückgehen, die Winterniederschläge in ähnlichem Maß oder regional, z.B. in Mittelgebirgslagen, auch darüber hinaus ansteigen [18]. Es ist weiterhin wahrscheinlich, dass Niederschlagsintensitäten und Extremniederschläge zunehmen [19]. Man kann davon ausgehen, dass der Landschaftswasserhaushalt zukünftig extremer und differenzierter werden wird. Dies gilt sowohl für Unterschiede zwischen den Jahreszeiten - Sommer werden trockener, Winter nasser - aber auch zwischen Jahren durch die Zunahme extremer Ereignisse.

Für den Wasserhaushalt von Rekultivierungs- oder Wasserhaushaltsschichten ist deshalb mit zwei wesentlichen Konsequenzen zu rechnen:

- Die Verlagerung der Niederschläge ins Winterhalbjahr verstärkt grundsätzlich die bereits heute sehr hohen Anteile des Winter-Sickerwassers (siehe Abbildung 2).
- Abnehmender Sommerniederschlag in Verbindung mit höheren Temperaturen wird zu einem angespannteren Bodenwasserhaushalt führen und ein höheres Wasserstressrisiko für den Bewuchs bedeuten.

### **4.2 Funktion der Wasserhaushaltsschicht unter neuen Bedingungen**

Im Folgenden wird mit einer Wasserhaushaltsmodellierung der Frage nachgegangen, welches Ausmaß diese Veränderungen beispielhaft für den klimatisch durchschnittlichen Standort Leonberg erreichen könnten. Die Wasserhaushaltsmodellierung wurde mit den Programmen BOWAHALD [15] und HELP [20] gerechnet. Eingangswerte der Berechnungen sind reale Aufbaudaten des Leonberger Lysimeterfeldes mit unverdichteter Rekultivierungsschicht sowie regionale Klimadaten für Leonberg aus dem Klima-Modell REMO [21], Emissionsszenario B1 (siehe [22]). B1 ist ein moderates Szenario und geht von einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und anschließender Abnahme der Emissionen aus [23]. Emissionsszenarien mit höheren Anstiegsraten der Treibhausgase führen dementsprechend zu stärkeren Auswirkungen auf das Klima. Als Bewuchs wurde in BOWAHALD ein einschichtiger mittelalter Waldbestand (Stangenholz) mit einem Deckungsgrad von 100 % und in HELP ein maximaler Blattflächenindex von 5 mit jeweils einer maximalen Durchwurzelungstiefe von 1 m angenommen. Die Ergebnisse der beiden Wasserhaushaltsmodelle unterscheiden sich insgesamt nur geringfügig.

Tabelle 2: Jahresniederschlag und Lufttemperatur des Standorts Leonberg, reale Klimadaten für die Normalperiode 1961-1990 (DWD) sowie Modellierungsergebnisse für drei zukünftige Zeiträume mit dem Modell REMO

			1961 - 1990 DWD	1976 - 2000 A	2026 - 2050 B	2076 - 2100 C
<b>Niederschlag</b>	( $\Sigma$ Jahr)	mm	764	712	791	762
Anteil	Sommer	%	56,8	55,7	55,6	51,3
	Winter		43,2	44,3	44,4	48,7
<b>Lufttemperatur</b>	( $\emptyset$ Jahr)	°C	8,4*	9,8	10,2	11,9

\*: Die reale Jahresurschnittstemperatur betrug im Zeitraum 1992 - 2008 bereits 9,2 °C.

Ein Überblick über die klimatischen Veränderungen in Zeitschritten von 50 Jahren (Tabelle 2) zeigt, dass die mittlere Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Zukunftsszenario stetig und deutlich bis auf 11,9 °C ansteigt. Bezüglich der Niederschlagsmengen ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen, sie nehmen zur Mitte des Jahrhunderts (Zeitraum B) zu und gehen später (Zeitraum C) wieder zurück. Für den Zeitraum A von 1976 - 2000 wurden von REMO um 52 mm niedrigere mittlere Jahresniederschläge simuliert, als vom DWD gemessen. Dies sollte bei der weiteren Betrachtung berücksichtigt werden. Die Verlagerung von Niederschlägen ins Winterhalbjahr wird in den REMO-Daten für Leonberg erst im Zeitraum C 2076 - 2100 spürbar.

Tabelle 3: Jahres- und Quartalsummen von Niederschlag, realer Verdunstung und Absickerung in den Zeiträumen A = 1976 - 2000, B = 2026 - 2050 und C = 2076 - 2100; Modellierung mit HELP auf Grundlage der REMO-Daten des Emissionsszenarios B1

[mm]	Niederschlag			reale Verdunstung			Absickerung		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
<b>Jahr</b>	<b>711,4</b>	<b>791,1</b>	<b>762,2</b>	<b>590,5</b>	<b>597,5</b>	<b>601,7</b>	<b>114,6</b>	<b>187,8</b>	<b>148,6</b>
I - III	150,0	171,7	172,7	49,1	53,5	58,0	76,2	109,1	92,5
IV - VI	195,6	203,0	209,0	245,4	249,9	257,6	16,1	31,3	30,7
VII - IX	206,6	230,3	184,6	251,1	245,2	230,5	0,4	4,2	2,2
X - XII	159,1	186,2	195,8	44,7	49,0	55,5	21,8	43,1	23,1



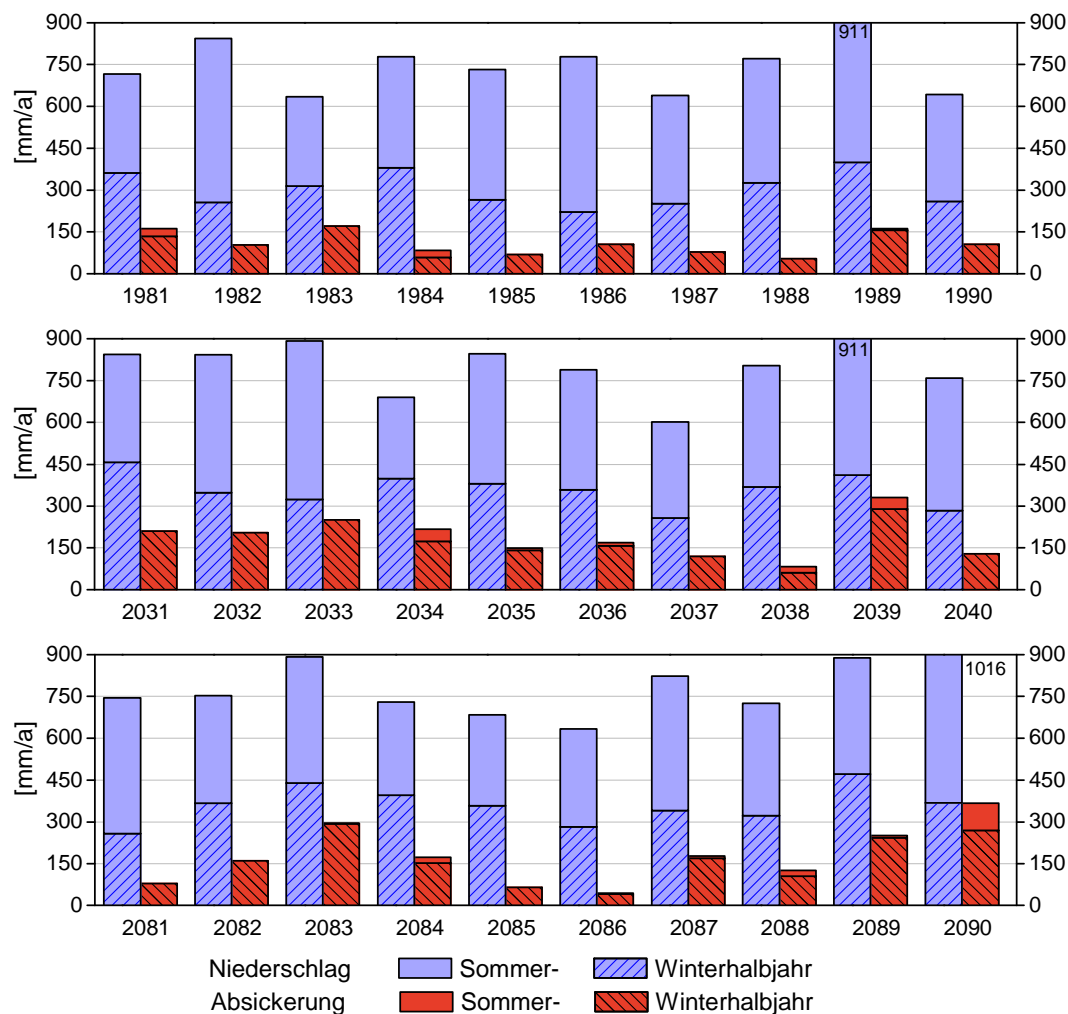


Abbildung 3: Niederschlag und Absickerung [mm/a] für die Dekaden 1981-90, 2031-40 und 2081-90 am Standort Leonberg; Modellierung mit BOWAHALD; alle Wetterdaten: REMO

Wie aufgrund des Temperaturanstiegs zu erwarten ist, nimmt in den Zukunftsszenarien auch die reale Verdunstung (ETA) zu, allerdings nur geringfügig im Vergleich zum Zeitraum A von 1976 - 2000 (Tabelle 3). Die Variation der Absickerung wird offensichtlich weniger durch die Verdunstung, sondern stärker durch die Niederschlagsmengen gesteuert (Abbildung 3) und erreicht im Zeitraum B von 2026 - 2050 ebenso wie der Niederschlag die höchsten Werte. Abbildung 3 zeigt außerdem, dass mit Ausnahme sehr niederschlagsreicher Jahre Sickerwasser praktisch nur im Winterhalbjahr anfällt. Die Absickerung für den Zeitraum A (1976 - 2000) fällt aufgrund der im Vergleich zu den realen Werten sehr niedrigen REMO-Niederschlagsmengen ebenfalls eher niedrig aus. Aus den Quartalswerten in Tabelle 3 wird außerdem deutlich, dass die ETA trotz ansteigender Temperaturen und höherer potentieller Verdunstung im Hoch- und Spätsommer (Monate VII - IX) zukünftig eher abnehmen könnte. Grund hierfür ist, dass in dieser Zeit zukünftig weniger Bodenwasser für die Verdunstung zur Verfügung stünde. Die in den Szenarien außerhalb der Vegetationszeit durch höhere Temperaturen ansteigende reale Evapotranspiration könnte dann die ebenfalls ansteigenden

Niederschlagssummen nicht auffangen, dementsprechend nähmen auch die Absickerungssummen zum Ende des 21. Jahrhunderts (C) zu.

Die Betrachtung der Bodenwassergehalte in der Wurzel- beziehungsweise Verdunstungszone der Rekultivierungsschicht zeigt, dass das veränderte Klima zukünftig einen angespannteren Wasserhaushalt in der Vegetationszeit nach sich ziehen kann. In Abbildung 4 sind die Ganglinien der Bodenwassergehalte beispielhaft für je ein Jahr mit von REMO modellierter durchschnittlicher Niederschlagsmenge in den drei Betrachtungszeiträumen aufgetragen. Beispielhaft für die eher feuchte Periode in naher Zukunft (A) zeigt sich im Jahr 2036 ein gegenüber der Vergangenheit günstigerer Bodenwasserhaushalt in dem auch im Sommer kurzzeitig Bodenwassergehalte über 50 % der nutzbaren Feldkapazität (nFk) erreicht werden. Der Wassergehalt von 50 % nFk gilt als Schwelle, unterhalb der Bäume ihre Transpiration einschränken. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts (Zeitraum C), in Abbildung 4 am Beispiel des durchschnittlichen Jahres 2091 dargestellt, ergibt sich eine im Vergleich zu 1992 zwar kürzer anhaltende, aber dafür stärkere Austrocknung des Bodens bis unter den permanenten Welkepunkt (PWP), also die Grenze unter der für die meisten Pflanzen keine Wasseraufnahme mehr möglich ist.

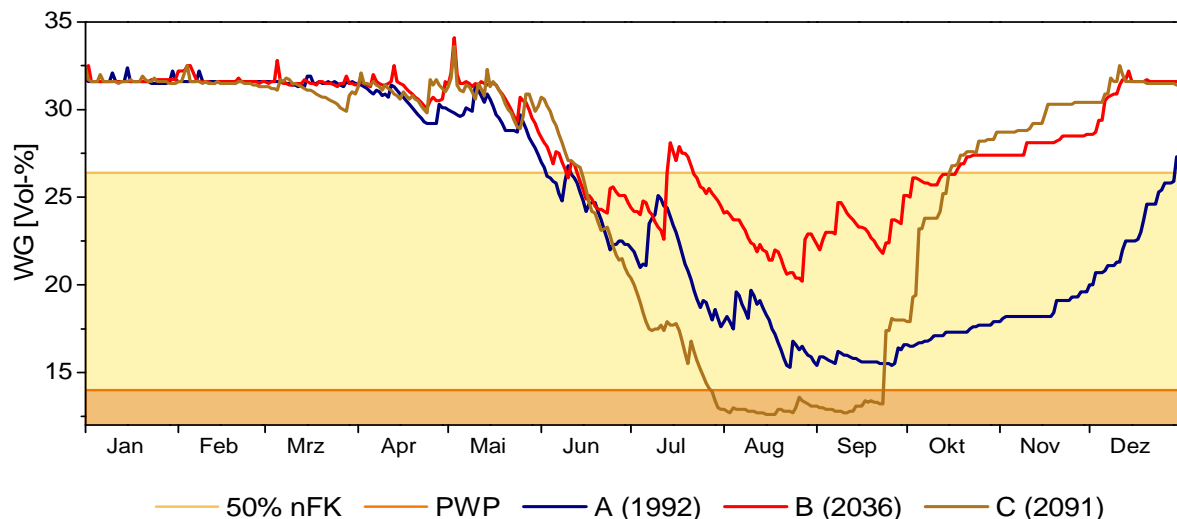


Abbildung 4: Bodenwassergehalte in der Wurzelzone der Rekultivierungsschicht in Leonberg für jeweils ein Jahr mit durchschnittlichen Niederschlägen in den Zeiträumen 1976 - 2000 (A), 2026 - 2050 (B) und 2076 - 2100 (C); Wetterdaten aus REMO-Szenarien, HELP-Modellierung; Erklärung im Text

Nach den REMO-Szenarien können die durchschnittliche Dauer und Intensität von Trockenphasen zunehmen. Die Zahl der Tage mit Wassergehalten unter 50 % der nFk könnte von 126 Tagen (A, 1976 - 2000) auf 135 Tage pro Jahr (C, 2076 - 2100) ansteigen. Noch wichtiger ist, dass sich die durchschnittliche Anzahl der Tage mit Wassergehalten unter dem permanenten Welkepunkt in den modellierten Szenarien von 16 Tagen pro Jahr im Zeitabschnitt 1976 - 2000 auf 30 Tage im Zeitraum 2076 - 2100 nahezu verdoppelt. Auch die maximale Dauer von anhaltenden Dürrephasen mit Wassergehalten unter PWP kann nach den REMO-Szenarien zum Ende unseres Jahrhunderts länger werden. Sie beträgt im Zeitraum A höchstens 52 Tage, im Zeitraum C ab dem Jahr 2076 aber 88 Tage, wobei in letzterem Zeitraum in 11 der 25 Jahre Dürrephasen von mehr als 30 Tagen auftreten. Diese Werte gelten für die Leonberg Testfelder, in Rekultivierungsschichten mit geringerer nutzbarer Feldkapazität aufgrund hoher Dichte oder Steingehalte ist demnach mit erheblich

längeren und intensiveren Trockenphasen zu rechnen. Insgesamt weisen die Ergebnisse der REMO-Szenarien zumindest für die Zukunft gegen Ende des 21. Jahrhunderts auf einen deutlich angespannteren Wasserhaushalt in Rekultivierungsschichten hin.

## **5 Fazit**

Die Versuche auf den Leonberger Lysimeterfeldern mit einem ungefähr dem langjährigen Deutschlandmittel entsprechenden Jahresniederschlag zeigen, dass durch eine bodenschonende Herstellung eine signifikante Steigerung des Wirkungsgrades der Wasserhaushaltsschicht möglich ist. Es wird allerdings ebenfalls deutlich, dass die im neuen Deponierecht gestellten Anforderungen an Wasserhaushaltsschichten auf klimatisch durchschnittlichen Standorten in Deutschland sehr schwer zu erreichen sind. Wenn die Absickerung nicht mehr als 10 % des langjährigen Niederschlagsmittels und gleichzeitig maximal 60 mm pro Jahr betragen darf, so kommen Wasserhaushaltsschichten für Standorte mit mehr als 600 - 650 mm mittleren Jahresniederschlag realistischerweise kaum in Frage. Außerdem wird der Tatsache, dass die Wasserhaushaltsschicht ein „lebendiges System“ ist, welches hinreichend Zeit zur Entwicklung braucht, mit der kurzen Entwicklungsfrist von fünf Jahren nur ungenügend Rechnung getragen.

Die Eigenschaften von Rekultivierungsschichten sind aber keine statischen Größen mehr, denn auch der Klimawandel beeinflusst ihren Wasserhaushalt. Die Wasserhaushaltsmodellierungen mit einem synthetischen Wetterszenario des Modells REMO zeigen, dass bereits bei der Verwendung des moderaten Emissionsszenarios B1 zukünftig mit ansteigenden Absickerungsmengen gerechnet werden muss. Gleichzeitig könnte der Bewuchs von Rekultivierungsschichten im Sommer zukünftig zunehmendem Trockenstress ausgesetzt sein. Für die langfristige Sicherung der Deponieoberflächen - egal ob mit Wasserhaushalts- oder einfacher Rekultivierungsschicht versehen - ist deshalb der Klimawandel ein weiteres Argument dafür, in Zukunft verstärkt auf bodenschonende Einbauverfahren zu achten, um den Pflanzen einen unter den gegebenen Verhältnissen möglichst optimalen Standort zur Verfügung zu stellen.

## **6 Dank**

Ich danke Herrn Jannik Loest und dem Institut für Meteorologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg für die Bereitstellung der Wetterdaten aus den REMO-Szenarien.

## 7 Literatur

- [1] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2006): GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 83 (9): 585 – 596
- [2] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2000): GDA-Empfehlung E 2-32 Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 627 – 629
- [3] Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, BGBl 2009 Teil I Nr. 22, vom 29.4.2009, S. 900 - 950
- [4] WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2005): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 41, 268 S., Freiburg
- [5] WOHLRAB, B., H. ERNSTBERGER, A. MEUSER & V. SOKOLLEK (1992): Landschaftswasserhaushalt, 352 S., Hamburg & Berlin
- [6] DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e. V. (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, DVWK- Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996, 135 S., Bonn
- [7] WATTENDORF, P. & V. SOKOLLEK (2003): Gestaltung und Entwicklung des Bewuchses auf Rekultivierungsschichten von Deponien und Altlasten, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10/1: 171 –183, Weimar
- [8] BRAUNS, J., K. KAST, H. SCHNEIDER, W. KONOLD, P. WATTENDORF & B. LEISNER (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfallkonformer Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall Band 13, 97 S. + Anhang, Karlsruhe
- [9] WATTENDORF, P. & O. EHRMANN (2006): Funktion und Wirksamkeit von Rekultivierungsschichten – Ergebnisse der Lysimeterfelder auf der Deponie Leonberg, in: HENKEN-MELLIES, U. [Hrsg.]: 17. Nürnberger Deponieseminar Abdichtung, Stilllegung und Nachsorge von Deponien, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Heft 85: 71 - 89
- [10] DIN 19731: Bodenbeschaffenheit – Verwendung von Bodenmaterial (1998)
- [11] BÖNECKE, G. (1997): Hinweise zur Aufforstung von Deponien mit Oberflächenabdichtung, in: FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT [Hrsg.]: Rekultivierung von Deponien, FVA-Arbeitsberichte 1/97: S. 39 – 50
- [12] WATTENDORF, P. & V. SOKOLLEK (2000): Gestaltung und Entwicklung von standortgerechtem Bewuchs auf Rekultivierungsschichten, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 47: 225 – 234
- [13] BÖNECKE, G. (2001): Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien - Deponiewald statt Oberflächenabdichtungen?, in: EGLOFFSTEIN, T., & G. BURKHARDT [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 122: 263 - 280
- [14] SCHABER-SCHOOR, G. (2006): Regulierung des Wasserhaushalts von Deponien durch Gehölzbewuchs, AFZ-Der Wald 19/2006: 1050 - 1056
- [15] DUNGER, V. (2002): Dokumentation des Modells BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von wasserungesättigten Deponien/Halden und deren Sicherungssystemen, 134. S., Freiburg

- [16] WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN (2009): Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten, 18 S., <http://www.bwplus.fzk.de>
- [17] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Hrsg.]: M.L. PARRY, O.F. CANZIANI, J.P. PALUTIKOF, P.J. VAN DER LINDEN & C.E. HANSON, Cambridge University Press, Cambridge
- [18] BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Beschluss des Bundeskabinetts vom 17. Dezember 2008, 78 S.
- [19] ROTHER, K.-H. (2006): Klimaentwicklung und Risiken für den Hochwasserschutz, Wasser und Abfall 12: 10 - 13
- [20] SCHROEDER, P.R. & K. BERGER (2004): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell: Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3, 4. überarb. Aufl., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg, 117 S.
- [21] ENKE, W., & A. SPEKAT (1997): Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression, Climate Research 8: 195 - 207
- [22] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000): Emission Scenarios, A Special Report of IPCC Working Group III, Summary for Policymakers, 20 S.
- [23] UMWELTBUNDESAMT (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen, Hintergrundpapier, 27 S., <http://www.uba.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf>