

5584

Der Wasserhaushalt eines großflächigen Oberflächenabdecksystems – Fallbeispiel Deponie Georgswerder (Hamburg)

Sokollek, Volker *Dr. Volker Sokollek*, Hamburg; *Marietta Weigelt-McGlone*, Bremen

Inhaltsübersicht

	Rdnr.
1 Einführung	1 – 2
2 Das Abdecksystem der Deponie Georgswerder	3 – 7
3 Das Überwachungsprogramm für die Nachsorgephase	8 – 10
4 Methoden der Wasserhaushaltsermittlung	11 – 32
4.1 Wasserhaushaltsgleichung	11 – 12
4.2 Niederschlag	3 – 16
4.3 Abfluß	17 – 21
4.4 Verdunstung	22 – 27
4.5 Dichtschichtdurchsickerung	28
4.6 Speicherinhaltsänderung	29
4.7 Ermittlungsgenauigkeit	30 – 32
5 Ergebnisse der Wasserhaushaltsermittlung	33 – 56
5.1 Allgemeines, Temperaturen	33 – 34
5.2 Niederschlag	35 – 39
5.3 Abfluß	40 – 47
5.4 Verdunstung	48 – 50
5.5 Dichtschichtdurchsickerung und Bilanz	51 – 56
6 Ausblick	57 – 59
7 Zusammenfassung	60 – 63
8 Literaturverzeichnis	

Schlagwortübersicht nach Rdnr.

Dichtschichtdurchsickerung Dichtschichtdurchs 9

Handbuch der Altlastensanierung	
EigenüberwachungEigenüberwachung	8
EinleitmengenEinleitmengen	9
FlächendränabflußFlächendränabfluß	6, 18, 42
Funktions- und ErfolgskontrolleFunktions- und Erfolgskontrolle	2, 9
GesamtabflußGesamtabfluß	40
GesamtbilanzenGesamtbilanzen	51
GroßlysimeterGroßlysimeter	5, 10, 19, 49, 51
HochwasserabflußHochwasserabfluß	43
HochwasserabflußverhaltenHochwasserabflußv	9
HochwasserdämpfungHochwasserdämpfung	44
Hydrologische BasisdatenHydrologische Basisdaten	9
Indirekte VerdunstungsbestimmungIndirekte Verdunstungsbestimmung	22
MeßnetzMeßnetz	13
NiederschlagserfassungNiederschlagserfassung	9, 13
OberflächenabflußOberflächenabfluß	6, 17, 41
Pflanzenverfügbare WassermengePflanzenverfügbare Wassermenge	25
Potentielle VerdunstungPotentielle Verdunstung	26, 48
Reale VerdunstungReale Verdunstung	23, 27, 48
SchlußfolgerungenSchlußfolgerungen	63
ÜberwachungsprogrammÜberwachungsprogram	10
VegetationseinflußVegetationseinfluß	9
WasserhaushaltsbilanzierungWasserhaushaltsb	9
WasserhaushaltsgleichungWasserhaushaltsglei	11

1 Einführung

1

Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen von Altlasten und Deponien werden meist ausgeführt, um gezielt in das hydrologische System und damit in den Wasserhaushalt dieser

Handbuch der Altlastensanierung

Standorte einzugreifen. In der Regel soll die Zusickerung niederschlagsbürtigen Wassers in die Altlast oder Deponie minimiert werden. Zugleich ist eine hohe Verdunstung erwünscht sowie ein gleichmäßiger geringer lateraler Abfluß oberhalb des Dichtsystems. Hinsichtlich seines hydrologischen Verhaltens soll das Abdecksystem möglichst langfristig stabil bleiben.

2

Gemäß diesen Anforderungen werden Abdeckungen seit etwa zehn Jahren geplant und gebaut. Ob sich die Hydrologie des fertiggestellten Abdecksystems allerdings längerfristig plangemäß verhält, wird häufig nicht überprüft. Eine direkte **Funktions- und Erfolgskontrolle** sollte jedoch bei solch aufwendigen umweltsichernden Bauwerken nicht versäumt werden. Im folgenden wird anhand der Deponie Georgswerder gezeigt, wie ein entsprechendes längerfristiges hydrologisches Meß- und Auswerteprogramm durchgeführt wird und welche Erkenntnisse daraus zu gewinnen sind.

2 Das Abdecksystem der Deponie Georgswerder

3

Die Abdichtung der gesamten, 44 ha großen Oberfläche der Altablagerung ist der aufwendigste Teil im Sicherungskonzept für die Deponie Georgswerder (8). Die Abdeckung gliedert sich in zwei hydraulisch voneinander getrennte große Teilbereiche:

- Die Obere Abdeckung über Kuppen und Oberhängen der Deponie, mit ca. 15 ha Fläche,
- die Untere Abdeckung über Unterhang- und Fußbereich der Deponie, mit ca. 29 ha.

4

Die Obere Abdeckung wurde im Jahr 1988 fertiggestellt, die Untere Abdeckung 1995. Die Obere Abdeckung besteht aus folgenden Schichten (von oben nach unten):

- Vegetationsdecke, überwiegend Grünlandbestände;
- mind. 0,75 m kulturfähiger Boden (Deckssubstrat), oberste 0,25 m mit 4 – 8 % Humusgehalt, Bodenart: lehmiger Sand bis sandiger Lehm;
- Geotextilvlies;
- 0,25 m Flächendränage aus grobsandigem Feinkies mit $k_f \geq 10 - 4$ m/s, Körnung 0,5 bis 8 mm;
- 1,5 mm PEHD-Kunststoffdichtungsbahn, in der Horizontalen überlappend verlegt, in Fallrichtung verschweißt;
- 0,60 m mineralische Dichtung aus verdichtetem Geschiebemergel mit $k_f \geq 10 - 9$ m/s;
- mindestens 0,35 m Ausgleichsschicht und Gasdränage aus Sand/Kies über der Altablagerung.

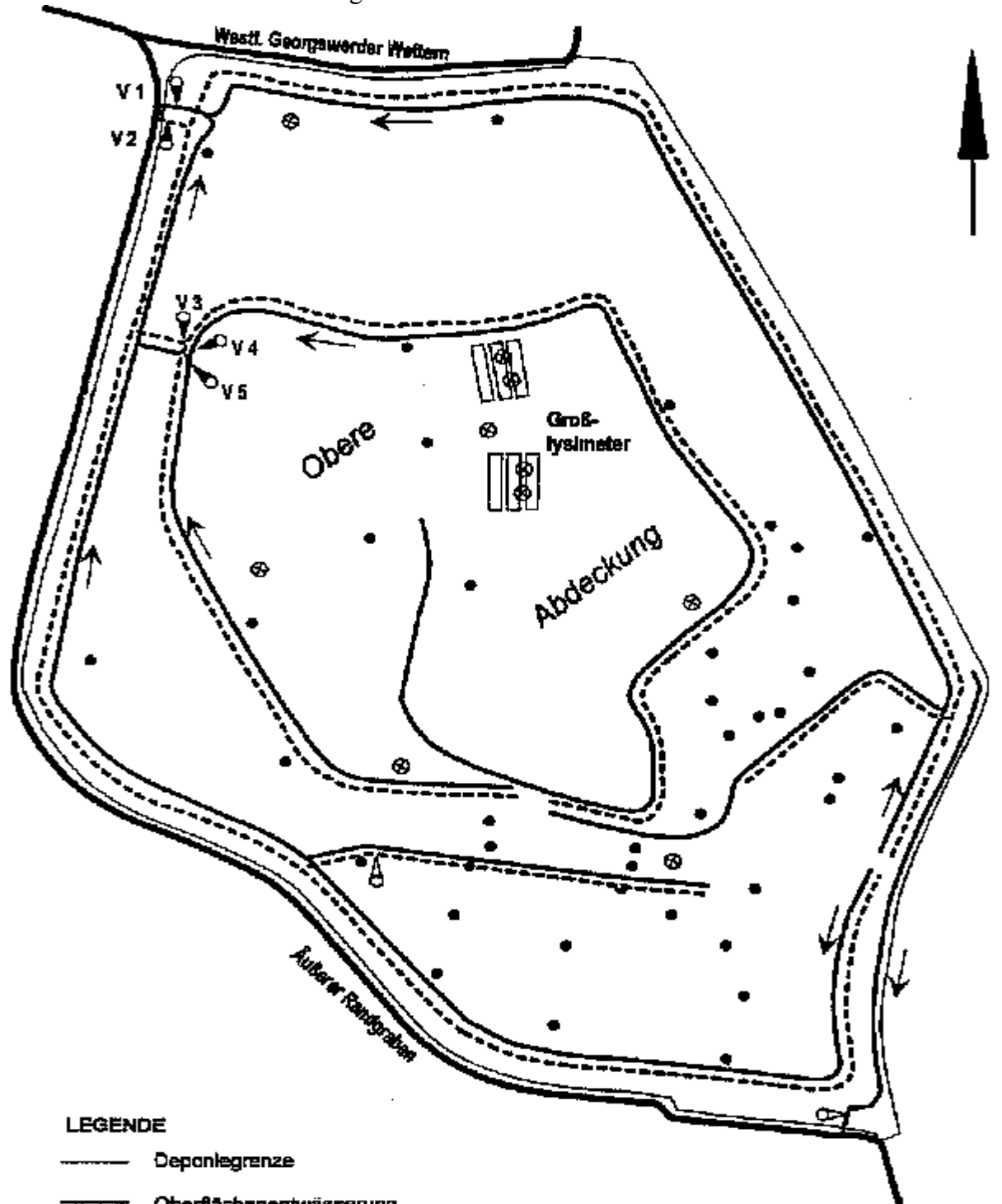
5

Im Jahr 1992 wurde gemäß dem landschaftspflegerischen Begleitplan die Rekultivierungsschicht auf mehreren, insgesamt ca. 3 ha umfassenden Teilflächen der Oberen Abdeckung durch Einbau einer zusätzlichen 0,40 m starken Sandschicht auf mind.

Handbuch der Altlastensanierung

1,15 m Mächtigkeit aufgehört, um hier eine spätere Anpflanzung von Gehölzen zu ermöglichen. In die Obere Abdeckung sind sechs **Großlysimeter** (Testfelder) von je 10 × 50 m integriert. Sie dienen der Untersuchung des Wasserhaushalts und der Wirksamkeit sowie des Langzeitverhaltens verschiedener mehrschichtiger Abdecksysteme (vergl. 4). Die Obere Abdeckung liegt zwischen 17 m und 41 m Höhe über NN. Die Hangneigungen betragen 3 bis 30 %, wobei Neigungen zwischen 10 und 20 % besonders häufig vorkommen.

Abb. 1: *Entwässerungssystem und hydrologisches Meßstellennetz auf der gesicherten Deponie Georgswerder*



LEGENDE

- Deponiegrenze
- Oberflächenentwässerung
- Sammelleitung der Flächendränage
- ⊕ Abflußanlage u. Wasserprobenahmestelle
- ⊕ Wasserprobenahmestelle
- ⊗ Niederschlagsmeßstelle
- Stauffisigkeitspegel.



6

Der **Oberflächenabfluß** der Oberen Abdeckung wird in einem Ringgraben erfaßt, während der **Flächendränabfluß** in einer Dränageringleitung gesammelt wird. Beide Wasserfassungen entwässern zu ihrem Tiefpunkt im Nordwesten der Abdeckung, von wo die Abflüsse über eine Kaskade bzw. eine Rohrleitung dem Randgraben der Unteren Abdeckung zufließen (siehe Abb. 1). Die Einzugsgebietsgröße der Wasserfassungen beträgt 14,3 ha. Die Testfelder mit zusammen 0,3 ha sind hierin nicht enthalten, da sie eine eigene Entwässerung besitzen.

7

Die Untere Abdeckung entspricht in ihrem vielschichtigen Aufbau im wesentlichen der Oberen Abdeckung. Eine wichtige Abweichung besteht darin, daß im unteren Bereich die PEHD-Dichtungsbahnen allseitig verschweißt sind. Die Entwässerung erfolgt ebenfalls über einen Randgraben und eine Dränageringleitung. Sämtliche oberhalb der Kombidichtung anfallende Abflüsse werden schließlich in das Grabensystem der Elbmarsch westlich der Deponie eingeleitet (Abb. 1).

3 Das Überwachungsprogramm für die Nachsorgephase

8

In der Nachsorgephase ist eine Langzeit-**Eigenüberwachung** des fertiggestellten Sicherungsbauwerkes durch den Sanierungspflichtigen unumgänglich, mit den Hauptzielen:

- Funktionskontrolle und Erfolgskontrolle des Sicherungsbauwerkes,
- Optimierung der Wartung und Pflege des Systems,
- Gewinnung von Praxiserfahrungen für den Bau künftiger, effektiver und kostengünstiger Oberflächenabdichtsysteme.

9

Im ordnungsbehördlichen Zulassungsbescheid nach § 7(2) AbfG zur Fertigstellung der Abdeckung der Deponie Georgswerder ist die Aufstellung eines Konzeptes zur Überwachung der gesamten Deponie nach Abschluß der Bauarbeiten gefordert. Zentraler Teil des in den letzten Jahren in der sanierungspflichtigen Dienststelle (Fachamt Altlastensanierung im Amt für Umweltschutz der Umweltbehörde Hamburg) entwickelten Eigenüberwachungskonzeptes für die gesicherte Altablagerung ist die Funktionskontrolle der Abdecksysteme (Abb. 2). Den breitesten Raum nimmt dabei die Überwachung des Wasserhaushalts ein. Sie hat folgende Ziele:

- Genaue **Erfassung des Niederschlags** als größter Wasserhaushaltskomponente unter meßtechnisch schwierigen Bedingungen;

Abb. 2: Strukturplan des Eigenüberwachungskonzeptes der Deponie Georgswerder in der Nachsorgephase

Genehmigungen		Örtliche Gegebenheiten		Betriebl. Erfordernisse		Materieller Bedarf		Finanzmittel	
Gesamt-Überwachungskonzept Deponie Georgswerder									
A. Überwachung des Altlastkörpers			B. Überwachung der Abdeckung			C. Überwachung vom Schutzgütern			
A1 Deponiegas A2 Stoffmengenbilanz: A21 Stützlastmengenplanung A22 Sickerflüssigkeitsfassung A3 Abdeckung/TKW: A3 Stoffmengenqualität A4 Setzungen			B1 Vegetation/Erosion B2 Wasserschub: B21 Niederschlag B22 Abfluß B23 Dichtschichtdurchsickerung B24 Permeation/Bilanz B3 Abflußqualität B4 Dichtsystem-Langlebigkeit B5 Dichtung Beolen 5/6			C1 Grundwasserhydrologik C2 Grundwasserbeschaffenheit C3 Oberflächengewässerhydrologik C4 Oberflächengewässerbeschaffenheit			

- Funktionskontrolle für Flächendränagen und Wasserfassungssysteme;
- Überwachung der Einhaltung der zulässigen **Einleitmengen** in den Äußeren Randgraben außerhalb des Deponiegrundstücks;
- Ermittlung des **Hochwasserabflußverhaltens**;
- Überprüfung des Wasserverbrauchs der **Vegetation** durch Verdunstung;
- Ermittlung der **Dichtschichtdurchsickerung** einschließlich längerfristiger zeitlicher Trends;
- Nachweis des Funktionierens der Oberen und Unteren Abdeckung als komplexe Systeme über die **Wasserhaushaltsbilanzierung**
- Gewinnung zuverlässiger **hydrologischer Basisdaten** für die Planung neuer Abdecksysteme.

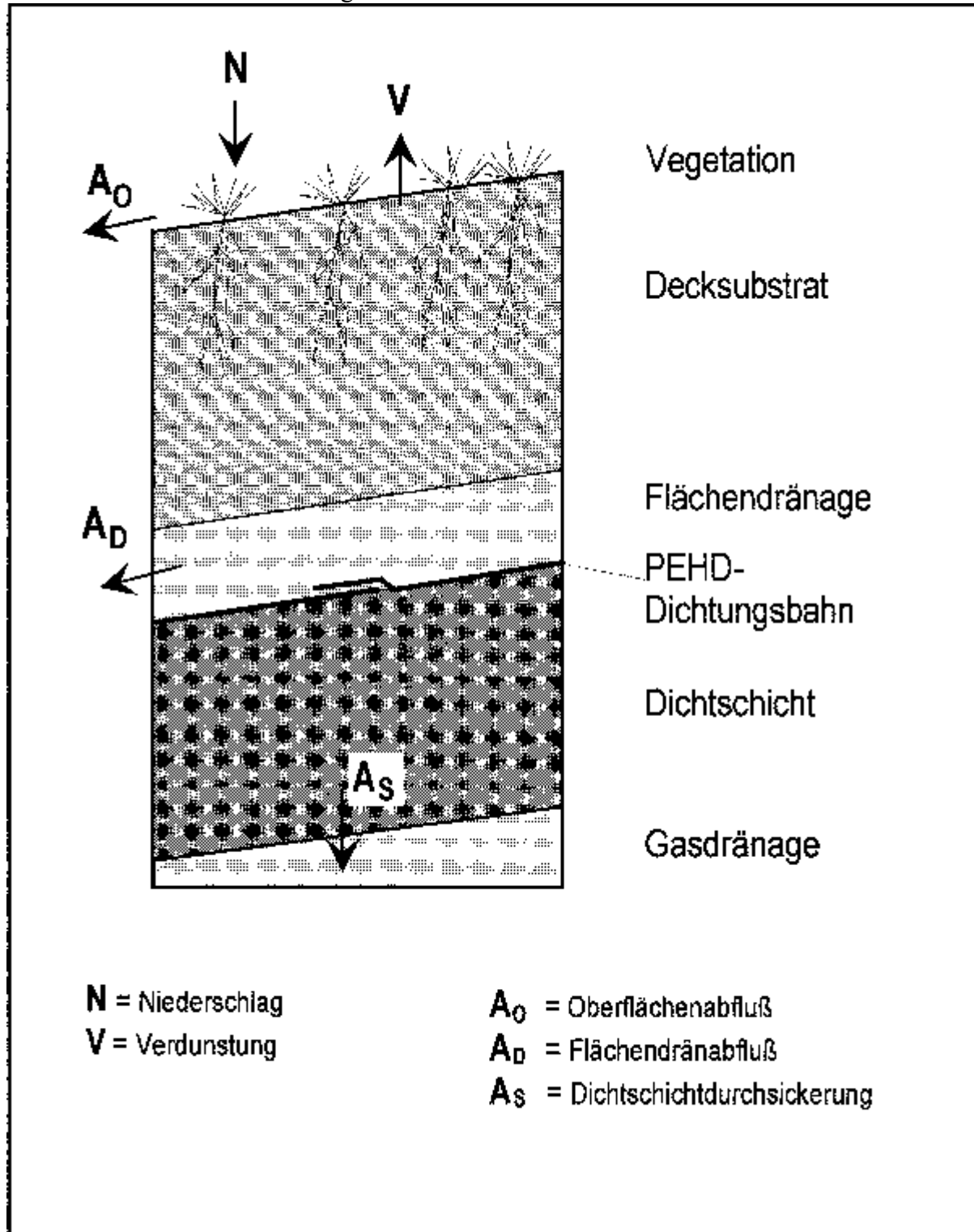
10

Die Obere Abdeckung wird seit 1989 hinsichtlich ihrer Hydrologie überwacht. Die folgenden Ausführungen beziehen sich im wesentlichen auf diesen Teil der Gesamtabdeckung, und zwar auf den Überwachungszeitraum April 1989 bis März 1995. Die Durchführung des **Überwachungsprogrammes** obliegt dem Fachamt Altlastensanierung. Unter Leitung eines Naturwissenschaftlers (Hydrologe) werden die hydrologischen Messungen im wesentlichen

Handbuch der Altlastensanierung

von eigenen technischen und gewerblichen Mitarbeitern durchgeführt, während die Auswertearbeiten großteils von studentischen Hilfskräften und Diplomanden (Fachrichtung **Geographie**) geleistet werden. Die Wasserhaushaltsuntersuchungen in der **Großlysimeteranlage** werden seit 1987 vom Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg im Auftrag der Umweltbehörde durchgeführt.

Abb. 3: Vereinfachtes Schichtenprofil der Oberen Abdeckung der Deponie Georgswerder mit den wichtigsten hydrologischen Fließgrößen.: Schichtmächtigkeiten: Decksstrat 0,75 m; Flächendränage 0,25 m; Dichtschicht 0,60 m.



4 Methoden der Wasserhaushaltsermittlung

4.1 Wasserhaushaltsgleichung

11

Das Schichtenprofil der Oberen Abdeckung mit den wichtigsten hydrologischen Fließgrößen ist in Abb. 3 dargestellt. Jährliche Wasserbilanzen in mm/a werden ausgehend von der **Wasserhaushaltsgleichung** ermittelt:

$$N = (A_O + A_D) + A_S + V + (R - B) \quad (1) \\ \text{bzw.}$$

$$N = A + U \quad (2)$$

mit

N = Niederschlag

A_O = Oberflächenabfluß

A_D = Flächendränabfluß

A = Gesamtabfluß (**A_O** + **A_D**)

A_S = Dichtschichtdurchsickerung

V = Reale (aktuelle) Verdunstung

(R – B) = Speicherinhaltsänderung (Rücklage – Aufbrauch)

U = Unterschiedshöhe (**N – A**)

12

Daraus ergibt sich für die Unterschiedshöhe

$$U = A_S + V + (R - B) \quad (3)$$

Im folgenden wird die Ermittlung der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten näher erläutert.

4.2 Niederschlag

13

Um zuverlässige Input-Größen der hydrologischen Bilanz zu gewinnen, müssen die üblichen systematischen Fehler der **Niederschlagsmessung** (hauptsächlich wind- und benetzungsbedingte Defizite; vgl. 6, 9, 5) weitgehend vermieden bzw. korrigiert werden. Auf dem exponierten Deponiehügel wird zur Vermeidung windbedingter Meßfehler der Niederschlag mit bodenebenen (mit Spritzschutzgitter) eingebauten Hellmann-Niederschlagsmessern erfaßt. Das **Meßnetz** der Oberen Abdeckung einschließlich der Großlysimeteranlage umfaßt acht Boden-Niederschlagsmesser und zwei Meßgeräte in 1 m Höhe, die werktäglich gemessen werden, sowie zwei Niederschlagschreiber. Die (C) 2001 C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg

Handbuch der Altlastensanierung

Niederschlagsmesser sind mit ihrer Öffnung hangparallel aufgestellt und entsprechend den Hauptexpositionen plaziert (Abb. 1).

14

Bei der tageweisen Auswertung erfolgt zunächst eine Korrektur der Benetzungsverluste, d. h. eine Erhöhung der Meßwerte um 0,1 mm pro Regenereignis. Zudem müssen die Meßsummen der geneigt aufgestellten Geräte mit dem Faktor $(\cos \alpha)^{-1}$ korrigiert werden (α = Neigung der Geräte-Auffangöffnung). Für den Wasserhaushalt maßgeblich sind die korrigierten Werte der bodengleichen Hellmann-Geräte. Die Schreiberdaten dienen in diesem Zusammenhang nur der zeitlichen Aufteilung gemessener Mehrtagessummen sowie der Identifikation von Einzelereignissen.

15

Probleme entstehen in Schneedeckenperioden, welche im Zeitraum 1989 bis 1995 allerdings selten auftraten. Zur Niederschlagsermittlung werden dann u. a. die Meßwerte eines 1-m-Sammlers verwendet, nach Korrektur (Erhöhung) aufgrund der Relation Boden-Meßwert/-1-m-Meßwert in anderen Schneeniederschlagsperioden ohne Schneedeckeeinfluß. Bei höherer Schneedecke können Schneeausstechsonden eingesetzt werden.

16

Zur Bestimmung der Gebietsniederschlagshöhe werden den Boden-Niederschlagsmessern Flächenanteile der Oberen Abdeckung mit entsprechender Exposition und Neigung zugeordnet, um schließlich die mittlere Niederschlagshöhe für die gesamte Obere Abdeckung zu erhalten.

4.3 Abfluß

17

Der **Oberflächenabfluß** A_O wird an den Meßstellen V 4 und V 5 (Abb. 1) an zwei 90°-Dreiecksüberfallwehren kontinuierlich ermittelt. Schwimmerschreibpegel zeichnen die Wasserstände in analoger Form auf. Bei der Auswertung erfolgt die Umrechnung in Abflüsse in Stundenintervallen mit Hilfe einer Näherungsformel (vgl. 9).

18

Der **Flächendränabfluß** A_D wird am Auslauf der Dränageringleitung an der Meßstelle V 3 gemessen. Das Meßsystem bestand hier bis Frühjahr 1993 aus einem Venturikanal mit Schwimmer als Meßwertgeber und analoger Abflußdatenregistrierung auf einem Bandschreiber. Zum Abflußmeßprogramm gehörten mindestens wöchentliche Gefäßmessungen (z. B. mit Eimer und Stoppuhr) am Auslauf der Meßanlage. Des öfteren ergaben sich dabei Abweichungen gegenüber der Registrierung der Venturikanalanlage. Die Erfassung der sommerlichen Trockenwetterabflüsse war überhaupt nur per Gefäßmessung möglich. Bei der in der Regel stundenweisen Auswertung der Abflüsse wurde die aufgezeichnete Abflußganglinie durch Anpassung an die vorliegenden punktuellen Gefäßmessungen korrigiert.

19

Im Zeitraum Mai 1993 bis März 1994 fiel die Meßstelle V 3 wegen des Baues der Unteren Abdeckung völlig aus. Die Meßlücke wurde unter Zuhilfenahme der durchgehend gemessenen Flächendränabflüsse eines flachen (F 3) und eines steilen **Großlysimeters** (S 2) überbrückt. Basierend auf je 13 Flächendränabfluß-Monatsmitteln aus einem Zeitraum vor der Meßlücke ergab sich eine lineare Regression zwischen den Großlysimeter- und den Gesamtabflüssen der Oberen Abdeckung mit einem Korrelationskoeffizienten $r = 0,996$, was eine zuverlässige Schätzung der bei V 3 fehlenden monatlichen Abflußwerte ermöglichte.

20

Ab April 1994 war die Meßstelle V 3 in Form eines Zwei-Kammer-Rechteckschachtes wiederhergestellt. In der folgenden Jahresperiode waren hier nur Abfluß-Gefäßmessungen zweimal pro Woche sowie Kammermessungen bei besonders hohen Abflüssen möglich. Seit Sommer 1995 ist V 3 mit induktiven Durchflußmessern mit On-line-Datenerfassung ausgerüstet. Regelmäßige Kontroll-Gefäßmessungen bzw. Kammermessungen erfolgen weiterhin.

21

Soweit Aufzeichnungen vorliegen, wird der Flächendränabfluß stundenweise in l/s ausgewertet. Falls nur Schätzwerte oder regelmäßige Einzel-Gefäßmessungen zur Verfügung stehen, erfolgt eine Bestimmung von Monatsmittelwerten oder -summen.

4.4 Verdunstung

22

Eine direkte Verdunstungsbestimmung für eine größere Fläche wie die Obere Abdeckung ist nicht möglich. **Indirekt** kann die Verdunstung z. B. mit Lysimetern als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung (1) bestimmt werden. Für die sechs Großlysimeter (Testfelder) der Deponie Georgswerder konnten aufgrund sorgfältiger Messung sämtlicher anderer Wasserhaushaltsgrößen N , A_O , A_D , A_S und $(R - B)$ die Verdunstungshöhen für eine Reihe von Jahren zuverlässig ermittelt werden (4). Ergebnisse liegen allerdings nur für einen Teil des hier behandelten Untersuchungszeitraumes vor.

23

Die näherungsweise Verdunstungsermittlung für die bewachsenen Flächen der Oberen Abdeckung (Anteil: 95 %) wird hier mit Hilfe einer empirischen Formel durchgeführt, die meteorologische, bodenphysikalische und pflanzliche Einflußfaktoren beinhaltet. Das von RENGER und WESSOLEK (nach 3) entwickelte Näherungsverfahren berechnet die **reale Verdunstung** (Evapotranspiration) bewachsener Lockergesteinsstandorte für Einzeljahre, und zwar für den Zeitraum 1. April bis 31. März des Folgejahres. Das Verfahren wurde im Raum Hannover auf ebenen Standorten geeicht. Die Methode ist u. E. dennoch auch für die hügelartige Abdeckung der Deponie Georgswerder anwendbar, da einerseits der Oberflächenabfluß in der Jahresbilanz minimal ist (siehe Abschnitt 5.3) und andererseits alle Expositionsrichtungen sowie plateauähnliche Lagen vorkommen, so daß sich unterschiedliche Strahlungseinflüsse insgesamt annähernd ausgleichen.

24

Die Formel lautet:

$$ETA = a N_{So} + b N_{Wi} + c \log W_{Pfl} + d ETP + e \quad (4)$$

mit

ETA = reale (aktuelle) Verdunstung in mm, Summe 01. 04. bis 31. 03. des Folgejahres

N_{So} = Sommerniederschlag in mm, Summe 01. 04. bis 30. 09.

N_{Wi} = Winterniederschlag in mm, Summe 01. 10. bis 31. 03.

W_{Pfl} = maximale pflanzenverfügbare Wassermenge im effektiven Wurzelraum in mm

ETP = potentielle Verdunstung (Evapotranspiration) nach *Haude* (Gras) in mm, Summe 01. 04. bis 31. 03. des Folgejahres

Die Faktoren a, b, c, d, e sind bodennutzungsabhängige Konstanten. Für Grünland gelten nach (3) die Werte: a = 0,48 b = 0,10 c = 286 d = 0,10 e = -330

25

Für die Obere Abdeckung wird die maximale **pflanzenverfügbare Wassermenge** im Decksubstrat (nutzbare Feldkapazität, d. h. Wasserspannungsbereich 60 bis 15.000 hPa bzw. pF 1,8 bis 4,2) mit 90 mm für die Jahre bis 1992 und 100 mm für die Folgejahre abgeschätzt, ausgehend von den pF-Kurven, die für die Decksubstrate der Testfelder ermittelt wurden (4). Der höhere Wert ab 1993 berücksichtigt die vergrößerte Bodenmächtigkeit der neu geschaffenen Aufhöhungsflächen auf ca. 20 % der Oberen Abdeckung.

26

Als **potentielle Verdunstungshöhen** nach *Haude* werden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für die Station Hamburg-Kirchwerder berechneten Werte verwendet, da die benötigten Eingangsdaten (Temperatur und Relative Luftfeuchte, unter Standardbedingungen gemessen) auf Georgswerder nicht vorlagen. Kirchwerder liegt 12 km südöstlich von Georgswerder, ebenfalls in der Elbmarsch außerhalb der städtischen Bebauung.

27

Für die versiegelten Teilflächen (5 %) wird die **reale Verdunstung** ausgehend von der Häufigkeit der Niederschlagsereignisse, nach einem Interzeptionsansatz grob abgeschätzt, wobei pro Niederschlagsereignis eine Evaporation von 0,5 mm angenommen wird (vgl. 3).

4.5 Dichtschichtdurchsickerung

28

Handbuch der Altlastensanierung

Die im Hinblick auf die Wirksamkeit des Abdecksystems besonders interessierende **Durchsickerung** der Kombidichtung wird im Großlysimeter F 3, das das gleiche Dichtsystem enthält wie die Obere Abdeckung, seit 1988 kontinuierlich direkt gemessen. Allerdings entspricht die Lysimeterfläche (500 m²) nur 0,3 % der Gesamtfläche der Oberen Abdeckung. Eine Ermittlung der großflächigen Dichtschichtdurchsickerung A_S als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung (1) ist offensichtlich nur möglich, falls A_S wider Erwarten relativ groß sein sollte, zumindest größer als die Bilanzungenauigkeit.

4.6 Speicherinhaltsänderung

29

Durch die Wahl des Bilanzierungszeitraumes jeweils vom 01. April bis zum 31. März des Folgejahres, auch "Vegetationswasserhaushaltsjahr" oder kurz "Bilanzjahr" genannt, wird die Speicherinhaltsänderung im Wurzelraum ($R - B$) klein, d. h., das Speicherglied der Bilanzgleichung (1) wird vernachlässigbar. Man geht hierbei von der Überlegung aus, daß im Frühjahr als Folge der winterlichen Durchfeuchtung vor Einsetzen eines stärkeren Vegetationswasserverbrauches alljährlich der Zustand der Feldkapazität im Wurzelboden (hier: Decksustrat), d. h. Aufsättigung der Fein- und Mittelporen, erreicht wird. Dies gilt jedenfalls für humide Klimabereiche und niedrigwüchsige Vegetation wie z. B. Grünland.

4.7 Ermittlungsgenauigkeit

30

Trotz sorgfältiger Messung und Auswertung muß bei allen Wasserhaushaltsgrößen eine Ungenauigkeit der Ermittlung berücksichtigt werden [vgl. z. B. (2)].

31

Hinsichtlich der Bilanzgrößen der Oberen Abdeckung wird hier – auf Jahreswerte bezogen – größenordnungsmäßig mit folgenden Fehlern gerechnet:

- Gebietsnieders N $\pm 5\%$ bzw. ± 40 mm/a (oder besser)

- Gesamtabfluß A $\pm 5\%$ bzw. ± 20 mm/a

- Reale V $\pm 8\%$ bzw. ± 40 mm/a (oder schlechter)
Gebietsverduns

32

Die Unsicherheit der Jahresbilanzen beträgt erfahrungsgemäß etwa ± 50 mm, da sich in der Regel die Fehler der einzelnen Bilanzgrößen teilweise wieder aufheben. D. h., ein sich bei Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung rechnerisch ergebender Bilanzrest von 50 mm/Jahr ist nicht signifikant verschieden von 0. Bei der Mittelung über längere Jahresreihen

Handbuch der Altlastensanierung
ist mit einer Reduzierung der Fehlerquoten zu rechnen.

5 Ergebnisse der Wasserhaushaltsermittlung

5.1 Allgemeines, Temperaturen

33

Die bisherigen Wasserhaushaltsermittlungen für die Obere Abdeckung der Deponie Georgswerder beziehen sich auf den sechsjährigen Zeitraum April 1989 bis März 1995. Die Periode war im ganzen wärmer als der langjährige Durchschnitt, besonders ausgeprägt in den Wintermonaten. Als relativ kalt sind nur Februar 1991, November 1993 und Februar 1994 zu bezeichnen.

34

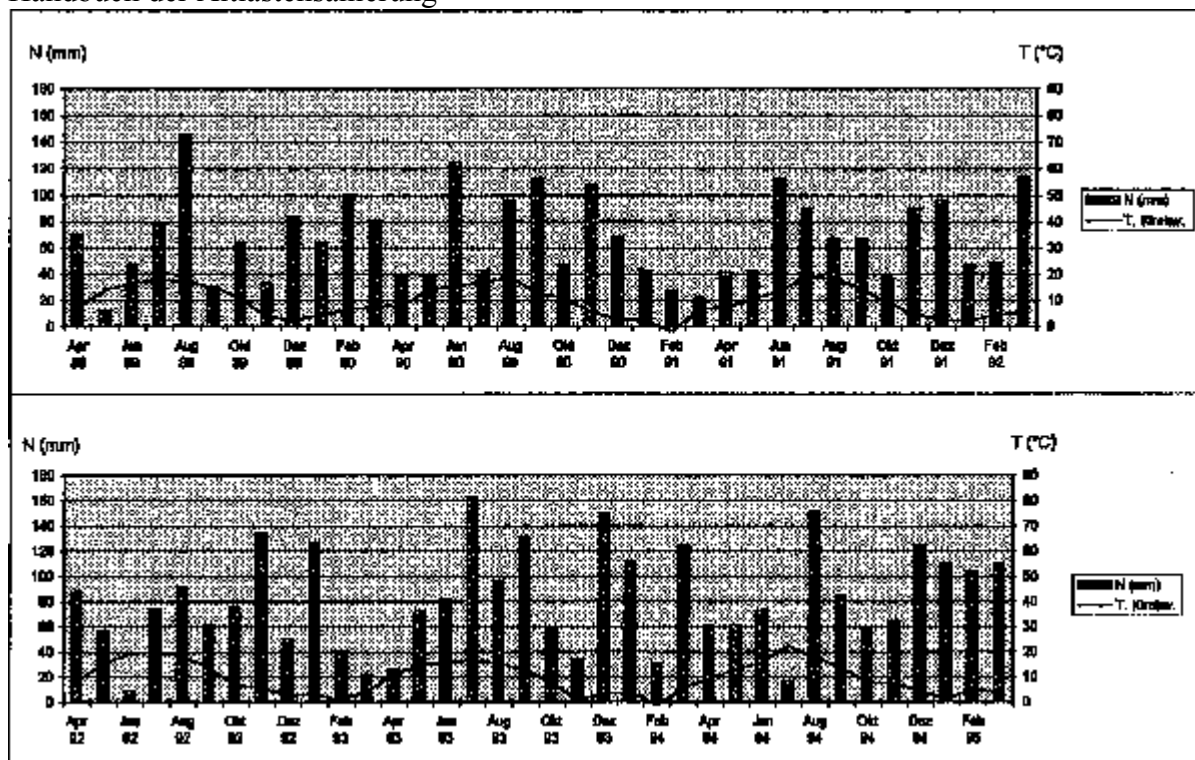
Von den Sommerhalbjahren waren 1989 bis 1991 annähernd "normal", 1992 und 1994 dagegen ausgesprochen warm (mit "Jahrhunderttemperaturen" im Juli 1994). Im Sommer 1993 dagegen herrschten kühle Temperaturen, siehe Abb. 4.

5.2 Niederschlag

35

Die Bilanzjahre (jeweils April bis März des Folgejahres) 1989 bis 1992 brachten mit 768 bis 855 mm insgesamt durchschnittliche Niederschlagshöhen. Die Bilanzjahre 1993 und 1994 hingegen waren ausgesprochen

Abb. 4: Monatsmitteltemperaturen der DWD-Station Hamburg-Kirchwerder in °C und monatliche Gebietsniederschlagshöhen auf der Oberen Abdeckung der Deponie Georgswerder in mm im Zeitraum April 1989 bis März 1995



niederschlagsreich mit Jahressummen über 1000 mm, siehe Tab. 1/2 und Abb. 8.

36

Vergleicht man die auf der Deponie Georgswerder über sechs Jahre bodengleich gemessenen und benetzungskorrigierten Niederschlagshöhen mit den Werten benachbarter DWD-Stationen (Messung in 1 m Höhe, keine Benetzungskorrektur), so liegen die Georgswerder-Daten generell höher; z. B. wird gegenüber der Station St. Pauli (6 km nordwestlich von Georgswerder) ein Plus von 7,5 % erreicht, gegenüber Kirchwerder (12 km südöstlich) sogar ein Plus von 20 %.

37

Bei jahreszeitlicher Betrachtung waren besonders regenreich der Sommer 1993 und der Winter 1994/95. Monatsniederschläge von ca. 150 mm wurden im August 1989, Juli und Dezember 1993 sowie August 1994 beobachtet. Ungewöhnliche Trockenheit herrschte hingegen im Winter 1990/91. Als besonders regenarme Einzelmonate sind zudem der Mai 1989, Juni 1992 und der heiße Juli 1994 hervorzuheben; siehe Abb. 4..

38

Erwähnenswerte kurzzeitige Starkniederschläge geringer Eintrittswahrscheinlichkeit kamen kaum vor. Als "Jahrhundertregen" ist allerdings ein Niederschlagsereignis von 102 mm in 40 Stunden im August 1989 einzustufen.

39

Die Winter waren insgesamt schneearm, abgesehen von einer 14 tägigen Schneedeckenperiode im Februar 1991.

5.3 Abfluß

40

Der **Gesamtabfluß** der einzelnen Bilanzjahre beträgt zwischen 32 % und 46 % der Niederschlagssumme, im sechsjährigen Mittel 39 %. Im ganzen nimmt der Abflußanteil in den Bilanzjahren absolut und relativ gesehen mit steigendem Niederschlag zu, siehe Tab. 2 und Abb. 8..

41

Der jährliche **Oberflächenabfluß** (A_O) erreicht nur 1,1 % bis 2,5 % des Niederschlages, im Mittel 1,7 %. Somit bestehen nur 3 % bis 7 % des gesamten Jahresabflusses aus Oberflächenabfluß. Der relativ höchste A_O -Anteil wird im Bilanzjahr 1989 erreicht, offenbar infolge noch unvollständiger Bodenbedeckung durch die Vegetation auf der "jungen" Abdeckung (7). Nachdem sich in den darauffolgenden Jahren hochdeckende Grünlandbestände entwickelt haben, spielt der Oberflächenabfluß heute trotz der teilweise steilen Hänge kaum noch eine Rolle. Der gemessene A_O entstammt zudem zum erheblichen Teil den versiegelten Flächen.

Abb. 5: Monatliche Flächendränabflußhöhen (A_D) der Oberen Abdeckung (14,3 ha) in mm und A_D in % des Monatsniederschlages im Zeitraum April 1989 bis März 1995

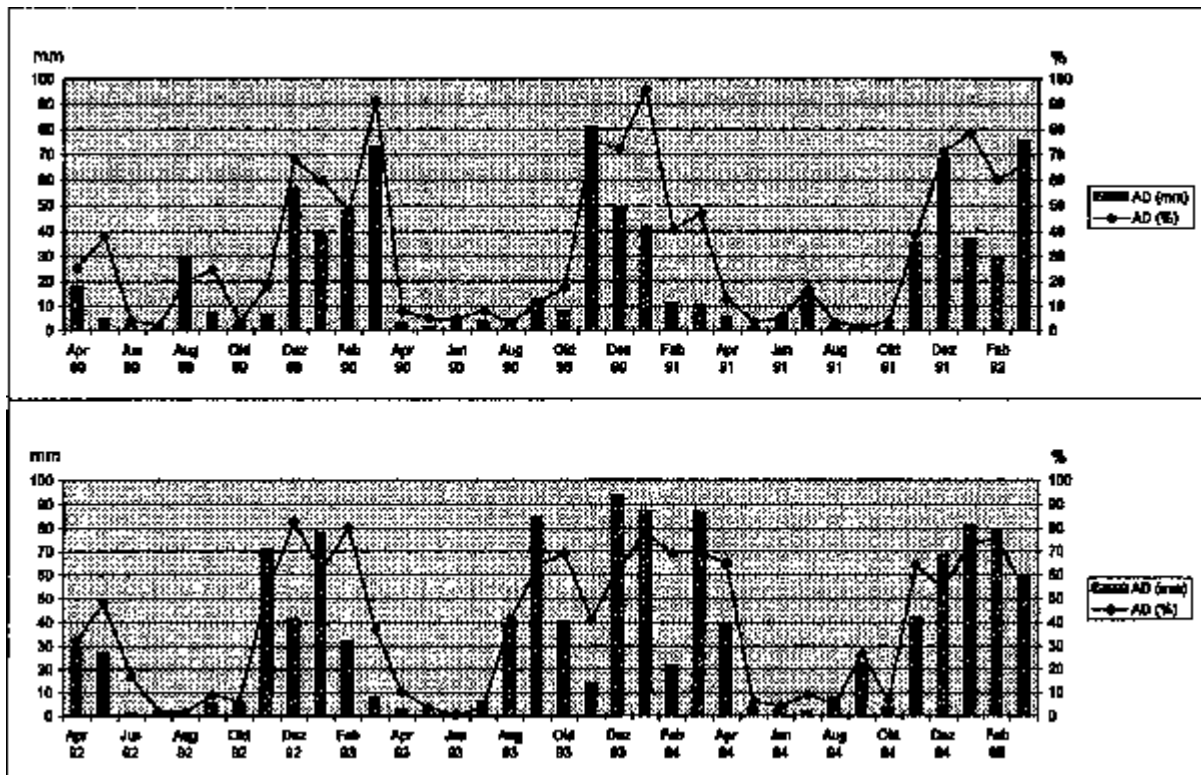
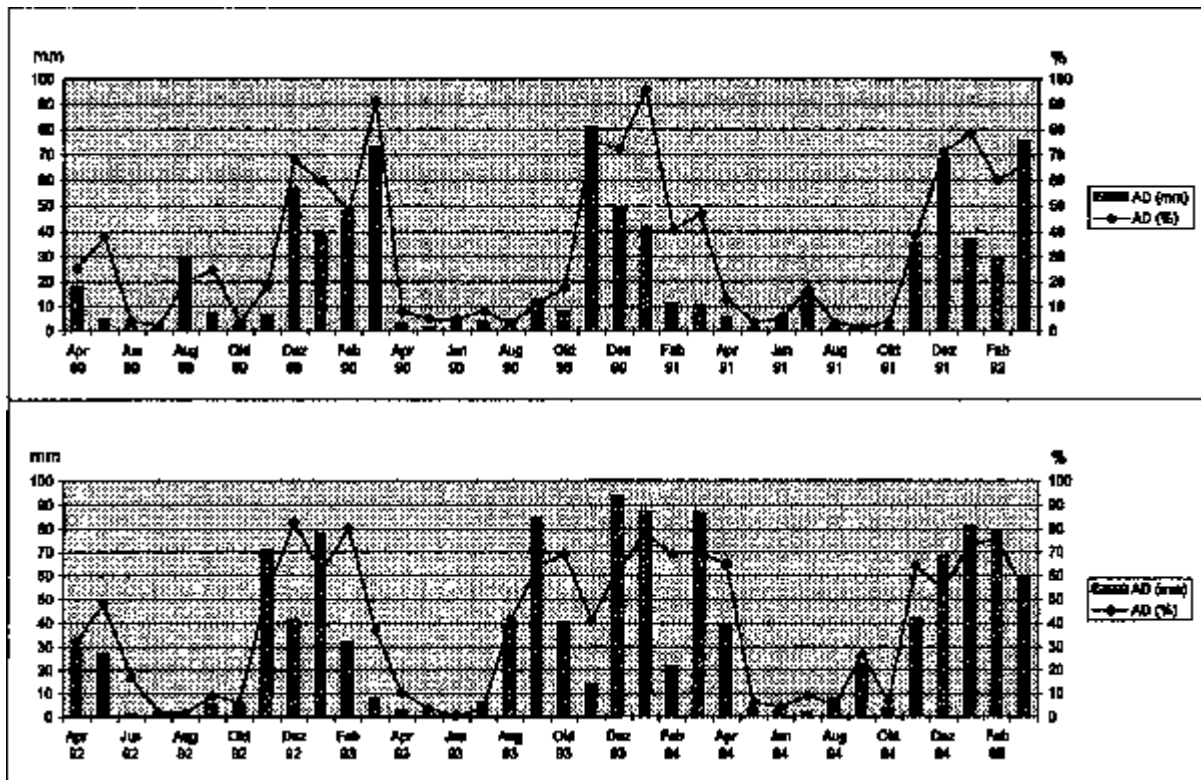


Abb. 6: Abflußgang bei einem extremen Sommerhochwasser im August 1989 auf der Oberen Abdeckung (14,3 ha), ausgelöst durch 102 mm Niederschlag in 40 Stunden



42

Der **Flächendränabfluß** A_D ist demnach die dominierende Abflußkomponente. Er macht durchschnittlich 96 % des Gesamtabflusses aus. Der jahreszeitliche Verlauf des Flächendränabflusses wird aus Abb. 5 deutlich. Maximale A_D -Monatssummen, sowohl in mm als auch in % vom Niederschlag, erscheinen im Winterhalbjahr meist im Zeitraum November bis März/April – aufgrund minimaler Verdunstung bei bis zur Feldkapazität aufgefüllten Böden. Im Sommerhalbjahr bis einschließlich Oktober hingegen sind die monatlichen Abflüsse niedrig, bedingt durch hohen Vegetationswasserverbrauch bzw. Rücklagenbildung (Wiederauffüllung des Wurzelraumes) im Herbst. Einen untypischen Verlauf zeigt allein das Naßjahr 1993, in welchem bereits im Juli durch sehr hohe Niederschläge (162 mm/Monat) eine Wiederauffüllung erfolgte und somit ab August bei weiterhin überdurchschnittlichen Regenmengen die Flächendränabflüsse "winterliche" Werte erreichten.

43

Einzelne **Hochwasserabflußereignisse** nach ergiebigen Niederschlägen laufen im Prinzip immer wieder ähnlich wie in Abb. 6 dargestellt ab:

44

Der Oberflächenabfluß reagiert unmittelbar auf den auslösenden Niederschlag, erreicht

Handbuch der Altlastensanierung

kurzfristig sein Maximum und geht rasch auf Null zurück. Der Flächendränabfluß hingegen steigt mit deutlicher Verzögerung an und erreicht erst ca. 24 Stunden nach dem Schwerpunkt des Regenereignisses sein abgeflachtes Maximum, welches durchaus höher liegen kann als das A_O -Maximum. Hinsichtlich des Abflußvolumens überwiegt der A_D -Anteil auch beim Einzelereignis in der Regel deutlich. D. h., das System Vegetationsdecke-Decks substrat-Flächendränage führt zu einer guten **Hochwasserdämpfung**.

45

Die höchste Gesamtabfluß-Spitze der sechsjährigen Periode wurde mit 45 l/s (315 l/s.km²) im Dezember 1989 gemessen. Die höchste A_O -Spitze erreichte zugleich 42 l/s (295 l/s.km²). Bei den Flächendränabflüssen wurde das maximale Niveau von 20 – 25 l/s (ca. 150 l/s.km²) mehrfach erreicht, und zwar zum einen im August 1989 (Abb. 6) sowie verschiedentlich während der Monate November bis Januar.

46

Ein überragendes Oberflächenabflußmaximum wurde im übrigen vor Beginn der Bilanzierungsperiode im Dezember 1988, d. h. kurz nach Fertigstellung des Abdeckbauwerkes, beobachtet. Die Abflußspitze wurde mit 130 l/s (900 l/s.km²) abgeschätzt.

47

Die niedrigsten Abflüsse der einzelnen Jahre treten gewöhnlich in den Monaten Juli bis September auf. Die sommerlichen Trockenwetterabflüsse liegen dann meist bei 0,03 l/s (0,2 l/s.km²) und können sogar auf 0,015 l/s (September 1991) sinken. Ein vollständiges Versiegen der Flächendränabflüsse der Oberen Abdeckung wurde jedoch, anders als bei den 500 m²-Großlysimetern (4), noch nie beobachtet.

5.4 Verdunstung

48

Die berechnete jährliche **reale Verdunstung** ETA der begrüneten Flächen liegt zwischen 517 und 617 mm (Tab. 1). Sie ist in den meisten Jahren kleiner oder ebensogroß wie die **potentielle Verdunstung** ETP nach *Haude*, welche ungefähr der realen Verdunstung einer ständig gut wasserversorgten Rasenfläche entspricht. Die besonders große Verdunstungsreduktion im Jahr 1992 wurde durch Niederschlagsmangel in Verbindung mit hohem Verdunstungsanspruch der Luft vor allem im Frühsommer (normalerweise die Hauptwachstumsperiode) verursacht, wodurch die Grasdecke vorübergehend verdorrte, d. h. nicht mehr transpirierte. Im Naßjahr 1993 ist überraschenderweise die berechnete reale ETA deutlich höher als die potentielle Verdunstung ETP. Dies hängt vor allem damit zusammen, daß in der Berechnungsformel (4) der Sommerniederschlag ein größeres Gewicht besitzt als die potentielle Verdunstung.

49

Im ganzen passen die hier ermittelten realen Jahresverdunstungshöhen größenordnungsmäßig gut zu den für 1988 – 90 vorliegenden Bilanzierungsergebnissen der **Großlysimeter** (C) 2001 C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg

Handbuch der Altlastensanierung

(Testfelder) auf Georgswerder sowie zur andernorts in Deutschland ermittelten Verdunstung grasbewachsener Flächen. Nach (4) beträgt über alle sechs Testfelder gemittelt während der Kalenderjahre 1989 – 1990 die reale Verdunstung 557 mm gegenüber den von uns berechneten 525 mm für die gesamte Obere Abdeckung (Vegetationsflächen) im Zeitraum April 1989 bis März 1991. Im Bereich der Bornhöveder Seenkette (Schleswig-Holstein) werden 1989 und 1990 für Weidenstandorte Jahresverdunstungen von 495 bis 596 mm ermittelt (1). Nach (9) beträgt die reale Verdunstung von Grünland in unteren Mittelgebirgslagen bei 700 – 800 mm Jahresniederschlag im Durchschnitt etwa 500 mm/Jahr. Einzig der für das Naßjahr 1993 berechnete ETA-Wert ist mit 617 mm unverhältnismäßig hoch. Vermutlich liegt hier eine leichte Überschätzung vor, da die verwendete Regressionsbeziehung im Bereich derartig hoher Jahresniederschläge offenbar ihren linearen Bereich verläßt.

50

Die Verdunstungshöhen der versiegelten Flächen erreichen nur etwa 1 mm/Jahr. Ähnliche Größenordnungen werden bei (3) für entsprechende Oberflächen angegeben. Die errechnete Gebietsverdunstung der Oberen Abdeckung schließlich erreicht mit Werten von gut 500 mm/Jahr zwischen 54 % und 67 % des Jahresniederschlages (Tab. 1).

Tab. 1: *Ergebnisse der Verdunstungsermittlung für die Obere Abdeckung (14,3 ha) der Deponie Georgswerder; alle Angaben in mm/Jahr. Bilanzierungszeitraum jeweils 01. April bis 31. März des Folgejahres. ETP nach Haude: DWD-Station Hamburg-Kirchwerder.*

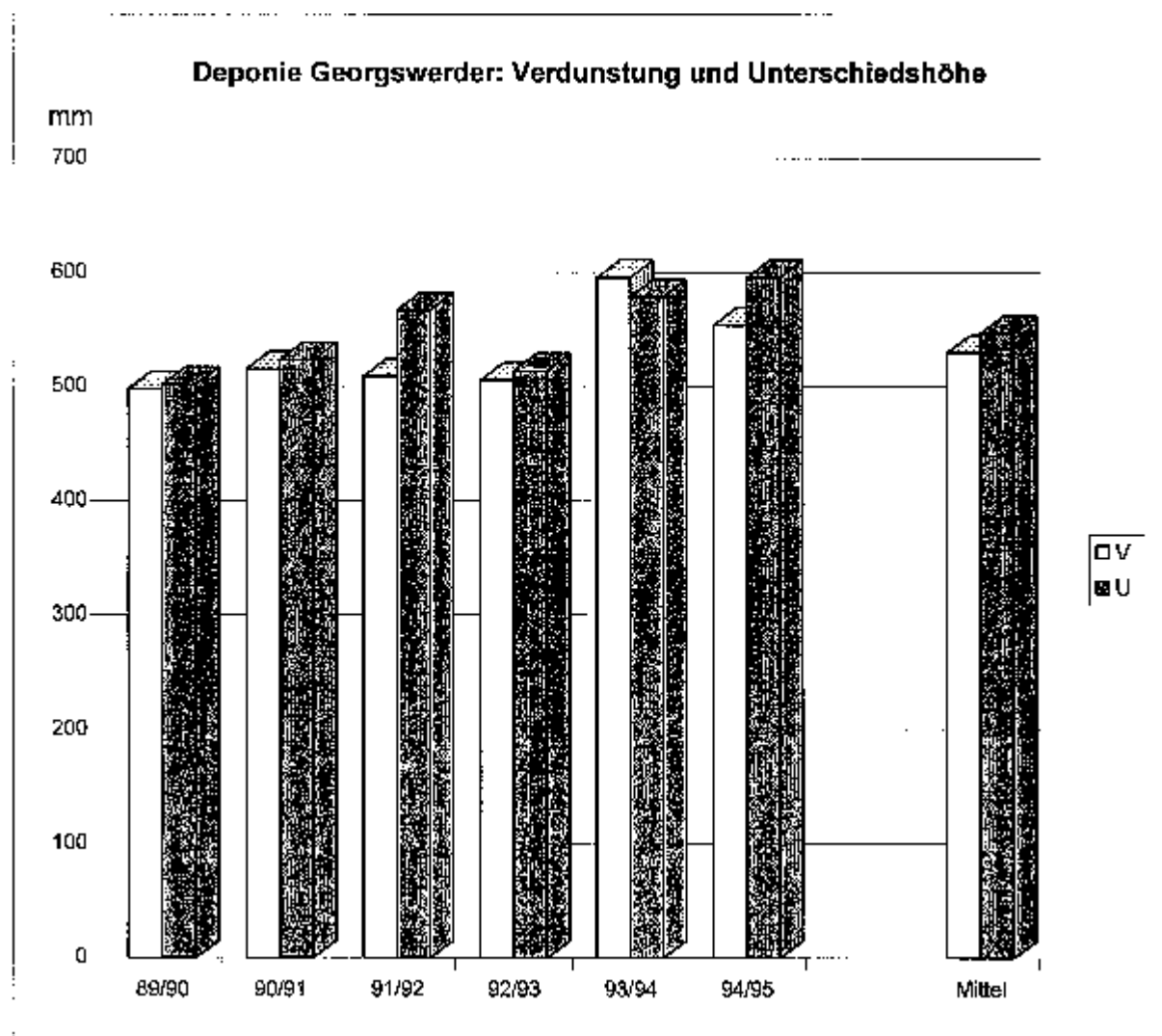
Jahr		1989	1990	1991	1992	1993	1994	Mittel 1989 – 94
Gebietsniederschlag	N	810	768	855	827	1079	1021	893
Potentielle Verdunstung nach <i>Haude</i>	ETP	612	551	522	679	508	601	579
Reale Verdunstung der Vegetationsflächen	ETA	517	533	526	524	617	575	549
Reale Verdunstung der versiegelten Flächen	EA	97	101	111	101	108	108	104
Gebietsverdunstung	V	495	511	505	502	592	551	526
Gebiets-V in % von N		61	67	59	61	55	54	59

5.5 Dichtschichtdurchsickerung und Bilanz

Die direkt gemessene **Dichtschichtdurchsickerung** A_S im **Großlysimeter 3**, dessen Schichtaufbau der Oberen Abdeckung entspricht, beträgt im Zeitraum 1989 bis 1992 pro Jahr 1 bis 4 mm (4). Wenn diese Größenordnung für die gesamte Obere Abdeckung zuträfe, wäre A_S als Bilanzrest nicht zu erkennen. Zugleich müßten jährliche Verdunstungs- und Unterschiedshöhen annähernd übereinstimmen; vgl. Abschnitt 4.1, Gl. (3). Daher sind nun die ermittelten **Gesamtbilanzen** näher zu betrachten.

Abb. 7: Vergleich der Gebietsverdunstungshöhe V mit der Unterschiedshöhe $U = N - A$ für die Obere Abdeckung (14,3 ha) in den Bilanzjahren 1989 bis 1994. Bilanzierungszeitraum jeweils 01. April bis 31. März.

V = helle Säulen, U = dunkle Säulen



Wie Abb. 7 und Tab. 2 zeigen, stimmen die jährlichen U - und V -Werte recht gut überein. Für die Differenz gilt:

53

Bezogen auf die einzelnen Bilanzjahre erreicht der Differenzbetrag im Durchschnitt 25 mm. Tendenziell ist die Unterschiedshöhe etwas größer als die Verdunstung, wofür z. Z. keine Erklärung geliefert werden kann. Da die Differenzen in der Regel aber deutlich kleiner als die Bilanzungenauigkeit von ca. 50 mm/a sind, ist auf jeden Fall eine erhebliche Dichtschichtdurchsickerung A_S auszuschließen. Der relativ große Differenzbetrag im Jahr 1991 ist zumindest teilweise auf eine ausnahmsweise etwas größere positive Speicherinhaltsänderung $(R - B)$ im Bilanzzeitraum zurückzuführen. Ein deutlicher Anstieg des Flächendränabflusniveaus vom Beginn zum Ende des Bilanzjahres läßt auf Rücklagenbildung in Rekultivierungsschicht und Flächendränage schließen.

54

Generell bewegen sich die jährlichen Gebietsverdunstungs- und Unterschiedshöhen in einem relativ engen Rahmen von 500 bis 600 mm (Tab. 2 und Abb. 8). Als wesentlich biologisch gesteuerte und durch das Energieangebot begrenzte Größe schwankt die Verdunstungshöhe deutlich weniger als die Jahresabflußhöhe, welche – stärker niederschlagsabhängig – im untersuchten Sechsjahreszeitraum zwischen etwa 250 und 500 mm liegt.

55

Die ermittelten Jahresbilanzen erscheinen durchweg plausibel. Genauere Angaben zur Höhe der auf jeden Fall geringen jährlichen Dichtschichtdurchsickerung auf der Gesamtfläche der Oberen Abdeckung sind aus den vorliegenden Bilanzen allerdings nicht abzuleiten. Die hier vorgestellten Bilanzergebnisse stehen aber auf jeden Fall nicht im Widerspruch zu den zuverlässig ermittelten Ergebnissen der Großlysimeteranlage.

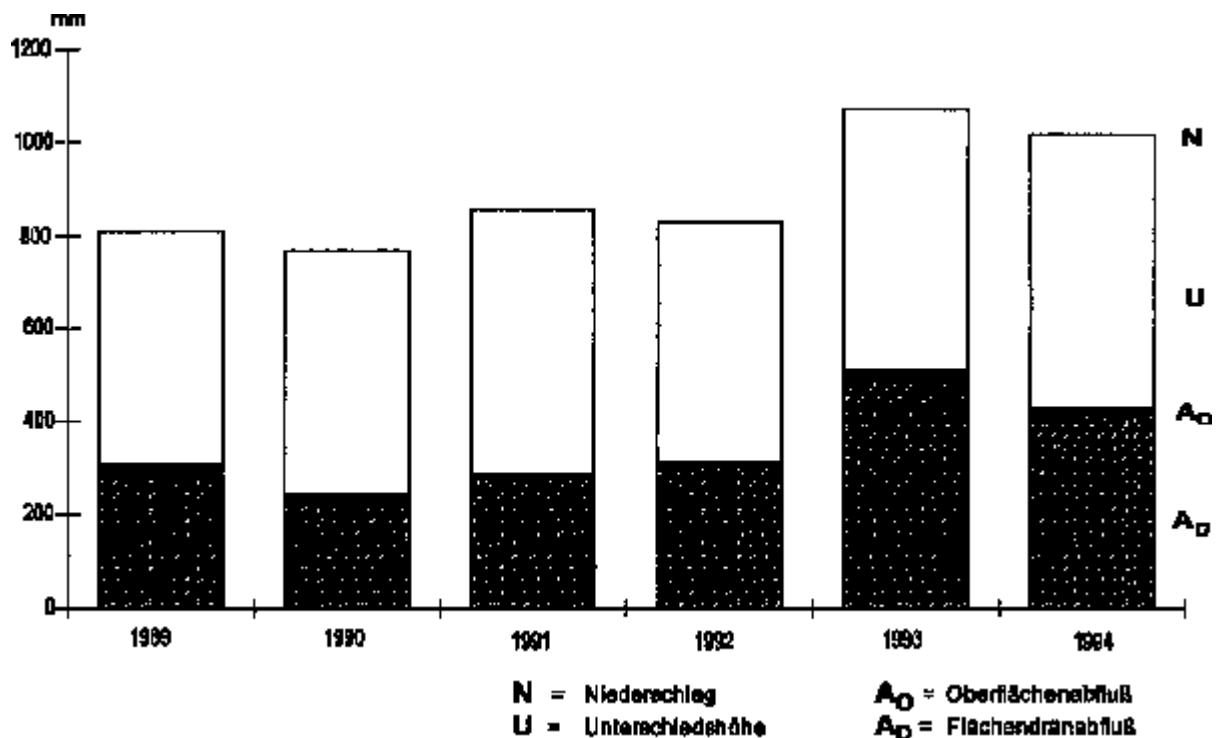
56

Daß das Dichtsystem annähernd "dicht" ist, ergibt sich zudem aus den Veränderungen des Staufflüssigkeitsspiegels im Deponieinnern. Dieser ist unter der Oberen Abdeckung von 1987 bis 1996 bereits um mehr als 3 m abgesunken.

Tab. 2: *Wasserbilanzen der Oberen Abdeckung (14,3 ha) der Deponie Georgswerder während der Bilanzjahre 1989 bis 1994 in mm/Jahr*

Jahr		1989	1990	1991	1992	1993	1994	Mittel 1989 – 94
Gesamtniederschlag	N	10	768	855	827	1079	1021	893
Gesamt-Abfluß	A	308	245	287	314	500	425	347
Unterschiedshöhe	U = N – A	502	523	567	513	579	596	547
Gebietsverdunstung	V	495	511	505	502	592	551	526
Differenz	U – V	+7	+12	+62	+11	-13	+45	+21

Abb. 8: Niederschlag, Abfluß und Unterschiedshöhe der Oberen Abdeckung in den Bilanzjahren 1989 bis 1994 in mm



6 Ausblick

57

Die Aufstellung plausibler Wasserbilanzen für ein Oberflächenabdecksystem ist offenbar mit vertretbarem Meß- und Auswerteaufwand durchführbar. Im Fall Georgswerder werden die Bilanzermittlungen fortgesetzt, um insbesondere auch langfristige Trends erkennen zu können.

58

In Zukunft wird das Meßprogramm weiter optimiert. Das Niederschlagsmeßstellennetz kann voraussichtlich verkleinert werden. Die Datenerfassung insbesondere im Abflußbereich erfolgt in immer stärkerem Maße automatisiert, wobei aber regelmäßige begleitende Handmessungen zu Kontrollzwecken weiterhin unumgänglich sind. Zur Verbesserung der Meßresultate erfolgt inzwischen die Ermittlung der verdunstungsbestimmenden Parameter Lufttemperatur und Relative Luftfeuchte unter DWD-Standardbedingungen vor Ort. Die sensible Größe Verdunstung soll zudem durch Anwendung alternativer Näherungsverfahren (vgl. 3) einschließlich stärkerer Einbeziehung der Großlysimeterergebnisse genauer eingegrenzt werden. Hinsichtlich der Abflüsse steht noch eine ereignisorientierte Datenanalyse aus, d. h. eine Auswertung der Höchstabflüsse (maximale Systembelastung)

59

Die bisherigen Bilanzierungen haben deutlich gemacht, daß die Dichtsystemdurchsickerung nur durch direkte Messungen in geeigneten Lysimetern mit dem erforderlichen hohen Genauigkeitsgrad ermittelt werden kann. Daher wird die auf Georgswerder vorhandene Großlysimeteranlage, bei stärker automatisiertem Betrieb, auch zukünftig als Bestandteil der hydrologischen Überwachung des Abdecksystems unverzichtbar sein.

7 Zusammenfassung

60

Im Rahmen der unumgänglichen Langzeitüberwachung einer gesicherten Altlast wird das mehrschichtige Abdecksystem der sog. "Oberen Abdeckung" (14,3 ha) der Deponie Georgswerder seit 1989 hinsichtlich seines Wasserhaushalts überwacht. Das Dichtsystem besteht aus überlappend verlegten PEHD-Bahnen über 0,60 m Geschiebemergel (Kombidichtung). Darüber sind 0,25 m Flächendränage und mindestens 0,75 m Rekultivierungsschicht aufgebracht. Niederschläge und Abflüsse werden kontinuierlich gemessen, die reale Verdunstung der Grünlandvegetation wird aufgrund einer Regressionsbeziehung berechnet. Eine Großlysimeteranlage ermöglicht die direkte Ermittlung der Dichtschichtdurchsickerung.

61

Im sechsjährigen Zeitraum April 1989 bis März 1995 erhält man folgende Bilanzmittelwerte:

- Gebietsniederschlag N (korrigiert): 893 mm/a,
- Gesamtabfluß A: 347 mm/a (davon 332 mm Flächendränabfluß),
- Gebietsverdunstung V: 526 mm/a.

62

Es bleibt ein Bilanzrest ($N - A - V$) von 21 mm/a. Der Wert liegt deutlich unter der meß- und auswertetechnisch bedingten Bilanzungenauigkeit.

63

Folgende **Schlüsse** können gezogen werden:

- Die Ermittlung plausibler Jahreswasserbilanzen für mehrschichtige Oberflächenabdecksysteme ist mit vertretbarem Aufwand durchführbar.
- Flächendränagen und Wasserfassungssysteme der untersuchten Abdeckung der Deponie Georgswerder erfüllen offenbar ihre Funktion.
- Die ermittelte reale Verdunstung der Grünlandvegetation des Abdecksystems entspricht in ihrer Größenordnung andernorts in Deutschland bestimmten Verdunstungswerten für "gewachsene" Böden mit ähnlicher Pflanzendecke. Die für Georgswerder berechnete Gebietsverdunstung erreicht 55 – 67 % des Jahresniederschlages.
- Das System Vegetationsdecke-Rekultivierungsschicht-Flächendränage funktioniert

Handbuch der Altlastensanierung

hinsichtlich Verdunstungsleistung und Abflußdämpfung voll zufriedenstellend.

- Die Dichtschichtdurchsickerung A_S der Oberen Abdeckung läßt sich aufgrund der erstellten Gebietsbilanzen aus Niederschlag, Abfluß und Verdunstung nur ungefähr eingrenzen; auf jeden Fall ist A_S geringer als ca. 50 mm/a, die Größenordnung der Bilanzunsicherheit.
- Direkt ist die Dichtschichtdurchsickerung nur in geeigneten Lysimetern meßbar. Das in seinem Schichtaufbau der Oberen Abdeckung entsprechende Großlysimeter F 3 auf Georgswerder liefert bisher Durchsickerungswerte von wenigen mm pro Jahr.
- Zur Ermittlung alterungsbedingter längerfristiger Trends oder sprunghafter Veränderungen im hydrologischen Verhalten des Georgswerder-Abdecksystems sollen sowohl die Gebietswasserhaushaltsermittlungen als auch die Großlysimetermessungen fortgesetzt werden.

8 Literatur

(1) *Bornhöft, D.*: Untersuchungen zur Beschreibung und Modellierung des Bodenwasserhaushalts entlang einer Agrar- und einer Wald-Catena im Bereich der Bornhöveder Seenkette (Schleswig-Holstein). EcoSys Beiträge zur Ökosystemforschung, Suppl. Bd. 6, Kiel 1993

(2) *Bortz, S. und V. Sokollek*: Wasserhaushaltsuntersuchungen an Altlasten – dargestellt am Beispiel der Deponie Georgswerder/Hamburg. Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Mitteilungen, Bd. 38 b, S. 413 – 425, München 1990

(3) *DVWK*: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996. Hrsg.: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Bonn 1996

(4) *Melchior, S.*: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 22, Hamburg 1993

(5) *Richter, D.*: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Offenbach 1995

(6) *Sevruk, B.* : Methodische Untersuchungen des systematischen Meßfehlers der Hellmann-Regenmesser im Sommerhalbjahr in der Schweiz. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 52, Zürich 1981

(C) 2001 C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg

Handbuch der Altlastensanierung

(7) *Sokollek, V.;* *Weigelt-McGlone, M.:* Langfristige Überwachung des Wasserhaushalts einer großflächigen Deponieabdeckung. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 79, S. 123 – 126, 1996

(8) *Umweltbehörde Hamburg:* Deponie Georgswerder Sanierung 1984 – 95. Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde, Amt für Umweltschutz – Altlastensanierung, Hamburg 1995

(9) *Wohlrab, B.;* *Ernstberger, H.;* *Meuser, A. und Sokollek, V.:* Landschaftswasserhaushalt. Hamburg/Berlin 1992

Danksagung

Dem Deutschen Wetterdienst, Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung (Hamburg), wird für die freundliche Überlassung von Niederschlags-, Verdunstungs- und Temperaturdaten der Stationen Hamburg-St. Pauli und Hamburg-Kirchwerder gedankt. Vom Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg wurden Niederschlags- und Abflußdaten der Großlysimeteranlage (Testfelderanlage) auf der Deponie Georgswerder zur Verfügung gestellt, wofür die Autoren herzlich danken.