

Anforderungen an die Wasserhaushaltsschicht - die Bedeutung der Klimabedingungen

Dr.-Ing. N. Markwardt, pedo tec GmbH, Berlin

1 Einleitung

Für die Oberflächenabdichtung von Deponien sind in der Deponieverordnung (DepV) Regel-Oberflächenabdichtungssysteme vorgegeben.

Vor dem Hintergrund der kostenintensiven Aufwendungen für solche Oberflächenabdichtungssysteme werden derzeit unter den Forderungen der ökologischen Notwendigkeit und der Berücksichtigung der ökonomischen Möglichkeiten kostensparende Alternativen geplant und gebaut.

Für niederschlagsarme Standorte werden in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeiten und Grenzen von Wasserhaushaltsschichten als alleiniges Sicherungselement zur Minimierung des Niederschlagseintritts in Deponien und Altablagerungen z.T. kontrovers diskutiert.

In dieser Arbeit werden die Abhängigkeiten und der Einfluss der bodenkundlichen und vegetationsspezifischen Parameter der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht vor dem Hintergrund der Minimierung der Dränspende (im Falle eines Oberflächenabdichtungssystems) bzw. Minimierung der Versickerung in den Deponiekörper (im Falle einer Wasserhaushaltsschicht als alleiniges Sicherungselement) dargestellt und bewertet.

Neben den bodenkundlichen und vegetationsspezifischen Parametern wird insb. auch auf die Bedeutung der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in Deutschland eingegangen.

2 Anforderungen an die Wasserhaushaltsschicht

Die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht hinsichtlich der Schichtdicke sind gemäss Deponieverordnung DepV (Tab. 2 Anhang 1) $d \geq 1,0$ m.

Im Anhang 5 der DepV ist weiter formuliert, dass die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht sich an der Durchwurzelungstiefe der Vegetation und an der erforderlichen Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats und besonderen Schutzerfordernissen der Rekultivierungsschicht im Einzelfall zu orientieren hat.

Die Materialien der Rekultivierungsschicht sollen über eine hohe nutzbare Feldkapazität nFK sowie über eine ausreichende Luftkapazität LK verfügen.

Weitere detaillierte Hinweise sind den beiden GDA Empfehlungen E 2-31 "Rekultivierungsschichten" und E 2-32 "Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien" auch mit Bezug auf die BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994) zu entnehmen.

In Anlehnung an die Vorgaben der DepV für Rekultivierungsschichten sind an Wasserhaushaltsschichten erhöhte Anforderungen vor dem Hintergrund der Minimierung der Dränspende (Oberflächenabdichtungssystem) bzw. Minimierung des Niederschlagseintritts in den Deponiekörper (Wasserhaushaltsschicht als alleiniges Sicherungselement) zur Beantwortung der folgenden Frage zu stellen:

Kann unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen die Schichtdicke und das Wasserspeichervermögen der Wasserhaushaltsschicht in Verbindung mit einem geeigneten Bewuchs so gewählt werden, dass die Versickerung aus der Wasserhaushaltsschicht auch unter Berücksichtigung von Langzeitaspekten so weit minimiert wird, um die Anforderungen an das/die Dichtungselement(e) zu reduzieren bzw. gänzlich auf sie zu verzichten?

3 Unterschiedliche klimatische Bedingungen in Deutschland

Der Abb. 1 ist die graphische Darstellung der mittleren jährlichen Niederschlagshöhe in Deutschland zu entnehmen (Quelle: Deutscher Wetterdienst DWD). Es sind die unterschiedlichen langjährigen Jahressummenwerte des Niederschlags für die einzelnen Bundesländer zu erkennen.

Der Karte ist zu entnehmen, dass die Bandbreite des Niederschlags für den Nordosten Deutschlands von minimal 400-500 mm (rote Kennzeichnung der Bereiche Thüringer Becken, große Teile Sachsen-Anhalts und vereinzelt Bereiche im östlichen Teil Brandenburgs) bis maximal 1100 mm schwankt (dunkelgrüne Kennzeichnung der Höhenlagen im Thüringer Wald und Erzgebirge).

Die unterschiedlichen klimatischen Voraussetzungen für Deponiestandorte in Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen werden in der Tab. 1 deutlich.

Die Tab. 1 zeigt für verschiedene Standorte das langjährige Mittel von 1961-1990 (Quelle: Monatliche Witterungsberichte des Deutschen Wetterdienstes DWD) und die jahreszeitliche Verteilung des Niederschlags auf der Basis von Monatssummenwerten sowie die Zusammenfassung dieser Monatssummenwerte für das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr.

Während für die Standorte in Sachsen-Anhalt generell geringe Niederschläge vorhanden sind (Regenschatten des Harzes!) sind für die Standorte Meiningen (Thüringen) und Aue (Sachsen) deutlich höhere Niederschläge vorhanden.

Neben den geringen Jahressummenwerten des Niederschlags für die Standorte in Sachsen-Anhalt sind vor allem auch die geringen Niederschläge in den verdunstungsarmen Wintermonaten zu nennen.

Für den niederschlagsärmsten Standort Weißenfels (s. Tab. 1) mit einem langjährigen Mittel des Niederschlags von 471 mm/a beträgt der langjährige Wert des Niederschlags für das hydrologische Winterhalbjahr (Monate Nov.-Apr.) lediglich 189 mm.

4 Wasserhaushaltsbetrachtungen und einflussnehmende Faktoren

4.1 Qualitative Wasserhaushaltsbetrachtungen

Die Wasserhaushaltskomponenten des in der Abb. 2 dargestellten alternativen Oberflächenabdichtungssystems sind:

Niederschlag

Verdunstung (Evapotranspiration)

Oberflächenabfluss

Dränabfluss in der Entwässerungsschicht

Versickerung durch die Abdichtungsschicht

und Änderung der Bodenfeuchte in der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht.

Die Wasserhaushaltskomponenten der in der Abb. 2 dargestellten Oberflächenabdeckung (Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht; ohne Dichtungs- und Dränelement) sind:

Niederschlag

Verdunstung (Evapotranspiration)

Oberflächenabfluss

Versickerung in den Deponiekörper

Änderung der Bodenfeuchte in der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht

Der Wasserhaushalt in der Rekultivierungsschicht/Wasserhaushaltsschicht (sowohl als Bestandteil des Oberflächenabdichtungssystems als auch im Falle einer Oberflächenabdeckung) kann folgendermaßen qualitativ beschrieben werden:

Unter den vorhandenen standortspezifischen klimatologischen Bedingungen (hier ist insbesondere der Niederschlag zu nennen) kommt es zunächst unter Berücksichtigung des Bodens der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht und des Bewuchses zur aktuellen Verdunstung und bei entsprechenden Starkniederschlägen ggf. zum Oberflächenabfluss.

Während der Oberflächenabfluss auf einzelne Niederschläge beschränkt ist, stellt die Verdunstung einen im tages- und jahreszeitlichen Verlauf sich ändernden kontinuierlichen Prozess dar.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um die tatsächliche (aktuelle, reale) Verdunstung handelt, die in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte in der Rekultivierungsschicht gegenüber der potentiellen Verdunstung (**Evapotranspiration**) deutlich reduziert sein kann.

Die potentielle Verdunstung stellt die maximal wieder in die Atmosphäre verdunstende Niederschlagsmenge dar.

Zusammen mit der vorhandenen Vegetation hat die Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht insbesondere in dem verdunstungsrelevanten Bodenbereich einen entscheidenden Einfluss auf die Größe der aktuellen Verdunstung.

In Zeiträumen hoher Verdunstung erfolgt in dem verdunstungsrelevanten Bereich der Rekultivierungsschicht der Wasserentzug durch Bodenevaporation und Pflanzentranspiration in Abhängigkeit vom Wasserspeichervermögen des Bodens.

Bei nachlassender (bzw. nicht ausreichender) Verdunstung wird zunächst das entstandene Bodenwasserdefizit wieder aufgefüllt. Ist das Wasserspeichervermögen des Bodens in dem verdunstungswirksamen Bodenbereich ausgeschöpft, kommt es zu einer Versickerung in die darunter liegenden verdunstungsunbeeinflussten Bodenbereiche.

Der Anteil des Niederschlagswassers, der den verdunstungsbeeinflussten Bodenbereich verlassen hat, ist nicht mehr pflanzenverfügbar und steht somit der Verdunstung nicht mehr zur Verfügung. Es findet keine aufwärts gerichtete Wasserströmung mehr statt. Dieser Anteil des Niederschlagswassers entspricht somit der Versickerung aus der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht.

4.2 Parameter und Kennwerte für Wasserhaushaltsschichten

Neben den klimatologischen Parametern sind insb. auch die bodenkundlichen und vegetationspezifischen Parameter zu nennen.

Hier stehen in der Bodenkunde (s.a. BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994)) Kenngrößen hinsichtlich des Wasserspeichervermögens und des Verdunstungsvermögens zur Verfügung, die als Eingabeparameter für Wasserhaushaltsmodelle (z.B. HELP-Modell) dienen und somit die Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten von Oberflächenabdichtungssystemen und Oberflächenabdeckungen/Wasserhaushaltsschichten ermöglichen.

4.2.1 Bodenkundliche Parameter

Nach DIN 19683 Bl. 9 ist unter der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_f eines Bodens die Filtergeschwindigkeit v in der wassergesättigten Probe geteilt durch das Wasserspiegelgefälle $i = h/l$ zu verstehen. In Verbindung mit der Kontinuitätsgleichung kann k_f gemäß der Formel

$$k_f = Q \cdot l / (F \cdot h)$$

Q = Abfluss in cm^3/s

l = Länge der durchströmten Probe in cm

F = Probenquerschnitt in cm^2

h = Druckhöhe in cm

gemessen werden.

Die Wasserleitfähigkeit wird wesentlich beeinflusst von der Anzahl, Größe und Form der Poren, durch die das Wasser fließt. Dieser Zusammenhang kann auch durch die Berechnung nach der HAGEN-POISEUILLESCHEN Gleichung oder durch die einfach aufgebaute Näherungsformel nach HAZEN berücksichtigt werden (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1982).

Unter gesättigten Bedingungen stellt sich der maximal mögliche Wassergehalt eines Bodens entsprechend der Porosität n ein, wenn alle Poren mit Wasser gefüllt sind. Die Porosität wird auch als Porenvolumen PV bezeichnet und entspricht dem Hohlraumanteil bezogen auf das Gesamtvolumen eines Bodenkompartmentes.

Für den Bodenwasserhaushalt in der ungesättigten Zone (Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschichten !!!) ist allerdings die ungesättigte Wasserleitfähigkeit k_u von Bedeutung. Der Wassergehalt eines Bodens beeinflusst dabei im wesentlichen die Größe von k_u in der Form, dass in Folge der in den wasserleitenden Poren eingelagerten Luft die ungesättigte Wasserleitfähigkeit gegenüber der gesättigten reduziert wird, da der wasserleitende Querschnitt durch die eingelagerte Luft eingeengt wird (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1982).

Der Bodenwassergehalt Θ kann im Labor gemessen werden, indem an einer Bodenprobe bei verschiedenen Unterdrücken der sich einstellende Wassergehalt gemessen wird. Der so bestimmte Wassergehalt entspricht für einen bestimmten Boden mit einer charakteristischen Porenraumverteilung einem bestimmten Matrixpotential Φ , dass anschaulich als Saug- oder Wasserspannung aufgefasst werden kann, mit dem die Bodenmatrix das Wasser festhält.

Da sich das Matrixpotential, gemessen in (cm Wassersäule), in einem Boden über mehrere Größenordnungen erstreckt, wird i. allg. der negative Zehnerlogarithmus des Matrixpotentials angegeben. Dieser wird als pF-Wert bezeichnet und die durch mit den verschiedenen Unterdrücken gewonnenen Kurven werden pF-Kurven oder Saugspannungskurven genannt. Sie geben den Zusammenhang zwischen dem Matrixpotential Φ und dem Wassergehalt Θ .

Nach DIN 19682 Bl.6 ist die Feldkapazität FK der Wassergehalt, der entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten werden kann. Der pF-Wert bei Feldkapazität ist nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (1994) definitionsgemäß 1,8.

Der permanente Welkepunkt PWP eines Bodens ist definitionsgemäß der Wassergehalt bei einem pF-Wert von 4,2 (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1994) und kennzeichnet den Grenzwert, bei dessen Erreichen landwirtschaftliche Kulturen in der Regel irreversibel zu welken beginnen.

Die Differenz der beiden ist die nutzbare Feldkapazität nFK und beschreibt somit das maximale Wasserspeichervermögen eines Bodens unter natürlichen Bedingungen.

Der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1994) sind die bodenkundlichen Zusammenhänge für die einzelnen Parameter Porenvolumen, Feldkapazität, permanente Welkepunkt, Luftkapazität und Lagerungsdichte zu entnehmen.

In den beigefügten Tab. 26 und 56 der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1994) sind exemplarisch für einen mittel schluffigen Sand Su3 die relevanten bodenkundlichen Parameter markiert. Demnach hat der Su3 bei einer mittleren Lagerungsdichte (Rohdichte

trocken 1,45 -1,65 (g/cm³)) eine nutzbare Feldkapazität von 22 Vol%, eine Feldkapazität von 28,5 Vol% und ein Luftvolumen von 9,5 Vol%.

Diese Werte gelten streng genommen nur für gewachsene Böden. Es gibt aber keine für geschüttete Böden im Zusammenhang mit der Verwendung als Material für Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten, so dass die o.g. Werte zunächst als Orientierung dienen müssen und im Rahmen der Qualitätssicherung durch die Eigen- bzw. Fremdüberwachung nachzuweisen sind.

4.2.2 Vegetationsspezifische Parameter

Für die Wasserhaushaltsmodellierung zur Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten ist neben dem Wasserspeichervermögen des Bodens (nutzbare Feldkapazität nFK) die Ausbildung des verdunstungsbeeinflussten Bereichs der vorhandenen Vegetation von Bedeutung. In der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1994) wird in diesem Zusammenhang standardmäßig der Begriff "effektive Durchwurzelungstiefe DWT_{eff} " verwendet. Im Unterschied zur realen Durchwurzelungstiefe der vorhandenen Vegetation ist hierunter auch der nicht durchwurzelte Bereich des Bodens zu verstehen, in dem das Wasser durch Kapillarkräfte im Boden an die Untergrenze des Wurzelraums aufsteigen kann und dort über die Pflanzentranspiration wieder in die Atmosphäre verdunstet.

In der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1994) sind die vegetationskundlichen Zusammenhänge bzgl. der Ausbildung des verdunstungsbeeinflussten Bereichs und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen vertikalen Bodenfeuchteverteilung in der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht grundsätzlich dargestellt.

In der beigefügten Tab. 68 der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1994) ist exemplarisch für einen mittel schluffigen Sand Su3, mittlere Lagerungsdichte die effektive Durchwurzelungstiefe markiert.

5 Berechnung der Bodenfeuchte in einer Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht

Mit den o.g. nutzbaren Feldkapazitäten und mittleren effektiven Durchwurzelungstiefen wird in den Wasserhaushaltsmodellen, u. a. auch mit dem HELP-Modell, gerechnet.

Die Abb. 3 verdeutlicht anschaulich die Berechnung der vertikalen Bodenfeuchteverteilung mit dem HELP-Modell in einer Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht (allg. Darstellung zur Visualisierung).

Berechnung der ungesättigten Versickerung

In den verdunstungsarmen Zeiträumen kommt es zu der vertikalen ungesättigten Wasserbewegung in der Rekultivierungsschicht von oben nach unten. Wenn man z.B. die

Schichtdicke einer Rekultivierungsschicht von 1,0 m in 10 Kompartimente (Teilschichten) von jeweils 10 cm unterteilt, kann die ungesättigte vertikale Versickerung wie folgt erklärt werden:

Innerhalb jeder einzelnen Teilschicht ($d = 10$ cm) bestimmt die Feldkapazität des Bodens den Anteil des Niederschlagswassers, der entgegen der Schwerkraft infolge der Bindungskräfte des Bodens gehalten werden kann. Ist die Bodenfeuchte in einem Kompartiment grösser als die Feldkapazität, so kommt es zur ungesättigten Versickerung in das darunter liegende Kompartiment usw.

Der Bodenwassergehalt/Bodenfeuchte ist also nicht einheitlich verteilt über die Schichtdicke der Rekultivierungsschicht, sondern in Abhängigkeit von den Niederschlägen und den Witterungsbedingungen zuvor kommt es zu einer unterschiedlichen vertikalen Bodenfeuchteverteilung innerhalb des gesamten Profils.

So ist bei Bodenfeuchten größer als Feldkapazität dann auch die Versickerungsfront des Niederschlagswassers innerhalb der Rekultivierungsschicht nach einem Starkregenereignis zu erklären, die sich mit einer entsprechenden zeitlichen Verzögerung von etwa 1-2 Tagen als Versickerung aus der Rekultivierungsschicht (Dränspende) in gedämpfter Form bemerkbar macht.

Berechnung der Austrocknung

In den verdunstungsintensiven Sommermonaten kommt es in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge zu einem Bodenfeuchtedefizit in der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht.

Auch in diesem Fall ist die Bodenfeuchteverteilung nicht einheitlich über das gesamte Profil der Rekultivierungsschicht verteilt. Als Folge der hohen Verdunstung (Evapotranspiration) ist die Bodenwasserentnahme durch Bodenevaporation und Pflanzentranspiration im oberflächennahen Bereich der Rekultivierungsschicht deutlich stärker ausgeprägt und findet in den tieferen Bodenschichten der Rekultivierungsschicht zeitlich verzögert und in deutlich abgeschwächer Form statt.

Auch für diese Fragestellung kann die Rekultivierungsschicht (in diesem Fall die Verdunstungszone) in verschiedene Kompartimente/Teilschichten in der folgenden Form unterteilt werden:

Es sind 6 gleich große Elemente/Segmente mit jeweils 15 cm Dicke für einen verdunstungsbeeinflussten Bereich von z.B. 90 cm vorhanden. Diese Unterteilung wird im HELP-Modell verwendet und ist aus Verdunstungsmessungen an grasbewachsenen wägbaren Lysimetern in Verbindung mit Tensiometermessungen zur Bestimmung der Bodenfeuchte entwickelt worden.

Zur Erfassung der erhöhten oberflächennahen Austrocknungsprozesse wurde das obere Segment weiter unterteilt und alle Segmente mit den nachfolgend dargestellten Gewichtungsfaktoren versehen:

Segmentdicke		Gewichtungsfaktoren (aufsummiert)	
1/36	2,5 cm	0,111	0,111
5/36	12,5 cm	0,397	0,508
1/6	15,0 cm	0,254	0,762
1/6	15,0 cm	0,127	0,889
1/6	15,0 cm	0,063	0,952
1/6	15,0 cm	0,032	0,984
1/6	15,0 cm	0,016	1,000
$\Sigma=1$	$\Sigma=90$ cm		

In dieser Form können die erhöhten Verdunstungsprozesse in dem oberflächennahen Bodenbereich der Rekultivierungsschicht auch quantitativ erfasst werden.

Aus den o. g. Werten wird deutlich, dass z.B. bis zu einer Tiefe von 30 cm unter Geländeoberkante 76,2 % der Evapotranspiration stattfindet. In den darunter liegenden Bodenbereichen ist die aktuelle Evapotranspiration und damit auch die Abnahme der Bodenfeuchte (Austrocknung) in der Rekultivierungsschicht deutlich schwächer ausgeprägt. Hier erfolgt bei grasbewachsenen Böden in erster Linie der kapillare Aufstieg des Bodenwassers bis an die Untergrenze des Wurzelraums. Die Bodenfeuchteabnahme ist in dem unteren Bereich also deutlich geringer.

Erst wenn infolge lang anhaltender Trockenperioden mit keinen oder nur geringen Niederschlägen (mehrere Wochen) der Boden der Rekultivierungsschicht in dem oberen Bereich stark ausgetrocknet ist, erfolgt auch in den unteren Bereichen eine zeitlich verzögerte Abnahme der Bodenfeuchte.

6 Messung der Bodenfeuchte in einer Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht

Für die Messung der vertikalen Bodenfeuchteverteilung innerhalb einer Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht stehen FDR Sonden zur Verfügung.

Zur Messung des Wassergehalts wird der Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätszahl des Bodens und dem volumetrischen Wassergehalt verwendet. FDR Sonden nutzen die Amplitudenänderung eines Impulses. Sie sind ganzjährig einsetzbar. Es ist eine bodenspezifische Kalibrierung notwendig. Die Genauigkeit der FDR Sonden beträgt ≈ 2 Vol%.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Wassergehaltsmessungen in unterschiedlichen Tiefen einer Wasserhaushaltsschicht dargestellt, die seit 1994 zur Sicherung der Hochhalde Leuna aufgebracht wird.

Seit Oktober 2003 werden neben den Versickerungsmessungen aus der Wasserhaushaltsschicht (Kleinlysimeter) auch Bodenfeuchtemessungen in der Wasserhaushaltsschicht mittels FDR Sonden in den Tiefen 30 cm, 80 cm und 130 cm unter GOK durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen sind in der Abb. 4 dargestellt.

Die Bodenfeuchtemessungen dokumentieren, dass nach der Vegetationsperiode 2003 bis zu einer Tiefe von 80 cm unter GOK eine Austrocknung bis zum permanenten Welkepunkt stattgefunden hat (ca. 27 Vol%).

Dieser Wert des permanenten Welkepunktes wurde zusammen mit den Werten der Feldkapazität und des Porenvolumens im Labor bestimmt (pF-Apparatur, Druckmembrantopf).

In dem oberflächennahen Bereich bis zu 30 cm unter GOK hat eine weitere Austrocknung bis auf ca. 20 Vol% stattgefunden, da in diesem Bereich neben dem Wasserentzug durch die Wurzeln der vorhandenen Grasvegetation auch noch der zusätzliche Wasserentzug durch die Sonneneinstrahlung wirksam ist.

Als wesentliches Ergebnis der Bodenfeuchtemessungen ist weiterhin festzustellen dass in dem außergewöhnlich trockenen Jahr 2003 in der Tiefe von 130 cm unter GOK eine deutliche Abnahme der Bodenfeuchte gemessen worden ist. Der minimale Wassergehalt betrug in dieser Tiefe nach dem Ende der Vegetationsperiode 2003 ca. 36 Vol%.

Das entspricht ca. 40% der nutzbaren Feldkapazität ($36 \text{ Vol\%} [= \text{aktueller Wassergehalt}] - 27 \text{ Vol\%} [= \text{Wassergehalt bei permanenten Welkepunkt}] = 9 \text{ Vol\%}; 9 \text{ Vol\%} : 23 \text{ Vol\%} [= \text{nutzbare Feldkapazität } nFK = FK - PWP] = 40\%$ der nFK). Das bedeutet, dass in der Tiefe von 130 cm unter GOK immerhin 60% des pflanzenverfügbaren Wassers durch die Vegetation in der Vegetationsperiode 2003 aufgenommen worden sind.

Die Bodenfeuchteabnahme in der Vegetationsperiode 2004 entspricht bis zu einer Tiefe von 30 cm den Bedingungen des Vorjahres. Auch in 2004 wurde vor den hohen Niederschlagsmengen im Juli ein minimaler Wassergehalt in dieser Tiefe von ca. 20 Vol% gemessen.

Im Unterschied dazu war die Bodenfeuchteabnahme in der Tiefe 80 cm unter GOK im Vergleich zum Vorjahr deutlich reduziert. Der minimale Wassergehalt betrug in dieser Tiefe ca. 32 Vol %.

In der Tiefe von 130 cm unter GOK ergaben sich nur geringfügige Unterschiede (2004: minimaler Wassergehalt 38 Vol%; im Vergleich dazu 2003: minimaler Wassergehalt 36 Vol%).

Die Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen sind wie folgt zu bewerten:

Der relativ konstante Wassergehalt (36 - 38 Vol%) in der Tiefe von 130 cm unter GOK für den Zeitraum von Oktober 2003 bis Oktober 2004 dokumentiert, dass keine bzw. keine nennenswerte Versickerung des Niederschlagswassers in der Wasserhaushaltsschicht bis in diese Tiefe stattgefunden hat!

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Hinblick auf die mögliche Minimierung der Versickerung des Niederschlagswassers aus einer Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht wurden die maßgeblichen klimatologischen, bodenkundlichen und vegetationspezifischen Parameter dargestellt und bewertet, die in Verbindung mit Modellierungen eine Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems bzw. einer Wasserhaushaltsschicht als alleiniges Sicherungselement für Deponien und Altablagerungen ermöglichen.

Es wurden die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen für Deponiestandorte in Deutschland dargestellt.

Als Folge der Lage im Regenschatten des Harzes sind z.B. weite Teile Sachsen-Anhalts sowohl durch geringe mittlere jährliche Niederschlagssummen (ca. 500 mm/a) als auch geringe mittlere Niederschläge in dem hydrologischen Winterhalbjahr (ca. 200 mm/a) geprägt.

Unter der Voraussetzung einer Wasserhaushaltsschicht mit einem hohen Wasserspeichervermögen und in Verbindung mit einer gut ausgeprägten Grasvegetation können diese besonderen klimatischen Bedingungen zu einer Minimierung/Vermeidung der Versickerung aus der Wasserhaushaltsschicht an diesen niederschlagsarmen Standorten führen.

In Ergänzung zu Wasserhaushaltsmodellierungen erlauben Bodenfeuchtemessungen mit FDR-Sonden eine ganzjährige Quantifizierung der Wassergehalte und somit den Verlauf der Versickerungsfront nach Niederschlagsereignissen bzw. den Wasserentzug als Folge der Verdunstung in unterschiedlichen Tiefen einer Wasserhaushaltsschicht.

Aufgrund der Ergebnisse solcher Wassergehalts-/Bodenfeuchtemessungen in einer Wasserhaushaltsschicht auf der Hochhalde Leuna in den Tiefen 30, 80 und 130 cm unter der grasbewachsenen GOK konnte dokumentiert werden, dass an diesem niederschlagsarmen Standort in Sachsen-Anhalt in dem Zeitraum von Oktober 2003 bis Oktober 2004 keine Versickerung in den unteren Bereich der Wasserhaushaltsschicht stattgefunden hat.

Es wird abschließend darauf hingewiesen, dass sich an niederschlagsreichen Standorten (z.B. Höhenlagen des Thüringer Waldes bzw. Erzgebirge) grundsätzlich andere Wasserhaushaltsbedingungen einstellen, die in Abhängigkeit von den hohen Niederschlägen dann folgerichtig auch zu den entsprechend großen Versickerungen aus der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht führen.

8 Literatur zum Thema

Bendler D., MARKWARDT N., Kliche H.(2002): Wasserhaushaltsuntersuchungen an einer Deponieabdeckschicht, DEPOTECH 2002, Konferenzbericht der 6. Depotech Fachtagung Leoben/Österreich 20.-22.11.2002, Verlag Glückauf GmbH Essen, ISBN 3-7739-5979-6

BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994): AG Bodenkunde, 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

- Deponieverordnung - DepV (24. Juli 2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Änderung der Abfallablagerungsverordnung, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil Nr.52
- DVWK (1996): Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996, Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
- GDA-Empfehlung E 2-30 (1998): Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Bautechnik 75 (1998) Heft 9, S. 616-626
- GDA-Empfehlung E 2-31 (2000): Rekultivierungsschichten, HAMBURGER BODENKUNDLICHE ARBEITEN BAND 47, ISSN : 0724-6382
- GDA-Empfehlung E 2-32 (2000): Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien, HAMBURGER BODENKUNDLICHE ARBEITEN BAND 47, ISSN : 0724-6382
- HAFERKORN U. (2001): Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebiets -Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis- Elektronische Dissertationen der Georg-August-Universität Göttingen; <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2001/haferkorn/haferkorn.pdf>
- MARKWARDT, N. (1990): Der Bodenwasserhaushalt in Deponieabdeckschichten. IX, 119S., Best. Nr. 8 Va 2045, TU Berlin. UB. Abt. Publikationen, Str. d. 17. Juni 135, 1000 Berlin 12
- MARKWARDT,N.(1998): Der Einfluss von Rekultivierungsschichten auf den Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen, in Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 109, Erich Schmidt Verlag
- SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung, Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer Verlag 185 pp
- USDA; Soil Conservation Service. (1972): National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. U.S.Government Printing Office, Washington D.C.

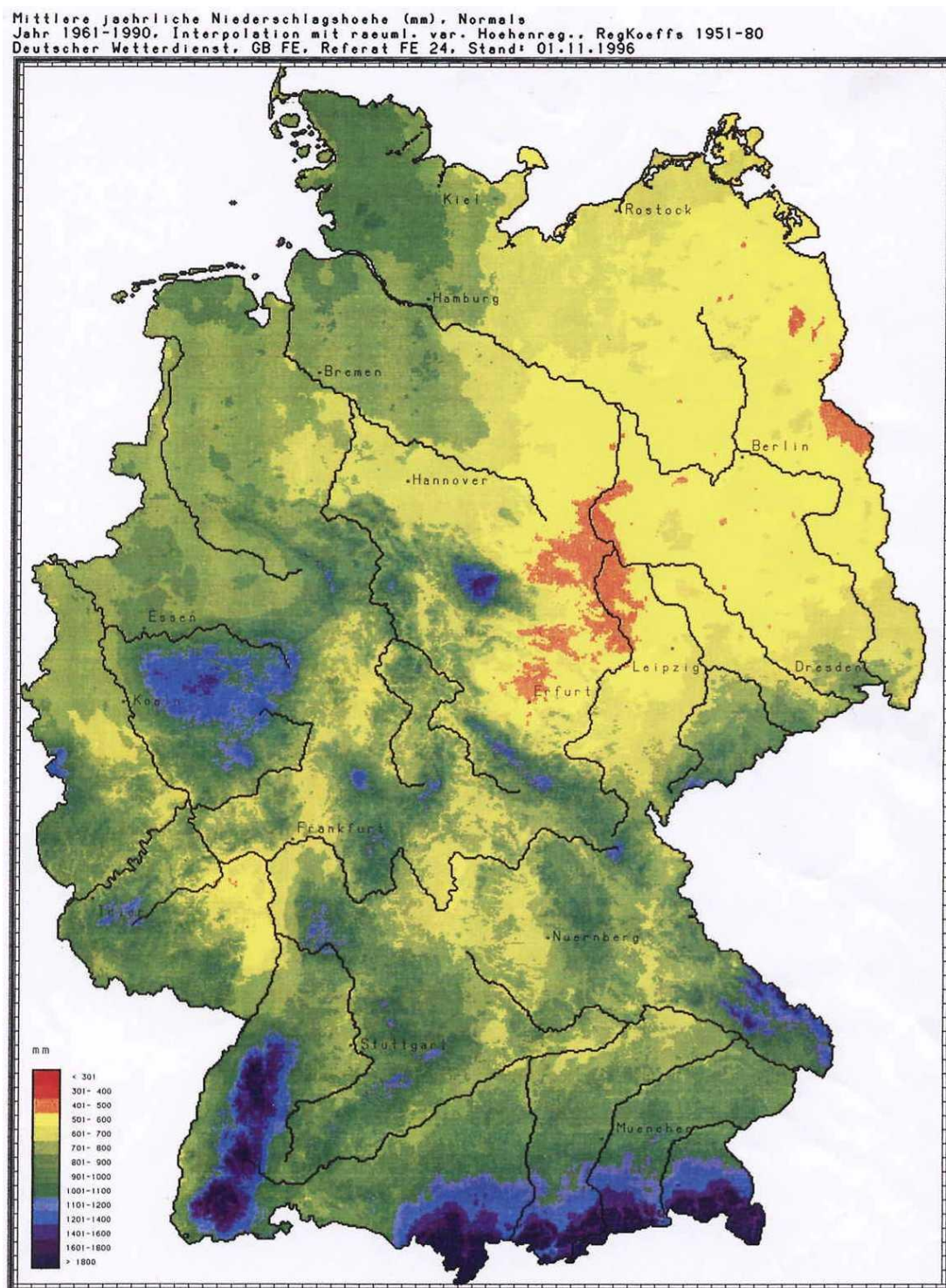


Abb. 1: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (mm) in Deutschland
(Quelle: DWD)

Tab. 1 Monatssummenwerte des Niederschlags (langj. Mittel 1961 - 1990)
für unterschiedliche Standorte in Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

Monat	See- hausen (mm)	Magde- burg (mm)	Witten- berg (mm)	Brocken (mm)	Weiß- fels (mm)	Meiningen (mm)	Aue (mm)
Jan	40	33	41	182	25	50	53
Feb	29	31	34	139	26	41	48
Mär	37	38	41	164	33	51	52
Apr	39	40	42	131	44	50	71
Mai	48	47	52	118	50	61	80
Jun	64	62	63	139	59	73	94
Jul	57	48	48	133	45	59	85
Aug	51	51	62	138	57	61	89
Sep	46	36	46	131	39	48	65
Okt	36	29	39	136	32	47	49
Nov	44	38	44	189	30	56	55
Dez	48	41	53	215	31	64	63
Summe 1-12	539	494	565	1815	471	661	804
Summe * 11-4	237	221	255	1020	189	312	342
Summe ** 5- 10	302	273	310	795	282	349	462

* Winterhalbjahr ** Sommerhalbjahr

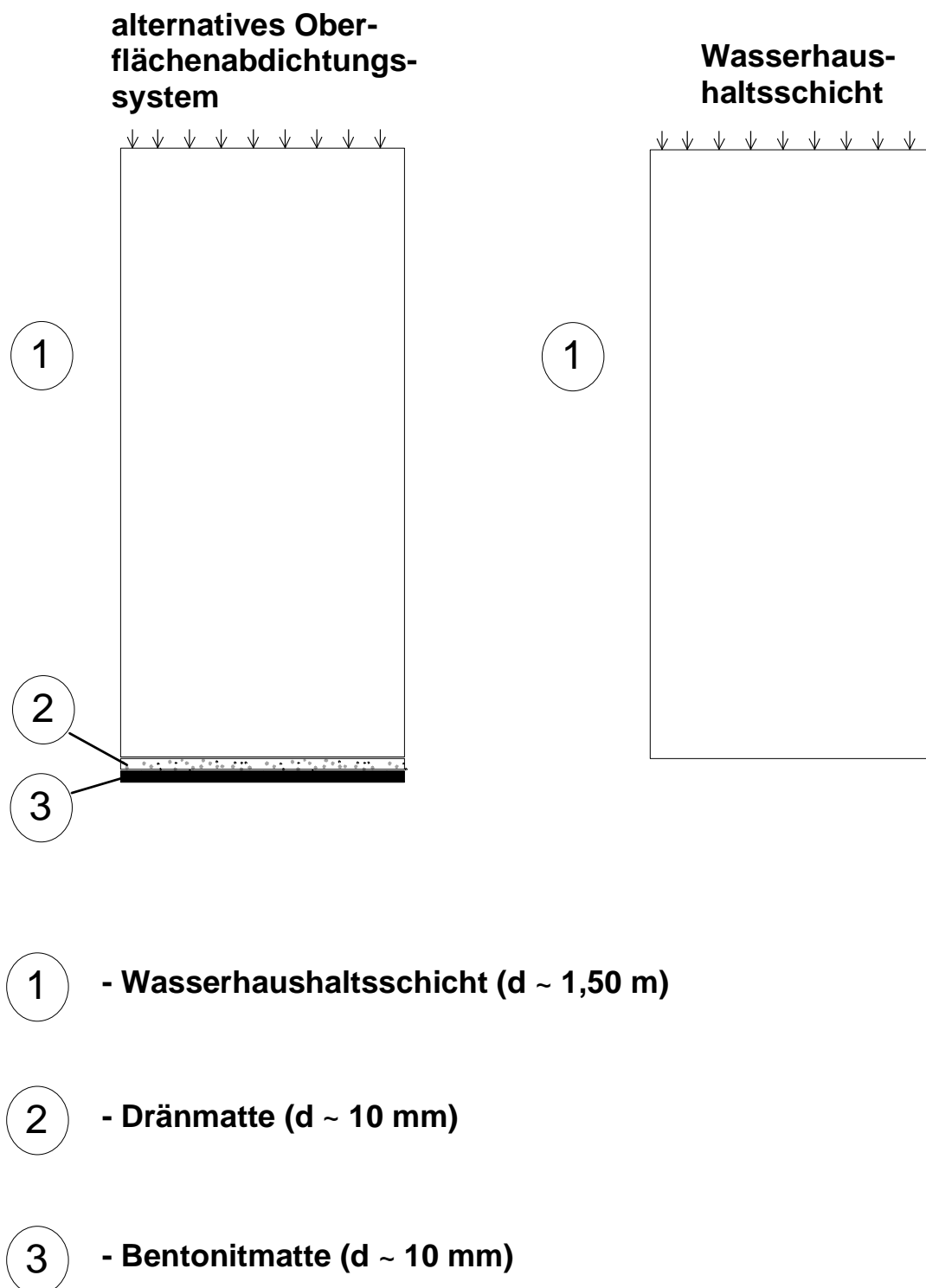


Abb. 2: Schematische Darstellung eines alternativen Oberflächenabdichtungssystems bzw. einer Wasserhaushaltsschicht

Tabelle 26: Grenzwerte der Bodenarten (Anteile der Fraktionen)

Bodenartenuntergruppen	Kurz- zeichen	Kornfraktionen (Masse-%)		
		Ton	Schluff	Sand
reiner Sand	Ss	0- 5	0- 10	85-100
schwach schluffiger Sand	Su2	0- 5	10- 25	70- 90
schwach lehmiger Sand	Sl2	5- 8	10- 25	67- 85
mittel lehmiger Sand	Sl3	8- 12	10- 40	48- 82
schwach toniger Sand	St2	5- 17	0- 10	73- 95
mittel schluffiger Sand	Su3	0- 8	25- 40	52- 75
stark schluffiger Sand	Su4	0- 8	40- 50	42- 60
schluffig-lehmiger Sand	Slu	S 17	40- 50	33- 52
stark lehmiger Sand	Sl4	12- 17	10- 40	43- 78
mittel toniger Sand	St3	17- 25	0- 15	60- 83
schwach sandiger Lehm	Ls2	17- 25	40- 50	25- 43
mittel sandiger Lehm	Ls3	17- 25	30- 40	35- 53
stark sandiger Lehm	Ls4	17- 25	15- 30	45- 68
schwach toniger Lehm	Lt2	25- 35	30- 50	15- 45
sandig-toniger Lehm	Lts	25- 45	15- 30	25- 60
stark sandiger Ton	Ts.4	25- 35	0- 15	50- 75
mittel sandiger Ton	Ts3	35- 45	0- 15	40- 65
reiner Schluff	Uu	0- 8	80-100	0- 20
sandiger Schluff	Us	0- 8	50- 80	12- 50
schwach toniger Schluff	Ut2	8- 12	65- 92	0- 27
mittel toniger Schluff	Ut3	12- 17	65- 88	0- 23
sandig-lehmiger Schluff	Uls	8- 17	50- 65	18- 42
stark toniger Schluff	Ut4	17- 25	65- 83	0- 18
schluffiger Lehm	Lu	17- 30	50- 65	5- 33
mittel toniger Lehm	Lt3	35- 45	30- 50	5- 35
mittel schluffiger Ton	Tu3	30- 45	50- 65	0- 20
stark schluffiger Ton	Tu4	25- 35	65- 75	0- 10
schwach sandiger Ton	Ts2	45- 65	0- 15	5- 40
lehmiger Ton	Tl	45- 65	15- 30	0- 25
schwach schluffiger Ton	Tu2	45- 65	30- 55	0- 35
reiner Ton	Tt	65-100	0- 35	

Quelle: Bodenkundliche Kartieranleitung (1994)

Tabelle 56: Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität in Volumen-% in Abhängigkeit von Bodenart und Rohdichte trocken (pt)

Bodenart*	Luftkapazität			nutzbare Feldkapazität			Feldkapazität		
	Poren > 50 µm (pF<1,8)			Poren 0,2-50 µm (pF 4,2 bis 1,8)			Poren < 50 µm (pF ≤ 1,8)		
Kurzzeichen	pt1-2	pt3	pt4-5	pt1-2	pt3	pt4-5	pt1-2	pt3	pt4-5
Ss	24	21,5	18,5	15,5	11	10,5	22	15,5	14,5
Sl2	17	14,5	10,5	19,5	17,5	17	28	24,5	22
Sl3	12,5	11,5	7,5	22,5	18,5	16	34,5	27	24
Sl4	11,5	10	6	20,5	17,5	14,5	34	29	25,5
Slu	8	7	5,5	27	21,5	18,5	41,5	32	29
St2	18,5	17	13	20	15,5	11,5	28,5	22,5	20
St3	-	9,5	7,5	-	14,5	12	-	29	26
Su2	18	15,5	12,5	19,5	16,5	14,5	27,5	22	20
Su3	12	9,5	8	24	22	19	32,5	28,5	25,5
Su4	10,5	8	5	26,5	24,5	21,5	35	31	28,5
Ls2	9	7	5,5	20	14,5	13	39,5	32,5	29
Ls3	7,5	6,5	4,5	19,5	15	12,5	41,5	32,5	28,5
Ls4	8,5	7,5	5,5	19	15,5	12	40	32	27,5
Lt2	5,5	4,5	3	16,5	13	10,5	44,5	36,5	31,5
Lt3	4	3	2,5	14,5	10,5	8	45	38,5	33
Lts	4	3,5	3	15	12	10	45	36,5	30,5
Lu	6,5	5,5	4	19,5	16	14	42	35,5	32
Uu	7,5	5	-	28	25,5	-	41	36,5	-
Uls	8,5	7	3,5	26	22,5	20,5	40,5	33,5	31,5
Us	8,5	6,5	-	28,5	26	-	41	34	-
Ut2	9,5	5	2	27,5	25,5	23	40	36	34,5
Ut3	10	4,5	2	25,5	24	22	38	36	34,5
Ut4	9,5	5	2	22	20,5	17,5	38	36	33,5
Tt	3	2,5	-	16	11,5	-	54	42	-
TI	4	3	-	14	9	-	50	40	-
Tu2	3	2,5	2	15	10	7,5	50	40,5	35,5
Tu3	4,5	4	3	15,5	11	6,5	45	37,5	33
Tu4	7	5	-	17	15	-	41	36	-
Sande									
gSfs	-	20	15	-	14	15	-	17,5	19
mS	-	25,5	22	-	8	8	-	12	12
mSgs	28,5	25	20	9,5	8,5	9,5	13,5	13	13,5
mSfs	26	23,5	18	14	12,5	13,5	16,5	15	17
fS	23	17	13,5	20,5	20	22	23	22,5	25
fSms	21,5	19	16	19	16,5	17,5	22	19,5	20

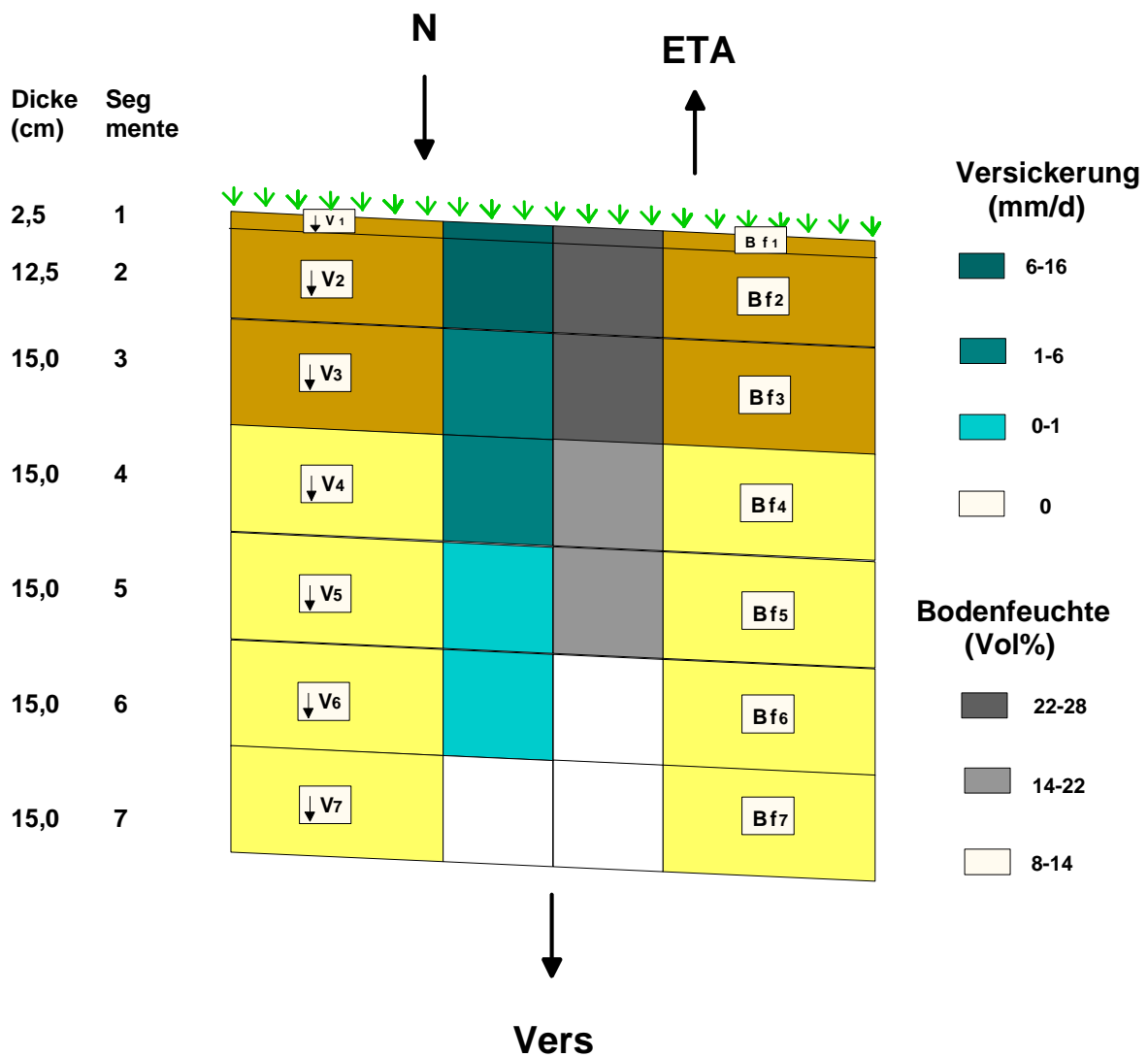
Quelle: Bodenkundliche Kartieranleitung (1994)

Tabelle 68: Mittlere effektive Durchwurzelungstiefe homogener Böden in Abhängigkeit von der Rohdichte trocken (pt) und der Lagerungsdichte (Ld) für Ackerkulturen sowie für Torfe bei Substanzvolumen (SV) der Stufe 3

Bodenarten- hauptgruppe	Bodenart* Kurzzeichen	mittlere effektive Durchwurzelungstiefe (We) in dm		
		pt1 - pt2 Ld1 - Ld2	pt3 Ld3	pt4 - pt5 Ld4 - Ld5
Sand	gS	7	5	5
	mS, fS	8	6	6
	Sl2, Su2, Su3, Su4	9	7	6
	Sl3, St2	11 - 9	8	7
Schluff	Uu, Us	14 - 12	10	8
	Uls, Ut2, Ut3, Ut4, Lu	15 - 13	11	9
Lehm	S14, St3, Slu	13	9	8
	Ls2, Ls3, Ls4, Lt2, Lts	14 - 12	10	8
Ton	Lt3	14 - 12	10	8
	Tu3, Tu4	15 - 13	11	9
	Tu2, Tl, Tt	14 - 12	10	8
Torf		bei SV 3		
	Hh Hn		2 4	

* Für Bodenarten Ts2 bis Ts4, gS, gSms, und fSgs können wegen zu geringer Untersuchungsergebnisse hier keine Angaben gemacht werden

Quelle: Bodenkundliche Kartieranleitung (1994)



verdunstungswirksamer Bodenbereich (DWTEff.) einer Reaktivierungsschicht (z.B. 90 cm)

- N Niederschlag
- ETA aktuelle Verdunstung
- Vers Versickerung (=Dränspende)
- V1 Versickerung aus dem 1. Segment
- Bf1 mittlere Bodenfeuchte in dem 1. Segment

PWP = 8 Vol%; FK = 22 Vol%, nFK = 14 Vol%

Abb. 3: Vertikale Verteilung der Versickerung und der Bodenfeuchte in einer Reaktivierungsschicht (allg. Darstellung zur Visualisierung)

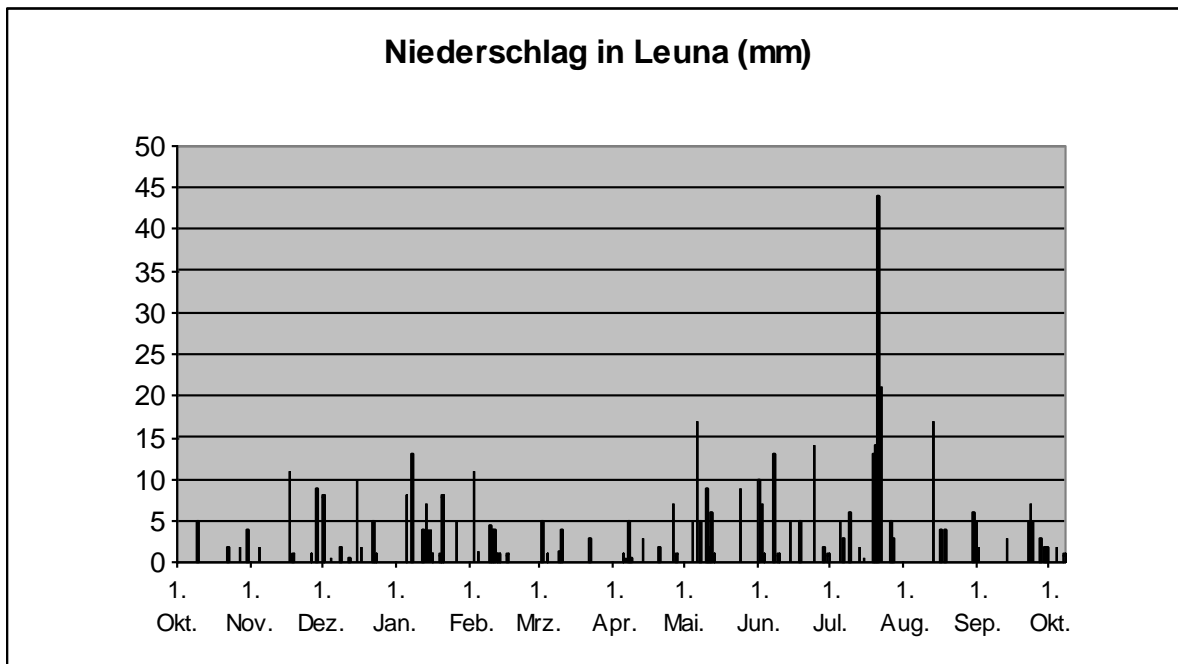
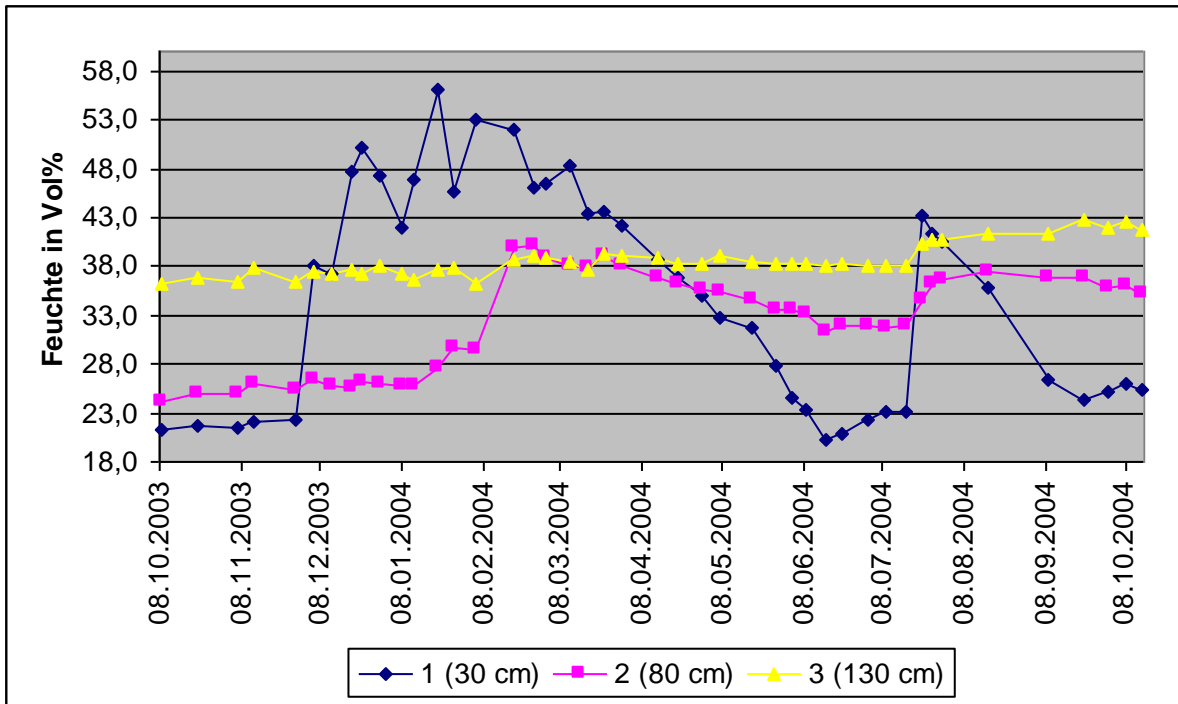


Abb. 4: Niederschläge und gemessene Bodenfeuchten in unterschiedlichen Tiefen einer Wasserhaushaltsschicht