

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	8
2	Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	14
3.1	Kenntnisstand zu Modellen zum Wasserhaushalt von Bodenersatzstoffen und –substraten	14
3.2	Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste.....	15
4	Standortbeschreibung.....	16
4.1	Rückstandshalde Bleicherode	16
4.1.1	Regionale Einordnung des Untersuchungsgebietes	16
4.1.2	Relevante Angaben zum Haldenkörper.....	17
4.1.3	Klima.....	21
4.1.4	Vegetation	22
4.2	Anforderungen und Aufbau der Abdeckschichten	24
4.2.1	Kapillarbrechende Schicht	26
4.2.2	Konturgebende Schicht.....	26
4.2.3	Kulturschicht (Deck- bzw. Rekultivierungsschicht)	27
4.2.4	Überdeckung der Plateaubereiche.....	27
5	Methodik und Arbeitsschritte.....	29
5.1	Wasserhaushalt von Überdeckungsmodulen des Haldenstandortes	29
5.2	Modellbildung.....	31
5.2.1	Kurzbeschreibung relevanter Modelle und -ansätze zur Bodenwasserhaushaltsprognose..	31
5.2.1.1	UNSAT-H 2.02	32
5.2.1.2	SWACROP/SWATRE 2.02.....	32
5.2.1.3	SWIM 1.05.....	32
5.2.1.4	SWMS_2D 1.21	33
5.2.1.5	Modell SIWAPRO.....	33
5.2.1.6	Modell HYDRUS-2D.....	33
5.2.1.7	HELP - Modell deutsche Version.....	34
5.2.1.8	Modell BOWAHALD - TU Freiberg.....	34
5.2.1.9	M&S.....	35
5.2.1.10	Agrarmeteorologisches Modell AMBETI	35
5.2.1.11	Modell DESI - Finsterwalder Umwelttechnik GmbH.....	36
5.2.1.12	Modell SIMPEL.....	36
5.2.2	Wichtung und Auswahl geeigneter Modellansätze	36
5.3	Teilmodule zur Modellparametrisierung.....	41
5.3.1	Infiltration.....	43
5.3.2	Ermittlung des die Oberfläche erreichenden Niederschlages	43
5.3.3	Berücksichtigung von Staunässe und kapillarem Wasseraufstieg	44
5.3.4	Evapotranspiration.....	45

5.3.5	Interzeption.....	46
5.3.6	Oberflächenabfluss	47
5.3.7	Hypodermischer Abfluss	49
5.4	Ermittlung der Daten und Messwerte	51
5.4.1	Klimatologische Daten.....	51
5.4.2	Ermittlung der Versickerungsmengen.....	53
5.4.3	Modellrelevante bodenphysikalische Parameter	56
5.5	Modellpräzisierung	58
6	Untersuchungsergebnisse und Auswertung.....	61
6.1	Klimatologische Daten.....	61
6.1.1	Niederschlag.....	61
6.1.2	Vergleich zu bodenebenen Niederschlagssammlern.....	62
6.1.3	Lufttemperatur.....	63
6.1.4	Windverhältnisse.....	63
6.1.5	Globalstrahlung	65
6.2	Einschätzung der klimatischen Wirkungen auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten.....	66
6.3	Bewertung bodenphysikalischer Parameter	67
6.4	Ergebnisse der Simulationsrechnungen.....	69
6.4.1	Modellverifizierung.....	69
6.4.2	Handhabung des Modells BOWAHALD.....	70
6.4.3	Erstellung von Szenarien	73
6.4.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.....	81
7	Verwertung und Nutzen der Ergebnisse.....	83
7.1	Anwendungsorientierte Hinweise zur Überdeckungsoptimierung	83
7.2	Ableitung standortbezogener pflanzenphysiologischer Kriterien und Vorschläge zur Begrünung	84
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	86
9	Literaturverzeichnis	89

Anlagenverzeichnis

1	Übersichtskarte Südharz-Kalirevier	Maßstab 1 : 10.000
2	Lage des Lysimeters und der Klimastationen	Maßstab 1 : 2.500
3	Überdeckung der Kalihalde Bleicherode	Maßstab 1 : 5.000
4	Lageplan der Lysimeteranlage	Maßstab 1 : 2.000
5	Monatliche Niederschläge an den verschiedenen Wetterstationen	
6	Monatsmittel der Lufttemperatur an den drei Expositionen	
7	Monatsmittel der Windgeschwindigkeiten an den Expositionen	
8	Monatsmittel der Globalstrahlung an den Expositionen	
9	Monatsmittel der relativen Luftfeuchte an den Expositionen	
10	Zeitverläufe der Versickerungsraten der Lysimeter mit unterschiedlichen Abdeckmaterialien	
11	Schematischer Aufbau der Lysimeter	
12	Relevante Stoffe und Stoffgruppen zur Abfallverwertung auf Kalirückstandshalden	
13	Auszug einer Ausgabedatei von HELP 3.50d	
14	Informationsdateien für die mit BOWAHALD simulierten Varianten	
15	BOWAHALD-Simulationsergebnisse	
16	DUNGER, V. (2002): Untersuchungen zum wasserhaushaltlichen Verhalten ausgewählter Lysimeter mit verschiedenen Abdeckungen auf der Halde Bleicherode	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Die Kalirückstandshalde Bleicherode (Quelle: Amtliche Topographische Karten, 1999).....	16
Abbildung 2:	Entstehung der Lockerschicht	19
Abbildung 3:	Korngrößenverteilungsdiagramm Lockerschichtmaterial (Vergleich mit optimalen Kapillarschichtmaterialien)	20
Abbildung 4:	Schematischer Aufbau der Abdeckung nach Halden-Richtlinie [30].....	24
Abbildung 5:	Schema des Wasserhaushalts einer Rekultivierungsschicht (Quelle: BERGER, 2001[25])....	31
Abbildung 6:	Modellierung des Pflanzenentzuges in Abhängigkeit von der Wurzelverteilung.....	46
Abbildung 7:	Schematische Darstellung zur hypodermischen Abflussbildung	49
Abbildung 8:	Wetterstation auf dem Haldenplateau	52
Abbildung 9:	Lysimeteranlage Bleicherode auf dem Haldenplateau.....	54
Abbildung 10:	Vergleich der Niederschlagswerte Klimastation (Plateau) und bodenebene Niederschlagssammler	62
Abbildung 11:	Korrelation der Globalstrahlung zwischen den Stationen Südhang und Plateau (aus [85])..	65
Abbildung 12:	Teilmodelle BOWAHALD (in Anlehnung an DUNGER, 2000 [80]).....	72
Abbildung 13:	Vergleich der modellierten mit den real gemessenen Sickerwassermengen	75
Abbildung 14:	Vergleich der Sickerwassermengen (kumulativ) der Ausgangsvariante mit den Varianten der geänderten Pedologie und Schichtmächtigkeiten.....	78
Abbildung 16:	Modellierte Sickerwassermengen für die Änderung des Bedeckungsgrades auf 90 % im Vergleich zu 100 % Bedeckung (für geänderte Pedologie).....	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mächtigkeit der Lockerschicht in Abhängigkeit der Lagerungsdauer.....	19
Tabelle 2:	Klimadaten des Untersuchungsgebietes (langjähriges Mittel 1901 – 1950).....	21
Tabelle 3:	Gegenüberstellung der Modelle HELP und BOWAHALD (aus DUNGER, DORNBUSCH, 2000 [5]):	41
Tabelle 4:	Windrichtungen der Expositionen Plateau, Nord- und Südhang (Januar 1995–Oktober 2001).....	64
Tabelle 5:	Windstärkenskala nach BEAUFORT.....	64
Tabelle 6:	Bodenphysikalische Kennwerte der Ausgangsvariante.....	73
Tabelle 7:	Zeitliche Entwicklung der Vegetation.....	74
Tabelle 8:	Gesamtbilanzen der mittleren Jahressummen für den Vergleich der modellierten mit den real gemessenen Sickerwassermengen	76
Tabelle 9:	Bodenphysikalische Parameter für die Varianten der geänderten Pedologie.....	77
Tabelle 10:	Gesamtbilanzen der mittleren Jahressummen für die Änderung der Pedologie im Vergleich zur Ausgangsvariante.....	78
Tabelle 12:	Gesamtbilanzen der Jahressummen für einen Bedeckungsgrad von 90 %	80
Tabelle 13:	Gesamtbilanzen der Jahressummen für einen Bedeckungsgrad von 50 %	81

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung/Erklärung
DSB	Bodenspeicheränderung
ETR	reale Verdunstungsmenge
EI	Interzeptionsverdunstung
ETP	potentielle Verdunstungsmenge
ETR	reale Verdunstungsmenge
F	Infiltrationsmenge
FEHL	Modellfehler
k_f	Filtrationskoeffizient (k_f -Wert)
MS	Muldenspeichermenge
nFK	nutzbare Feldkapazität (pflanzenverfügbare Porosität)
P	Niederschlag
RH	hypodermischer (bodeninnerer lateraler) Abfluss
RO	Oberflächenabfluss
ROV	Oberflächenvernässung (als Teil von RO)
RU	Sickerwassermenge an der Modellbasis
STW	Stauwassermenge
WS	Äquivalentwassergehalt der Schneedecke
I	Infiltration
TS	Tiefensickerung

1 Aufgabenstellung

An der Oberfläche von Rückstandshalden des Kalibergbaus kommt es infolge der auftretenden Niederschläge zur Auflösung chloridischer und sulfatischer Salze. Die Kalirückstandshalden bestehen zu 70 % aus leichtlöslichem Natriumchlorid, das im Kontakt mit Niederschlagswässern hochkonzentrierte Salzlösungen bildet und damit zum Lösungsaustrag aus dem Haldenkörper führt. Die Halden der stillgelegten Kaliwerke im ehemaligen Südharz-Kalirevier

- Sondershausen
- Bleicherode
- Bischofferode
- Sollstedt
- Roßleben und
- Volkenroda (Menteroda)

sind damit die Ursache von langandauernden Versalzungen des Grund- und Oberflächenwassers im südlichen Harzvorland. Allein bei der Rückstandshalde Bleicherode mit einer Aufstandsfläche von ca. 32 ha würde dieser Prozess 500 Jahre andauern, bei dem Anhydritreste übrig bleiben würden [82].

Durch das ehemalige Kaliforschungsinstitut Sondershausen wurde bereits 1980 ein Verfahren zur sogenannten biologischen Versiegelung der Halden entwickelt und patentiert, das auf der Erhöhung der Evapotranspiration durch Überdeckung mit speicherfähigem Material und einer wasserzehrenden Begrünung beruht.

Die Versickerung von Niederschlagswässern kann durch Transpiration der geschlossenen Vegetationsdecke minimiert werden, so dass die Bildung von quasi gesättigten Salzlösungen stark eingeschränkt wird. Nach diesem Verfahren werden seit Anfang der 90er Jahre fünf Haldenstandorte im Südharzgebiet abgedeckt und begrünt. Mittelständische Unternehmen überdecken die Rückstandshalden nach der Thüringer Haldenrichtlinie [30] an den Standorten Bleicherode, Sondershausen, Sollstedt, Menteroda und Roßleben unter Verwendung von Boden, -ersatzstoffen und Bodensubstraten sowie durch Verwertung von Abfällen, Abfallgemischen und sonstigen Materialien.

Maßstab für die Effektivität dieser Überdeckung ist die Verminderung der Versickerung und damit der Salzlösungsbildung gegenüber dem unbedeckten Haldenstandort auf ein umweltverträgliches Maß.

Die Zielstellung der Versickerungsminimierung zwingt zu einer möglichst hohen jährlichen Verwertungsrate, um in Zeiträumen von etwa 20 Jahren die Maßnahmen abzuschließen. Entscheidend für den Verwertungscharakter der Abfälle ist ihr zielführender Einsatz.

Begrenzend wirkt dabei das Materialaufkommen (pro Standort werden jährlich 300.000 bis 400.000 Tonnen Material benötigt) sowie die Standortsituation.

Die Überdeckung mit starkmächtigen Bodenschichten nach der Thüringer Haldenrichtlinie [30] mit hohem Wasserspeichervermögen erfordert eine Abflachung der Hangflächen der Rückstandshalde auf eine Neigung von 1 : 2,5. Zur Erfüllung dieser Forderung ist es allerdings notwendig, entsprechende Vorlandflächen in Anspruch zu nehmen. Wenn dies durch Verkehrswege, Bebauung etc. nicht zur Verfügung steht, müssen weniger effektive Überdeckungen in Kauf genommen werden.

Die ökologische Sicherung der Nachbetriebsphase der privatisierten Haldenbetreiber muss zur Abwendung volkswirtschaftlicher Schäden langfristig gewährleistet werden.

Die ökologische Ziele sind:

- Wiederherstellung der Gewässergüte der Oberflächengewässer, insbesondere Verbesserung der biologischen Lebensfähigkeit und Erhöhung der Artenvielfalt
- Vermeidung einer weiteren Ausbreitung der Grundwasserversalzung
- Verbesserung des Landschaftsbildes

Zielstellung dieses Forschungsthemas ist die Erarbeitung eines Modells zur Bestimmung der potentiellen und realen Evapotranspiration und der Wasserspeicherung überdeckter und begrünter Haldenflächen unter Berücksichtigung der an der Erdoberfläche und in den unteren Schichten der Atmosphäre ablaufenden dynamischen und energetischen Prozesse in Verbindung mit sich vollziehenden bodenphysikalischen und bodenbiologischen Vorgängen sowie physiologischen Reaktionen der Pflanzen.

Die anzustrebende Modellbetrachtung stellt die notwendige Erweiterung zur Gewährleistung und Optimierung der Versickerungsreduzierung dar und soll den Nachweis der sinnvollen Verwertung als auch Ansatzpunkte für die Effektivität der Überdeckungen und Begrünung liefern. Damit wird die Grundlage für effektive Planungs- und Leitungsentscheidungen unter dem Gesichtspunkt einer ökologisch effektiven Standortsanierung geschaffen.

Die Haldenbetreiber erhalten damit eine Arbeitsgrundlage für die Überdeckungsplanung und den Nachweis der jährlich erreichten Effekte. Sie sind somit auch in der Lage, eine Prognose der Umweltentlastung durch Verminderung der Versickerung zu treffen und den Einsatz der Materialien zu optimieren. Gleichzeitig wird eine Einschätzung des Wasserbedarfs für die Erhaltung der Pflanzenbestände und die Auswahl der Bepflanzung möglich.

Eine weitere Anwendung des Modells wird bei den zuständigen Behörden gesehen. Es dient:

- der vorausschauenden Prognose,
- der Ermittlung der jeweiligen Umweltentlastung an den Standorten in Abhängigkeit vom Überdeckungsfortschritt,
- der kritischen Prüfung der vorgelegten Teilbetriebspläne der Betreiber.

Das Modell soll am Beispiel des Standortes Rückstandshalde Bleicherode erarbeitet werden. Von besonderer Spezifik sind dabei die klimatischen Bedingungen auf dem Haldenplateau:

- vielfach erhöhte Windgeschwindigkeiten gegenüber der Ebene,
- veränderte Niederschlagsverhältnisse und
- die sandig/grobsandige Lockerschicht ohne Wasserspeichervermögen an den Haldenoberflächen.

Aus dem Pilotprojekt Bleicherode „Entwicklung eines Verfahrens zur Rekultivierung von Kalialthalden“ [18] liegen wissenschaftliche Grundlagen zum Standort und langjährige standortspezifische Klimabeobachtungen vor, die in diesem Projekt ergänzt und weitergeführt wurden.

6 Untersuchungsergebnisse und Auswertung

6.1 Klimatologische Daten

Die Auswertung aller meteorologischen Daten zum Haldenstandort Bleicherode erfolgt auf der Basis von 3 automatischen Wetterstationen in Nord-, Süd- und Plateaulage und von 6 Niederschlagssammlern Typ Hann.Münden.

Für die Auswertung der Klimawerte wurden alle an den automatischen Messstationen (s. Kapitel 5.4.1) gemessenen Daten vom 01.11.1994 bis zum 31.10.2001 verwendet.

Für die Simulationsrechnungen wurden allerdings nur die klimatologischen Daten von Januar 1995 bis Oktober 2001 betrachtet, der damit der Laufzeit der verwendeten Lysimeter (s. Kapitel 5.4.2) entspricht.

6.1.1 Niederschlag

Die Niederschläge zeigten über den Betrachtungszeitraum hinweg einen sehr variablen Verlauf. Die Niederschlagshöhen wichen in allen Jahren erheblich von dem langjährigen Mittel der Region ab, was nicht nur die Jahressummen, sondern auch die einzelnen Monatsniederschläge betraf.

Die Darstellung der monatlichen Niederschläge der 3 Wetterstationen über den Gesamtzeitraum ist der Anlage 5 zu entnehmen.

In den hydrologischen Jahren 1995 bis 2002 fielen im Mittel zwischen 451 mm und 583 mm. Damit lagen die Niederschläge ca. 9% bis 30% unter dem LJM von 641 mm.

Insgesamt wiesen auch alle Sommer- und ganz besonders die Winterhalbjahre hohe Defizite an Niederschlägen auf. Die über alle drei Stationen gemittelten Niederschlagsmengen der WHJ lagen dabei bis zu 55% unter dem LJM von 279 mm, während die der SHJ bis zu 44% geringer als der langjährige Durchschnitt von 362 mm waren.

Ein Vergleich des Wetter- und Klimageschehens gemessen an der DWD - Station Leinefelde und am Haldenstandort Bleicherode ergab nach [84] folgende Beziehungen:

Die günstigste Korrelation ergab sich beim Vergleich der Niederschläge der Wetterstation Leinefelde (N_{DWD}) mit der Niederschlagsmessung an der Bauschutt-/Erdstoff-Annahme (N_{an}) am westlichen Haldenrand (Messungen erfolgen durch die Nordhäuser Entsorgungsbetreibergesellschaft, NDH-E GmbH, die uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden):

$$N_{an} = 0,939898 \cdot N_{DWD} - 13.7854$$

mit $R^2 = 0,81$

6.1.2 Vergleich zu bodenebenen Niederschlagssammlern

Die kumulativen Niederschläge der Klimastation auf dem Plateau der Rückstandshalde von November 1999 bis Oktober 2001 sind im folgendem Diagramm dargestellt. Eingepasst in diese Darstellung wurden die Niederschläge der bodenebenen Niederschlagssammler, um sie vergleichsweise für die Auswertung der Versickerungsraten mit heranzuziehen

Da sich über längere Zeiträume aber keine signifikanten Abweichungen ergeben, werden für die Auswertung die Messungen der Plateaustation zugrunde gelegt, da hier kontinuierlich der größere Messwertevorrat vorhanden ist.

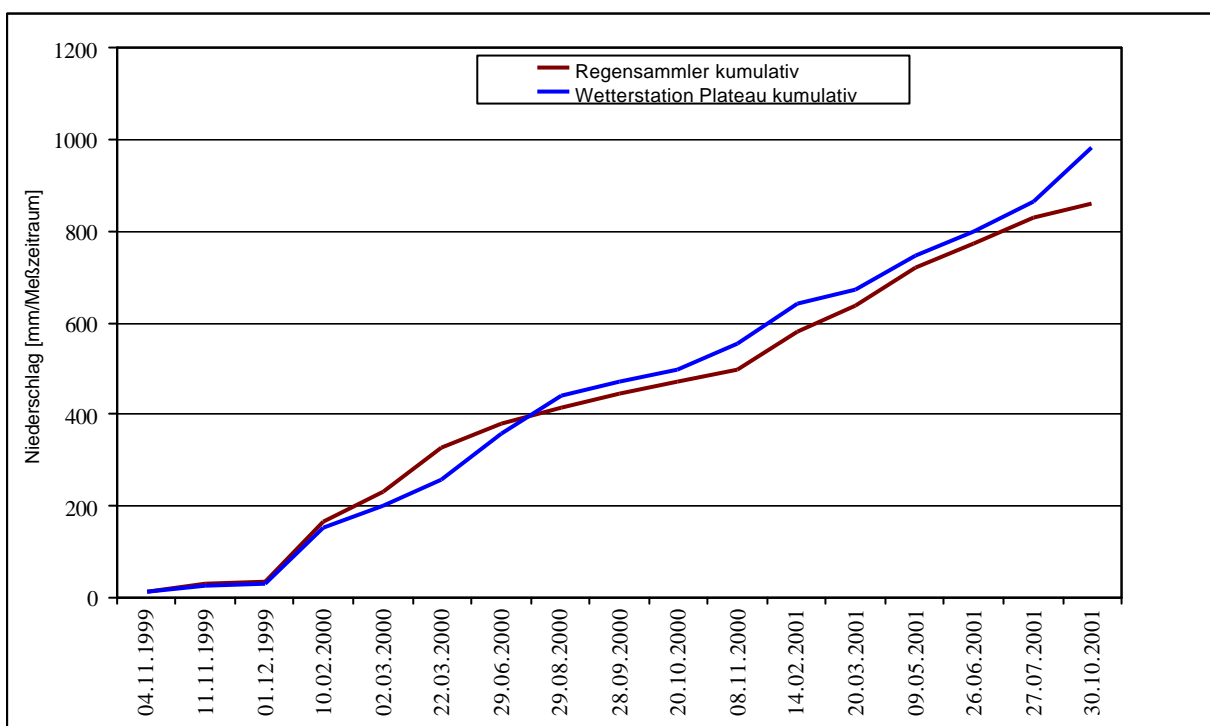


Abbildung 10: Vergleich der Niederschlagswerte Klimastation (Plateau) und bodenebene Niederschlagssammler

6.1.3 Lufttemperatur

Eine Korrelation der Werte ist jedoch nicht mit hinreichender Genauigkeit abzuleiten. Deshalb konnten die Niederschlagswerte von Leinefelde nicht zur Berechnung für den Standort Bleicherode herangezogen werden.

Der Vergleich der Temperaturen an der DWD - Wetterstation Leinefelde (T_{DWD}) und der Wetterstation auf dem Haldenplateau (T_{pl}) ergab eine gute Übereinstimmung mit folgender Formel:

$$T_{pl} = 0,985474 \cdot T_{DWD} + 0,75233$$

mit $R^2 = 0,99$

Hierbei können die Daten der DWD – Station somit - entsprechend nach oben korrigiert - übernommen werden.

Zur qualitativen Bewertung von Jahresgängen dürften die bekannten Daten von Monatsmitteln der Lufttemperatur sowie der monatlichen Niederschlagsmenge an der Station in Leinefelde allerdings prinzipiell ausreichend sein.

6.1.4 Windverhältnisse

Die Hauptwindrichtung der Region um Bleicherode ist ein wenig um West schwankend. Da die Rückstandshalde Bleicherode längs von WSW nach ONO ausgerichtet ist, werden durch den im wesentlichen im spitzen Winkel auftreffenden Wind die Geschwindigkeitsvektoren an den Haldenböschungen bezüglich Richtung und Betrag verändert.

Auf dem Haldenplateau wird die Hauptwindrichtung nur wenig beeinflusst. Infolge der Wirkung des Haldenkörpers als Strömungshindernis im Wippertal nehmen bei der Überströmung des Plateaus die mittleren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur Anströmgeschwindigkeit zu.

Zeitraum vom 01.01.1995 – 31.10.2001 (ca. 125.000 Werte):

-	Nordhang	2,6 m/s
-	Südhang	2,2 m/s
-	Plateau	4,0 m/s

Die niedrigsten mittleren Windgeschwindigkeiten wurden im gesamten Beobachtungszeitraum am Südhang, die höchsten am Plateau gemessen

	Südhang	Plateau	Nordhang
Hauptwindrichtung (> 60 %)	WSW	SW - NW	WSW
Nebenwindrichtung (10 – 60 %)	O	SW	ONO
Untergeordnete Windrichtung (< 10 %)	-	OSO	variierend
Mittlere Windgeschwindigkeit (m/S)	2,2	4,0	2,6

Tabelle 4: Windrichtungen der Expositionen Plateau, Nord- und Südhang (Januar 1995–Oktober 2001)

Aus diesen Werten geht die deutlich höhere Windbeaufschlagung des Plateaus sowie die Änderung der Windrichtung an den Haldenhängen hervor.

Anlage 7 verdeutlicht dies auf der Grundlage der Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeiten.

Neben Schwankungen im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr eines Jahres sind auch Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren zu festzustellen.

Zur Bewertung der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten (aus den halbstündlichen Mittelwerten) konnten nur die relativ beschränkten Möglichkeiten der Software für die Datenkonvertierung aus den Datenloggern der Klimastationen genutzt werden. Bei der Definition von Windgeschwindigkeitsklassen wurde auf die Windstärkenskala nach BEAUFORT Bezug genommen, wobei Stufen zusammengefasst wurden:

Klasse	Windstärke	Bezeichnung
0,3 - <5,5 m/s	1 - 3	kleiner Zug – schwache Brise
5,5 – 10,7 m/s	4 - 5	mäßige – frische Brise
>10,7 – 17,1 m/s	6 - 7	starker – steifer Wind
>17,1 m/s	8 und höher	Stürmischer Wind – Sturm - Orkan

Tabelle 5: Windstärkenskala nach BEAUFORT

Die höchsten Windgeschwindigkeiten im Zeitraum vom 01.01.95 – 31.10.01 wurden auf dem Plateau am 17.01. und 18.01.00 mit 12,1 m/s bzw. 11,5 m/s gemessen.

Windgeschwindigkeiten über > 17,1 m/s, d.h. Sturm bis Orkan traten auf dem Plateau bei den halbstündlichen Mittelwerten nicht auf. Es ist aber nicht auszuschließen, dass kurzzeitig Böen mit Sturmwindstärken auftraten.

Die Windauswertungen zeigen besonders deutlich die exponierte Lage des Plateaus

6.1.5 Globalstrahlung

Die Jahregänge repräsentieren die jahreszeitliche Verschiebung der Globalstrahlungsintensität, wobei sich für den Gesamtbeobachtungszeitraum (Januar 1995 – Oktober 2001) tendenziell ein leichter Anstieg der Globalstrahlung erkennen lässt.

In Anlage 8 sind die Globalstrahlungen an den drei Standorten der Wetterstationen als Monatsmittelwerte dargestellt.

Die Messwerte der Klimastationen am Südhang und auf dem Plateau weisen im Gesamtbeobachtungszeitraum seit 1995 eine deutlich höhere Globalstrahlung gegenüber dem Nordhang auf.

Die Korrelation der Globalstrahlung zwischen den Stationen Südhang und Plateau wurde nachgewiesen und ist im folgenden Diagramm dokumentiert.

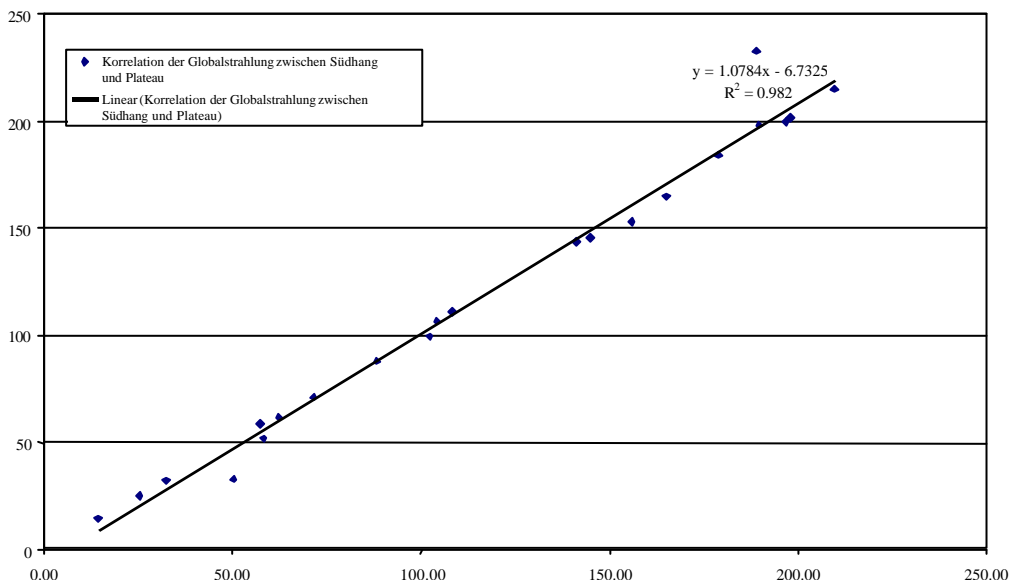


Abbildung 11: Korrelation der Globalstrahlung zwischen den Stationen Südhang und Plateau (aus [85])

6.2 Einschätzung der klimatischen Wirkungen auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten

Zur Einschätzung des klimatischen Einflusses auf den Bodenwasserhaushalt können die volumetrischen Bodenfeuchten und die Wasserspannungen herangezogen werden.

Die bodenphysikalischen Kennwerte wie Körnung, Porenvolumen, Dichte, Durchlässigkeit etc. spielen zwar eine große Rolle beim Wasserhaushalt, werden aber eher durch die Materialeigenschaften und deren Zusammensetzungen bestimmt und können durch das Klima nur modifiziert werden (z.B. durch Auswaschung, Erosion, Dichteschlämmung bei fehlender Vegetation, Erhöhung des kapillaren Aufstiegs durch Verdunstung).

Anhand der Bodenfeuchten und der Wasserspannungen kann in Abhängigkeit von den bodenphysikalischen Eigenschaften direkt ein Zusammenhang zwischen Klima und Bodenwasserhaushalt hergestellt werden [32]:

Die volumetrischen Bodenfeuchten auf den mit Erde und Bauschutt bedeckten Hangflächen unterschieden sich insgesamt nur geringfügig voneinander.

Während auf den Nordhängen in den untersuchten Tiefen 20 und 40 cm hangabwärtsgerichtete Fließprozesse ausgemacht werden konnten, waren auf den Südhängen Austrocknungserscheinungen zum Hangfuß hin zu beobachten.

Diese Unterschiede können damit begründet werden, dass im Norden durchschnittlich 11% mehr Niederschläge gefallen sind als im Süden. Hinzu kommen die höheren Strahlungsintensitäten am Südhang, die höhere Bodentemperaturen und somit höhere Verdunstungsraten hervorrufen. Dadurch wurden im Süden den Erwartungen entsprechend weniger hohe Bodenfeuchten erreicht als im Norden.

Auch die fehlenden hangabwärtsgerichteten Feuchtezunahmen können mit diesen Klimabedingungen erklärt werden. Auf den Nordflächen stehen den Rekultivierungsschichten infolge der hohen Niederschlägen und der geringeren Verdunstung mehr Wassermengen zur Verfügung, die allerdings aufgrund der Hangneigung nicht nur in den Untergrund versickern, sondern auch hangabwärts fließen. Auf den Südhängen dominierte statt dessen die Verdunstung, so dass die Wassermengen keinesfalls ausreichten, um in Richtung Hangfuß zu fließen.

Zum Teil verblieben die Niederschläge auch in den oberen Bodenschichten, so dass die unteren Bodentiefen geringere Feuchte aufwiesen (vor allem im Mittel- und Unterhangbereich). An den Oberhängen waren dagegen die oberen Bodenschichten trockener als die unteren, wofür die höheren Windgeschwindigkeiten und die dadurch erhöhte Verdunstung an den exponierten Hangschultern verantwortlich gemacht werden können.

Ein weiterer Grund für die hohen Bodenfeuchten an den Unterhängen der Nordflächen ist deren Leelage und die damit verbundenen Verwirbelungen der Luftmassen beim Passieren der Hangschulter. Der Niederschlag wird dadurch über den Oberhangbereich noch hinweggeweht und erst in den unteren Hangbereichen ausgefällt, was dort dementsprechend höhere Bodenfeuchtwerte hervorruft.

LÜCKE führte im Rahmen seiner Untersuchungen Niederschlagsmessungen an unterschiedlichen Hangpositionen durch und ermittelte gegenüber dem Nordunterhang für den Nordoberhang signifikant geringere Niederschlagsmengen. Innerhalb eines Untersuchungszeitraumes von 112 Wochen fielen am Nordoberhang insgesamt 762 mm und am Nordunterhang sogar 969 mm (LÜCKE 1997, [47]). Schon allein aufgrund dieser Tatsache können die Bodenfeuchten im Norden an den Unterhängen größer sein als an den Oberhängen.

Wie die mit Bodenaushub und Bauschutt abgedeckten Flächen zeigten auch die Substratschichten (Asche-Klärschlamm-Gießereisand-Gemisch) sehr ähnliche Bodenfeuchtwerte. Insgesamt wies aber die westexponierte Fläche die höchsten Feuchtegehalte auf, was damit zusammenhängt, dass West bis Westsüdwest die vorherrschende Hauptwindrichtung an den untersuchten Haldenflanken ist. Durch die Stauung der Luftmassen beim Auftreffen auf das Hindernis „Halde“ kommt es zu einem erhöhten Niederschlagsaufkommen.

Dies gilt auch für die Südfläche. Allerdings sind hier aufgrund der stärkeren Strahlungsintensitäten die Verdunstungsraten höher als am Westhang, wodurch ein Teil des Bodenwassers eingebüßt wird. Auffällig ist der hangabwärtsgerichtete Anstieg der Bodenfeuchten. Demnach gibt es trotz der höheren Verdunstungsraten Fließprozesse in Richtung Hangfuß [32].

6.3 Bewertung bodenphysikalischer Parameter

Anhand der bodenphysikalischen Untersuchungen konnten insgesamt recht eindeutige Unterschiede der Abdeckmaterialien bezüglich ihrer Eigenschaften und besonders in Hinblick auf ihre Fähigkeit, Wasser aufzunehmen und zu speichern, festgestellt werden.

Die Lockerschicht (Rückstand) wird durch die fast ausschließliche Dominanz der Korngröße Sand charakterisiert, durch eine relativ geringe Lagerungsdichte ($0,69\text{g/cm}^3$) und ein enormes Porenvolumen, das mit knapp 73 % in 40 bis 45 cm Tiefe die Porenvolumina sämtlicher Abdeckmaterialien übertrifft. Die sehr geringen volumetrischen Bodenfeuchten und die niedrigen Wasserspannungen in den untersuchten Bereichen bestätigten, dass das Rückstandsmaterial nur eine geringfügige Speicherkapazität hat. Die extrem hohen Wasserleitfähigkeiten fördern zudem ein sehr schnelles Vordringen des Niederschlages zum verfestigten Salzkern.

Bei den Abdeckmaterialien wurden erwartungsgemäß höhere Speicherfähigkeiten gegenüber der Lockerschicht (Rückstand) festgestellt, die allerdings je nach Zusammensetzung Unterschiede aufweisen.

Eine Beimengung von Asche in Boden-Bauschutt-Substrate bewirkte dagegen eine Herabsetzung der Lagerungsdichte und eine Erhöhung des Porenvolumens. Gleiches gilt für einen Bodenersatzstoff Gereka (Gemisch aus Asche, Gießereisand und Klärschlamm), der durch die Klärschlammzugabe zusätzlich einen erheblich erhöhten Gehalt an organischen Inhaltsstoffen aufweist. Dies zeigte sich dann auch in den sehr geringen Dichten und dem hohen Porenvolumen, das die Volumina der beiden anderen Substrate um bis zu 37% übertraf.

Die Wasserleitfähigkeit erwies sich bei den untersuchten Abdeckmaterialien als enorm hoch. Sie überschritten den Wert, der laut AG BODEN schon als äußerst hoch eingestuft wurde (300 cm/d) noch einmal um das 6- bis 24-fache (AG BODEN 1994, [86]). Niederschlagswasser kann demnach bei allen Substraten sehr schnell in tiefere Schichten vordringen.

Einer allzu schnellen und vor allem vollständigen Versickerung steht jedoch die Speicherefähigkeit der Abdeckmaterialien entgegen. Die maximalen Wasserspeicherefähigkeiten der mit Boden oder Boden-Bauschutt-Deckschichten lagen recht nah beieinander und betragen in 40 cm Tiefe bei den Substraten im Mittel um die 15%.

Für den Bodenersatzstoff Gereka konnten dagegen Wasserspeicherefähigkeiten von knapp 44% nachgewiesen werden. Das heißt, dass das Gereka-Gemisch im Vergleich zu den bodenbedeckten Flächen die 2,5- bis 3-fache Wassermenge aufnehmen kann. Diese Fähigkeit wird durch das organische Material begünstigt, da es gefügevverbessernd wirkt und das Porenvolumen erhöht.

Die Unterschiede hinsichtlich der Wasserspannungen beruhen einerseits auf der unterschiedlichen Zusammensetzung der Abdeckungen und andererseits auch auf der jeweiligen Exposition der Fläche. Die Ergebnisse bestätigten die Erwartung, dass im Süden höhere Wasserspannungen anzutreffen sind als im Norden

Die Untersuchungsergebnisse zu den bodenphysikalischen Eigenschaften der Abdeckmaterialien zeigen, dass alle Varianten der Abdeckung eine Verbesserung gegenüber dem Rückstand darstellen. In jedem Fall konnte die Wasseraufnahmefähigkeit erhöht und die Versickerung in den Haldenkörper verringert werden.

Insgesamt lässt sich sagen, dass keine signifikante Verringerung der Durchlässigkeiten mit zunehmendem Alter erreicht wird.

Als insgesamt günstigste Deckschicht erwies sich aber das Gereka-Gemisch aus Asche, Gießereisand und Klärschlamm. Der hohe Gehalt an organischem Material, das sehr hohe Porenvolumen, die enorme Wasserkapazität und die stärkeren Bindungskräfte bewirken eine Wasserspeicherefähigkeit, die dem Anspruch, das Sickerwasseraufkommen zu verringern, am ehesten gerecht wird.

6.4 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Die Simulation erfolgte für ausgewählte Varianten der Lysimeteranlage auf der Rückstandshalde Bleicherode. Dabei wurden folgende Parametersätze genutzt:

- Meteorologische Daten der drei automatischen Wetterstation in Nord-, Süd, und Plateaulage der Rückstandshalde Bleicherode
- Angaben zur Vegetationsbedeckung und Wurzeltiefe in den Lysimetern der Rückstandshalde
- Stoffzusammensetzung der in den Lysimetern eingebauten Materialien
- Ergebnisse bodenphysikalischer und –chemischer Analysen von den in den Lysimeterversuchen eingesetzten Abdeckmaterialien (Erdaushub, Bodensubstrate, -ersatzstoffe)
- kumulierte Sickerwasserverlaufskurven der einzelnen Lysimeter
- k_f – Werte aus Siebanalysen der beim Lysimeterausbau gewonnenen Bodenproben

6.4.1 Modellverifizierung

Im Rahmen der Modellverifizierung wurden durch DUNGER 2002 [79] Simulationsrechnungen mittels BOWAHALD an ausgewählten Lysimetern der Station auf der Rückstandshalde Bleicherode durchgeführt.

Der gesamte Bericht ist als Anlage 16 beigefügt. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle nur wesentliche Ergebnisse erwähnt.

Die Simulationsrechnungen wurden sowohl ohne Niederschlagskorrektur (wird in nachfolgenden Ausführungen als Ausgangsvariante bezeichnet) als auch mit einem um + 14 % erhöhten Niederschlag (in Anlehnung an LÜCKE, 1997 [47]) durchgeführt. DUNGER (2002) kam mit o.g. Simulationen zu folgendem Ergebnis:

Die Modellrechnungen zeigen, dass das Modell BOWAHALD generell als ein geeigneter Simulator zur Quantifizierung der in den Lysimetern ablaufenden wasserhaushaltlichen Prozesse angesehen werden kann. Die wesentlichen Prozessverläufe werden unter Verwendung von ermittelten bzw. plausibel geschätzten Ausgangsparametern realistisch nachgebildet.

Um einen optimalen Einsatz zu gewährleisten, wurde das Programm zuvor anhand von standortspezifischen Parametern und mehrjähriger Sickerwassermessungen ausgewählter Lysimeter der Halde Bleicherode auf seine Anwendbarkeit für diese speziellen Bedingungen getestet. Die errechneten Modellwerte konnten mit realen Sickerwassermengen verglichen werden.

Die Ergebnisse sind im Bericht „Quantifizierung des Wasserhaushaltes für ausgewählte Lysimeter der Abdecksysteme von Kalisalzhalden mittels Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodell BOWAHALD“ (DUNGER, 2002) zusammengefasst. Nach Einschätzung von DUNGER (2002) werden die wesentlichen in den

Lysimetern ablaufenden hydrologischen Prozesse realistisch nachgebildet. Das Modell kann somit als geeigneter Simulator zur Quantifizierung der in den Lysimetern ablaufenden Vorgänge angesehen werden.

Für die vorliegende Arbeit zur Beurteilung des Speichervermögens von Rekultivierungsschichten sind insbesondere die Fragestellungen zur Sickerwasserbildung und zum Bodenfeuchtereime interessant. Festzustellen war, wie sich die gezielte Änderung einzelner Parameter (Mächtigkeit, Pedologie, Bedeckung) auf das Speichervermögen der Abdeckschichten auswirkt. Zum Vergleich wurden die realen Sickerwasserwerte der ausgewählten Beispiellysimeter, bzw. die der modellierten Ausgangsvariante nach DUNGER (2002), herangezogen.

Die Detailinformationen über In- und Output sind den Anlagen 14 und 15 zu entnehmen.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurden anhand Vor-Ort ermittelter Parameter auf bereits fertiggestellten Rekultivierungsschichten im Plateaubereich der Halde Bleicherode weitere Simulationsrechnungen durchgeführt, um das vorhandene Modell auf reale Abdecksysteme zu adaptieren.

6.4.2 Handhabung des Modells BOWAHALD

Im folgenden soll das Modell sowie dessen Handhabung im Überblick erläutert werden, für genauere Informationen sei auf die Dokumentation des BOWAHALD von DUNGER (2002, s. Anlage 16) verwiesen.

Die Voraussetzung für die Anwendung von BOWAHALD sind das Vorhandensein entsprechender meteorologischer Messwerte (Tage-, Monats- bzw. Jahreswerte), die Kenntnis der Standortbedingungen und der pedologischen Parameter der einzelnen Schichten sowie Informationen zu Nutzungs- bzw. Bewuchsformen. Anhand dieser Parameter lassen sich über Variationen Szenarien zum Wasserhaushalt von Abdeckschichten erstellen über die sich beispielsweise Aussagen zur Speicherleistung von Abdeckschichten sowie Empfehlungen zum einzusetzenden Material und Schichtenaufbau ableiten lassen.

Das BOWAHALD - Modell setzt sich aus insgesamt 4 Teilmodellen zusammen, den Hilfsprogrammen ROHLINGM und ROHLINGN, dem Eingabemodell BOHALINP und dem eigentlichen Berechnungsmodell BOHALCALC. Der detaillierte Modellablauf ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt.

Mit Hilfe von ROHLINGM und ROHLINGN lassen sich die meteorologischen Daten und die Nutzungsinformationen in der von BOHALINP geforderten Dateistruktur erstellen. Die Erfassung der noch fehlenden Standortinformationen zur Haldenmorphologie, zum vertikalen Schichtenaufbau und zu den pedologischen Parametern der einzelnen Schichten erfolgt über BOHALINP. Diese Informationen werden in sogenannten Hydrotop-Dateien abgespeichert. Darüber hinaus werden mit BOHALINP anschließend alle für die Berechnung erforderlichen Dateien zusammengestellt und die gewünschten Ergebnisdateien festgelegt. Die Informationen werden einer Übergabedatei übergeben.

Sind alle diese Vorarbeiten durchgeführt und mit der Erstellung der Übergabedatei abgeschlossen, kann die Berechnung der Wasserhaushalts- und Sickerwasserbilanzen mit BOHACALC erfolgen. Für die Modellierung ist lediglich der Filename der Übergabedatei einzugeben, die vereinbarten Ausgabedateien werden automatisch erstellt.

Es können Tages-, Monats-, Jahres- und Gesamtbilanzen erstellt werden, die folgende Inhalte umfassen können:

Übersicht der Wasserhaushaltsbilanz

komplette Wasserhaushaltsbilanz

Abfluss- und Sickerwasserbilanz für jeden Bodenbereich

Bodenfeuchtwerte für jede Schicht

Bodenfeuchtwerte für die obersten 20 Teilschichten

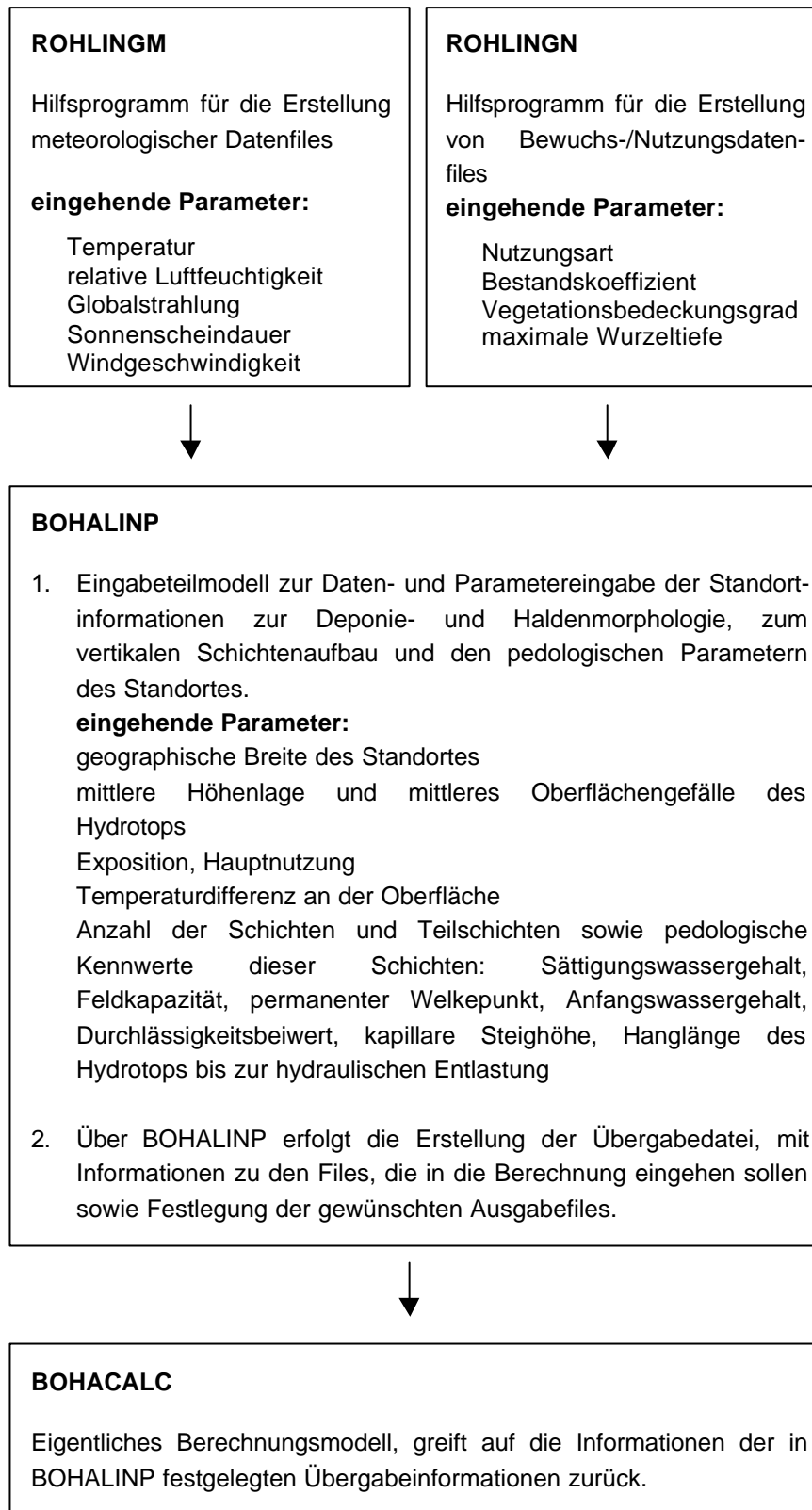


Abbildung 12: Teilmodelle BOWAHALD (in Anlehnung an DUNGER, 2000 [80])

6.4.3 Erstellung von Szenarien

Ausgangsvariante

Für die bodenphysikalischen und standortbedingten Parameter der Ausgangsvariante werden Daten der Lysimeterstation der Halde Bleicherode herangezogen.

Der Standort der Lysimeteranlage befindet sich auf 51° 25' nördlicher Breite in einer Höhe von 279 m NN, er ist nach Norden exponiert und besitzt eine Hangneigung von 0 %.

Das Beispiellysimeter stellt eine mögliche Variante der real aufzubringenden Abdeckung in Anlehnung an die Kali-Haldenrichtlinie dar. Es ist mit einem 0,5 m mächtigen Erdaushub/Klärschlammkompost-Gemisch als Begrünungsschicht, einer 1,6 m mächtigen konturgebenden Schicht bestehend aus Erdaushub und einem Perkolatraum von 0,4 m befüllt. Die genauen Werte sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Da bei niederschlagsbedingter Auswaschung der Haldenoberfläche die dort entstehende Lockerschicht (s. Kapitel 4.1.1) die Funktion einer Kapillarschicht übernehmen kann, wurde diese dem Perkolatraum gleichgesetzt.

Aus den Parametern Wassersättigung, Feldkapazität, Welkepunkt und Durchlässigkeitsbeiwert ergibt sich damit die Schichtenabfolge schluffiger Lehm, toniger Schluff und sandiger Kies (von oben nach unten).

Die beiden obersten Schichten besitzen Wasserdurchlässigkeiten von E-7 bzw. E-6 m/s, sie gelten damit als schwach durchlässig. Wassersättigung, Feldkapazität und permanenter Welkepunkt weisen zusätzlich darauf hin, dass es sich hierbei um Bodenarten handelt, die ein hohes Wasserspeichervermögen (Wasseraufnahme, Wasserabgabe) aufweisen.

Der Perkolatraum gilt mit E-3 als stark durchlässig. Die Werte der Wassersättigung und der Feldkapazität lassen außerdem erkennen, dass das Wasserspeichervermögen des Materials sehr gering ist.

Bei der Gesamtmächtigkeit von 2,5 m, wird von einer maximalen Evaporationstiefe von 1500 mm ausgegangen.

Tabelle 6: Bodenphysikalische Kennwerte der Ausgangsvariante

Schicht	Höhe konturgebende Schicht [m]	Wassersättigung [Vol.-%]	Feldkapazität [Vol.-%]	Welkepunkt [Vol.-%]	k_f -Wert [m/s]	Bodenart
1	0,5	47,3	36,0	21,5	$3,7 \cdot 10^{-7}$	schluffiger Lehm
2	1,6	50,3	30,3	15,0	$1 \cdot 10^{-6}$	toniger Schluff
3	0,4	24,0	16,0	8,0	$1 \cdot 10^{-3}$	sandiger Kies

Wetterdaten

Als meteorologische Datengrundlage für die folgenden Simulationen dienen die langjährigen Klimabeobachtungen an der Plateau-Wetterstation der Halde Bleicherode (s. Kapitel 4.1.2), da diese den realen meteorologischen Verhältnissen im Bereich der Lysimeterstation am nächsten kommen (Anlage 2). Die regelmäßige Erfassung der tagbezogenen Messwerte erfolgt hier seit November 1994. Für einen Vergleich mit den Simulationen von DUNGER sowie mit den real gemessenen Sickerwassermengen an ausgewählten Lysimetern, wird die Modellierung unter Verwendung der meteorologischen Daten jedoch für den Zeitraum vom 01.11.1997 bis 31.10.2001 durchgeführt. Das entspricht der Laufzeit der Beispiellysimeter.

Da nach Prüfung durch DUNGER über eine Niederschlagskorrektur um 10 bzw. 14 % keine signifikanten Änderungen der Simulationsergebnisse festzustellen waren, werden die gemessenen Niederschlagswerte als repräsentativ angesehen und somit nicht nach oben korrigiert.

Nutzungsfile

Auf den Lysimetern hat sich durch spontane Begrünung eine überwiegend krautige Vegetation mit geringen Anteilen von Gräsern herausgebildet (s. Kapitel 4.1.3). Auf einigen Lysimetern wurden zusätzlich Ahornbäume angepflanzt. Diese sollen jedoch bei der Simulation außer acht gelassen werden, da sie nicht dem gegenwärtigen Begrünungsstand der dem Selbstlauf überlassen Haldenflächen entsprechen.

Die Beschreibung des Vegetationszustandes bzw. des Entwicklungsverlaufes erfolgt für den Modellierungszeitraum monatsbezogen.

Es wird also im Modell von einem Gras-Krautbewuchs ohne Beweidung (Dauerwiese) mit vollständiger Bedeckung (Idealfall) der Geländeoberfläche ausgegangen. Die zeitliche Entwicklung des Bewuchses wird durch die Modellparameter Wurzeltiefe und Bewuchsentwicklung gesteuert. Für diese Angaben wurden die von DUNGER geschätzten Wurzeltiefen für die zeitliche Entwicklung der Vegetation übernommen und sind aus Tabelle 7 ersichtlich. Die Wurzeltiefen wurden von DUNGER anhand von Literaturwerten festgelegt.

Tabelle 7: Zeitliche Entwicklung der Vegetation

Jahr	Wurzeltiefe [cm]	Bewuchsentwicklung
1998	20	spärlich
1999	80	normal
2000	90	üppig
2001	90	üppig

nach DUNGER

Simulationsergebnisse

Abbildung 13 und Tabelle 8 zeigen, dass die modellierten Werte nur geringfügig unter den tatsächlich gemessenen Sickerwassermengen der Beispiellysimeter liegen. Die Abweichungen der mittleren Jahressummen von ca. 1 bis 2 mm/a sind tolerierbar und die Werte somit durchaus miteinander vergleichbar. Prozentual ergibt sich eine modellierte Sickerwassermenge von 14,7 % des Gesamtniederschlages gegenüber 15,0 % bzw. 15,8 % des real gemessenen Sickerwassers. Diese Abweichungen von ca. 1 % liegen im Bereich des systematischen Modellfehlers, folglich bestätigen diese Ergebnisse die Anwendbarkeit des Modells (siehe auch DUNGER, 2002 [79]).

Von 487,5 mm Niederschlag pro Jahr infiltrieren 347,8 mm/a (71,3 %) in den Boden, davon wiederum treten 71,9 mm/a (20,7 %) als Sickerwasser an der Modellbasis aus. Auffallend ist, die trotz sehr ähnlicher Niederschlagshöhen, relativ große Schwankung der Versickerungswerte der einzelnen Jahre (s. Anlage 15). Die umgekehrt proportionalen Verhältnisse der realen Verdunstungsmengen zu den Sickerwassermengen weisen auf höhere Verdunstungsraten aufgrund spezifischer meteorologischer Gegebenheiten (Sonneneinstrahlung, Windverhältnisse, relative Luftfeuchtigkeit) hin. Die Frage der Abhängigkeiten konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden. Es empfiehlt es sich daher, diese Zusammenhänge umfassend zu untersuchen.

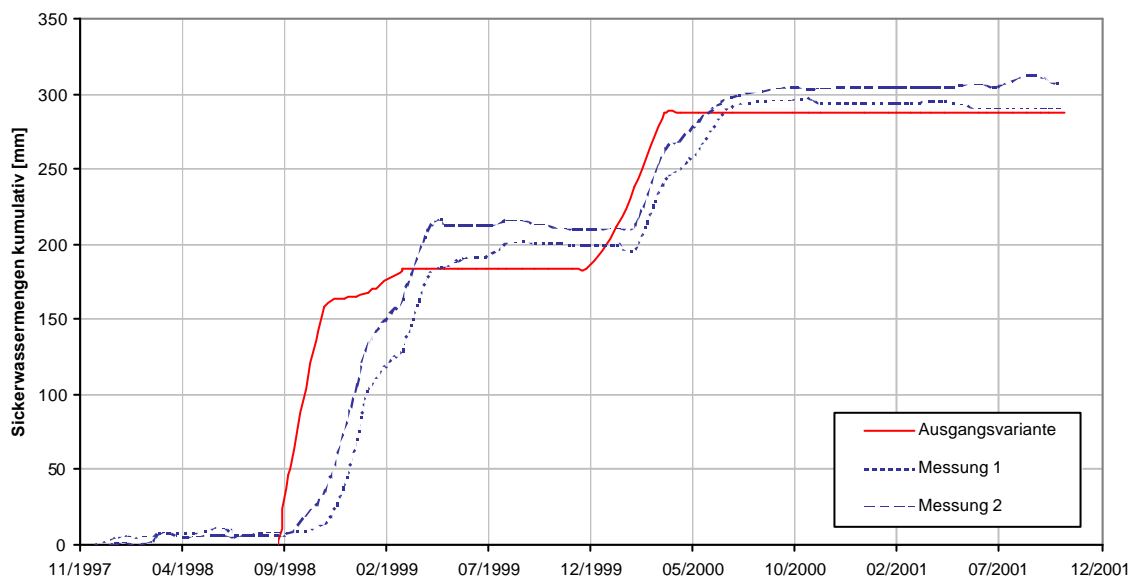


Abbildung 13: Vergleich der modellierten mit den real gemessenen Sickerwassermengen

Tabelle 8: Gesamtbilanzen der mittleren Jahressummen für den Vergleich der modellierten mit den real gemessenen Sickerwassermengen

	Niederschlag [mm/a]	reale Verdunstungs- menge [mm/a]	Infiltrations- menge [mm/a]	Sickerwasser- menge [mm/a]	Sickerwasser- menge* [%]
Modell	487,5	415,6	347,8	71,9	14,7
Messung 1	487,5	k.A.	k.A.	73,0	15,0
Messung 2	487,5	k.A.	k.A.	77,0	15,8

* Bezugsgröße ist die jährliche Niederschlagsmenge

Änderung der Pedologie

Im nächsten Schritt sollen die pedologischen Verhältnisse an reale Haldenverhältnisse angepasst werden, d.h. es wird hier auf Werte gemäß Haldenrichtlinie bereits abgedeckten Bereichen zurückgegriffen. Die Werte sind in Tabelle 9 überblicksmäßig dargestellt. Die k_f -Werte dieser Abdeckmaterialien liegen mit E-5 bzw. E-4 gegenüber der Ausgangsvariante (E-7 bzw. E-6) deutlich höher. Diese Materialien besitzen damit höhere Wasserdurchlässigkeiten und sind nach DIN 18 130 als durchlässig zu bewerten. Die geringeren Durchlässigkeitsbeiwerte lassen auf einen verminderten Fein- und Mittelporenanteil und folglich ein geringeres Wasserhaltevermögen schließen.

Da zum Zeitpunkt der Modellierung keine Angaben für die Parameter Wassersättigung, Feldkapazität und permanenter Welkepunkt zur Verfügung standen, wurde die Modellierung unter Verwendung der vom Programm vorgeschlagenen Werte durchgeführt. Es ergibt sich eine Schichtenabfolge, bei der die oberste Schicht aus schluffigem Sand, von tonigem Sand und Kies unterlagert wird.

Zusätzlich zur Änderung der pedologischen Parameter wurde die Mächtigkeit der konturgebenden Schicht variiert. Die Simulation erfolgte für die unterschiedlichen Schichtdicken 1,6 m (Ausgangsvariante), 9,0 m und 0,5 m. Entsprechend der Gesamtmächtigkeiten der Abdeckung von 2,5 m, 9,9 m und 1,4 m ist eine Änderung der maximalen Evaporationstiefe von 1500 mm auf 2500 mm bzw. auf 1000 mm notwendig.

Tabelle 9: Bodenphysikalische Parameter für die Varianten der geänderten Pedologie

Schicht	Höhe kontur- gebende Schicht [m]	Wassersättigung* [Vol.-%]	Feldkapazität* [Vol.-%]	Welkepunkt* [Vol.-%]	k_f -Wert [m/s]	Bodenart
1	0,5	29,0	14,0	21,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$	schluffiger Sand
2	1,6 / 9,0 / 0,5	33,0	20,0	15,0	$1 \cdot 10^{-5}$	toniger Sand
3	0,4	28,0	14,0	5,0	$1 \cdot 10^{-3}$	sandiger Kies

* vom Programm vorgeschlagene Werte

Simulationsergebnisse

Durch die Änderung der bodenphysikalischen Parameter, insbesondere des k_f -Wertes, ändern sich die Wasserdurchlässigkeiten und damit die Speichereigenschaften der Abdeckung. Ein höherer k_f -Wert gegenüber der Ausgangsvariante bedeutet einen Anstieg der Wasserdurchlässigkeit des Materials und gleichermaßen ein schlechteres Wasserrückhaltevermögen.

Bezüglich der Änderung der pedologischen Parameter ergibt sich für die Simulationsergebnisse (Abbildung 14, Tabelle 10) der mittleren jährlichen Sickerwassersumme eine Erhöhung von 14,7 % auf 19,5 % gegenüber der Ausgangsvariante. Trotz gleicher Infiltrationsmenge liegt die reale Verdunstungsmenge der Varianten der geänderten Pedologie mit 392,4 mm/a unter den 415,6 mm/a der Ausgangsvariante. Aufgrund des oben beschriebenen geringeren Wasserhaltevermögens dieser Bodenart ergibt sich ein geringerer Wasserverbrauch durch die Pflanzen und folglich eine geringere Verdunstungsrate durch die Vegetation. Die Verdunstung durch den Boden spielt bei vollständiger Bedeckung praktisch keine Rolle.

Eine Änderung der Mächtigkeit der konturgebenden Schicht zeigt keinen Einfluss auf die austretenden Sickerwassermengen.

Auch hier konnten zwischen den einzelnen Jahren starke Schwankungen der anfallenden Sickerwässer festgestellt werden.

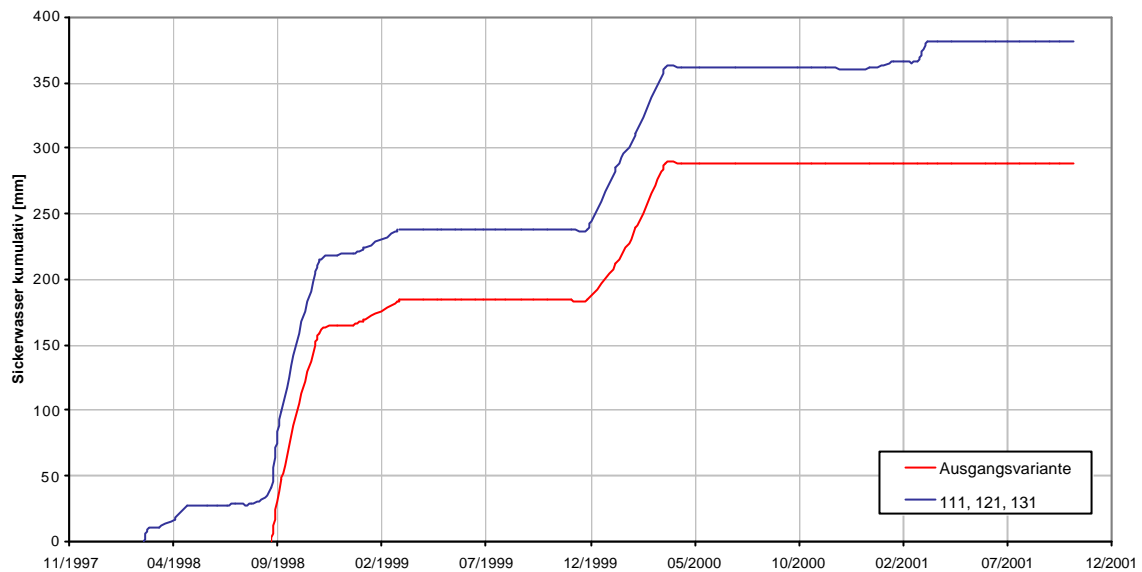


Abbildung 14: Vergleich der Sickerwassermengen (kumulativ) der Ausgangsvariante mit den Varianten der geänderten Pedologie und Schichtmächtigkeiten

Tabelle 10: Gesamtbilanzen der mittleren Jahressummen für die Änderung der Pedologie im Vergleich zur Ausgangsvariante

Variante	Niederschlag [mm/a]	reale Verdunstungsmenge [mm/a]	Infiltrationsmenge [mm]	Sickerwassermenge [mm/a]	Sickerwassermenge* [%]
013	487,5	415,6	347,8	71,9	14,7
111	487,5	392,4	347,8	95,1	19,5
121	487,5	392,4	347,8	95,1	19,5
131	487,5	392,4	347,8	95,1	19,5

* Bezugsgröße ist die jährliche Niederschlagsmenge

- 013: Ausgangsvariante
- 111: geänderte Pedologie
- 121: geänderte Pedologie und Erhöhung der Mächtigkeit der konturgebenden Schicht auf 9,0 m
- 131: geänderte Pedologie und Verringerung der Mächtigkeit der mittleren Schicht auf 0,5 m

Änderung des Bedeckungsgrades

Der Bedeckungsgrad der bereits begrünten Haldenflächen entspricht infolge von Ausfällen und Verbiss nicht dem Idealfall von 100 %. Eine Senkung des Bedeckungsgrades auf 90 % kommt daher der Realität recht nah. Eine Änderung der Pflanzenbedeckung zieht veränderte Verdunstungsverhältnisse nach sich. Einerseits verringern sich die Interzeption und die Transpiration durch die Vegetation, andererseits wird die Evaporation des Bodens erhöht.

Die Simulation mit dem verringerten Bedeckungsgrad wird nur für die Varianten mit den geänderten Bodenkennwerten durchgeführt (111, 121, 131). Diese werden in der folgenden Auswertung zum Vergleich herangezogen und folglich als Vergleichsvarianten bezeichnet.

Simulationsergebnisse

Die Simulation mit einem Bedeckungsgrad von 90 % ergibt gegenüber 100 % Bedeckung eine geringfügige Erhöhung der Infiltration des Niederschlagswassers von 71,3 % auf 73,2 %. Dieser Anstieg ist auf das geringere Interzeptionsvermögen der Pflanzendecke zurückzuführen.

In Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Abdeckung resultieren bei gleicher Infiltrationsrate des Niederschlages unterschiedliche Sickerwassermengen (Tabelle 11, Abbildung 15). In allen Fällen wurde jedoch eine Verringerung des anfallenden Sickerwassers gegenüber den Vergleichsvarianten (19,5 % des Gesamtniederschlages) beobachtet. Für die verschiedenen Gesamtmächtigkeiten von 1,4 m, 2,5 m und 9,9 m ergeben sich 19,4 %, 18,9 % und 17,9 % Sickerwasseranteil des gesamten Niederschlages. Diese Unterschiede können auf die Evaporationstiefen zurückgeführt werden, wobei die höchste Mächtigkeit mit der höchsten maximalen Evaporationstiefe die prozentual geringsten Sickerwassermengen aufweist. Der Beleg für diese Ergebnisse wird von den Werten der realen Verdunstung geliefert. Diese liegen über den Vergleichswerten. Dabei verhält sich die reale Verdunstungsmenge proportional zur maximalen Evaporationstiefe und umgekehrt proportional zur Versickerungsmenge.

Obwohl die simulierten Werte nur geringfügig unter den Vergleichswerten liegen, zeigt sich der Einfluss der Vegetation auf den Wasserhaushalt des Bodens. Vermutliche Ursache für die verringerten Sickerwasserwerte ist die Evaporation, d.h. die Verdunstung aus dem Boden. Der Effekt der Evaporation überwiegt Interzeptions- und Transpirationsverluste durch die geringere Pflanzenbedeckung, deshalb wird trotz erhöhter Infiltration eine Verringerung der Sickerwassermengen beobachtet.

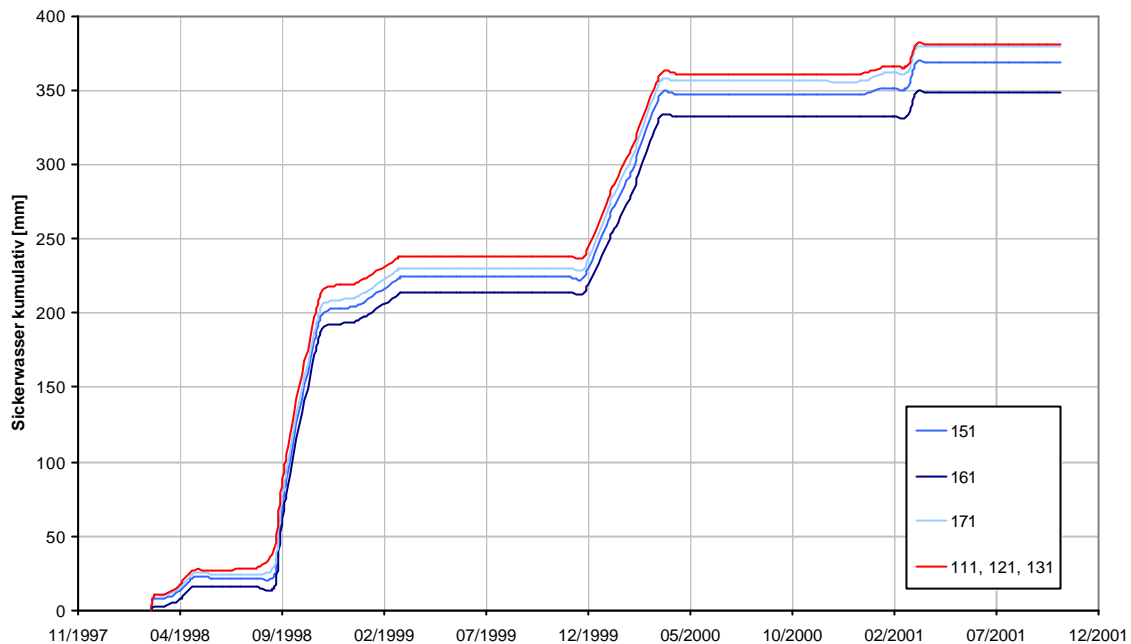


Abbildung 15: Modellierte Sickerwassermengen für die Änderung des Bedeckungsgrades auf 90 % im Vergleich zu 100 % Bedeckung (für geänderte Pedologie)

Tabelle 11: Gesamtbilanzen der Jahressummen für einen Bedeckungsgrad von 90 %

Variante	Niederschlag [mm/a]	reale Verdunstungsmenge [mm/a]	Infiltrationsmenge [mm/a]	Sickerwassermenge [mm/a]	Sickerwassermenge* [%]
111	487,5	392,4	347,8	95,1	19,5
151	487,5	395,4	357,0	92,1	18,9
161	487,5	400,3	357,0	87,2	17,9
171	487,5	392,8	357,0	94,7	19,4

* Bezugsgröße ist die jährliche Niederschlagsmenge

- 111: Vergleichswerte, Berechnungsergebnisse für geänderte Pedologie (111, 121, 131)
- 151: 111 (geänderte Pedologie, konturgebende Schicht 1,6 m), Bedeckungsgrad 90 %
- 161: 121 (geänderte Pedologie, konturgebende Schicht 9,0 m), Bedeckungsgrad 90 %
- 171: 131 (geänderte Pedologie, konturgebende Schicht 0,5 m), Bedeckungsgrad 90 %

Simulation für einen Bedeckungsgrad von 50 %

Es ist zu überprüfen, ob sich bei geringeren Bedeckungsgraden die diskutierten Effekte umkehren und die Infiltrationsmenge trotz erhöhter Evaporation zu einem Anstieg der Sickerwassermengen führt. Die vorherige Simulation wurde für einen Bedeckungsgrad von 50 % wiederholt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 aufgeführt, die Vergleichswerte sind Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 12: Gesamtbilanzen der Jahressummen für einen Bedeckungsgrad von 50 %

Variante	Niederschlag [mm/a]	reale Verdunstungs- menge [mm/a]	Infiltrati- onsmenge [mm/a]	Sickerwasser- menge [mm/a]	Sickerwassermenge* [%]
181	487,5	393,0	401,6	94,5	19,4
191	487,5	411,3	401,6	76,2	15,6
101	487,5	382,6	401,6	104,9	21,5

* Bezugsgröße ist die jährliche Niederschlagsmenge

- 181: 111 (geänderte Pedologie, konturgebende Schicht 1,6 m), Bedeckungsgrad 50 %
 191: 121 (geänderte Pedologie, konturgebende Schicht 9,0 m), Bedeckungsgrad 50 %
 101: 131 (geänderte Pedologie, konturgebende Schicht 0,5 m), Bedeckungsgrad 50 %

Bei Verringerung des Bedeckungsgrades auf 50 %, steigt erstens die infiltrierte Menge des Gesamtniederschlags erwartungsgemäß an und liegt mit 82,4 % deutlich über den 71,3 % der Vergleichsvariante (111, 121, 131). Zweitens liegen die Versickerungsraten nun nicht mehr einheitlich unter dem Vergleichswert, hier betrug der Sickerwasseranteil am Gesamtniederschlag 19,5 %. Die modellierten Sickerwasserwerte der Abdeckungsmächtigkeiten von 1,4 m und 2,5 m weichen nur geringfügig von den Ergebnissen der vorherigen Simulation ab, wobei bei der geringsten Mächtigkeit der Abdeckung mit 1,4 m der Sickerwasseranteil nun mit 21,5 % sowohl über der Vergleichsvariante (19,5 %) als auch über der Variante mit 90 % Bedeckung (19,4 %) liegt. Dagegen weicht die simulierte Sickerwassermenge bei 9,9 m Mächtigkeit stärker von den übrigen Ergebnissen ab und liegt mit 15,6 % deutlich unter den anderen Werten. Hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Mächtigkeit.

6.4.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Ziel der Simulation war es, festzustellen inwieweit sich die Änderung einzelner Kennwerte auf den Bodenwasserhaushalt und damit auf die Bildung von Sickerwasser auswirkt.

Hierbei wurden die folgenden Parameter variiert:

- pedologische Eigenschaften
- Mächtigkeit der konturgebenden Schicht
- Vegetationsbedeckungsgrad

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die bodenphysikalischen Kennwerte und die Bedeckungsverhältnisse direkten Einfluss auf die Bildung von Sickerwasser haben.

Die Erhöhung der Durchlässigkeitsbeiwerte führt, infolge Verringerung des Wasserhaltevermögens, zu einem Anstieg der Sickerwassermengen. Die Schichtmächtigkeit spielt unter der Voraussetzung einer vollständigen Bedeckung durch die Vegetation keine Rolle.

Die Verringerung des Pflanzenbedeckungsgrades auf 90 % bewirkt trotz erhöhter Infiltration des Niederschlagswassers in den Boden keine Erhöhung der modellierten Sickerwassermengen. Mit zunehmender Mächtigkeit der Abdeckung nehmen die maximalen Evaporationstiefen und die realen Verdunstungsmengen zu und verhalten sich umgekehrt proportional zur Versickerungsmenge.

Bei der Senkung des Pflanzenbedeckungsgrades auf 50 % wirkt sich die Mächtigkeit der Abdeckschichten deutlicher auf die Quantität des Sickerwassers aus. Die höheren Evaporationstiefen bei größeren Schichtstärken können die Nachteile einer schlechten Bedeckung kompensieren und sich somit positiv auf den Sickerwasseranfall auswirken. Dagegen nehmen die modellierten Sickerwasserwerte bei geringeren Mächtigkeiten zu.

Die Simulation ergab, dass die an der Modellbasis anfallenden Sickerwassermengen nicht primär von der Mächtigkeit der Abdeckschichten abhängig sind. Eine zunehmende Mächtigkeit ermöglicht zwar ein höheres Wasserspeichervolumen, was aber lediglich zu einer zeitlichen Verzögerung des Sickerwasseraustritts führt. Nach Einstellung eines Feuchtegleichgewichts, d.h. bei gesättigtem Boden, sind die Mächtigkeiten für die Speicherleistung demnach unbedeutend. Die Bodenspeichereigenschaften werden vielmehr von den bodenphysikalischen Eigenschaften sowie von den Entzugsparametern, die direkten Einfluss auf die Verdunstung ausüben, beeinflusst. Die Aufteilung wie viel Wasser aus welcher Schicht verdunstet, wird zwar durch die Pedologie gesteuert, ist aber hauptsächlich von den Entzugsparametern Wurzeltiefe, Wurzeldichte, Evaporationstiefe und Vegetationsbedeckungsgrad abhängig.

Für die Validierung des Modells wurden die Mengen und Zusammensetzung der bei den Lysimeterversuchen gewonnenen Sickerwasserproben herangezogen. Es erfolgte ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den tatsächlichen Sickerwasserfrachten aus den Lysimeterversuchen.

7 Verwertung und Nutzen der Ergebnisse

7.1 Anwendungsorientierte Hinweise zur Überdeckungsoptimierung

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die bodenphysikalischen Kennwerte und die Bedeckungsverhältnisse direkten Einfluss auf die Bildung von Sickerwasser haben.

Es wurde festgestellt, dass die Überdeckungsmächtigkeiten nur bedingt und mittelbar auf die Reduzierung der Sickerwasserlösungen Einfluss haben. Eine Mächtigkeitserhöhung der Abdeckschichten allein spielt unter der Voraussetzung einer vollständigen Vegetationsbedeckung keine entscheidende Rolle auf die Größe der Sickerwasserrate. Jedoch sollte eine bestimmte Mindestschichtstärke für die Abdeckung (> 2 m) eingehalten werden.

Die Bodenspeichereigenschaften werden vielmehr von den bodenphysikalischen Eigenschaften sowie von den Entzugsparametern (Wurzeltiefe, Wurzeldichte, Evaporationstiefe und Vegetationsbedeckungsgrad), die direkten Einfluss auf die Verdunstung ausüben, beeinflusst. Damit ist die fachgerechte Auswahl und Verwendung von Abdeckmaterialien mit den dafür erforderlichen Eigenschaften und bodenphysikalischen Parametern von wesentlicher Bedeutung.

Um geringe Versickerungsraten zu erreichen, ist ein hoher Vegetationsbedeckungsgrad anzustreben, wobei Pflanzen mit tiefen Wurzeln und einer hohen Wurzeldichte zur Anwendung kommen sollten.

Weiterhin sind folgende Kriterien für die Rekultivierungsschichten zu empfehlen:

- Schichtmächtigkeiten > 2 m
- Vermeidung von anthropogen geschaffenen „Schichtgrenzen“ in der Abdeckung
- Verwendung von Materialien mit hohem Wasserspeichervermögen (z.B. Gemische aus Sanden, Aschen, organischen Materialien)
- Sofortige Begrünung der fertiggestellten Abdeckmodule

Die im Rahmen dieses FuE – Vorhabens erzielten Ergebnisse finden Anwendung bei den Betreibern der Kalirückstandshalden in Thüringen. Für diesen Interessentenkreis können die vorliegenden Ergebnisse sofort eine praxisnahe Verwendung finden.

7.2 Ableitung standortbezogener pflanzenphysiologischer Kriterien und Vorschläge zur Begrünung

Grundlage dieser Aussagen bildet eine Literaturrecherche zu einsetzbarer Vegetation an Extremstandorten (z. B. Halden). Weiterhin wurden die Begrünungskonzeptionen der Haldenbetreiber recherchiert und durch Felduntersuchungen untersetzt.

Schlussfolgernd ergeben sich Auswahlkriterien für Pflanzen (Gras-, Baum- und Strauchvegetation), die zur biologischen Versiegelung von Halden eingesetzt werden können:

- schneller Anwuchs
- hoher Wasserverbrauch
- große Wurzeldichte als Voraussetzung für hohe Wasseraufnahme
- wärmeliebend
- ausgeprägtes Wurzelgeflecht zur Stabilisierung der Hangbereiche
- geringes Konkurrenzverhalten untereinander

Folgende Standortvoraussetzungen wirken limitierend auf einen vitalen Bewuchs:

- steile Hänge mit großen Hanglängen
- beschränkt mächtige Rekultivierungsschicht mit begrenzten Nährstoffträgern
- extreme Windverhältnisse
- begrenztes Wasserreservoir
- maximale Wärmeentwicklung an Hangbereichen

Nicht limitierend wirkt der eigentliche Hauptbestandteil der Halden, das NaCl, da dieses aufgrund der mächtigen Überdeckungsschichten auch durch kapillaren Aufstieg nicht oder nur in nicht pflanzentoxischen Mengen in die oberste Rekultivierungsschicht gelangt. Eine Ausnahme bilden hier lange Hangbereiche, welche nicht durch Bermen unterteilbar sind und somit nicht in der von der Kali-Haldenrichtlinie [30] vorgesehenen Mächtigkeit überdeckt werden können. Hier kann die Geringmächtigkeit zum Eindringen von Wurzeln in den Salzkörper führen bzw. der kapillare Salzaufstieg in die Überdeckungsschicht insbesondere bei den an den südlichen Hangbereichen herrschenden Strahlungsverhältnissen im Sommerhalbjahr stattfinden und phytotoxisch wirken. Tiefwurzler sind hier demnach nicht zu empfehlen.

Im Modell BOWAHALD kann neben der Grasvegetation auch die Strauch- bzw. Baumvegetation bezüglich der Interzeption berücksichtigt werden. Daher wurden folgende Baum- bzw. Straucharten für die Modellierung ausgewählt, teilweise werden sie bereits seit Beginn der kommerziellen Überdeckung zur Rekultivierung eingesetzt.

- ausgewählte Grasarten:

- Blaugras	<i>(Sesleria varia)</i>
- Blauschwengel	<i>(Festuca cinerea)</i>
- Rotes Straußgras	<i>(Agrostis capillaris)</i>
- Weißes Straußgras	<i>(Agrostis stolonifera)</i>
- Schafschwengel	<i>(Festuca ovina duriuscula)</i>
- Horstbildender Rotschwengel	<i>(Festuca rubra comm.)</i>
- Rotschwengel mit kurzen Ausläufern	<i>(Festuca rubra trich.)</i>
- Wiesenrispengras	<i>(Poa pratensis)</i>
- Deutsches Weidelgras	<i>(Lolium perenne)</i>

- ausgewählte Baum- bzw. Straucharten:

- Sanddorn (Sado)	Hippophae rhamnoides L.
- Traubeneiche (TEi)	Quercus petraea L.
- Weiß-u. Roterle (Erle)	Alnus incana; -glutinosa L.
- Robinie (Rob)	Robinia pseudoacacia L.
- Sandbirke (Bi)	Betula pendula Roth
- Balsampappel (Pa)	Populus Sect. Tacamahaca
- Weide (Wei)	Salix smithiana, purpurea, viminal.
- Spitzahorn (Sah)	Acer platanoides L.
- Weißbuche (WBU)	Carpinus betulus L.
- Vogelkirsche (Kir)	Prunus avium L.
- Winterlinde (WiLi)	Tilia cordata Mill.
- Schwarzkiefer (Ski)	Pinus nigra ssp. nigra Arnold
- Douglasie (Dgl)	Pseudotsuga menziesii Franco

- | | |
|----------------------|------------------------|
| - Weymouthskiefer | Pinus strobus L. |
| - Rot- und Zerreiche | Quercus rubra, -cerris |

In eine ersten Bewertung kann einfließen, dass die Vitalität der gepflanzten Koniferen nicht befriedigend ist und diese trotz günstiger Interzeptionskapazitäten im Winterhalbjahr daher aus dem Modellansatz herausfallen.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen dieses Vorhabens erfolgte eine Modellierung des Bodenwasserhaushaltes mit Aussagen zum Wasserspeichervermögen von Rekultivierungsschichten auf Kalirückstandshalden, speziell am Standort Bleicherode.

Nach intensiver Recherche zu Wasserhaushaltsmodellen und deren Auswertung hinsichtlich der Anwendung für Kalirückstandshalden kristallisierte sich das Modell BOWAHALD als optimalster Simulator heraus.

Das im Rahmen einer Diplomarbeit [28] am Standort getestete HELP-Modell war nur für Bodenaushub als Abdeckschicht anzuwenden. Bei den auf der Kalihalde eingesetzten Bodenersatzstoffen und Bodensubstraten waren nach den Simulationsrechnungen deutliche Abweichungen von den realen Sickerwasserraten zu verzeichnen. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass die verwendeten Bodenersatzstoffe und Bodensubstrate zwar bodenähnliche Eigenschaften besitzen, aber deren Parameter von den Bodenmatrizes abweichen.

Die BOWAHALD - Modellierung der Sickerwassermengen wurde für verschiedene Varianten durchgeführt, die realen Verhältnissen bei der Kalihaldenrekultivierung entsprechen.

Anhand der Simulation sollte festgestellt werden, inwieweit sich die Änderung einzelner Inputparameter auf den Bodenwasserhaushalt und damit auf die Bildung von Sickerwasser auswirkt.

Hierbei wurden die folgenden Parameter variiert:

- pedologische Eigenschaften
- Mächtigkeit der konturgebenden Schicht
- Vegetationsbedeckungsgrad

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die bodenphysikalischen Kennwerte und die Bedeckungsverhältnisse direkten Einfluss auf die Bildung von Sickerwasser haben.

Eine Erhöhung der Wasserleitfähigkeit führt, infolge Verringerung des Wasserhaltevermögens, zu einem Anstieg der Sickerwassermengen.

Die Schichtmächtigkeit allein spielt unter der Voraussetzung einer vollständigen Bedeckung durch die Vegetation keine entscheidende Rolle auf die Größe der Sickerwasserrate..

Mit zunehmender Mächtigkeit der Abdeckung nehmen die maximalen Evaporationstiefen und damit die realen Verdunstungsmengen im umgekehrt proportionalen Verhältnis zu den Sickerwassermengen zu.

Eine geringfügige Reduzierung des Pflanzenbedeckungsgrades (90 %) bewirkt trotz erhöhter Infiltration des Niederschlagswassers keine Erhöhung der modellierten Sickerwassermengen. Die höheren Evaporationstiefen bei größeren Schichtstärken können die Nachteile einer schlechteren Bedeckung kompensieren und sich somit positiv auf den Sickerwasseranfall auswirken.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die an der Modellbasis anfallenden Sickerwassermengen nicht primär von der Mächtigkeit der Abdeckschichten abhängig sind. Eine Mächtigkeitszunahme ermöglicht zwar ein höheres Wasserspeichervolumen, was aber lediglich zu einer zeitlichen Verzögerung des Sickerwasseraustritts führt. Nach Einstellung eines Feuchtegleichgewichts in den Rekultivierungsschichten, d.h. bei gesättigtem Boden, sind die Mächtigkeiten für die Speicherleistung demnach unbedeutend. Die Bodenspeicher-eigenschaften werden vielmehr von den bodenphysikalischen Eigenschaften sowie von den Entzugsparametern, die direkten Einfluss auf die Verdunstung ausüben, beeinflusst.

Das Modell konnte am Standort Bleicherode validiert werden. Dafür wurden die Mengen und Zusammensetzung der bei den Lysimeterversuchen gewonnenen Sickerwasserproben herangezogen. Es erfolgte ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den tatsächlichen Sickerwasserfrachten aus den Lysimeterversuchen. Durch optimale Abdeckvarianten wird somit eine Reduzierung der Sickerwassermengen auf 15 bis 20 % (bezogen auf die Niederschläge), erreicht. Damit wird durch die „biologische Versiegelung“ der Kalihalden einer Verringerung der Sickerwassermengen um 70 bis 80 % erzielt.

Durch Simulationen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAHALD lassen sich Aussagen zur Überdeckungsoptimierung von Kalirückstandshalden machen. Zur Reduzierung der Sickerwassermengen und damit der Salzlösungsbildung sind die aufzubringenden Abdeckmodule nur in Kombination mit einer entsprechenden Vegetation erfolgreich.

Die am Extremstandort Kalirückstandshalde mögliche Vegetation muss Kriterien erfüllen, die den dort vorherrschenden Bedingungen

- Trockenstress
- Hitzestress
- Nahrungsstress gerecht werden.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Modell über die Inputparameter relativ schnell an die jeweiligen Standortverhältnisse der Halde angepasst werden können.

Bei der Projektbearbeitung hat sich herausgestellt, dass weiterer Forschungsbedarf vorhanden ist. Dies betrifft insbesondere den bisher nur als Annahmen und nicht mit Messwerten belegten Modellinput. Es macht sich erforderlich, dass mittels umfangreicher Wurzelkartierungen in den Abdeckmaterialien Daten zu Wurzel-dichte, -länge, -verteilung und -masse erhoben werden. Die derzeit in das Modell eingeflossenen Angaben beruhen auf Daten ungestörter Standorte.

Daneben sind bei der Ermittlung der Inputgrößen des Modells Grundlagenuntersuchungen zur direkten Bestimmung (in-situ) der Evapotranspiration über den Abdeckschichten notwendig. Dazu ist derzeit geeignete Messtechnik in Entwicklung.

9 Literaturverzeichnis

- 1 Akademie der Wissenschaften der DDR [Hrsg.] (1981): Atlas der DDR, Teil I und II, Verlag Hermann-Haack, Geographisch-kartographische Anstalt Gotha/Leipzig
- 2 BLUME, H.-P. [Hrsg.] (1992): Handbuch des Bodenschutzes. ecomed.- 2. Auflage
- 3 BORCHARDT, W.; PACALAJ, C. (1994): Kalirückstandshalden im Südharzrevier – Untersuchung von Begrünungsverfahren - Natur und Landschaft 69 (12), 543-546.
- 4 BAL GUMPENSTEIN [Hrsg.] (1994): 4. Gumpensteiner Lysimetertagung „Übertragung von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftlich genutzte Flächen und Regionen“ vom 19. - 20. April 1994. – Gumpenstein.
- 5 DUNGER, D.; DORNBUSCH, L. (2000): Bestimmung von Restdurchsickerungsraten von Altablagerungen als Zielgröße der Altlastensanierung durch Wasserhaushaltsmodelle. – Müll und Abfall, H 7, S. 431 - 437
- 6 SCHEFFLER, E. (1997): Teilabschlussbetriebsplan Abdeckung und Begrünung der Rückstandshalde des stillgelegten Kalibergwerks Volkenroda. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 7 SCHÜRER, J. (1993): Projektstudie zur ökologisch verträglichen Salzlaststeuerung in Thüringen. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 8 SCHÜRER, J. (1998): Grundsatzuntersuchungen zur Haldenlösungsqualität am Standort Volkenroda. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 9 LIEBMANN, H.; DÖHNER, C.; SCHRÖDER, U. (1994): Bericht über Untersuchungen zur Präzisierung des Umfangs der ökologischen Auswirkungen der Zielitzer Rückstandshalden. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 10 MINNICH, M. (1996): Die Rekultivierung von Kali-Rückstandshalden: Begrünungsversuche auf der Halde Bleicherode/Thüringen. – Diplomarbeit an der Universität Trier
- 11 LIEBMANN, H.; SCHRÖDER, U. (1997): Untersuchungen zum kapillaren Salzaufstieg in den Überdeckungen von Kali-Rückstandshalden. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 12 LIEBMANN, H.; DÖHNER, C. (1994): Grobkonzept zur Sicherung und Rekultivierung der GTS Halden Teutschenthal. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 13 LIEBMANN, H.; SCHAEF, H.-J. (1994): Gutachten zur Bauschuttablagerung an Kali-Rückstandshalden. – K-UTEC GmbH in Zusammenarbeit mit Ing.-Gesellschaft Dr. Schaefer und Partner, unveröff. Bericht
- 14 LIEBMANN, H. (1993): Jährliche Versickerungsmengen der Halden der Zielitzer Kali AG. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht

- 15 LIEBMANN, H. (1992): Konzeption zur Durchführung von Lysimeteruntersuchungen an Rückstandsmaterial der Zielitzer Kali AG. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 16 K-UTEC GmbH; HGN GmbH; GVV mbH (2001): Abschlußbericht Wasserwirtschaftliches Haldenmonitoring im Südharz-Kalirevier. Bericht der ARGE
- 17 K-UTEC GmbH; GVV mbH (1997): Sanierungserfordernisse der Halden des Mansfelder Kupferbergbaus, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, AZ 03254 – Osnabrück
- 18 K-UTEC GmbH, GH Kassel, TU Clausthal u.a. (1996): Abschlußbericht Pilotprojekt Bleicherode – Entwicklung eines Verfahrens zur Rekultivierung von Kali-Rückstandshalden, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, AZ 02430. – Osnabrück
- 19 KÄMPF, M.; MONTENEGRO, H. (1999): Numerische Untersuchungen zum Aufbau von Oberflächenabdichtungssystemen, Forschungsbericht (Schlussbericht) BMBF 14709131 4. – TU Darmstadt, Dezember 1999
- 20 MÄNZ, K. (1995): Bericht zur Untersuchung der Abdeckschicht der Kleinhalde Kleinbodungen. – K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht
- 21 MÄRTNER, B.; ZEUNER, B.(2000): Standortspezifisch optimierte Oberflächenabdichtung von Deponien und Altablagerungen unter Einbeziehung der Wasserhaushaltsberechnung.- Manuskript XI. Sächsisches Altlastenkolloquium, Coswig
- 22 BERGER, K. (1998): Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse.– Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg. – Forschungsbericht 1471038, BMBF
- 23 BERGER, K. (2000): Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des HELP-Modells. – Müll und Abfall, H. 2, S. 65 - 76
- 24 BERGER, K. (2001): Weiterentwickeltes HELP-Modell 3.50D zur Simulation des Wasserhaushalts von Deponieabdichtungssystemen verfügbar. – Müll und Abfall, H. 8, S. 469 - 472
- 25 BERGER, K. (2001): Dimensionierung und Optimierung von Rekultivierungsschichten mit dem HELP-Modell zur Minimierung des Sickerwasseranfalls (Internet-Version). Quelle: Internet (<http://www.geowiss.uni-hamburg.de/l-boden/dimreku.pdf>).
- 26 HOLZMANN, H. (1996): Regionalisierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung unter Anwendung von GIS (Internetrecherche). – Universität Klagenfurt.
- 27 ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- 28 TATUS, A. (2001): Betrachtung der Versickerungsprozesse an Kalialthalden - Validierung des Simulationsmodells HELP am Standort Bleicherode (Thüringen).- Martin - Luther - Universität Halle - Wittenberg, Fachbereich Geowissenschaften, Diplomarbeit.

- 29 SCHROEDER, P. R.; BERGER, K. (2001): Das Hydrologic Evaluation of Landfill performance (HELP) Modell, - Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. -2., aktualisierte Auflage zur deutschen HELP-Version ab 3.50. – Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg. –
- 30 Richtlinie für die Abdeckung und Begrünung von Kalihalden im Freistaat Thüringen – Kali-Haldenrichtlinie.– Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt Erfurt, 18.04.2002.
- 31 SCHERZER, J. (2001): Der Wasserhaushalt von Kiefernforsten auf Kippenböden der Niederlausitz.- Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- 32 RUDOLPH; F (2002): Untersuchung und Bewertung des Zusammenhanges zwischen Geländeklima und Bodenwasserhaushaltseigenschaften auf der Kaliialthalde Bleicherode.- Martin - Luther - Universität Halle - Wittenberg, Fachbereich Geowissenschaften, Diplomarbeit (Entwurf)
- 33 ODAU, J. (1997): Untersuchungen von Vorflutern und Haldenlösungen in Nordthüringen hinsichtlich ihrer relevanten Salzfrachten. – Diplomarbeit FH Erfurt
- 34 BIEMELT, D. (2000): Bestimmung der Grundwasserneubildung auf Offlandbereichen der Lausitzer Bergbaufolgelandschaft.- Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- 35 KATZUR, J. u.a. (1999): Bodenverbessernde Substrate aus Massenabfällen für die landwirtschaftliche Rekultivierung.- Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V. Finsterwalde.- Forschungsbericht 1470933, BMBF
- 36 GEHLKER, H. (1976): Die optimale Mächtigkeit einer Bodendecke über schwer durchwurzelbarem Untergrund. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 17 :106-116.
- 37 DIERSCHKE, H. (1994): Pflanzensoziologie. Grundlagen und Methoden. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- 38 DONNER, J. (1967): Der Einfluß steigender Salzkonzentration der Bodenlösung auf das Wachstum, den Ertrag und den Stoffgehalt von sechs Gräsern. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 8 :163-174.
- 39 HEINZE, M. (1982): Boden - Pflanze - Beziehungen auf natürlichen und künstlichen Gipsstandorten Thüringens. Dissertation B, Sektion Forstwirtschaft, TU Dresden.
- 40 HEINZE, M., FIEDLER, H.J. UND LIEBMANN, H. (1984): Freilandversuche zur Begrünung von Kalirückstandshalden im Südharzrevier. Hercynia 21 :179-189.
- 41 HEINZE, M. UND LIEBMANN, H. (1991): Freilandversuche zur Begrünung von Kalirückstandshalden im Südharzgebiet. Hercynia 28, (1) :62-71.
- 42 HEINZE, M.; LIEBMANN, H. (1998): Begrünung der Kalirückstandshalden im Südharzgebiet.- AFZ, Der Wald, 21, S.1287-1289

- 43 LABO (1995): Abfallverwertung auf devastierten Flächen. Anforderungen an den Einsatz von Biokompost und Klärschlamm bei der Rekultivierung von langjährig devastierten Flächen in den neuen Bundesländern; Erich Schmidt Verlag, Berlin
- 44 LAGA 20 (1995): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln; Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), 20, E. Schmidt Verlag, Berlin.
- 45 LAGA 21 Merkblatt M10 (1995): Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall.- in: Müllhandbuch, Kennziffer 6856, E. Schmidt Verlag, Berlin
- 46 LIEBMANN, H.; SCHRAMM, J. (1982): Untersuchungen zur Hydrologie der Rückstandshalden. Überarbeitete Fassung eines Vortrages, gehalten zum 22. Technisch-Wissenschaftliches Kolloquium am 2.-3.4.1982 in Eisenach, unveröffentlicht, VEB Kombinat Kali.
- 47 LÜCKE, M. (1997): Untersuchungen zur Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie. - Dissertation am FB 11, FG LÖN der Univ. Gh Kassel, Witzenhausen.
- 48 MINNICH, M. (1996): Die Rekultivierung von Kalirückstandshalden: Begrünungsversuche auf der Halde Bleicherode/Thüringen. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Universität Trier.
- 49 MÜHLBERG, H., STEINICKE, A., LIEBMANN, H.; SCHRAMM, J. (1993): Zur Umweltverträglichkeit der Salzhalden. – unveröffentlichtes Manuskript. - Mitteldeutsche KALI AG. – Sondershausen.
- 50 OBERDORFER, E. (1978): Süddeutsche Pflanzengesellschaften - Teil II - Sand- und Trockenrasen, Heide- und Borstgrasgesellschaften, alpine Magerrasen, Saum-Gesellschaften, Schlag- und Hochstauden-Fluren; Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- 51 OBERDORFER, E. (1983): Süddeutsche Pflanzengesellschaften - Teil III - Wirtschaftswiesen und Unkrautgesellschaften; Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- 52 OBERDORFER, E. (1994): Pflanzensoziologische Exkursionsflora; Ulmer Verlag , Stuttgart
- 53 GOLDSCHMIDT, B. (1993): Sukzession auf Schieferhalden - Vegetation, Standortbedingungen und Sukzession auf Abraumhalden des Schieferbergbaus im Thüringisch-fränkischen Schiefergebirge; Diplomarbeit, Universität Bayreuth - Lehrstuhl für Biogeographie, Bayreuth
- 54 LIEBMANN, H., PARNIESKE-PASTERKAMP, J, GEBHARDT, L. (2001): Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen zur Salzlösungsgenese an Althalden der Kaliverarbeitung in Nordthüringen zur ökologischen Sicherung der Nachbetriebsphase.- K-UTEC GmbH, FH Nordhausen, Abschlußbericht B 309-98015
- 55 OSAN, C. (1994). Flora und Vegetation auf einer älteren Kalirückstandshalde (Kraja in Thüringen) unter besonderer Berücksichtigung der Strauchschicht. Projektarbeit im Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz, Gesamthochschule Kassel, unveröffentlicht, 68 S..

- 56 PETZOLD, C. (1979): Einfluß der Partialdruckverhältnisse für Wasserdampf über gesättigten Salzlösungen auf die Kondensation und Verdunstung auf Haldenoberflächen. unveröffentlichter Arbeitsbericht des VEB Kombinat Kali. - Sondershausen.
- 57 PODLACHA, G. (1995): Standortkundliche Untersuchungen der kleinräumlichen Gliederung von Spontanvegetation auf Rückstandshalden der Kaliindustrie. Diplomarbeit im Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz, Gesamthochschule Kassel, unveröffentlicht.
- 58 PODLACHA, G. (1999): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie. Untersuchungen zur Substratandeckung mit geringen Schichtstärken aus Bodenaushub-Wirbelschichtasche-Gemischen und ihrer Begrünung. - Dissertation am FB 11, FG LÖN der Univ. Gh Kassel, Witzenhausen.
- 59 RAL-GÜTERICHTLINIE [Hrsg] (1994): Güterrichtlinie Kompost. Kompostinformation 222, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., in Zusammenarbeit mit der VDLUFA, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- 60 RICHTER, J. (1986): Der Boden als Reaktor - Modelle für Prozesse im Boden. - Stuttgart.
- 61 ROTHMALER, W. (1994): Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Kritischer Band. Gustav Fischer-Verlag, Jena.
- 62 SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde; F. Enke Verlag, 13. durchgesehene Auflage, Stuttgart.
- 63 SCHMEISKY, H. (1996): Einsatz von Klärschlamm, Aschen und Kompost zu Rekultivierungszwecken. In: Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung u-nd Praxis. Biologische Abfallbehandlung III, Baeza-Verlag, Witzenhausen, :533-573.
- 64 SCHMEISKY, H., KUNICK, M.; LENZ, O. (1993): Zur Begrünung von Rückstandshalden der Kaliindustrie. Kali und Steinsalz, Essen, 11 (5/6) :132-152.
- 65 VAN ELSEN, TH. (1995): Erfassung und Bewertung schutzwürdiger Biotope im näheren Einflußbereich von Rückstandshalden der Kali-Industrie in Thüringen; Arbeit im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena, unveröffentlicht
- 66 VAN ELSEN, TH.; SCHMEISKY, H. (1990): Halophytenbestände im Einflussbereich von Rückstandshalden der Kali-Industrie; Mitteilungen aus dem Ergänzungsstudium Ökologische Umweltsicherung, 9, S. 167-180, FB 11, Universität Gh Kassel, Witzenhausen
- 67 HARTGE, K. H.; HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. 2. Aufl. Stuttgart.
- 68 HARTGE, K. H.; HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. 3. Aufl. Stuttgart.
- 69 SCHMEISKY, H.; HOFMANN, H. [Hrsg.] (2000): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie (3) – Untersuchungen zum Salzaustrag, zur Sukzession sowie Maßnahmen und Erkenntnisse zur Begrünung. - Ökologie und Umweltsicherung, Bd. 19/2000, Universität – Gesamthochschule Kassel/Witzenhausen, Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz

- 70 JUNKERSFELD, L. (1994): Die Bedeutung der Aggregation für den Wassertransport in Böden – Grenzen der Anwendbarkeit von hydraulischen Kennwerten. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Jg. 74, S. 277-280
- 71 WENDLING, U.; SCHELLIN; H. G.; THOMÄ, M. (1991): Bereitstellung von täglichen In-formationen zum Wasserhaushalt des Bodens für Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Zeitschrift für Meteorologie, Jg. 41, H. 6, S. 468-475.
- 72 ZUNDEL, R. (1987): Zur Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie und anderen schwierigen Standorten. Informationen der Universität Göttingen.
- 73 ZUNDEL, R.: Rekultivierungspläne für die Kalihalden Reyershausen (1982), Volpriehausen/Solling (1986), Empelde bei Hannover (1988), Bleicherode/Kreis Nordhausen (1991), Menteroda/Kreis Mühlhausen (1991) und Sollstedt/Kreis Nordhausen (1992).
- 74 VDLUFA (1991): Methodenbuch, Band I. Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- 75 LEUSSINK, H. (1964): Beitrag zur Kenntnis der bodenphysikalischen Eigenschaften von Mischböden. in: Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau; Karlsruhe.
- 76 KEZDI, A (1969):. Handbuch der Bodenmechanik 2; Berlin.
- 77 MÜFFELMANN, H. (1986): Umweltsichernde Bodendecken auf umweltgefährdenden Halden. Diplomarbeit am Leichtweiß - Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, unveröffentlicht.
- 78 POTT, R. (1992): Die Pflanzengesellschaften Deutschlands; Ulmer Verlag, Stuttgart
- 79 DUNGER, V. (2002): Untersuchungen zum wasserhaushaltlichen Verhalten ausgewählter Lysimeter mit verschiedenen Abdeckungen auf der Halde Bleicherode. unveröffentlicht.
- 80 DUNGER, V. (2002): Dokumentation des Modells BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von wasserungesättigten Deponien/Halden und deren Sicherungssystemen, Version 04/2002, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie.
- 81 HÖLTING, B. (1995): Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Stuttgart: Enke-Verlag, 5. Auflage.
- 82 KNAUER, S. (1994): Recherche zur historischen Entwicklung der Rückstandshalde Bleicherode. – Abschlussarbeit der Ingenieur- und Fachschule Nordhausen. – unveröffentlicht
- 83 UMWELT-GERÄTE-TECHNIK GmbH (UGT) (o.J.): Bedienungsanleitung - Mobiles Feldtensiometer Tensio 100. Münchenberg.
- 84 PARNIESKE-PASTERKAMP, J.; KRIEGLER, U. (2000): Bericht für das Jahr 2000 zur Dokumentation und Auswertung von Arbeiten an der Lysimeterstation Rückstandshalde Bleicherode.- K-UTEC GmbH, unveröff. Bericht, 27.11.2000.

- 85 STUDE, J.; KRIEGLER, U. (2001): Abschlussdokumentation 2001 zur Dokumentation und Auswertung von Arbeiten an der Lysimeterstation Rückstandshalde Bleicherode.- K-UTECH GmbH, unveröff. Bericht, 11.12.2001.
- 86 AG Boden (1994): Bodenkundliche Karteiranleitung, 4. Auflage. Herausgeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- 87 BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L. (1993): Geohydraulik, 2. Auflage. Enke-Verlag Stuttgart
- 88 BERGER, K.; DUNGER, V. (2000): Vergleichende Simulationsrechnungen mittels der Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodelle HELP und BOWAHALD. - Proceedings zum Weiterbildungsseminar des DGFZ e.V.: Simulation zum Halden-/Deponiewasserhaushalt am 7. und 8. April 2000 in Dresden
- 89 DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage. Verlag für Bauwesen Berlin.
- 90 GDA E2-31 (2000): Rekultivierungsschichten (Entwurf). DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, AK 6.1: Geotechnik der Deponiebauwerke, UG 7: Oberflächenabdichtungssysteme. Bautechnik, Heft 77, Verlag Ernst & Sohn.
- 91 HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. Deutsch. Wetterdienst Nr.11.
- 92 KOITZSCH, R. (1977): Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtenmodell. Zeitschrift für Meteorologie, Bd. 27, H. 5 (S. 302-306).
- 93 PRINZ, H. (1991): Abriss der Ingenieurgeologie. Enke Verlag. - Stuttgart
- 94 DVWK (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern – DVWK/FH-DGG-Fachausschuß Grundwassererkundung – Paul Parey Verlag, Hamburg, Heft 114, 57 S.
- 95 HEIDEN, S; ERB, R.; KAHLE, K.; LIEBMANN, H. (2001): Kalibergbau – Umweltlast und Chance. Initiativen zum Umweltschutz, Band 25, Deutsche Bundesstiftung Umwelt: ESV, Osnabrück
- 96 BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L.(1993): Geohydraulik, 2. Auflage. Enke-Verlag Stuttgart
- 97 STOPPKA, B. (2002): Prognosemodell zur Berechnung des Salzaustrages aus Straßenbaustoffen in der Sickerzone. Vortrag 5. Bochumer Fachtagung Sickerwasserprognose, Bochum, 28.02.02.
- 98 SCHROEDER, P.R.; BERGER, K. (2002): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell. HELP 3.55 D. CD, Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg.