

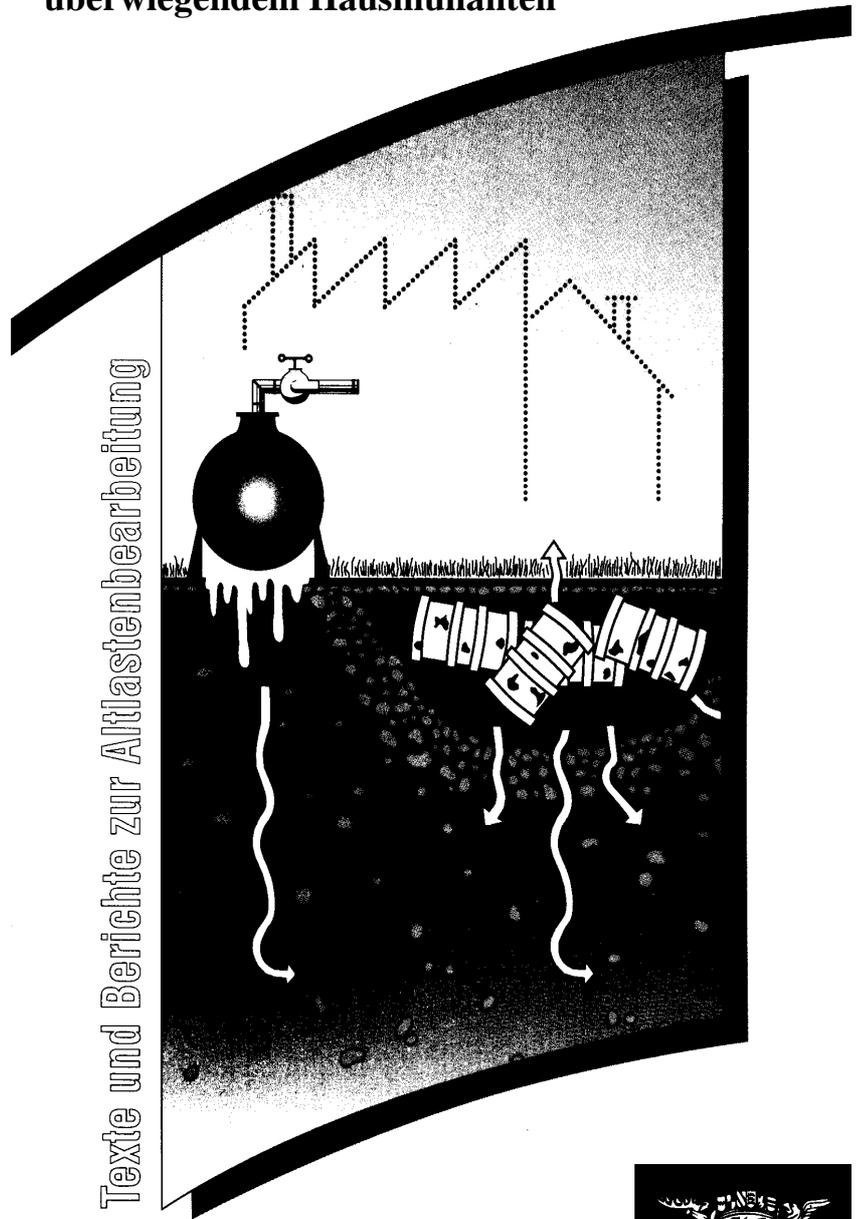
Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei  
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

# Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

zur Sicherung von Altablagerungen mit  
überwiegendem Hausmüllanteil

Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung



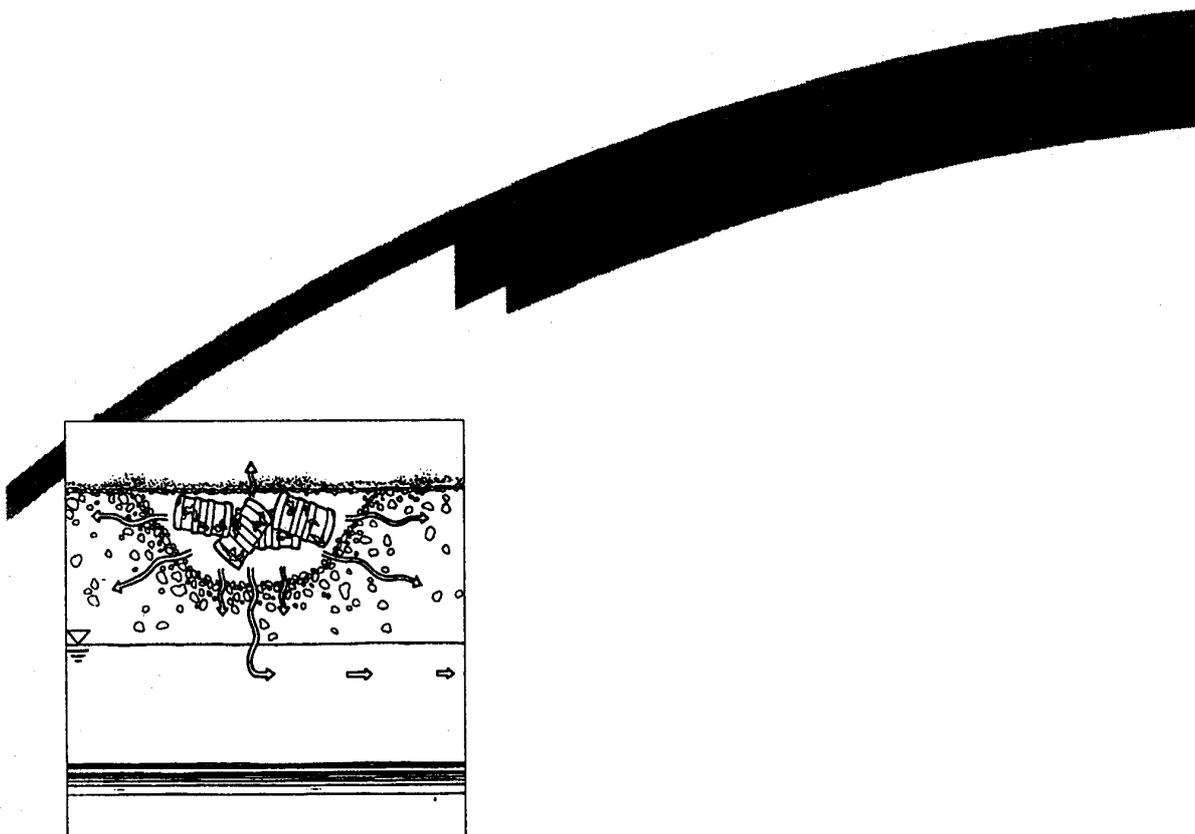
**BODEN  
ABFALL  
ATLASTEN**



**MINISTERIUM  
FÜR UMWELT  
UND VERKEHR**

# Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

zur Sicherung von Altablagerungen mit  
überwiegendem Hausmüllanteil



Herausgegeben von der  
Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
1. Auflage

Karlsruhe 1995



Altlastenfachinformation im WWW

## **Impressum**

**Herausgeber:** Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
Griesbachstr. 1  
76185 Karlsruhe

**Redaktion:** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten  
Referat 54 – Altlastensanierung  
Frieder Kern

**Verfasser:** K. Fischer  
A. Schultheis  
D. Steinbach  
H. Tyranowski  
A. Sihler  
Universität Stuttgart  
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft  
Abteilung Siedlungsabfall  
70550 Stuttgart

Karlsruhe, Juli 1995

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>1</b>
<b>TEIL I: TECHNISCHE BETRACHTUNG VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN</b>	<b>2</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>2. VORGEHENSWEISE</b> .....	<b>7</b>
2.1 FRAGESTELLUNG UND EINGRENZUNG.....	7
2.2 GRUNDLAGEN.....	7
2.3 QUELLEN FÜR DIE LITERATURSUCHE.....	11
2.4 SUCHKRITERIEN FÜR EXTERNE DATENBANKEN.....	12
2.5 AUSWAHLKRITERIEN FÜR DIE VERWENDETEN LITERATURSTELLEN.....	13
2.6 ERFASSUNG DER AUSGEWÄHLTEN LITERATURSTELLEN.....	15
<b>3. BEANSPRUCHUNGEN EINER OBERFLÄCHENABDICHTUNG</b> .....	<b>16</b>
3.1 GRUNDSÄTZLICHES.....	17
3.2 MITTELBARE BEANSPRUCHUNGEN.....	21
<b>4. SPEZIFISCHE REAKTIONEN DER BESTANDTEILE EINER KOMBINATIONSDICHTUNG</b> .....	<b>32</b>
4.1 MINERALISCHE OBERFLÄCHENABDICHTUNG.....	32
4.2 OBERFLÄCHENABDICHTUNG MIT KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHN.....	44
4.3 DECKSUBSTRAT UND WURZELBODEN.....	52
4.4 DRÄNAGE- FILTER- UND SCHUTZSCHICHTEN.....	56
4.5 KOMBINATIONSDICHTUNG.....	59
<b>5. BEWERTUNG UND VERGLEICH DER DICHTSYSTEME</b> .....	<b>69</b>
5.1 ALTERNATIVE DICHTSYSTEME.....	69
5.2 BEWERTUNG DER DICHTSYSTEME.....	75
<b>6. KRITERIEN ZUR BEURTEILUNG DES LANGZEITVERHALTENS</b> .....	<b>78</b>
6.1 LANGZEITVERHALTEN DER DICHTMAßNAHME.....	78
6.2 LANGZEITVERHALTEN DER DURCHLÄSSIGKEIT.....	86
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG TEIL I</b> .....	<b>88</b>
<b>8. AUSBLICK TEIL I</b> .....	<b>90</b>
<b>9. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>91</b>

<b>TEIL II: MATHEMATISCHE BETRACHTUNG; RECHENMODELLE</b> .....	<b>100</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>100</b>
<b>2. VORGEHENSWEISE</b> .....	<b>101</b>
<b>3. WASSERHAUSHALT EINER ABLAGERUNG</b> .....	<b>102</b>
<b>4. KOMMENTIERTE BESCHREIBUNG DES HELP-MODELLS</b> .....	<b>106</b>
4.1 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG.....	106
4.2 VORGEHENSWEISE DES HELP-MODELLS .....	108
<b>5. VERIFIZIERUNG DES HELP-MODELLS</b> .....	<b>118</b>
<b>6. ABSCHÄTZUNG DES SCHADSTOFFVERHALTENS</b> .....	<b>129</b>
6.1 SCHADSTOFFPOTENTIAL IM HAUSMÜLL .....	129
6.2 VERLAUF DES SCHADSTOFFAUSTRAGS .....	130
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>142</b>
<b>8. ANMERKUNGEN ZU DEN VERSCHIEDENEN VERSIONEN DES HELP-PROGRAMMSYSTEMS</b> .....	<b>143</b>
<b>9. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>145</b>
<b>TEIL III: VORGÄNGE IM DEPONIEKÖRPER</b> .....	<b>148</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>148</b>
<b>2. GRUNDLAGEN DER VORGÄNGE IM DEPONIEKÖRPER</b> .....	<b>149</b>
2.1 BIOCHEMISCHE VORGÄNGE.....	149
2.2 PHYSIKALISCH-CHEMISCHE VORGÄNGE .....	153
<b>3. SCHADSTOFFPROBLEMATIK</b> .....	<b>156</b>
3.1 SCHWERMETALLE.....	156
3.2 ORGANISCHE SCHADSTOFFE.....	156
3.3 ZUSAMMENFASSUNG .....	158
<b>4. DEPONIETECHNIK (AUSWIRKUNGEN AUF DEN DEPONIEKÖRPER)</b> .....	<b>160</b>
4.1 MÜLLEINBAU.....	160
4.2 OBERFLÄCHENABDICHTUNG.....	160
<b>5. AUSWIRKUNGEN VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN</b> .....	<b>162</b>
5.1 DEPONIEKÖRPER.....	162
5.2 KOSTEN/NUTZEN-BETRACHTUNG .....	163
5.3 UMGEBUNG (UMWELTVERTRÄGLICHKEIT) .....	163
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>164</b>
<b>7. LITERATUR</b> .....	<b>165</b>

<b>TEIL IV: BEZIEHUNG ZWISCHEN ALTABLAGERUNG UND UMGEBUNG .....</b>	<b>166</b>
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>166</b>
<b>2. PROBLEMSTELLUNG .....</b>	<b>168</b>
<b>3. VORGEHENSWEISE BEI DER BEURTEILUNG VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN .....</b>	<b>169</b>
<b>4. WASSERBILANZEN VON DECKSCHICHTEN.....</b>	<b>171</b>
4.1 ALLGEMEINES.....	171
4.2 STANDORTBEDINGTE UND KLIMATISCHE EINFLÜSSE AUF DIE SICKERWASSERMENGE .....	172
4.3 BODENKUNDLICHE EINFLÜSSE.....	173
4.4 EINFLÜSSE DER VEGETATION.....	176
<b>5. METHODIK ZUR DURCHFÜHRUNG DER DATENERHEBUNG IM GELÄNDE.....</b>	<b>181</b>
5.1 GEOMORPHOLOGIE .....	181
5.2 UNTERSUCHUNG DER DECKSCHICHTEN.....	181
5.3 VEGETATIONSKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN AN DER DEPONIE.....	183
5.4 BEGEHUNG MIT GASSPÜRGERÄT FID .....	186
5.5 SIMULATION DES WASSERHAUSHALTS DER DECKSCHICHT MIT DEM "HELP"- COMPUTERMODELL .....	187
<b>6. ALTABLAGERUNG "FEDERLESMAMD" .....</b>	<b>190</b>
6.1 ALLGEMEINE CHARAKTERISIERUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES.....	190
6.2 BESCHREIBUNG DER ALTABLAGERUNG .....	197
6.3 UNTERSUCHUNGEN AUF DER ALTABLAGERUNG .....	199
6.4 SIMULATION DES WASSERHAUSHALTS DER DECKSCHICHT MIT DEM "HELP" - MODELL .....	218
6.5 ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER IST-SITUATION .....	221
<b>7. ALTABLAGERUNG "HINTERE HALDE" .....</b>	<b>224</b>
7.1 LAGE UND NATURRÄUMLICHE EINORDNUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES .....	224
7.2. BESCHREIBUNG DER ALTABLAGERUNG .....	231
7.3 UNTERSUCHUNGEN AUF DER ALTABLAGERUNG .....	233
7.4 GASMESSUNG AUF DER "HINTEREN HALDE" .....	247
7.5 SIMULATION DES WASSERHAUSHALTS DER DECKSCHICHT MIT DEM "HELP"-MODELL .....	251
7.6 IST-SITUATION DER ALTABLAGERUNG "HINTERE HALDE" .....	253
<b>8. OBERFLÄCHENABDICHTUNG .....</b>	<b>256</b>
8.1 ALLGEMEINES.....	256
8.2 ALTABLAGERUNG "FEDERLESMAMD" .....	258
8.3 ALTABLAGERUNG "HINTERE HALDE" .....	261
<b>9. ABWÄGUNG ZWISCHEN DER AUFBRINGUNG EINER OBERFLÄCHENABDICHTUNG UND DER IST-SITUATION BEZÜGLICH IHRER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT.....</b>	<b>264</b>
9.1 "FEDERLESMAMD" .....	264
9.2 "HINTERE HALDE" .....	267
<b>10. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>270</b>
<b>11. LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>272</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>274</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>277</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS.....</b>	<b>279</b>

## Vorwort

Die vorliegende Studie „Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Altablagerungen mit überwiegendem Hausmüllanteil“ wurde im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart erarbeitet.

Bereits Ende 1992 wurde aufgrund dieses vielschichtigen Themas eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe aus Naturwissenschaftlern und Ingenieuren, wobei jeder unter dem Blickwinkel der einzelnen Fachrichtung sowie gegenseitiger Ergänzung wichtige Aspekte der Problematik betrachten konnte, ins Leben gerufen.

Die Studie gliedert sich in vier Teile, die jeweils die Themenbereiche Technische Betrachtung von Oberflächenabdichtungen (Teil I), Mathematische Betrachtung; Rechenmodelle, die das Computerprogramm „HELP“ für die Simulation des Wasserhaushaltes von Deckschichten behandeln (Teil II) sowie den chemisch-biologischen Aspekt bei Vorgängen im Deponiekörper (Teil III) umfassen. In Teil IV Beziehung zwischen Altablagerung und Umgebung werden ökologische Auswirkungen von Oberflächenabdichtungen anhand zweier Altablagerungen dargestellt und bewertet. Die einzelnen Teile der Studie stehen zunächst für sich, werden aber durch ihre Anordnung sowie dem themenübergreifenden letzten Teil in einen Zusammenhang gebracht.

Da die Studie bereits Anfang 1994 fertiggestellt war, erschien es den Verfassern im nachhinein als sinnvoll, neben einigen redaktionellen Änderungen einen Zusatz über die 1995 veröffentlichte neuste Version des Computerprogramms „HELP“ einzufügen.

Im Anschluß an die Studie wurde am Institut für Siedlungswasserbau im Auftrag der LfU Baden-Württemberg im November 1994 ein Workshop zum Thema veranstaltet. Auf Grundlage der Arbeiten der eingeladenen Fachleute von Universitätsinstituten, Ingenieurbüros und Fachbehörden sowie der hier vorliegenden Studie wurden die Aktualität der Thematik sowie der vorhandene Forschungsbedarf aufgezeigt.

Anhand der Studie und dem Workshop wird deutlich, daß zur Thematik Oberflächenabdichtungen (auf Altablagerungen) längst nicht alle Fragen beantwortet sind. Für weiterführende Anregungen und Kritik sind die Verfasser offen und hoffen durch ihren Beitrag zu Erweiterung der Diskussionsgrundlage beigetragen zu haben.

Stuttgart im Juni 1995

Der Verfasser

# Teil I: Technische Betrachtung von Oberflächenabdichtungen

## 1. Einleitung

Der Gebrauch des Begriffes Altablagerung soll sich in dieser Arbeit an dem Vorschlag des RATES VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN, 1990 [1] orientieren.

*Altablagerungen sind*

- *verlassene und stillgelegte Ablagerungsplätze mit kommunalen und gewerblichen Abfällen,*
- *stillgelegte Aufhaldungen und Verfüllungen mit Produktionsrückständen auch in Verbindung mit Bergematerial und Bauschutt sowie*
- *illegale ("wilde") Ablagerungen aus der Vergangenheit;*

*in denen oder auf denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen wurde, aus den Bereichen der gewerblichen Wirtschaft oder öffentlichen Einrichtungen.*

Beschränken soll sich diese Arbeit auf Altablagerungen mit überwiegendem Hausmüllanteil.

Die von einer **Deponie** oder **Altablagerung** ausgehenden schädlichen Umwelteinflüsse können nach GLÄSER, 1985 [2] in drei Gruppen eingeteilt werden:

- gasförmige Emissionen
- Deponiesickerwasser
- Oberflächenabtrag

Die gasförmigen **Emissionen** sind abhängig vom Deponietyp, dem Alter der Ablagerung, Art der eingelagerten Stoffe und einer Vielzahl weiterer Faktoren.

Das Niederschlagswasser dringt in den Deponiekörper ein, nimmt Schadstoffe auf und verunreinigt großflächig den Grundwasserhorizont. Neben dem Eindringen von Niederschlagswasser besteht auch die Möglichkeit des Eintritts von Grundwasser oder Hangzugwasser, das dann kontaminiert an anderer Stelle wieder austritt.

Zu Oberflächenabtrag kann es durch Wind und Niederschlag kommen. Dabei kann Deponiegut außerhalb des Bereiches der Deponie abgelagert werden.

Die Abb. I- I-1.1 stellt die **Emissionspfade** aus einer Ablagerung bzw. Deponie bildlich dar.

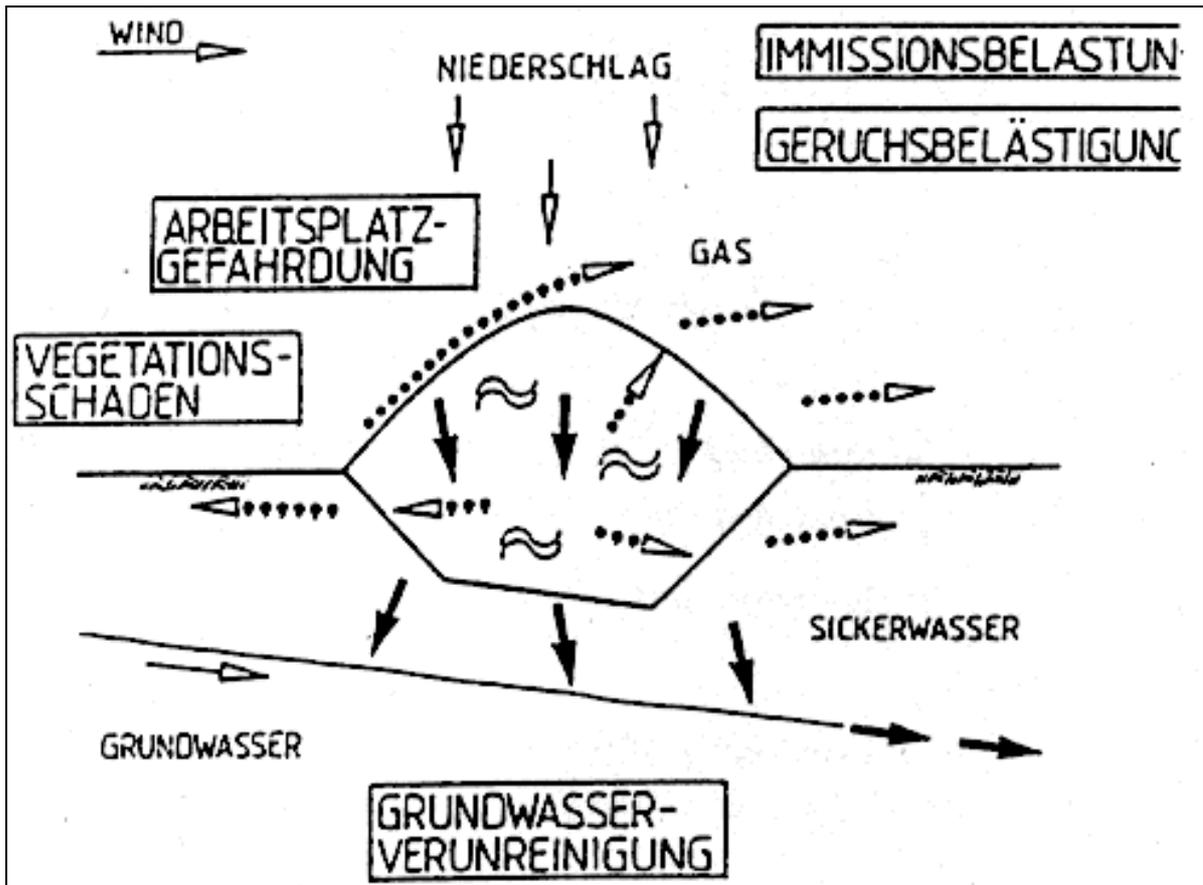


Abb. I- 1.1: Emissionspfade aus einer Ablagerung bzw. Deponie [3]

Über diese Emissionspfade können nachhaltige Gefährdungen des Ökosystems hervorgerufen werden. Um diesen vorzubeugen, ist eine Sicherung von Altlasten, angepaßt an die jeweilige Situation, notwendig. In diesem Kontext kommt der Oberflächenabdichtung eine zentrale Bedeutung zu.

Um die Auswirkungen einer nachträglich aufgetragenen Oberflächenabdichtung zu untersuchen, ist es unabdingbar, die **Oberflächenabdichtung** selbst als technische Maßnahme zu betrachten. Die Oberflächenabdichtung ist der Dreh- und Angelpunkt für die Vorgänge im Deponiekörper und in der Umgebung der Deponie. So ist in Abb. I- I- 1.2 die Oberflächenabdichtung in der Regel die einzige physikalische Größe, die direkt durch die Sicherungsmaßnahme beeinflussbar ist und unmittelbare Auswirkung, z. B. auf die Mobilität von Schadstoffen, hat.

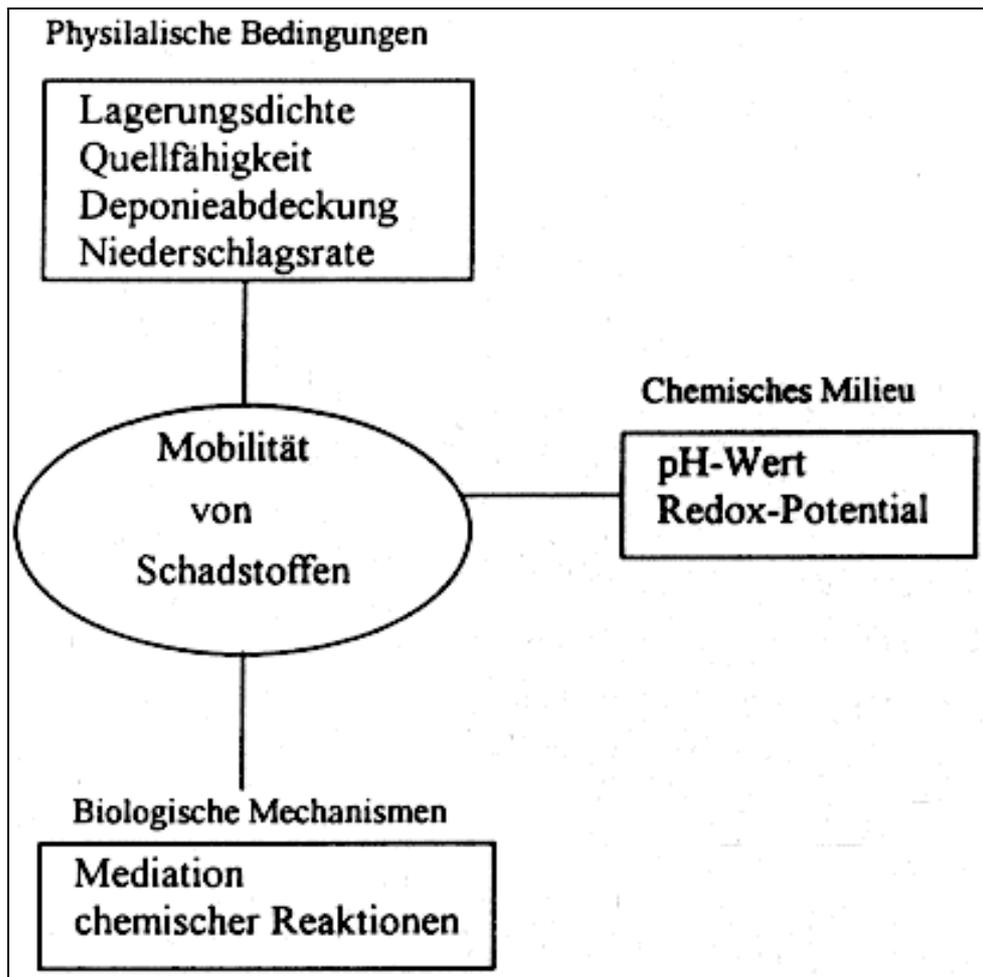


Abb. I- 1.2: Einflußgrößen für die Mobilität von Schadstoffen im Sickerwasser [4]

Derzeit existiert eine Vielzahl von Altdeponien, die keine Oberflächenabdichtung besitzen, in der Regel jedoch rekultiviert sind. Ein heute nachträglich durchgeführter Einbau einer solchen Dichtung würde an **Negativfolgen** aufweisen:

- die Zerstörung der Vegetation auf der Oberfläche,
- eine Veränderung des Landschaftsbildes, da nur Niederbewuchs möglich ist,
- die Veränderung des Wasserhaushaltes der Deponie mit Auswirkungen auf die Entwässerung und die Gasproduktion,
- Veränderungen des Reliefs und des Mikroklimas.

Als Positivfolge entsteht eine Barriere gegen eindringendes Oberflächenwasser und damit eine Minimierung der Sickerwassermenge, was, zumindest in den Fällen einer fehlenden Basisabdichtung, eine Verringerung der Gefahr einer Grundwasserkontamination bedeutet.

Auch einer unkontrollierten Gasemission kann mit Hilfe einer Oberflächenabdichtung entgegen gewirkt werden.

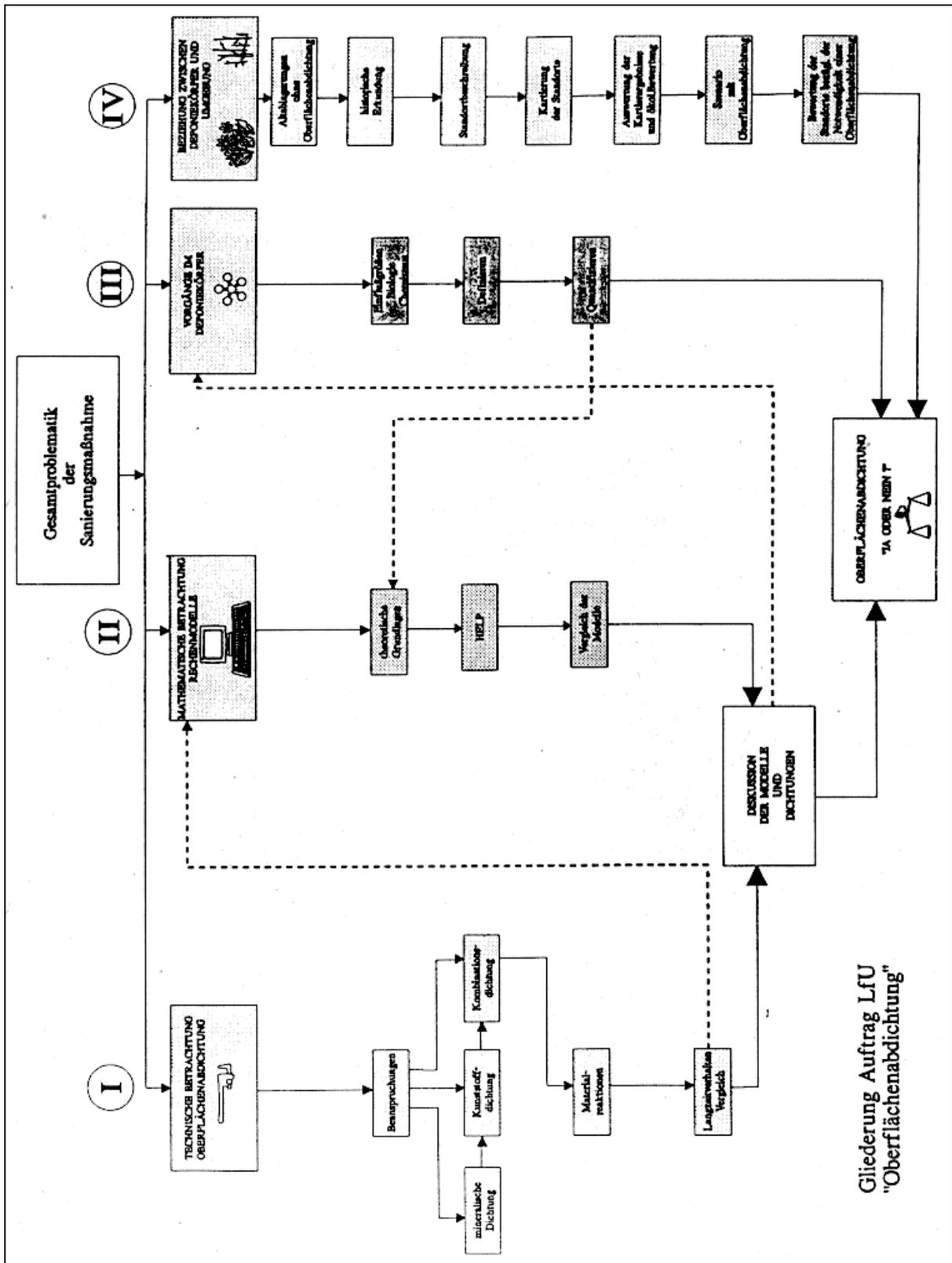
**Offene Fragen** sind:

- der Wasserhaushalt nach der Abdichtung gegenüber dem Ist-Zustand,
- die mechanisch/statischen Eigenschaften der ausgeführten Dichtung,
- die Auswirkungen einer Beschädigung der Dichtung auf den Wasserhaushalt,
- die eventuelle Remobilisierung der biologischen Vorgänge im Deponiekörper (z.B. Gasbildung),
- der Wasserhaushalt und das Nährstoffangebot in der nachträglich aufgetragenen Deckschicht im Zusammenhang mit einer standortgerechten Vegetation.

Letztlich ist abzuwägen, ob, bezogen auf Altablagerungen, die überwiegend Hausmüll enthalten, die Zerstörung der bereits bestehenden Rekultivierungsmaßnahmen zur Herstellung einer Oberflächenabdichtung gravierende Vorteile gegenüber dem bestehenden Zustand bietet. Hier ist herauszuarbeiten, unter welchen Rahmenbedingungen eine deutlich höhere Umweltverträglichkeit erzielt wird.

1. Diese Fragestellung wurde in vier Arbeitspakete aufgeteilt (Abb. I- 1.3): Eine technische Betrachtung der Oberflächenabdichtung, bei der die Mechanismen, unter Berücksichtigung des Material- und Langzeitverhaltens, die zu einem Versagen führen können, untersucht werden. Teil I geht in Teil II durch eine Abschätzung der langfristigen Wirksamkeit einer Oberflächenabdichtung ein.
2. Mathematisch-theoretischer Teil. Hier werden die grundsätzlichen Zusammenhänge, hauptsächlich bezüglich des Wasserhaushaltes einer Deponie aufgezeigt. Eine konkrete Simulation wird für die untersuchten Standorte aus Teil IV vorgenommen, unter Bezugnahme auf die Ergebnisse aus Teil I und II.
3. Teil III untersucht die Vorgänge im Deponiekörper, wobei im Vordergrund das Definieren und Quantifizieren der biologischen und chemischen Einflußgrößen steht. Diesem Teil kommt eine grundsätzliche Bedeutung für die Teile II und IV zu.
4. Im vierten Teil wird eine Untersuchung zweier konkreter Standorte hinsichtlich der Beziehungen des Deponiekörpers zur Umgebung vorgenommen. In diesem Teil finden die drei vorhergehenden Teile Eingang, wobei diese Querverbindungen aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abb. I- 1.3 nicht dargestellt sind.

Arbeitspaket I wird im folgenden behandelt. Die detaillierte Vorgehensweise, einschließlich der Fragestellung und Zielsetzung, sind Gegenstand des Kapitels 2.



Gliederung Auftrag LFU "Oberflächenabdichtung"

Abb. I- 1.3: Zusammenspiel der Teilberichte des Gesamtprojektes

## 2. Vorgehensweise

### 2.1 Fragestellung und Eingrenzung

Ziel des ersten Teilberichtes soll es sein, Mechanismen für das **Versagen** von Oberflächenabdichtungen aufzuzeigen. Wo eine Berechnung nicht möglich ist, sollen zumindest die Vorgänge anschaulich gemacht werden.

**Nicht untersucht werden:**

- Bemessung im herkömmlichen Sinn, d.h., daß auch Bemessungsfehler nicht Gegenstand der Untersuchung sein können, da hierfür eine detaillierte Beschreibung der üblichen Bemessungspraxis nötig wäre.
- Ausgeklammert bleibt weiterhin das grundsätzliche Werkstoffverhalten.

**Untersucht werden:**

- Versagensarten außerhalb der üblichen Bemessung
- Abschätzung der Größenordnung des Versagens in Theorie und Praxis, wobei hier die Betonung auf schätzen liegen muß, da eine klare Berechnung von Versagensarten, die außerhalb der Bemessung liegen, naturgemäß nicht gemacht werden können
- Bilanzierung der Erfahrungen mit Oberflächenabdichtungen
- Blick auf den Stand der Technik und Alternativen am Rande

**Ziel:**

Abschätzung des **Langzeitverhaltens** einer Kombinationsdichtung aufgrund der Beanspruchung und mögliches Versagen der Einzelkomponenten.

### 2.2 Grundlagen

Um den Begriff **Altlastensanierung** einzugrenzen, soll sich hier wiederum am Rat von Sachverständigen für Umweltfragen orientiert werden [1]:

*Altlastensanierung ist die Durchführung von Maßnahmen, durch die sichergestellt wird, daß von der Altlast keine Gefahren für Leben und Gesundheit des Menschen sowie keine Gefährdung für die belebte und unbelebte Umwelt im Zusammenhang mit der vorhandenen oder geplanten Nutzung des Standortes ausgehen.*

*Demnach sollte das Sanierungsziel sein, Altlasten mit Hilfe entsprechender Sanierungsmaßnahmen in nicht gefährliche Standorte zurückzuführen. Aus diesem allgemeinen Sanierungsziel lassen sich aber noch keine konkreten Qualitätsanforderungen für den Sanierungsumfang im einzelnen Fall ableiten. Diese müssen aber explizit in jedem Sanierungskonzept enthalten sein.*

Eine Position die auch vertreten wird, ist es, das **Gefährdungspotential** nicht direkt zu beheben, sondern nur den Kontakt zwischen Mensch und Belastung zu unterbinden [8]. In diese Kategorie fallen alle "End-of-the-pipe" Maßnahmen.

Das **Risiko**, das von einer Altlast ausgeht, läßt sich anhand objektiver Verfahren beurteilen. Mit Hilfe dieser Verfahren kann auch die Dringlichkeit einer eventuell notwendigen Maßnahme in bezug zu anderen Standorten gesetzt werden [9, 10].

Mit einer nachträglichen Oberflächenabdichtung bewegt man sich im Rahmen der Sicherungsmaßnahmen, zu denen nach [7] Verfestigungen, hydraulische Maßnahmen und Einkapselungen zählen. Die Sicherungsmaßnahmen sind zu unterscheiden von den Dekontaminierungsverfahren, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, die eine wirkliche Sanierung als Ziel haben.

Eine **Oberflächenabdichtung** ist als Element einer Einkapselung zu sehen, zu der neben vertikalen Dichtwänden [z.B. 11, 12] auch nachträgliche Basisabdichtungen [z.B. 13, 14, 15] gehören. Von den Kosten [16] bewegen sich z. B. Spundwände (ca. 200 bis 300 DM/m<sup>2</sup>) in der gleichen Größenordnung wie Oberflächenabdichtungen (ca. 250 bis 300 DM/m<sup>2</sup> ohne Ausgleichsschicht und Vegetationsdecke, zuzüglich Baustelleneinrichtungen und Kontrolle der HDPE-Schweißnähte).

Eine Einteilung der **Einkapselungsverfahren** ist in Abb. I- 2.1 zu sehen.

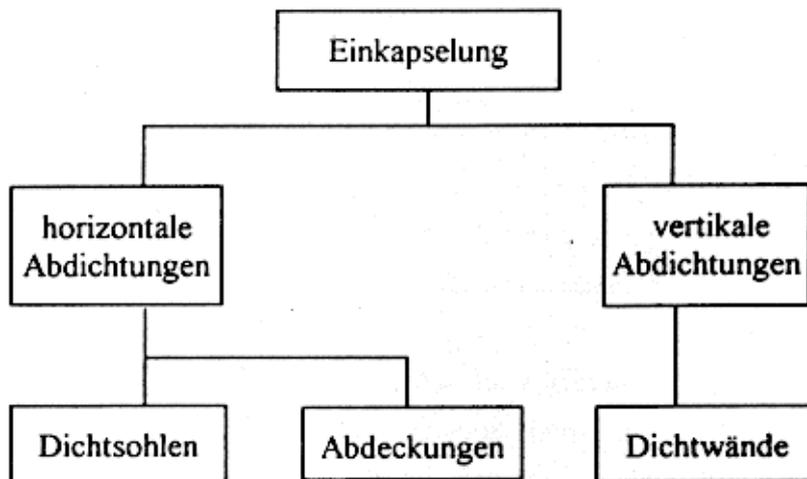


Abb. I- 2.1: Einteilung der Einkapselungsverfahren [17]

Die ausgeführte Oberflächenabdichtung hat innerhalb des Multibarrierenkonzeptes folgenden **Anforderungen** zu genügen [18]:

- Verhinderung von Infiltration in den Deponiekörper
- Schutz vor klimatischen Einflüssen (Frost- und Tauwechsel, Wind- und Wassererosion)
- Schutz vor unkontrollierter Ausbreitung gasförmiger Emissionen
- langfristig wartungsarm
- volle Wirksamkeit bis eine Stabilisierung bzw. Mineralisierung des Deponiekörpers erreicht ist

Das **Multibarrierenkonzept** sieht vor, daß Unsicherheiten hinsichtlich der Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit durch die Barrieren "Deponiekörper" und "Deponiebasisabdichtungssystem" aufgefangen werden.

Weiterhin soll nach Rettenberger und Urban-Kiss, 1992, ein Oberflächenabdichtungssystem im wesentlichen

- standsicher,
- kontrollierbar und
- reparierbar sein,

sowie nach der Erstellung Beanspruchungen, wie

- Setzungen und Sackungen,
- Erosionsvorgängen,
- chemischen und biologischen Angriffen und
- Befahrung

widerstehen. Im Bauzustand kommen noch weitere Beanspruchungen, wie z.B. durch Temperatur und UV-Strahlung bzw. durch Maschinen und scharfkantige Arbeitsmaterialien hinzu. Inwiefern Oberflächenabdichtungssysteme diesen letztgenannten Beanspruchungen gerecht werden können, soll unter anderem Ziel dieser Arbeit sein.

Die **Kontrolle** von Oberflächenabdichtungen dürfte allerdings in der Praxis nicht oder nur schwer durchführbar sein, da bislang einfache, funktionstüchtige Systeme, die ohne große Zeitverzögerung ansprechen, nicht verfügbar sind. So wird sich die Kontrolle der Abdichtung bezüglich des Wasserpfades in der Regel indirekt über die, zumindest bei Sanierungsfällen meist vorhandene, Sicker- bzw. Grundwasserbeobachtung vollziehen. Für den Gaspfad ergeben sich ähnliche, ebenfalls indirekte Kontrollmöglichkeiten über die Überwachung der Zusammensetzung des abgesaugten Gases (Methan- bzw. Sauerstoffanteil) und der evtl. Beobachtung von Gasschäden am Bewuchs der Deckschicht.

Reparierbar sind alle derzeit diskutierten Dichtungen auf der Deponieoberfläche, sofern die Schadensstelle lokalisierbar ist. Reparaturen bedingen allerdings ein Freilegen mindestens der Dichtungsschicht und damit eine Zerstörung des Bewuchses der rekultivierten Oberfläche. Außerdem ist die Herstellung des Anschlusses der Reparaturstelle an die bestehende Dichtung nicht unproblematisch, da hierfür je nach Beschädigung Schweiß- oder Verdichtungsarbeiten ausgeführt werden müssen.

Zusammengefaßt bestehen oberflächliche Abdichtungen von Abfallablagerungen von oben nach unten im **Querschnitt** gesehen aus

- einer **Deckschicht**, die aus einem bepflanzbaren Substrat besteht und hauptsächlich
  - dem Schutz der Dichtung vor Witterungseinflüssen (v.a. Frost),
  - einer Vergleichmäßigung und Förderung der Verdunstung von Niederschlagswasser
  - und durch die Bepflanzung der Erosionssicherung dient,

- einer **Wasserdränschicht**, deren Funktion in der Aufnahme und Abführung des durch die Deckschicht gesickerten Niederschlagswassers und in der Verhinderung von Stauanässe auf der Dichtungsschicht besteht,
- der eigentlichen **Dichtungsschicht**, die als Wasser- und Gassperre fungiert und aus mineralischem Material und/oder aus Kunststoff bestehen kann und
- einer **Gasvertei- bzw. Gassammelschicht**, die der Sammlung und der Abführung von Deponiegasen dient.

Darüber hinaus werden i.d.R. **Filter-, Trenn- und Schutzschichten** überall dort beim Aufbau des Dichtsystems angeordnet, wo eine Vermischung unterschiedlicher Körnungen vermieden, ein druckloser Wasserdurchfluß gewährleistet bzw. der Schutz einer Dichtungsbahn erreicht werden soll. Diese Zwischenschichten können sowohl aus mineralischen Materialien als auch aus Geotextilien bestehen [19].

Um diesen Anforderungen und Ansprüchen gerecht zu werden, wurde sowohl im Entwurf als auch in der Endversion der TA-Siedlungsabfall ein Standarddichtungsaufbau vorgeschrieben (s. Abb. I- 2.2).

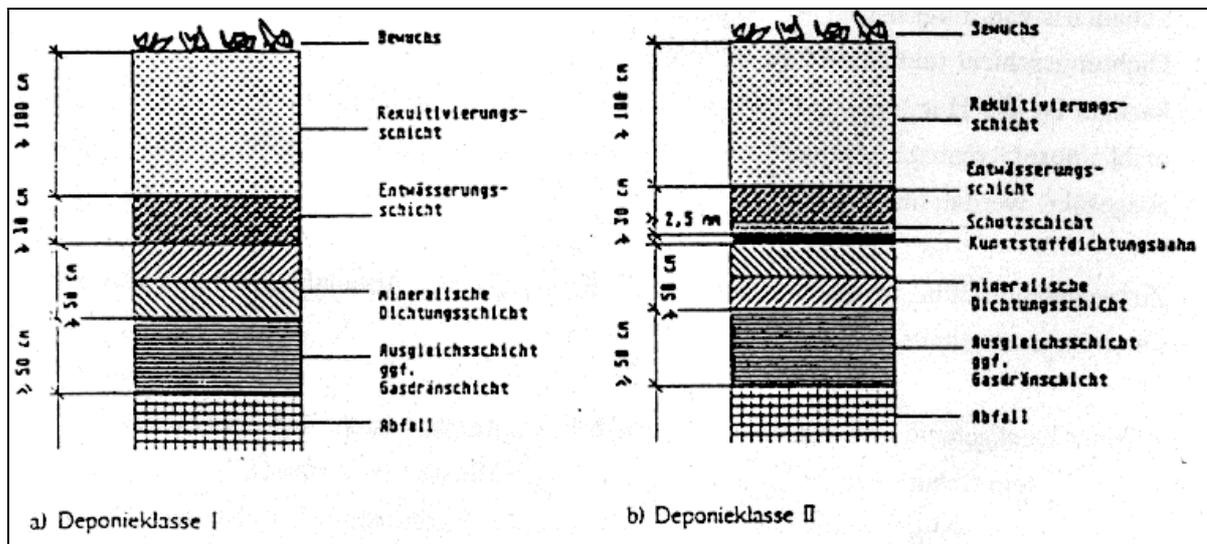


Abb. I- 2.2: Deponieoberflächenabdichtungssystem nach TA-Siedlungsabfall [20]

Allerdings wurde in den Änderungen vom Frühjahr '93 von der ausschließlichen Zulässigkeit dieser Dichtungssysteme Abstand genommen und der Begriff einer "Wertigkeit" eingeführt. Demnach wären alle Systeme, die den Kriterien zu dieser Wertigkeit genügen, zulässig. Hierfür ist natürlich ein Kriterienkatalog erforderlich, der vom Umweltbundesamt in Abstimmung mit den Ländern noch zu erstellen ist [21].

Zu diesem Zweck wurde vom Umweltbundesamt eine Arbeitsgruppe "Bewertung von Deponieabdichtungssystemen" (BEDAS) ins Leben gerufen. Anzumerken ist noch, daß aufgrund der anzunehmenden Vielfalt der Meinungen kurzfristig nicht mit einem gültigen Kriterienkatalog zu rechnen ist.

Vor diesem Hintergrund sollen in dieser Arbeit auch alternative Dichtsysteme, wie z.B. das System der Kapillarsperre einen gewissen Raum einnehmen, da sich abzeichnet, daß konkret

dieses System in Zukunft bei Diskussionen zur Oberflächenabdichtung nicht unberücksichtigt bleiben wird.

## 2.3 Quellen für die Literatursuche

Als Hauptinformationsquelle diene die Literaturrecherche mit EDV, die die Universitätsbibliothek (UB) Stuttgart im Rahmen ihrer Informationsvermittlungstätigkeit als "On line-Literatursuche" anbietet. Die UB hat zur Zeit Nutzungsverträge mit den folgenden **Datenbankanbietern**:

- Bertelsmann
- BRS
- Data-Star
- DIMDI
- FIZ Karlsruhe
- FIZ Technik
- IRB
- STN-international

Von diesen Datenbankanbietern sticht vor allem STN-international hervor. Die **Scientific and Technical Information Network (STN)** wird vom **Fachinformationszentrum Karlsruhe** für den deutschen Markt angeboten. Koordiniert werden unter anderem die American Chemical Society und das Japan Information Center, die durch Satellit beziehungsweise Seekabel miteinander verbunden sind.

Von STN wiederum werden mehrere Datenbanken innerhalb der verschiedensten Wissenschaftsbereiche angeboten. Konkret für diese Literaturrecherche wurden genutzt:

- Die **Umweltforschungsdatenbank (UFORDAT)** des Umweltbundesamtes in Berlin, die in Zusammenarbeit mit dem Fachinformationszentrum Karlsruhe erstellt wird. Die UFORDAT enthält in erster Linie Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die mit Hilfe eines Fragebogens des Datenbankerstellers erfaßt werden. Die Beantwortung dieses Fragebogens ist freiwillig und allein die Beantwortung sagt nichts über die Verfügbarkeit aus.
- Die **Umweltliteraturdatenbank (ULIDAT)** von den gleichen Erstellern der UFORDAT. Diese Datenbank beinhaltet Veröffentlichungen.
- Die **Datenbank für Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen und Bauwesen (RSWB)**. Erstellt wird diese Datenbank vom Informationszentrum Raum und Bau in Stuttgart. Eine Trennung zwischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten einerseits und Veröffentlichungen andererseits erfolgt hier nicht.
- Die **International Construction Data Base (ICONDA)**. Diese englischsprachige Datenbank wird auch vom IRB erstellt und hat daher entsprechende Überschneidungen mit der RSWB Datenbank.

Von diesen Datenbanken ist es möglich, Zusammenfassungen der Literaturstellen zu beziehen. Damit ist eine Bedeutung der Literaturstelle gut abzuschätzen.

Außer der EDV-Literaturrecherche wurde noch Kontakt mit den für diese Aufgabe in Frage kommenden Landesbehörden aufgenommen. Angesprochen wurden die Behörden folgender Länder:

- Baden-Württemberg
- Hessen

Weiterhin wurden bestehende Beziehungen zu Instituten anderer Universitäten und zu Ingenieurbüros und anderen Firmen sowohl bei der Beschaffung der Literatur als auch bei der Recherche hierfür genutzt.

Bei einzelnen Deponiestandorten zeigte sich darüberhinaus die Notwendigkeit, Kontakt mit den jeweils zuständigen Wasserwirtschaftsämtern aufzunehmen.

Eine weitere vertiefte Betrachtung vor Ort hätte jedoch den vorgegebenen Rahmen gesprengt.

## 2.4 Suchkriterien für externe Datenbanken

Als feststehender Block zur Erfassung des Themas "Deponie" wurden folgende Synonyme benutzt:

- Altablagerung
- Altlast
- Deponie
- Mülldeponie
- Abfalldeponie
- Hausmülldeponie
- Altdeponie
- Sondermülldeponie

Im ersten Suchlauf erfolgte eine klare Eingrenzung mit den Blöcken "Oberflächenabdichtung" und "Langzeitverhalten/Alterung". Das Ergebnis waren 4 Literaturstellen, von denen 2 eine hohe Relevanz haben. Da also die Abfrage bei diesen Einschränkungen kein befriedigendes Ergebnis lieferte, wurde ein zweiter Suchlauf durchgeführt.

Um einen Überblick über die Ist-Situation im Altlasten- beziehungsweise Deponiebereich zu gewinnen, wurden folgende Einschränkungen verwendet:

- Erfahrung
- Versuch
- Überwachung
- Beispiel

Das Resultat waren 365 Literaturstellen mit der Einschränkung "ab 1990". Im Großteil entsprachen sie nicht der Erwartung. Aus diesem Grund erfolgte eine Kombination des "Deponie"-Blockes mit "Langzeitverhalten, Dauerhaftigkeit und Alterung". Um ausgeführte Sanierungen ebenfalls zu erfassen, wurde der "Deponie"-Block mit "Sanierung" und mit "Erfah-

rung, Versuch, Überwachung und Beispiel" eingeschränkt. Das Ergebnis dieser letzten beiden Abfragen waren 151 Literaturstellen.

In der Summe sind das 520 Literaturstellen mit einem gewissen Anteil an Mehrfacheintragen bedingt durch die Unverknüpfbarkeit der verschiedenen Datenbankanbieter. Aus diesem Pool wurden 174 Titel ausgewählt.

Im Laufe der Arbeit zeigte sich aber die Notwendigkeit, die Literaturrecherche weniger durch Nutzung elektronischer Medien, als vielmehr durch Querverweise in der vorhandenen Literatur zu betreiben.

Begründet lag dies darin, daß die Komplexität der Fragestellung und der Mangel an Veröffentlichungen mit der gewünschten Fragestellung keine ausschließliche Suche mittels Stichwörter zuließ.

## 2.5 Auswahlkriterien für die verwendeten Literaturstellen

Insgesamt wurden über 460 Literaturstellen aufgenommen, wobei hier ein gewisser Anteil nicht relevanter Titel enthalten ist, die deswegen registriert wurden, um zu vermeiden, daß nicht relevante Literatur nochmals in Erscheinung tritt.

Die gesammelten Literaturstellen wurden nach festgelegten Stichwörtern erfaßt und in einer Datenbank abgespeichert. Es wurden folgende Stichwörter benutzt, wobei an dieser Stelle die Anzahl der Titel mit hoher Relevanz mit aufgeführt werden:

<b>Stichwort</b>	<b>Anzahl der Titel</b>
Sanierung	30
Exploration	39
Abfallparameter	49
Biologie	33
Gas	47
Sickerwasser	62
Neudeponie	22
Altdeponie	42
Einbau	35
Abdichtung	77
Schadstoffe	62
Versuch	55
Bilanzen	31
Perspektiven	15
Langzeitverhalten	59
Oberflächenabd.	56
Sonstiges	69

Es liegen insgesamt 150 Titel mit hoher Relevanz vor, die mehrere Aspekte, hier Stichwörter, beleuchten. Die Stichwörter, nach denen eine Einordnung erfolgte, werden im folgenden Text in Anführungsstriche gesetzt.

Unter dem Stichwort "*Sanierung*" werden ausgeführte Abdichtungsmaßnahmen, wie zum Beispiel nachträgliche Basisabdichtungen, verschiedene Formen der vertikalen Abdichtung und natürlich Oberflächenabdichtungen bei Altdeponien erfaßt, obwohl bei solchen Einkapselungsmaßnahmen keine Sanierung im eigentlichen Sinne des Wortes erreicht wird, sondern nur eine Konservierung oder auch Sicherung.

Nicht berücksichtigt werden tatsächliche Sanierungsmaßnahmen, die mit einem thermischen, biologischen oder auch einem Waschverfahren arbeiten. Bei diesen Verfahren handelt es sich i.d.R. auch nicht um die Behandlung von Altdeponien, sondern um die Wiederherstellung kontaminierter Böden oder ähnlichem.

Unter "*Exploration*" werden Titel erfaßt, die Angaben über den Ort der Altlast oder Deponie enthalten. Darunter fallen klimatische Bedingungen, Geohydrologie oder auch Angaben über natürliche Bodenschichten und Grundwasserbewegungen.

Mit dem Stichwort "*Abfallparameter*" sollen alle bekannten Parameter des eingebauten Abfalls registriert werden. Hierunter befinden sich Merkmale wie Art, Menge, Konditionierung oder auch Untersuchungen des Abfalls vor dem Einbau, unmittelbar danach oder zu einem späteren Zeitpunkt. Die Registrierung von Untersuchungen reicht von Parametern wie Schüttgewicht bis zu chemischen Untersuchungen nach Eluatkriterien. Kurz gesagt werden unter diesem Stichwort alle erdenklichen Beschreibungen der Abfälle erfaßt, die aber ihrerseits u.U. erst in neuerer Zeit vorliegen.

Weitgefächert sind die Eintragungen unter dem Stichwort "*Biologie*". Erfaßt werden mikrobielle Vorgänge im Abfallkörper und ihre Bedingungen, wie zum Beispiel Wasserhaushalt, Sauerstoffgehalt und pH-Wert. Zu einem Eintrag unter Biologie führen jedoch auch Rekultivierungsmaßnahmen der Oberflächenabdichtung sowie Bepflanzung und Durchlebung der hierfür relevanten Schichten.

"*Sickerwasser*" ist von besonderem Interesse. Bewertet werden Art, Menge, Herkunft und vor allem auch die Abhängigkeit von den vorhandenen Dichtungsmaßnahmen sowie den klimatischen Bedingungen. Desweiteren ist der zeitliche Verlauf der Qualität und Quantität registriert. Im übertragenen Sinne gilt dies auch für das Stichwort "*Gas*".

Unter "*Neudeponie*" fallen geordnete Ablagerungen mit angemessenen Dichtungs- und sonstigen Maßnahmen, im Gegensatz zur "*Altdeponie*", die über nichts dergleichen verfügt. Zu einem Eintrag unter Altdeponie führen reine Status quo-Untersuchungen und Berichte, die Altdeponien in irgendeiner Form untersuchen oder erfassen.

Mit "*Versuch*" werden Titel berücksichtigt, die Angaben über Untersuchungen im Labormaßstab machen. Ebenso werden hier auch Freilandversuche und großmaßstäbliche Versuche abgespeichert.

Das Stichwort "*Einbau*" bezieht sich auf den Einbau von Abfall und der hierbei verwendeten Technik. Die Art des Einbaus ist maßgeblich für den Luftporengehalt, den Preßwasseranteil am Sickerwasser und die Durchlässigkeit der Müllschichten in allgemeiner Form. Unter Einbau werden auch Verdichtung, Schüttplan und eine vorhergehende Zerkleinerung registriert.

Eine Erfassung der *"Abdichtung"* erfolgt nach Material, Ort des Einbaus (Basis, Flanken, Oberfläche) und nach Beständigkeit gegen die verschiedenen Belastungen. Falls eine *"Oberflächenabdichtung"* vorliegt oder eine theoretische Überlegung dazu, wird ein eigener Vermerk vorgenommen.

*"Schadstoffe"* werden nach Menge, Herkunft und Art erfaßt, wobei hier den Emissionswegen eine besondere Bedeutung zukommt. Ferner werden human-toxikologische Aspekte, aber auch Auswirkungen auf die Tier- und Pflanzenwelt, berücksichtigt.

Ein Eintrag unter *"Bilanzen"* wird vorgenommen, wenn zum Beispiel der Wasser- oder Gashaushalt komplett bilanziert worden ist.

Mit *"Perspektiven"* werden in Gang befindliche Entwicklungen und ihre etwaigen Auswirkungen bezeichnet. Beispiele hierfür wären Änderungen des Standes der Technik und Entwicklungen bei der Abfallvorbehandlung. Mit Perspektiven ist auch das *"Langzeitverhalten"* verbunden. Wobei hierunter konkret die Veränderungen der Abdichtungsmaßnahmen aufgrund der verschiedenen chemischen und physikalischen Angriffe verstanden werden. Von primärem Interesse ist eine Änderung der Dichtwirkung aufgrund der Angriffe.

Weiterhin wurde eine Sparte *"Sonstiges"* eingeführt. Hier befinden sich die Titel, die sich mit dem Altlasten- oder Deponiebereich in einer durch die vorstehenden Stichwörter nicht erfaßbaren Weise beschäftigen. Das wären Titel, die sich zum Beispiel mit der Menge von Altstandorten oder rechtlichen Rahmenbedingungen befassen.

Außerdem wurden alle erfaßten Titel einer Bewertung in fünf, der *"Relevanz"* nach gestaffelten, Kategorien unterzogen. Dadurch ist es möglich, wichtige Titel direkt abzurufen, auch oder gerade in Verbindung mit verschiedenen Stichwörtern oder deren Kombination.

## 2.6 Erfassung der ausgewählten Literaturstellen

Durch die Menge der notwendigerweise zu archivierenden Literaturstellen ist es unumgänglich, eine geeignete, interne Datenbank aufzubauen. Für dieses Vorhaben wurde das "Paradox"-Datenbanksystem der Firma Borland gewählt.

Mit diesem System ist es möglich, die verwendeten Literaturstellen mit bestimmten Merkmalen (siehe Kap. 2.4) zu versehen. Die Literaturstellen können dann nach diesen Merkmalen abgefragt werden. Außerdem ist eine Verknüpfung der verschiedenen Merkmale einfach zu realisieren. Mit Merkmalen sind unter anderem die im Kapitel 2.4 als Stichwörter bezeichneten Begriffe wie "Sickerwasser", "Exploration" und so weiter gemeint. Ein Ausdruck nach diesen Merkmalen sowie eine Kombination derselben ist durchführbar.

### 3. Beanspruchungen einer Oberflächenabdichtung

#### *Berücksichtigung von Beanspruchungen bei der Bemessung*

Ingenieurbauwerke, d.h. Bauwerke die "lediglich" technischen Ansprüchen genügen müssen, werden in der Phase des Entwurfs aufgrund von Beanspruchungen bemessen.

In der Praxis der Ausführungen von Oberflächenabdichtungen führt der Begriff "Bemessung" zu Irritationen. Um Mißverständnissen vorzubeugen soll der Begriff "Bemessung" hier erläutert werden.

Eine Bemessung im technischen Sinn liegt dann vor, wenn aufgrund einer gegebenen Belastung Abmessungen so dimensioniert werden, daß ein Versagen des Bemessungsgegenstandes aufgrund dieser Belastung ausgeschlossen werden kann.

Nun sind die Belastungen für eine Oberflächenabdichtung nur schwerlich oder gar nicht quantifizierbar. So wird eine eigentliche "Bemessung" im obigen Sinne kaum vorgenommen werden können. In der Regel wird man sich daher, auch von der Auftraggeberseite her, damit zufrieden geben, wenn die Anforderungen nach TA-Siedlungsabfall erfüllt werden. Aber eben diese Anforderungen werden den speziellen Erfordernissen, gerade auch im Rahmen der Altlastensanierung, nicht oder nur teilweise gerecht.

Als Anforderung für eine **Bemessung** könnte in der TA-Siedlungsabfall Abschnitt 13.4.1.1 gelten:

*Auflastbedingte Verformungen des Dichtungsaufagers dürfen die Funktionstüchtigkeit der Deponieabdichtungssysteme nicht beeinträchtigen. Die Setzungen und Verformungen der Dichtungsauflager und der Abdichtungssysteme sind zu berechnen und während der Betriebsphase zu kontrollieren.*

Die auflastbedingten Verformungen lassen sich mit den üblichen erdstatischen Berechnungsverfahren ermitteln. Da diese aber nicht das eigentliche Problem für die Oberflächenabdichtung darstellen, soll im weiteren nicht darauf eingegangen werden.

Eine erstmalige "**Dimensionierung**" einer Abdichtungsmaßnahme wurde wahrscheinlich nach BEINE, 1992 [22] vorgenommen.

Wobei sich hier der Begriff "Dimensionierung" auf eine Berechnung des Schadstofftransports aufgrund von Konvektion, Diffusion und Sorption durch eine Basisabdichtung beschränkt. Die Oberflächenabdichtung wurde nur mit einem vorgegebenen  $k_f$ -Wert als Eingangsgröße berücksichtigt.

Untersuchungen und Vorschriften aus neuerer Zeit sind sich der Problematik jedoch bewußt. So werden z.B. in den GDA-Richtlinien [23] oder auch nach SCHERBECK, 1992 [132] Konzepte angeboten, die es ermöglichen, auch ohne vorhergehende Untersuchungen an Modellen, das Verhalten der Abdichtungsmaßnahme bei vorgegebener Belastung (bei den hier genannten Quellen lediglich Setzungen) in gewissen Grenzen abzuschätzen. Diese Erkenntnisse werden

aber, nach nur stichpunktartiger Umfrage bei Planungsbüros, zumindest flächendeckend zur Zeit noch nicht berücksichtigt.

### 3.1 Grundsätzliches

Von den Beanspruchungen ausgenommen bleibt die von der Dränage abzuführende Wassermenge und die Menge des anfallenden Deponiegases. Diese Beanspruchungen, die natürlich im Vordergrund bei einer Dichtungsmaßnahme stehen, sollen in Teil II detailliert bearbeitet werden. Größenordnungsmäßig aber ist z. B. auf der Deponie Georgswerder nach BORTZ ET AL., 1990 [24] ein Jahreswert zwischen ca. 500 und 700 mm Wasser abzuführen, bei einem hohen Anteil von unbewachsenem Boden. Für die Gasproduktion gibt FARQUHAR, 1980 [25] einen Wert von 12 - 22 [m<sup>3</sup>/t\*a] an.

Bei einer Abdichtungsmaßnahme ist unter anderem letztlich die Durchlässigkeit der gesamten Abdichtung zu beurteilen. Dabei sind die Kernfragen:

- Wie "dicht" ist sie absolut?
- Wie lange bleibt sie "dicht"?

Für die erste Frage gibt es Antworten in Form von Labor- aber auch Feldversuchen. Die zweite Frage indes ist nicht eindeutig beantwortbar.

*Allgemein wird in einer Bandbreite von "undurchlässig" bis "gering durchlässig" von "dicht" gesprochen, wobei der Grad der Restdurchlässigkeit nicht eindeutig festgelegt ist und an dem durch die Dichtung zu erreichenden Ziel gemessen wird [26].*

In der Bodenmechanik spricht man von dichten bzw. undurchlässigen Bodenschichten bereits dann, wenn diese, relativ zu anderen, nur kleine bis sehr kleine Wassermengen durchlassen. Die Durchlässigkeit wird bodenspezifisch durch den Durchlässigkeitskoeffizienten oder -kennwert  $k_f$  beschrieben. In diesem Zusammenhang sei auf Kapitel 4.1 verwiesen.

Ziel einer Oberflächenabdichtung ist es, die durchsickernde Niederschlagsmenge zu minimieren. Das kann über zwei Faktoren erreicht werden:

- einen möglichst geringen  $k_f$ -Wert der Abdichtung
- und einen kleinen wirksamen Druckgradienten.

Ist ersteres über die Zusammensetzung des Dichtmaterials und seine Verdichtung erreichbar, so ist für das zweite eine gute Dränage über der Dichtung Voraussetzung. Deren Wirksamkeit wächst mit der Durchlässigkeit und dem Gefälle der Dränageschicht.

Aus Modellüberlegungen läßt sich erkennen, daß für das gute Zusammenwirken von Dränage und Dichtschicht lediglich der  $k_f$ -Wert der Abdichtung, nicht aber deren Schichtdicke, entscheidend ist [26].

Im folgenden soll auf die Beanspruchung der Oberflächenabdichtung eingegangen werden, wobei der Setzung und der Festigkeit des Deponiekörpers eine für alle Abdichtungsmaßnahmen relevante Bedeutung zukommt. Die übrigen Punkte sollen in diesem Kapitel nur kurz

angesprochen werden, da bei ihnen eine zu große Abhängigkeit vom beanspruchten Material vorliegt, als daß Aussagen allgemeiner Art gemacht werden könnten.

Prinzipiell kann zwischen "mittelbaren" und "unmittelbaren" Beanspruchungen für die Oberflächenabdichtung unterschieden werden (Abb. I- 3.1). Mittelbar ist eine Beanspruchung dann, wenn sie ihrerseits eine Beanspruchung nach sich zieht. So kann zum Beispiel eine lokale Setzung/Sackung ein Abrutschen (örtlich höhere Neigungen) oder ein Reißen (durch Überschreiten der örtlich zulässigen Festigkeiten) nach sich ziehen. Diese Zusammenhänge werden in Tab. I- I- 3.1 dargestellt. Natürlich können aber auch sogenannte mittelbare Belastungen direkt zu Schäden, wie Risse oder Löcher, führen. Dies wird in Abb. I- 3.1 durch die direkt eingehende Linie dargestellt. Unter unmittelbaren Beanspruchungen werden Belastungen verstanden, die direkt zur Schädigung führen können. Unmittelbare Belastungen brauchen nicht unbedingt eine mittelbare Belastung als Voraussetzung. So können z.B. durch Austrocknung und Tiere Schäden verursacht werden (Tab. I- 3.2). Die Schäden selbst sind jeweils an das geschädigte Abdichtungsmaterial gebunden.

Tatsächlich sind aber alle Belastungen und Beanspruchungen zumindest bei neuangelegten Deponien weitestgehend vermeidbar. Im Rahmen der Altlastensanierung hingegen, lassen sich z.B. ungleichmäßige Setzungen nicht vermeiden.

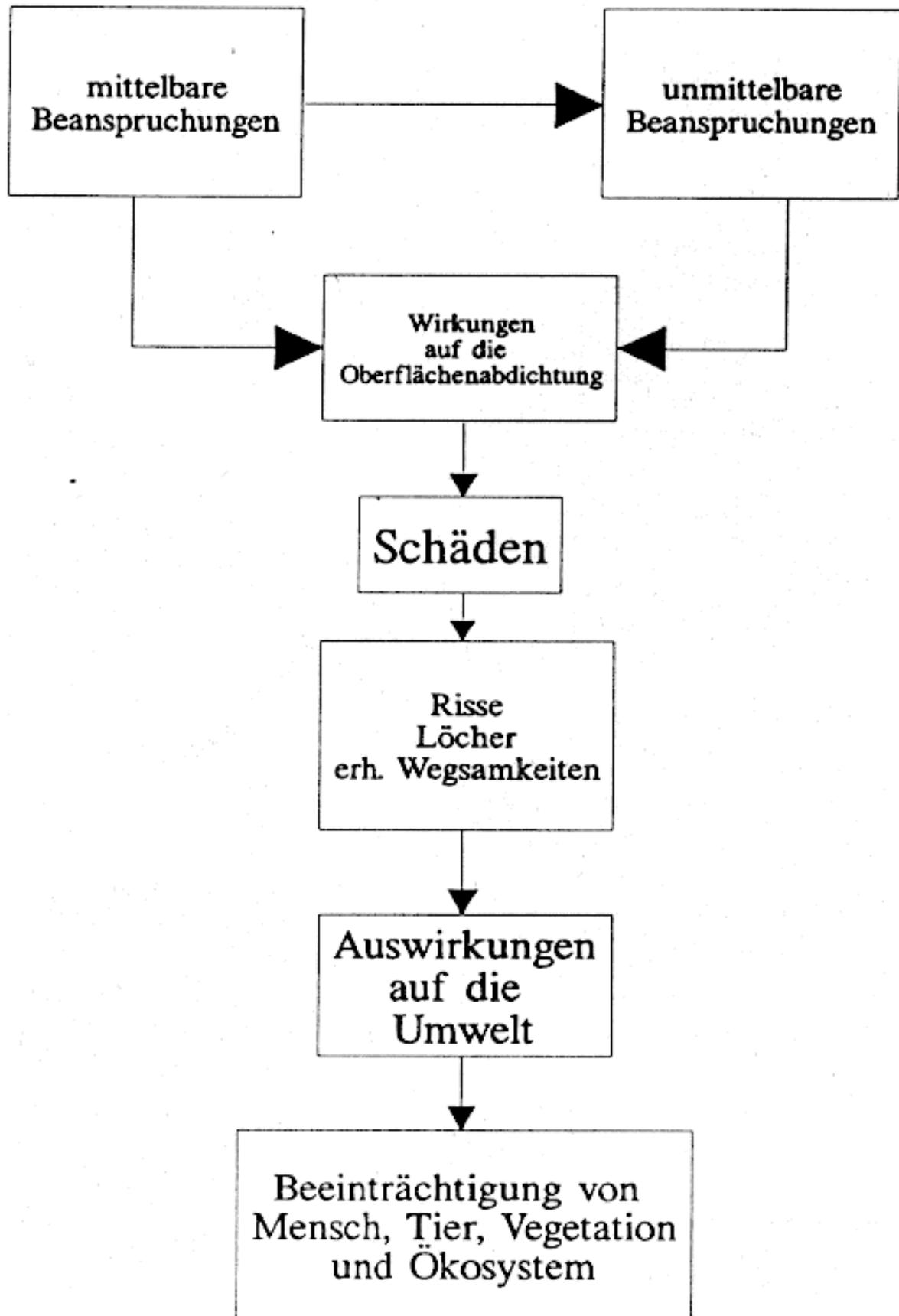


Abb. I- 3.1: Folgen von Beanspruchungen bei Oberflächenabdichtungen

Ursache	Dichtungsart	Folge	Mechanismen
Setzung/Sackung  kleinräumig  großräumig	mineralische Dichtung	Risse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Belastung auf Zug</li> <li>• Scherbelastung</li> <li>• Biegung (Überschreiten der zulässigen Krümmungsradien)</li> </ul>
	Kunststoffdichtung	Risse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Belastung auf Zug (Überdehnung, zweiachsig)</li> <li>• Verminderung der Langzeitfestigkeit</li> </ul>
	Kombinationsdichtung	Abrutschen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durch örtlich erhöhte Neigungen Überschreiten der zulässigen Reibungskräfte</li> </ul>
	Alle	Abgleiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Bildung eines Gleitkreises"</li> </ul>
Stabilität des Abfallkörpers	Alle	Gleitkreis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• äußere Standsicherheit</li> </ul>
	Alle	Setzung/ Sackung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorinduzierung durch ungenügende Verdichtung</li> </ul>
Einbaufehler Befahrung  hohe Temperaturen  tiefe Temperaturen	Alle	Risse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überschreiten von örtlichen Festigkeiten</li> <li>• Austrocknung</li> </ul>
	mineralische Dichtung	flächenhafte Undichtigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durch Längenausdehnung kann es zu Quetschaltenbildung kommen</li> <li>• Erhöhung der Elastizität</li> <li>• Bildung von Eislin sen</li> <li>• Frostgare beim Schweißen können zu große Spannungen im Material entstehen</li> </ul>
	Kunststoffdichtung	Risse	
	mineralische Dichtung	flächenhafte Undichtigkeiten	
Kunststoffdichtung	örtliche Undichtigkeiten		

Tab. I- 3.1: Ursachen, Folgen und Mechanismen von Beanspruchungen

Beanspruchung	Mechanismen
Erosion/Suffosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausspülen und Ausschwemmen von Dichtungsmaterial/ Feinstbestandteilen aus verschiedenen Dichtungsschichten</li> </ul>
Einbaufehler - Befahrung  - Durchstoßen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überschreiten örtlicher Festigkeiten durch Anfahren und Abbremsen</li> <li>• Scherbeanspruchung</li> <li>• vor allem Kunststofffolien werden durch scharfkantige Geräte beschädigt</li> </ul>
Organismen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erhöhte Durchlässigkeit durch Bildung von Sekundärporen bei mineralischen Materialien</li> <li>• Zerstörung von Kunststofffolien</li> </ul>
Stauwasserinhaltsstoffe	Schädigungsmechanismen wie bei Basisabdichtungen
Gas, Gasinhaltsstoffe, Kondensate, Niederschlagswasser	keine Angaben über Schädigungen in der vorliegenden Literatur
Austrocknen	durch Bildung von Rissen und Makroporen kommt es zu flächenhaften Undichtigkeiten

**Tab. I- 3.2: Direkt schädigende Beanspruchungen**

## 3.2 Mittelbare Beanspruchungen

### *Setzungen des Abfallkörpers*

Vorab sei gesagt, daß die absoluten Setzungen nicht die entscheidende Belastung für eine Oberflächenabdichtung darstellen, sondern die Setzungsunterschiede problematisch sind. Jedoch werden sich die Setzungsunterschiede, innerhalb bestimmter Grenzen, proportional zur absoluten Setzung verhalten, d.h. wo nur kleine absolute Setzungen auftreten, sind auch nur kleine Setzungsunterschiede zu erwarten und umgekehrt. Eine Angabe über einen "Proportionalitätsfaktor" der dies berücksichtigen würde, liegt in der ausgewerteten Literatur nicht vor. Forschungsarbeiten zu dieser Fragestellung sind jedoch in Bearbeitung [27], so daß die Prognosemodelle für absolute Setzungen hier auch einen gewissen Raum einnehmen sollen.

Die Ursachen für unregelmäßige Setzungen sind in Abb. I- 3.2 dargestellt.

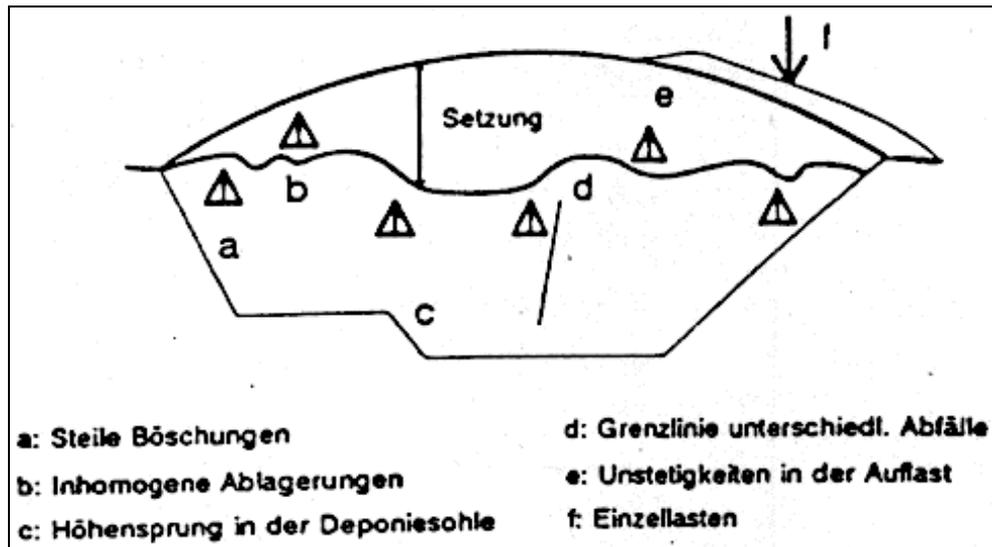


Abb. I- 3.2: Ursachen extremer Verformungskonturen an Deponieoberflächen [28]

Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, daß eine Abschätzung des Verhaltens von Abdichtungsmaterialien, aufgrund der unterschiedlichen Mechanismen, eigentlich nur nach vorhergehenden Feldmessungen möglich ist. Mit den Daten der Feldmessung wiederum ist es möglich, die Krümmung der Oberflächenabdichtung zu bestimmen [28].

Mit Hilfe der Geometrie eines Kreissegmentes und der allgemeinen Formeln hierzu, lassen sich die Längungen ansatzweise bestimmen.

Nun können für verschiedene Setzungsverläufe die notwendigen Parameter berechnet werden. SCHERBECK, 1992 [132] schlägt als Verläufe

- eine Sinusfunktion,
- eine rechnerische Setzungsmulde (bestehend aus einer Parabel 4. Ordnung mit einem Stich von 0,5 m Setzungsunterschied auf einer Einwirkungslänge von 5 m),
- eine Biegelinie aus der Balkentheorie
- und eine Biegelinie aus Modellversuchen

vor. Weiterhin wird auch hier auf eine Aufnahme von Vermessungspunkten hingewiesen, die dann ihrerseits die im Vermessungswesen üblichen Verfahren nach sich zieht.

Unterschiedliche Setzungen und Horizontalverschiebungen sind Folgen unterschiedlicher Volumenveränderung im Deponiekörper. Diese können auf unzureichende Einbautechniken und lokal unterschiedliche Abfallzusammensetzungen zurückzuführen sein [29].

Besonders kritisch werden die unterschiedlichen Setzungen bei Sanierungen von Altdeponien (Abb. I- 3.3).

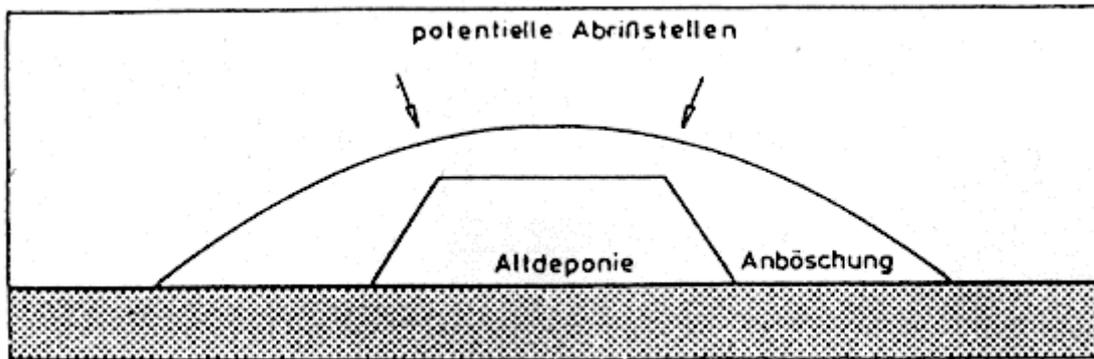


Abb. I- 3.3: Problemzonen bei der Sanierung von Altdeponien [30]

Die in Abb. I- 3.4 dargestellten Bermen liegen mit ihrem inneren Schenkel auf Müll auf, der über längere Zeiträume sein Volumen vermindert. Hierdurch kippen die einzelnen Bermen zur Deponiemitte hin ab und reißen im Bereich des Bermenfußes auf der Deponieseite auf.

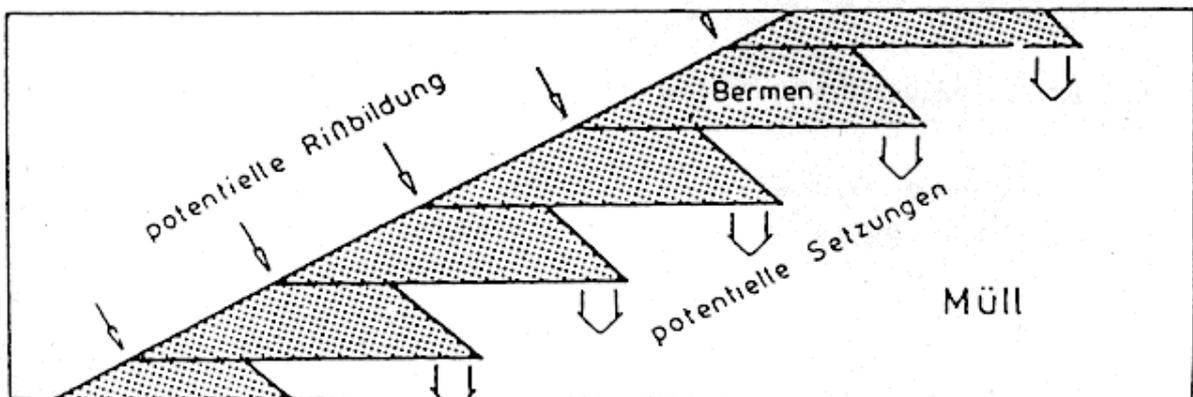


Abb. I- 3.4: Potentielle Bruchzonen im Bereich der Bermen von Deponien [30]

Abb. I- 3.5 verdeutlicht die Probleme bei Grubendeponien, die durchaus Tiefen bis zu 60 m (Deponie Grube Messel) aufweisen können. Die Gesamtsetzungsrate ist eine Funktion der zuvor beschriebenen Parameter und wird i.a. nach vorsichtigen Schätzungen zwischen 10 und 20 % der Ausgangshöhe betragen [31].

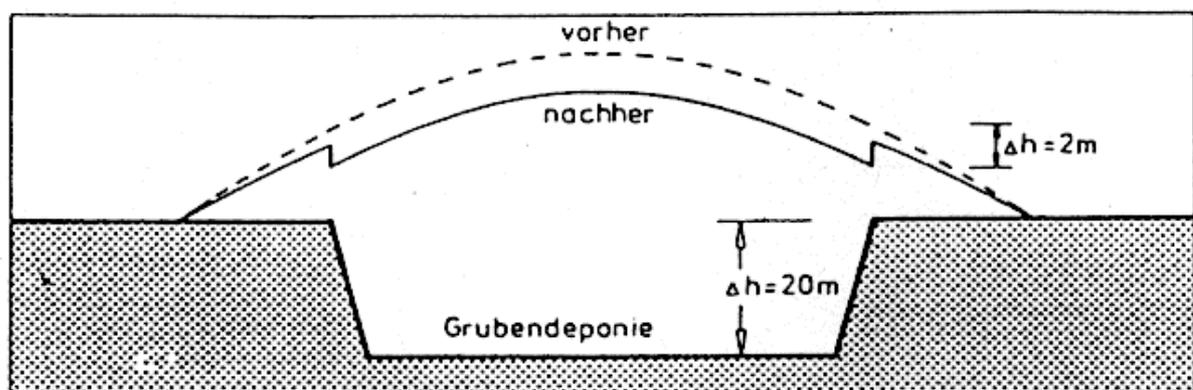


Abb. I- 3.5: Potentielle Rißbildung einer 20 m hohen Grubendeponie bei einer Gesamtsetzung von 10 % [30]

Im folgenden soll aus den oben angeführten Gründen, verstärkt auf die regelmäßigen Setzungen eingegangen werden.

Die Setzungen von Deponien sind in *zwei unterschiedliche Phasen* einzuteilen:

- Kurzzeitsetzung infolge von Verdichtung und Auflast
- Langzeitsetzung infolge von biologischem Abbau

Die beteiligten Vorgänge an der Setzung sind in Abb. I- 3.6 dargestellt.

Wobei hier Verformung, Verdichtung, Entwässerung und Einpressung der Kurzzeitsetzung zuzuordnen sind. Der biologische Abbau geht in die Langzeitsetzung ein.

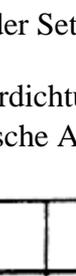
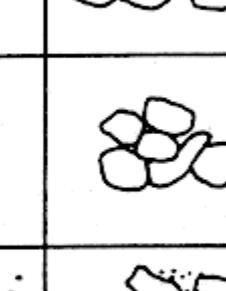
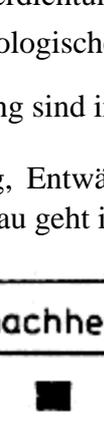
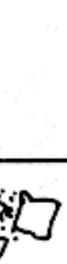
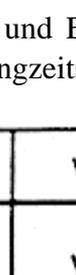
vorher	nachher	Vorgang
		Verformung
		Verdichtung
		Entwässerung
		Einpressung
		biol. Abbau

Abb. I- 3.6: Vorgänge bei der Setzung [31]

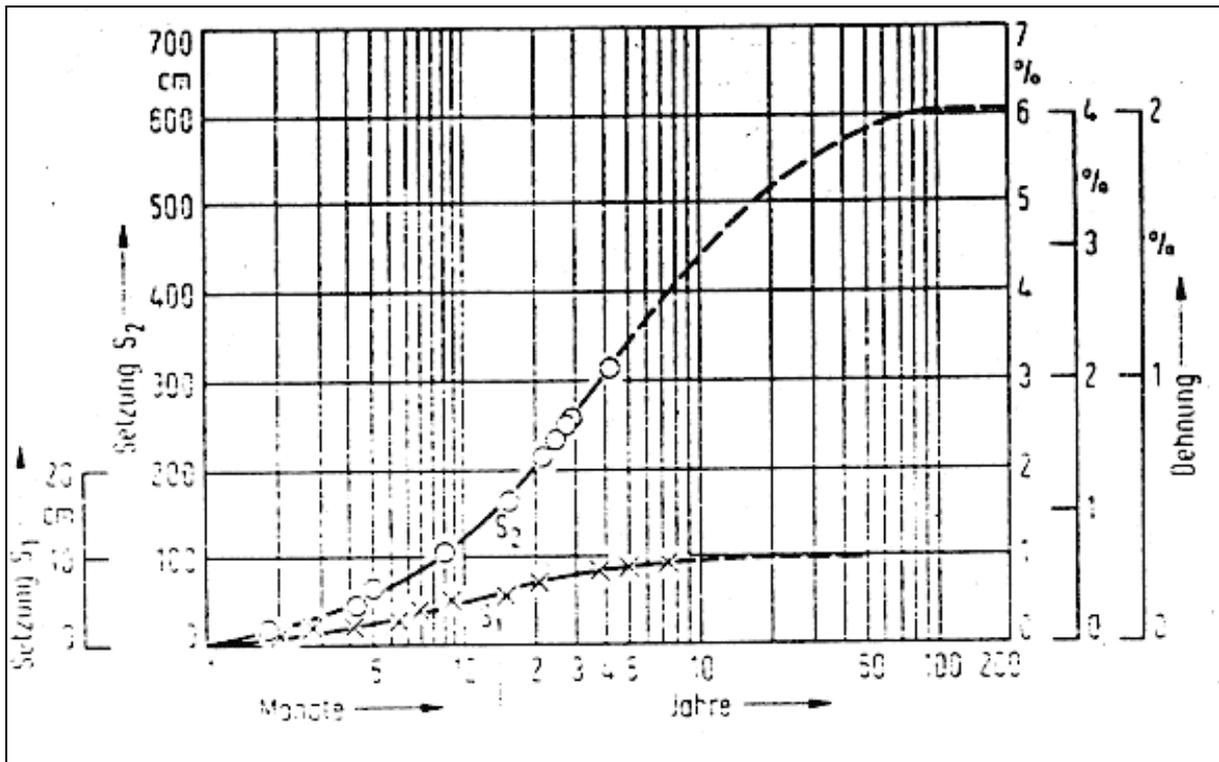


Abb. I- 3.7: Zeitsetzungskurven für ein Hochhaus (S1) und die Oberflächenabdeckung einer Deponie (S2), rechts Dehnungsmaßstäbe für Endabdeckungen von 2 - 6 % [32]

Während die Kurzzeitsetzungen durch Einbautechnik und Deponiegeometrie vor allem während des Deponiebetriebes dominant sind, verläuft die Langzeitsetzung entsprechend dem Zustand des Bioreaktors Deponie. Um die Auswirkung des Bioreaktors zu verdeutlichen, sei der zeitliche Setzungsverlauf für zwei sehr unterschiedliche Anwendungsfälle gezeigt (Abb. I-3.7). Kurve S1 ist die Zeitsetzungskurve eines Hochhauses, das auf einem vorbelasteten Ton des Mainzer Beckens errichtet wurde. Sie wurde im Verlauf von sieben Jahren gemessen und extrapoliert [32].

Die Zeitsetzungskurve S2 wurde bis zur Dauer von vier Jahren an der Oberfläche der bereits abgeschlossenen Deponie Hamburg Georgswerder gemessen und in gleicher Weise extrapoliert. Die angegebenen Setzungsbeträge beruhen überwiegend auf der Eigensetzung des rund 40 m hohen Deponiekörpers.

Allgemein kann gesagt werden, daß **Setzungen** im Deponiekörper *eine Folge*

- betrieblicher,
- zeitlicher,
- geometrischer und
- milieubedingter Parameter sind [33].

Die sich gegenseitig *überlagernden Mechanismen* sind:

- elastische Verformungen infolge Auflast,
- plastische Verformungen infolge Auflast und infolge von Kriechvorgängen,
- Substanzverlust infolge von Abbau- und Auslaugvorgängen.

Die genannten Mechanismen wirken unterschiedlich, je nach dem Einfluß der anfangs genannten Parameter und nach der Art der Abfallzusammensetzung.

Systematische Untersuchungen liegen über den Zusammenhang von Abfallbeschaffenheit (Einbautechnik) und Auflast vor. Nach JÄGER ET AL., 1984 [34] zeigen Laborversuche, daß die Dichte des Abfalls in Abhängigkeit von seiner Vorbehandlung sich einem asymptotischen Grenzwert nähert. Dieser Grenzwert liegt für zerkleinerten Abfall bei ca. 1,0 und für unzerkleinerten bei ca. 0,75 Mg/m<sup>3</sup>.

Bestätigt wurden diese Ergebnisse in [35], wo die Einbaudichte durch verschiedene Verdichter als Funktion der Überfahrhäufigkeit festgehalten wurde.

Allerdings wurde hier durch den Einsatz eines 36 Mg schweren Verdichters eine Einbaudichte von über 1,2 Mg/m<sup>3</sup> erreicht.

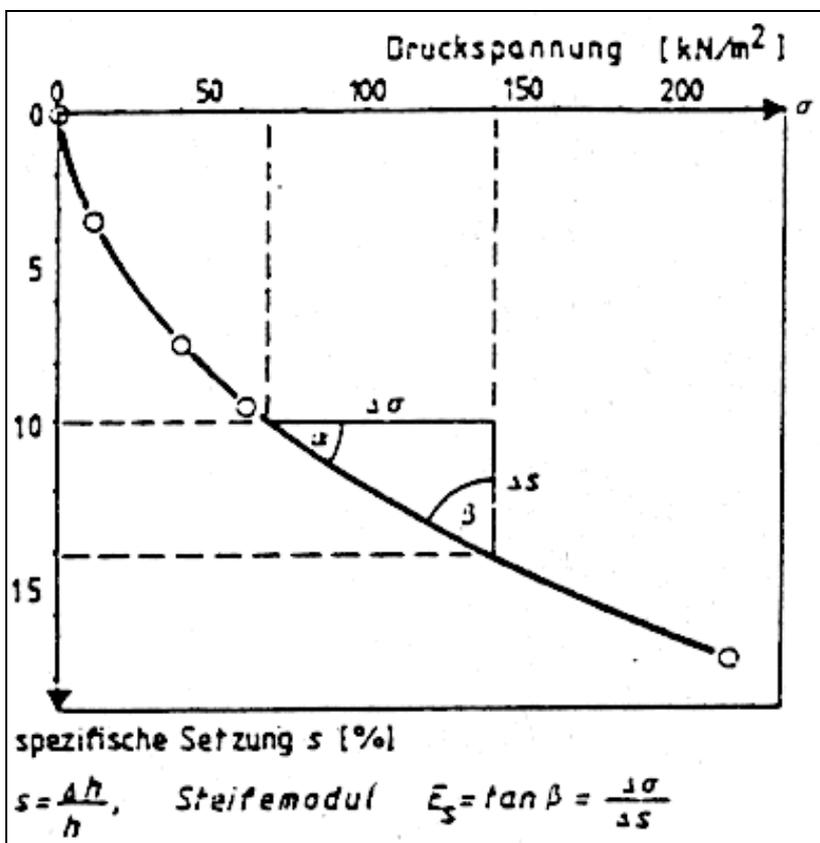


Abb. I- 3.8: Druck-Setzungsdiagramm der Deponie Halver [36]

Dieser Zusammenhang konnte durch Messungen an Betriebsdeponien bestätigt werden. Abb. I- 3.8 zeigt die mittlere Setzung einer 15 m mächtigen Müllschicht infolge einer Müllauflast von bis zu 20 m.

Der Zusammenhang zwischen Einbautechnik (Einbaudichte) und der jeweiligen Setzung infolge Auflast geht aus der Abb. I- 3.9 hervor.

Die Abbildung veranschaulicht, daß die größte Setzung (kleinstes Steifemodul) bei den Deponien mit der geringsten Einbaudichte der Abfälle stattfindet.

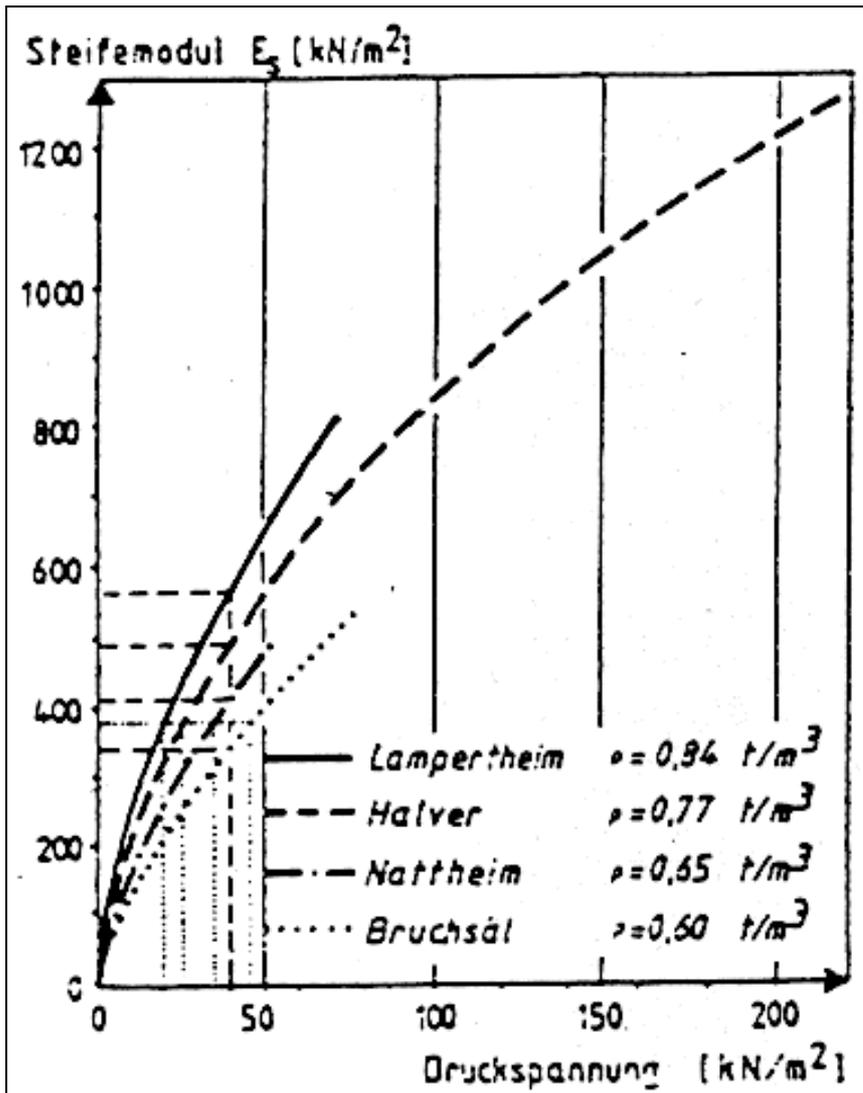


Abb. I- 3.9: Steifemodul als Funktion der Druckspannung bei verschiedenen Deponietypen [36]

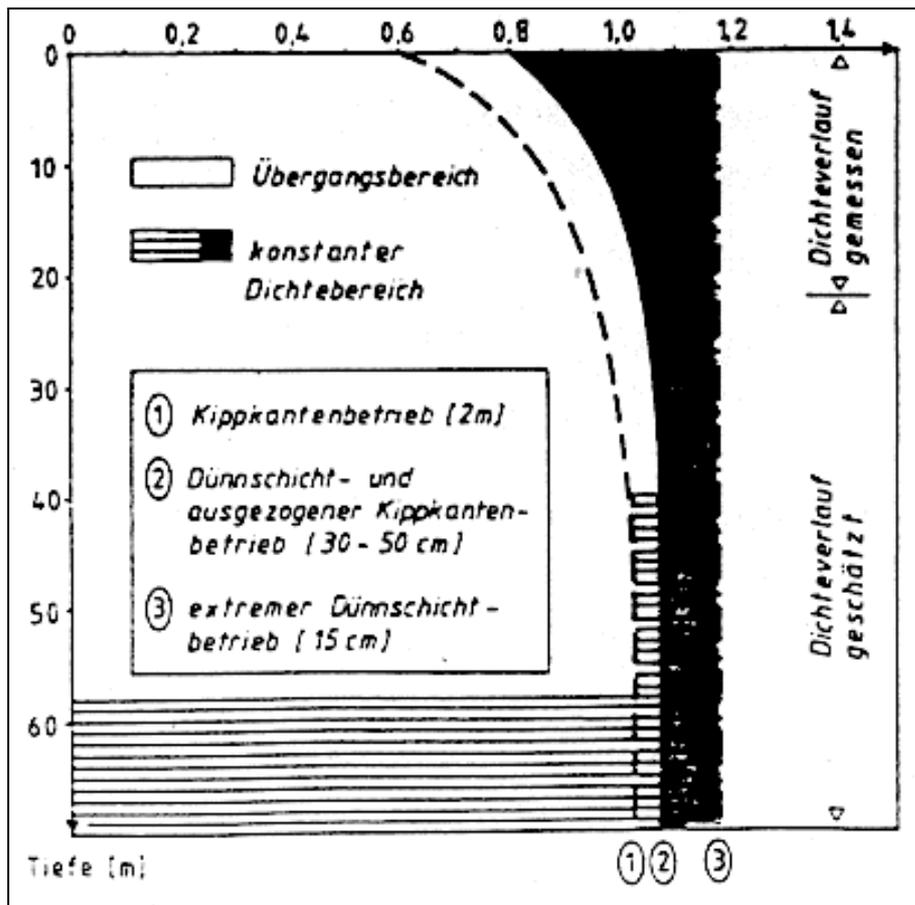


Abb. I- 3.10: Ablagerungsdichte in Abhängigkeit von der Deponietiefe [35]

Die Abb. I- 3.10 zeigt gleichbleibende Dichte über die Tiefe der Deponie bei extremem Dünnschichtbetrieb. Das heißt, daß die Maximaldichte (asymptotischer Bereich) bereits beim Einbau erzielt wurde und zusätzliche Auflasten keine zusätzlichen Setzungen mehr hervor-rufen.

Um das absolute Maß der Setzung vorhersagen zu können, ist es nötig, verschiedene Parameter zu kennen, z.B.: Alter der Ablagerung, Art der Abfälle, absolute Höhe der Abfälle, zeitlicher Verlauf des Deponieaufbaus etc.

Im folgenden sollen kurz Methoden zur Setzungsvorhersage beschrieben werden. Neben diesen "Methoden" gibt es auch generelle Angaben, die allerdings nur die Größenordnung vor Augen führen können. Diese Schätzungen bewegen sich zwischen 10 und 25 % der Ausgangshöhe.

Die wichtigste Einflußgröße auf die Setzung ist der organische Abbau durch mikrobielle Umwandlung von organischem Material zu  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$ . Die dabei entstehende Volumenreduktion kann zu Setzungen bis zu 25 % der Deponiehöhe führen.

Wiemer [31] hat die größten Setzungen an einer 15 Meter hohen Deponie gemessen. Sie betrug im Mittel 1.4 Meter innerhalb eines Jahres.

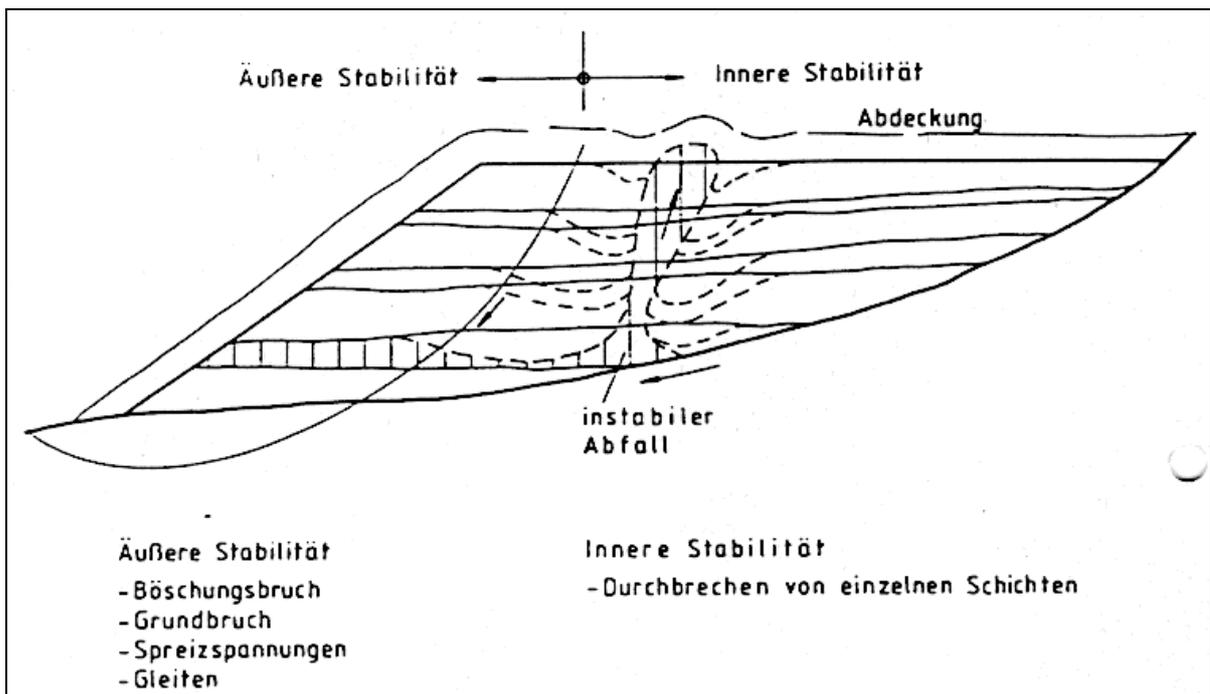
Die Methoden zur Setzungsprognose unterscheiden sich prinzipiell. Neben der Messung eines absoluten Setzungsmaßes nach WIEMER, 1982 [40] können Setzungen mittels einer Zeitrei-

henanalyse [31] entwickelt werden oder auch analog zur Gasproduktion [39] prognostiziert werden.

### **Stabilität des Abfallkörpers**

Die Probleme der inneren Stabilität lassen sich mit den herkömmlichen erdstatischen Ansätzen nicht lösen [44]. Geregelt sind hingegen die Nachweise der äußeren Stabilität, auf die hier aber nur am Rande eingegangen werden soll.

In Abb. I- 3.11 sind die zu untersuchenden Nachweise für die innere und äußere Stabilität eingezeichnet.



**Abb. I- 3.11: Schema der inneren und äußeren Stabilität [44]**

Hervorzuheben sind hier die Nachweise, die sich mit einer nachträglichen Oberflächenabdichtung ändern können. Diese wären der Böschungsbruch und der Nachweis auf Gleiten. Hier geht die Oberflächenabdichtung durch ihr Gewicht und veränderte Reibungsverhältnisse ein. Die hangabwärts gerichteten Kräfte werden durch den Neigungswinkel und das Eigengewicht bestimmt. Nimmt also das Eigengewicht bei gleichem Neigungswinkel zu, werden die angesprochenen Sicherheiten kleiner.

Die Veränderung der Abfallparameter durch die Oberflächenabdichtung kann auch eine Veränderung des Gleitkreises nach sich ziehen. Da die Dichtung ein Austrocknen des Abfallkörpers zumindest vorübergehend bewirkt, können hierdurch die Kohäsion und der Reibungswinkel verändert werden, wie aus Tab. I- 3.3 durch Gegenüberstellung von Anfangs- und Endwerten ersichtlich ist. Mit Hilfe der angegebenen Parameter lassen sich die Sicherheiten nach der Fellenius-Regel oder nach dem Lamellenverfahren bestimmen. Bei allen Verfahren werden die haltenden Kräfte durch die treibenden Kräfte gebrochen und der Quotient als Sicherheit angegeben.

Sofern nicht eingehende Untersuchungsergebnisse an vergleichbaren Abfällen vorliegen, die auch die zeitliche Festigkeitsveränderung umfassen müssen, kann von den Berechnungsparametern [44] in Tab. I- I- 3.3 ausgegangen werden.

Unbehandelt meint unsortierten, unzerkleinerten und nicht vorgerotteten frischen Hausmüll. Vorbehandelt heißt sortiert, zerkleinert und gerottet. Die Werte hängen jedoch sehr entscheidend von der Materialzusammensetzung der abgelagerten Abfälle ab.

Parameter	Unbehandelt Anfangswerte	Unbehandelt Endwerte	Vorbehandelt Endwerte
$\phi$ [°]	30	25	20
c [kN/m <sup>2</sup> ]	20	0	0
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	10	15	15

**Tab. I- 3.3: Festigkeitsparameter von unbehandeltem und vorbehandeltem Abfall in Anfangs- und Endwerten [44]**

Eine Zusammenstellung verschiedener Angaben liegt in [45] für **Scherparameter und Dichte** von **Hausmüll** vor (s. Tab. I- 3.4).

$\phi$ [°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Materialbeschreibung bzw Versuchsanordnung
17,5	7,5	10	Empfehlung für Haus und Gewerbemüll mit Klärschlammanteilen
15 - 17	10	-	Empfehlungen nach Rückrechnung der Scherparameter aus Beobachtung der Eindringtiefe von Radladerrädern auf einer Rotteponie
30 - 40	0	8 - 12	Schätzungen aufgrund v. Beobachtungen auf bestehenden Deponien
26,5	28	8 - 11	Frishmüll und Sickerwasser
18	21	13	Triaxialversuche
19 - 24	16 - 32	-	Empfohlene Rechnungswerte
38	7	-	Hausmüll, sonst keine Angaben

**Tab. I- 3.4: Zusammenstellung von Scherparametern und Dichte für Hausmüll [45]**

Zu erkennen ist die relativ große Streubreite der Werte, die sicher damit in Verbindung steht, daß folgende maßgebende Einflußfaktoren nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt und mit der Angabe von Scherparametern zusammen vorgelegt werden:

- Abfallart und -zusammensetzung
- organisch/anorganischer Gehalt
- Wassergehalt
- Korngrößenverteilung
- Einbaudichte

Weitere Angaben zu Festigkeitsparametern, die die äußere Standsicherheit betreffen, finden sich in [46].

Von besonderer Bedeutung ist jedoch, daß die Zusammensetzung, z.B. von Hausmüll, eine innere Struktur der Abfallstoffe ergibt, die von der inneren Struktur der Bodenmaterialien erheblich abweicht.

## 4. Spezifische Reaktionen der Bestandteile einer Kombinationsdichtung

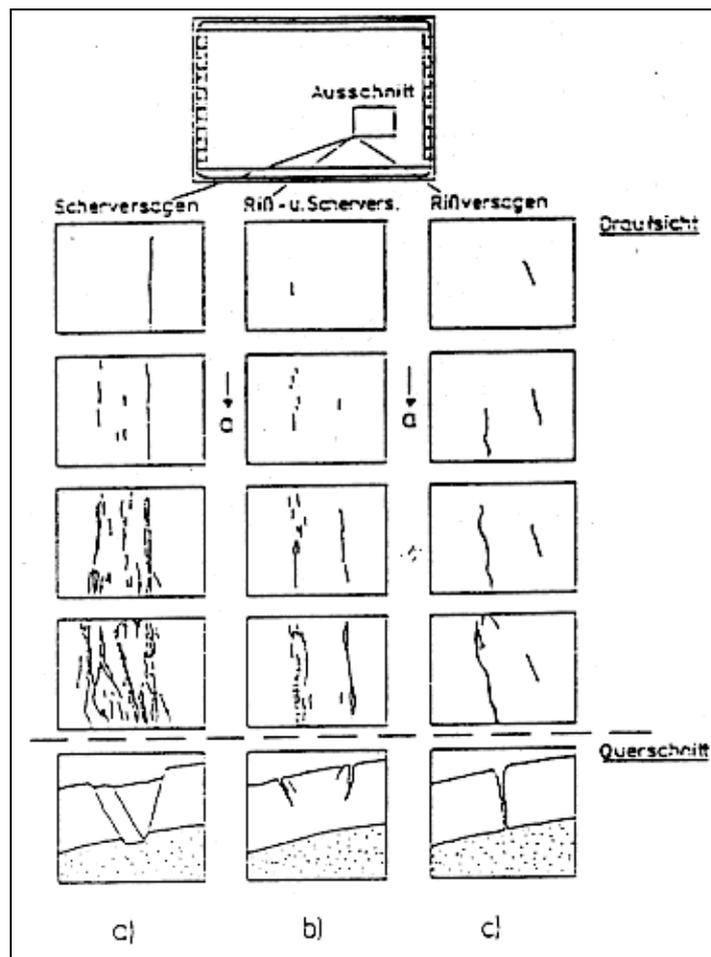
### 4.1 Mineralische Oberflächenabdichtung

#### 4.1.1 Reaktionen auf die Belastungen

##### *Setzungen und Sackungen*

Bei den Belastungen nimmt für die mineralische Oberflächenabdichtung die Setzung bzw. Sackung im Abfallkörper eine Schlüsselstellung ein. Diese Belastung wirkt sich auf die Abdichtung zum einen durch Biegung und zum anderen durch Abscheren aus.

In [132] konnten die nachfolgend beschriebenen **Versagensformen** in erster Linie im konvex gekrümmten Bereich beobachtet werden.



**Abb. I- 4.1: Beobachtete Versagensformen unbelasteter, bindiger Abdichtungsschichten im Grundriß und Querschnitt**

a.) Scherversagen, b.) kombiniertes Reiß- und Scherversagen, c.) Reißversagen [132]

Der Pfeil mit der Bezeichnung "a" in Abb. I- 4.1 meint eine zunehmende, künstlich erzeugte, Absenkung in einem Modellversuch. Die unterschiedlichen Versagensformen resultieren in erster Linie aus verschiedenen zur Anwendung gelangten Materialien. So ist Reiß- und Scherversagen charakteristisch für unbelastete, steife Abdichtungen (Abb. I- 4.1 b). Bindiges Material reagiert mit der Entwicklung von Scherfugen (4.1 a) und klaffenden Rissen (4.1 c) in Abhängigkeit der Einflußfaktoren Materialart und Konsistenz, sowie Betrag der Auflast.

Aufgrund der Messungen kann für den Schädigungsbereich die maßgebende Zerrung in der oberen Randfaser ( $e_{RF}$ ) in Abhängigkeit der Absenkkoordinate a und der Schichtstärke d angegeben werden:

$$e_{RF} = 0,0075 * a^2 - 0,04 * a * d$$

#### **Gl. 4.1: Maßgebende Zerrung in der oberen Randfaser**

In den Versuchen stiegen bei einem Reißversagen die Durchlässigkeiten schnell an und waren meßtechnisch dann nicht mehr erfaßbar. Festhalten läßt sich jedoch, daß bis zu einem Versagen der Dichtung eine Erhöhung der Durchlässigkeit um bis zu 100% festgestellt wurde (z.B. von  $0,38 * 10^{-9} \text{m/s}$  auf  $0,74 * 10^{-9} \text{m/s}$  bei einer Absenkung von 1,18 m).

Krümmungsradien von  $R = 200 \text{ m}$  konnten von mittelplastischen Tonen steifer Konsistenz ohne Auflast ohne Ausbildung erkennbarer Oberflächenrisse aufgenommen werden. Die Randfaserdehnungen bei Rißeintritt lagen zwischen 0,5 % und 3,5 % bei Schichtdicken von 1 m bis 2,50 m [37].

Die Scherfestigkeit wird in [134] in Abhängigkeit des Tongehaltes quantitativ erfaßt und mathematisch ausgedrückt.

$$\phi = e^{2,4789 - 0,0018 (TG-25)^2} + 10,2$$

TG: Tongehalt

$\phi$ : Reibungswinkel

#### **Gl. 4.2: Scherfestigkeit in Abhängigkeit vom Tongehalt**

##### ***Erosion und Suffosion***

Im Gegensatz zur Erosion, bei der sämtliche Kornfraktionen bei Durchströmung abgetragen werden [72], versteht man unter dem Begriff der Suffosion das Ausspülen der feinkörnigen Bestandteile. Dabei bleibt ein grobkörniges Korngerüst erhalten (Abb. I- 4.2).

Suffosionsgefahr besteht bei nicht ausreichend filterstabilem Kornaufbau (z.B. gleichförmige Sande mit Tonbeimengungen) und tritt bei hohen Gradienten auf. Während der Suffosion können kleinere Porenräume verstopft werden. Dieser Vorgang wird dann als Kolmation bezeichnet.

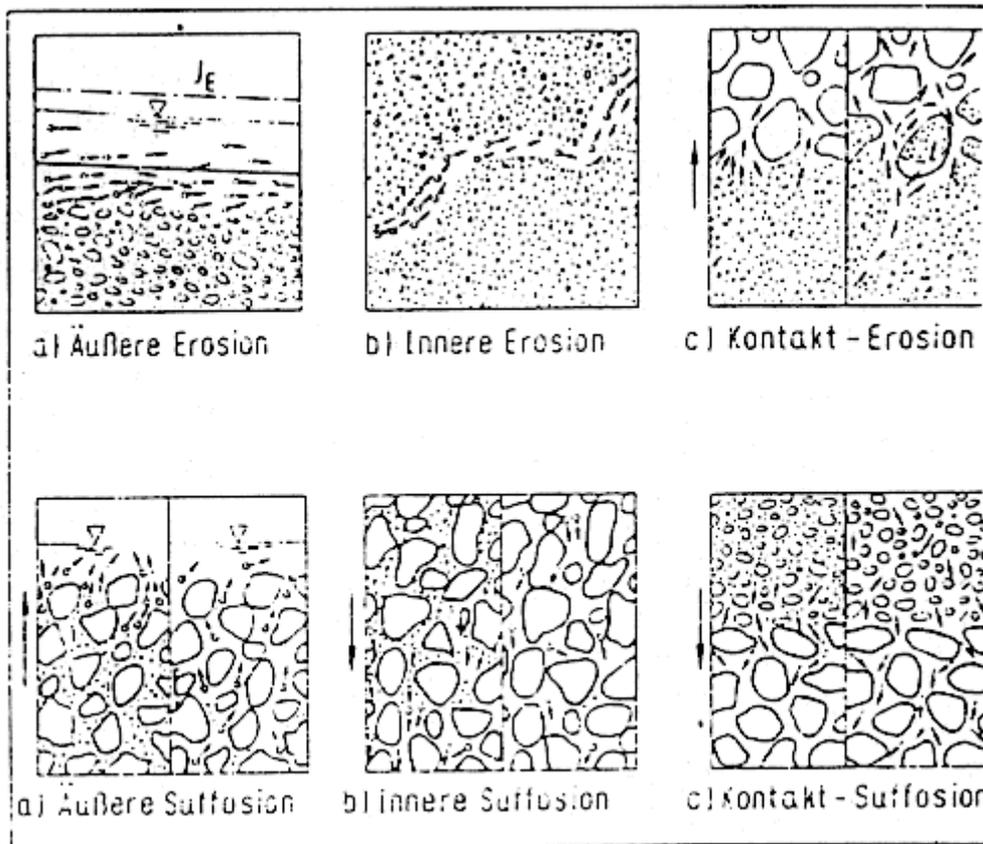


Abb. I- 4.2: Zur Definition von Erosion und Suffosion [72]

Bei bindigen Böden sind neben einem groben Filter hohe Gradienten notwendig, um Erosionen auszulösen [74]. Einflußfaktoren sind Zugfestigkeit (Kohäsion), Größe der Filterporen und die Strömungskraft.

Die dreiaxiale Zugfestigkeit ist zur Zeit mit bodenmechanischen Laborversuchen nicht zu ermitteln. Der Reibungswinkel hat nur einen sehr geringen Einfluß auf die Erosionssicherheit.

Die momentane Sicherheit gegen Erosion und Suffosion läßt sich mit einer gewissen Spannweite rechnerisch gut abschätzen [74]. Die dieser Studie zugrunde liegenden Versuche beschäftigen sich lediglich mit demineralisiertem Wasser. Diese Näherung scheint für Oberflächenabdichtungen im Gegensatz zu Basisabdichtungen zulässig.

Detaillierter soll auf diese Vorgängen in den Kapiteln Deckssubstrat (4.4) und Dränageschichten (4.5) eingegangen werden, da hier wohl die größte Beanspruchung hinsichtlich Erosion und Suffosion gegeben scheint.

### ***Mechanische Beanspruchungen***

Mechanische Beanspruchungen, wie Befahrung oder scharfkantige Geräte, stellen im allgemeinen kein direktes Problem für eine mineralische Dichtung dar. Falls der Boden aber aufgeweicht ist, aufgrund eines Starkregens beispielsweise, führt dies zu Konsistenzänderungen und somit zu einer erschwerten Bearbeitung. Bei Böden mit größerer Plastizität ist diese Gefahr ausgeprägter. Generell ist es aber so, daß bei mineralischen Dichtungsschichten das Was-

seraufnahme- und -ableitvermögen während eines Niederschlagsereignisses geringer ist als die Wassernachlieferung [135].

### ***Pflanzenwurzeln und Tiere***

In einer hinreichend verdichteten Dichtungsschicht ist aufgrund der geringen Wasserleitfähigkeit kurzfristig nicht mit einem starken Auftreten von Pflanzenwurzeln und Tieren zu rechnen. Bei einem hohen organischen Anteil in der Dichtungsschicht kann es aber schon zu einer Durchlebung kommen (s. Kap 4.4).

### ***Einbaufehler***

#### **\* Frosteinwirkung**

Frosteinwirkungen sollen hier als Einbaufehler behandelt werden, da es möglich ist unter Berücksichtigung folgender Punkte, negative Auswirkungen zu vermeiden:

- Einbauzeitpunkt
- Dicke des Deckssubstrates
- Dränung

Das Bodenwasser gefriert bei um so tieferen Temperaturen, je geringer der Wassergehalt ist, je kleiner also die noch wassergefüllten Poren sind und je größer die Wasserspannung ist. Bei gleichem Wassergehalt beginnen feinkörnige Böden später zu gefrieren als grobkörnige.

Der Temperaturgradient bewirkt bei Frost eine Wärmebewegung aus dem Boden an dessen Oberfläche, was eine Bildung der Eiskristalle im Boden ermöglicht. Ausgeprägtes Kristallwachstum und damit die Bildung von Eislinsen treten dort auf, wo plötzlich grobe Poren über einem feinporigen Untergrund auftreten (z.B. Kies über Schluff), wie dies zum Beispiel in der Wasserdrainschicht oberhalb der Dichtungsschicht der Fall ist. In homogenen grobkörnigen Böden ist mit einem Auffrieren nicht zu rechnen, weil die Wasserleitfähigkeit im ungesättigten Zustand gering ist. Feinkörnige Böden können die Ausbildung von Eislinsen ermöglichen, wenn die Temperatur so niedrig ist, daß sie das fest gebundene Porenwasser zum Gefrieren bringt [135].

Generell läßt sich jedoch festhalten, daß Eislinsenbildung und Frosthebung eine Veränderung der Durchlässigkeit um mehrere Zehnerpotenzen bewirken können und in unseren Breiten mit einer Eindringtiefe des Frostes von bis zu 120 cm zu rechnen ist.

Nach den Frostkriterien liegen die natürlichen und vergüteten Böden im Bereich der frostgefährdeten Böden. Ist kein genügender Schutz vorhanden, kann es unter Frosteinwirkung zur Bildung von Eislinsen und damit unter anderem zu örtlichen Austrocknungen und Schrumpfungen kommen. Die Bildung von Eislinsen führt zu einem Wassertransport von der ungefrorenen zur gefrorenen Zone. Ungeklärt ist bisher, in welchem Ausmaß im Porenwasser gelöste Stoffe, beispielsweise Schadstoffe aus einem Deponiekörper, hierbei mit transportiert werden [75].

Versuche [75] haben gezeigt, daß der Frost, konstante physikalische Randbedingungen vorausgesetzt, bei den unterschiedlichen Tonen völlig unterschiedliche Froststrukturen hervorbringt.

Beim Kaolinit bilden sich fast ausschließlich horizontale Eislinsen. Die Frosthebung ist erheblich. Eislinsen bilden sich ebenfalls bei Calcigel und Montigel. Allerdings finden sich hier vermehrt vertikale, schrumpfrißähnliche Strukturen. Je quellfähiger ein Ton ist, um so mehr vertikale Eisrisse bilden sich. Nach dem Abtauen blieben die Froststrukturen nur beim Calcigel und Montigel, den beiden Ca-Montmorilloniten, erhalten.

\* Gerätetechnik und Dichtungsaufbau

Treppenförmiger Einbau wie in Variante A der Abb. I- 4.3 dargestellt, ist kein eigentlicher Einbaufehler, sondern birgt die prinzipielle Gefahr einer zusätzlichen Teilchen- und k-Anisotropie [76] in sich.

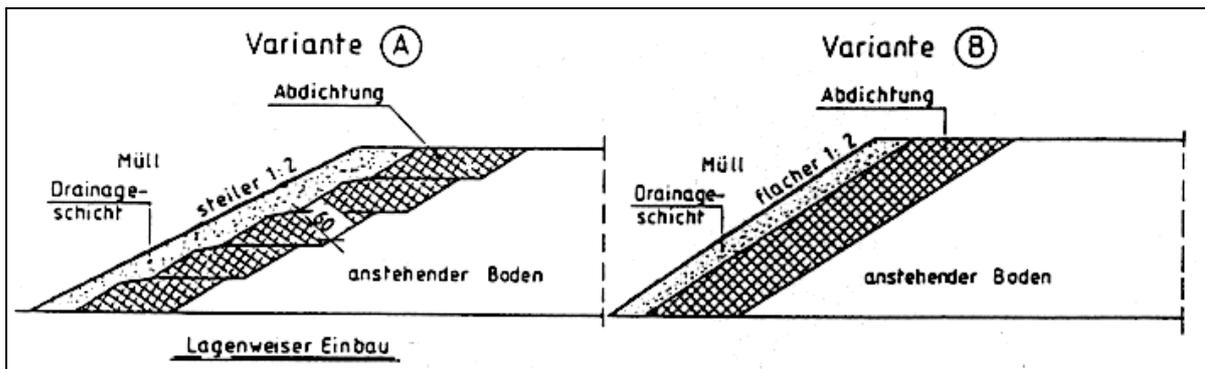


Abb. I- 4.3: Dichtungsaufbau an Böschungen [77]

Durch lichtmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Gefügeuntersuchungen [78] wird diese Annahme gestützt. Es bilden sich linsenförmige Inhomogenitätsbereiche mit entsprechend unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeitseigenschaften.

In Kombination mit senkrechter Rißbildung, z.B. Trockenrisse infolge unzureichender Schutzmaßnahmen, können die oben geschilderten Verhältnisse zu einer starken Beeinträchtigung des Dichtungskörpers führen (Abb. I- 4.4.).

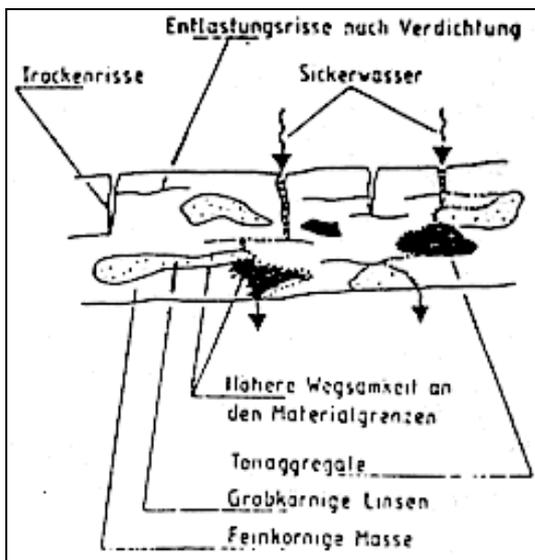


Abb. I- 4.4: Erhöhte Wegsamkeiten bei mineralischen Dichtungen [76]

### ***Austrocknung***

Austrocknungen mit Rißbildung entstehen bei der Herstellung der mineralischen Dichtungsschicht, insbesondere bei Sonneneinstrahlung und trockener Witterung [72]. Sie sind insofern problematisch, da sie, neben einer Versprödung hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften im Trockenbereich, vor allem den Preßverbund innerhalb einer Kombinationsdichtung aufheben.

In der Literatur, z.B.[106], ist von Rissen im Zentimeterbereich die Rede, wobei jedoch eine klare Aufstellung der Beziehungen, die zu diesem Versagen führen, nicht gemacht werden können.

Bei Untersuchungen [72] zum Feuchtigkeitstransport in mineralischen Dichtmassen im Zusammenhang mit der Austrocknungsgefahr und der damit verbundenen Rißgefahr bei Basisabdichtungen, werden weitere Zusammenhänge aufgezeigt. Infolge Schwerkrafteinwirkung und Temperaturgradient entsteht bei der Kombinationsdichtung in der mineralischen Dichtungsschicht ein Feuchtigkeitstransport von oben nach unten. Diesem Feuchtetransport wirkt die Saugspannung der mineralischen Dichtschicht entgegen. Die mineralische Dichtschicht trocknet jedoch für den Fall aus, daß Wasserzutritt infolge Niederschlag und Verdunstung, etwa durch eine Dichtungsbahn, unterbunden wird. Diesen Überlegungen soll im Kapitel Kombinationsdichtung (4.6) für Oberflächenabdichtungen weiter nachgegangen werden.

Risse infolge Austrocknung können sich ohne größere Auflast nicht schließen. Dieser Fall ist bei neueren Oberflächenabdichtungen aufgrund der nötigen Volumeneinsparung gegeben,.

Zur allgemeinen Berechnung steht das Prinzip des Potentialkonzeptes zur Verfügung, um konkret auf eine Wasserbewegung zu schließen. Speziell für die Austrocknung ist die Evaporation aufgrund von Sonneneinstrahlung der Hauptfaktor. Damit allerdings würde die Austrocknung in den Bereich der Einbaufehler gehören.

Dies stimmt jedoch nicht, da an ausgeführten (s. Kap. 4.1.2) Oberflächenabdichtungen Beobachtungen gemacht wurden, die sich lediglich durch Austrocknung erklären lassen.

## **4.1.2 Erfahrungen an ausgeführten Maßnahmen und Versuchsergebnisse**

### ***Einfache bindige mineralische Dichtung***

An der Deponie Georgswerder kam eine einfache bindige mineralische Dichtung, bestehend aus drei Lagen à 20 cm verdichtet eingebauten Geschiebemergels, zum Einsatz (s. Abb. I-4.5). Die Zusammensetzung des bindigen Materials ist in [502] beschrieben. Der Mergel ist demnach schwach bindig, leicht plastisch und von steifer Konsistenz.

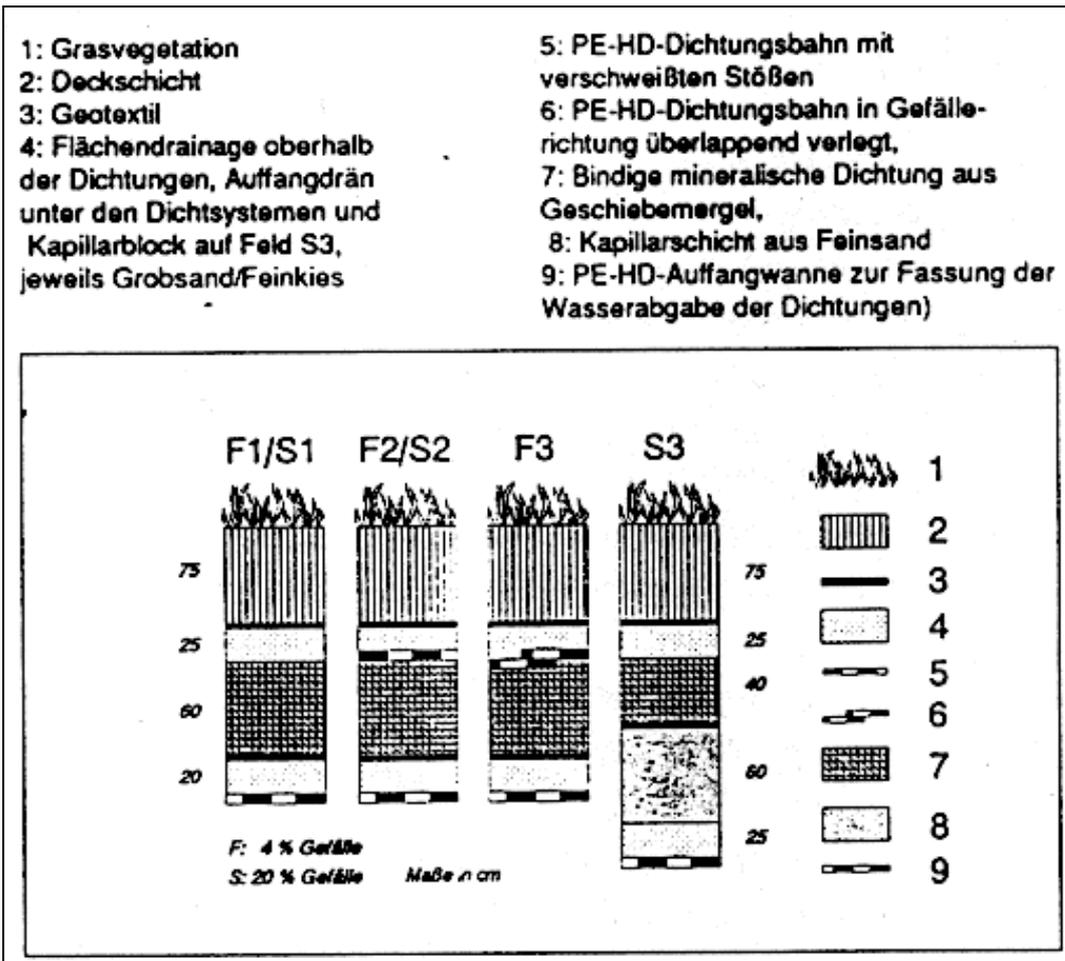


Abb. I- 4.5: Aufbau der Testfelder auf der Deponie Georgswerder [79]

Die Wirksamkeit der in den Testfeldern S1 und F1 untersuchten Geschiebemergeldichtungen hat mit der Zeit deutlich abgenommen. In Tab. I- I- 4.1 sind die zeitlichen Veränderungen der Auffangmenge von 1988 bis 1990 getrennt nach den Feldern F1 und S1 dargestellt.

Feld	S1	F1
1988	1,9	3,2
1989	6,9	8,0
1990	13,4	17,5

Tab. I- 4.1: Auffangmengen [mm] der mineralischen Dichtung auf der Deponie Georgswerder für die Testfelder S1 und F1, Daten aus [79]

Neben diesen steigenden Durchsickerungsraten hat sich auch das Abflußverhalten verändert. Bis August 1989 zeigten die Abflüsse unter den Dichtungen keinerlei Reaktion auf hohe Abflußintensitäten in den Flächendrainagen oberhalb der Dichtungen. Seit August 1989 schnell nun in Zeiten hoher Absickerung aus dem Decksubstrat und folglich hoher Abflüsse in der Flächendrainage auch die Abflußbildung unter den Dichtungen praktisch ohne Zeitverzug hoch. Dies zeigt, daß neben der zu erwartenden langsamen Sickerwasserbewegung auch eine

schnelle Wasserbewegung entlang grober Wasserleitbahnen (Makroporen) auftritt. Dieser Befund wird durch einen Tracerversuch eindeutig bestätigt.

*Auf den Testfeldern F1 und S1 begrenzt die schnelle Wasserabführung in der Drainschicht die Zeit möglicher Infiltration in die Dichtungen, so daß weniger Wasser durch die Geschiebemergel-Dichtung fließt, als diese zulassen würde. Nur aufgrund des höheren Gefälles und der daher schnelleren Drainage des Wassers sickert auf Feld S1 im Jahresverlauf weniger Wasser durch die Dichtungen als auf Feld F1.*

*Die Abnahme der Wirksamkeit der Geschiebemergeldichtung hat zwei Ursachen: Mängel beim Einbau und austrocknungsbedingte Schrumpfung. Die Mängel beim Einbau wurden durch Aufgrabungen der oberen Abdeckung außerhalb der Testfelder offenbar. Obwohl die Dichtung hier von einer PE-HD-Bahn bedeckt ist, wurden in rund einem Drittel der beprobten Dichtungslagen Gefügebildungen, Schrumpfrisse und Kluftflächen zwischen den einzelnen Mergellagen festgestellt. Die Bauablaufsteuerung und eingesetzte Einbautechnik waren offensichtlich unter diesen Bedingungen entweder nicht in der Lage das stückig angelieferte Material hinreichend zu zerkleinern und zu homogenisieren oder eine neue Gefügebildung im Zuge des Einbaus zu verhindern oder nachträglich wieder zu beseitigen [79].*

Die in den Dichtungen gemessenen Wassergehalte und Wasserspannungen zeigen diese Austrocknung eindeutig. Es treten starke aufwärtsgerichtete Gradienten für die Wasserbewegung auf. Aufgrund der sommerlichen Austrocknung von Deckssubstrat und Flächendrainage wurde den Dichtungen offensichtlich kapillar Wasser entzogen. Verdeutlicht werden diese Annahmen durch Abb. I- 4.6. Hier sind verschiedene Zeitreihen im Zeitraum von Anfang 1988 bis August 1992 dargestellt. Festzustellen ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Dichtungsdurchsickerung und dem Abfluß in der Drainage über der Dichtung. In [136] werden weiterhin die Tensiometerwerte als direktes Maß für die Austrocknung genommen, woraus sich schließen läßt, daß die Dichtung im Sommer von oben nach unten austrocknet.

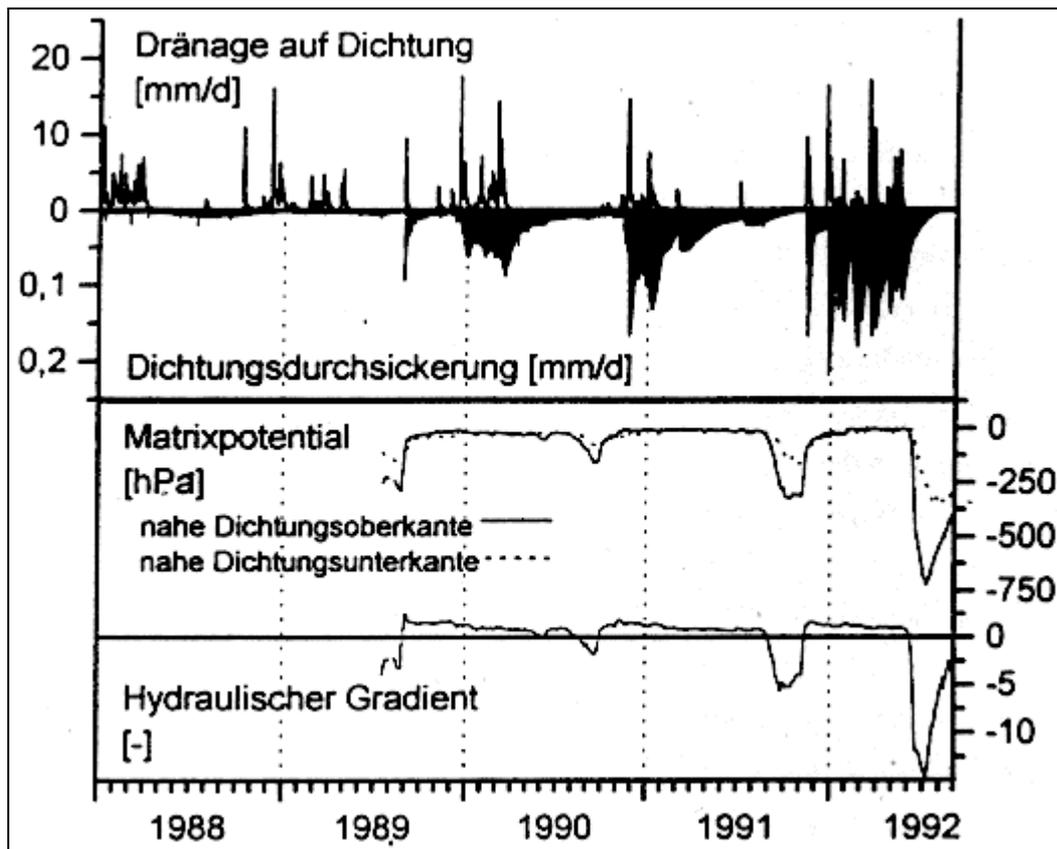


Abb. I- 4.6: Bindige mineralische Dichtung auf der Deponie Georgswerder, Abflüsse und Tensiometerdaten [136]

Neben diesem kapillaren Wasseraufstieg in flüssiger Phase, kommen noch andere Prozesse in Frage, die vermutlich jedoch weit weniger wirksam sind (thermisch induzierte Wasserbewegung, Gravitation, Anströmen wasserdampfgesättigter Bodenluft an die Oberfläche der Dichtung).

Sowohl die Aufgrabungen als auch die gemessenen Abflüsse zeigen, daß sich einmal gebildete Risse in der Geschiebemergel-Dichtung durch Wiederbefeuchten, Quellung oder Auflast nicht wieder so weit schließen, daß sie nicht mehr als schnelle Wasserleitbahnen wirksam wären.

Praktisch gemessene Durchlässigkeitsbeiwerte, bei Annahme eines hydraulischen Gradienten von 1, waren  $2,4 - 2,9 \cdot 10^{-9}$  m/s. Demgegenüber steht ein maximaler  $k_f$ -Wert in der TA-Abfall von  $5 \cdot 10^{-10}$  m/s. In [136] wird ein Durchlässigkeitswert von über  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s angegeben.

#### *Mineralische Abdichtung mit Bewehrungsmatte*

Diese Art der Abdichtung kam auf der Deponie Gerolsheim zur Ausführung.

Obwohl dieses System gegen Setzungen und daraus resultierende Beeinträchtigungen durch die robuste Tonschicht mit ihrem "Selbsteheilungsvermögen" und die die Zugspannungen aufnehmende Bewehrungsmatte in doppelter Weise gesichert ist, ist der Vorgang der Austrocknung und Reißbildung in der Dichtungsschicht auch hier die zentrale Fragestellung.

Der Aufbau der aus 60 cm starkem tonigem Schluff bestehenden mineralischen Abdichtung ist in Abb. I- 4.7 dargestellt.

	Decksubstrat	0,40 m
	Filtervliese	
	Flächendrän.	0,15 m
	Bewehrung	
	miner.Dichtung	0,60 m
	Flächendrän.	0,15 m
Müllkörper		1,30 m

Abb. I- 4.7: Mineralische Abdichtung der Deponie Gerolsheim, Testfeld B

Um das Austrocknungsverhalten der mineralischen Komponente zu untersuchen, wurden Temperatur und Feuchtefühler eingebaut [80], so daß der zeitliche Verlauf des Wassergehaltes und des Temperaturgradienten über das Tiefenprofil beobachtet werden konnte. Die Temperatur- und Feuchtwerte wurden durch kontinuierliche Abfrage von Dezember 1985 bis Januar 1987 mit einer Datenerfassungsanlage aufgezeichnet. Die Feuchtegradienten weisen keine einheitliche Ausrichtung auf, was durch Inhomogenitäten im Dichtungsmaterial bedingt sein kann.

Die Temperaturmessungen an einem Vergleichsfeld mit zusätzlicher Kunststoffabdichtungsbahn ergaben, daß die rein mineralische Dichtung eine schlechtere Wärmedämmung hat. Das führt zum Beispiel dazu, daß der Frost während einer langen Frostperiode in die Dichtungsschicht des Feldes B tiefer eindringt als in die des Feldes C.

Im Wurzelboden der mineralischen Abdichtung des Testfeldes B zeigten sich Veränderungen in Form einer zunehmenden Auflockerung des Korngefüges. Dies wurde im wesentlichen durch Austrag von Feinanteilen in die darunter liegende Wasserdrainschicht und durch Erosionsvorgänge verursacht.

Es zeigte sich eine ungehinderte Durchwurzelung des Mutterbodens und der Wasserdrainschicht bis in den oberen Bereich der Dichtungsschicht, bei welcher hierdurch eine Austrocknung verursacht und damit die Wasserdurchlässigkeit deutlich erhöht wurde.

Im Detail konnten folgende Materialveränderungen beobachtet werden [99], die hier tabellarisch wiedergegeben sein sollen:

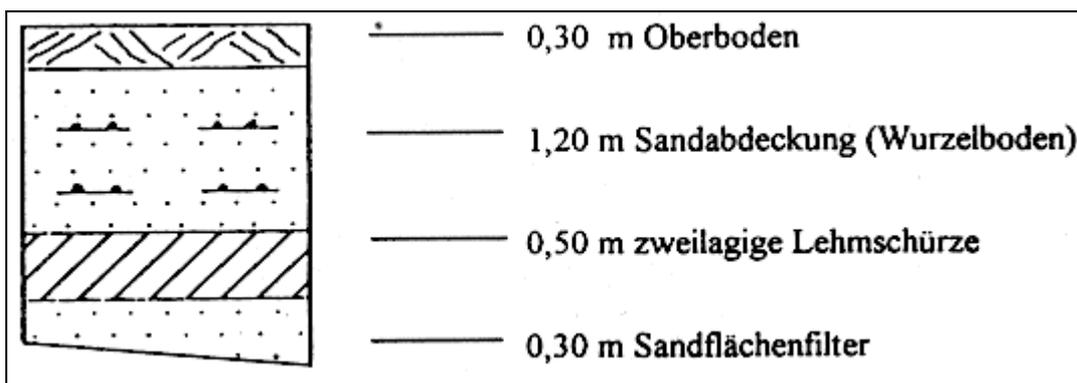
Parameter	Wurzelboden	Deckschicht
Kornverteilung	Abnahme des Feinkornanteiles um 6 - 10 %	keine einheitliche Veränderung
Wassergehalt	Abnahme zwischen 8,6 und 12,6 %	Zunahme zur Gasdränschicht hin
Organikgehalt	konstant 2,9 bis 3,7 %	1988 Anstieg in einer Schürfgrube auf 3 %
Trockendichte	Verfestigung von 1,68 g/m <sup>3</sup> auf 1,84 g/m <sup>3</sup>	nicht eindeutig
Porenanteil	Abnahme von 35,4 auf 30,3 %	nicht eindeutig
Luftporengehalt	keine Veränderung	von 2,5 - 6 % auf 11 - 17 %
Wasserdurchlässigkeit	von $7,03 \cdot 10^{-9}$ auf $4,9 \cdot 10^{-8}$ m/s	von $3,0 \cdot 10^{-10}$ auf $3,0 \cdot 10^{-9}$ bis $3,0 \cdot 10^{-8}$

**Tab. I- 4.2: Untersuchungen an der Deponie Gerolsheim und Veränderungen der Parameter (mineralische Dichtung) im Zeitraum von 1985 - 1988, Daten aus [99]**

Über die Ursachen dieser Materialveränderungen können keine klaren Aussagen gemacht werden [99]. Hier sind lediglich die allgemeinen Beanspruchungen aus Kapitel 3 aufgezählt, z. B. nachträgliche Befahrung, Setzungen und Erosion .

#### **Zweilagige Lehmschürze mit Wurzelbodenvariation**

Dieser Typ der mineralischen Abdichtung kam auf der Deponie Dreieich-Buchsschlag zur Ausführung. Der schematische Aufbau ist in Abb. I- 4.8 dargestellt.



**Abb. I- 4.8: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems der Deponie Dreieich-Buchs Schlag [81]**

Es wurden sechs verschiedene Varianten von Wurzelböden aufgebracht. Jeweils drei bestehen aus Schluff-Sand-Mischungen und drei aus unterschiedlichen Bodenmaterialien (Anlieferung im normalen Deponiebetrieb) [77].

Eine Lysimeteranlage ermöglicht es den Wasserhaushalt des Oberflächenabdichtungssystems zu bilanzieren. Festhalten läßt sich, daß bei der vorhandenen Vegetation (Grasbewuchs) im

Untersuchungszeitraum (1985 - 1986) keine Austrocknungserscheinungen zu beobachten waren. Jedoch kam es zur Ausbildung von Stauwasserhorizonten, da keine Dränageschichten zwischen Wurzelboden und Lehmschürzen eingebaut wurden. Das Stauwasser baute sich im Sommerhalbjahr wieder ab, so daß zukünftige Austrocknungserscheinungen mit dem geplanten Baumbestand nicht ausgeschlossen werden können [81].

Aus den Lysimetermessungen lassen sich Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich von  $1,4 \cdot 10^{-10}$  m/s bis  $5,8 \cdot 10^{-9}$  m/s bei einem hydraulischen Gefälle von 1,5 bis 1,8 errechnen [77]. Wobei angefügt werden muß, daß die zugrunde liegenden Daten keine langfristige Prognose über die Wirksamkeit der eingesetzten Dichtung erlauben.

Als Wurzelboden erwies sich eine Sand-Schluff-Mischung im Verhältnis von 2 : 1 als am geeignetsten.

Weiterhin werden Pumpversuche beschrieben, die sich aber auf die Wirkung der Dichtwand konzentrieren und die Durchsickerung durch die Oberflächenabdichtung nicht explizit berücksichtigen [138].

### ***Weitere ausgeführte mineralische Dichtungen***

Innerhalb dieser Literaturrecherche kam es zu einem Erfahrungsaustausch mit dem Wasserwirtschaftsamt Wiesbaden bezüglich ausgeführten Oberflächenabdichtungen [139]. Zu diesem Zweck wurde vom Wasserwirtschaftsamt eine Erkundigung über ausgeführte oder in Planung befindliche Maßnahmen vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tab. I- I- 4.3 dargestellt. Die Ansprechpartner liegen dem Verfasser teils namentlich und teils mit Angabe der Telefonnummer vor. Hier muß hinzugefügt werden, daß eine weitere telefonische Recherche lediglich begrenzt möglich war und eine Akteneinsicht ausschließlich vor Ort durchzuführen gewesen wäre. Dies war aus zeitlichen Gründen nur begrenzt realisierbar und hat im Ergebnis zu keinen verwertbaren Aussagen geführt, da die Akten, in die Einsicht genommen wurde, in erster Linie nicht dem Zweck der wissenschaftlichen Erkundung dienen, sondern Verwaltungsvorgänge beinhalten.

Anhand von konkret ausgeführten Oberflächenabdichtungen wurden in Wiesbaden folgende Problematiken besprochen:

- mangelhafter Einbau der Oberflächenabdichtung in bezug auf
  - Neigungverhältnis,
  - ungenügende Verdichtung,
  - ungünstige Schüttung der Abfälle (inhomogenes Material in Mulden).
- "Philosophie" der Oberflächenabdichtung
  - der Bau einer Oberflächenabdichtung macht eine stete Nachsorge notwendig,
  - optische Kontrolle der Oberflächenabdichtung und Nachbesserung,
  - Überwachung von im Ober- und Unterstrom gelegenen Brunnen

Vorgestellt wurde weiterhin die Idee einer "Ziehharmonikadichtung" (um ungleiche Setzungen aufzufangen, s. Nr. 18, Tab. I- 4.3) und die Möglichkeit der dosierten Wasserzugabe an eine Deponie (um eine Inertisierung zu erreichen, s. Nr. 7, Tab. I- 4.3).

Nr	Deponie	Art der Dichtung	$k_f$ [m/s]	Dicke [cm]	Besonderheiten
<b>Regierungsbezirk Kassel</b>					
1	Kirschenplantage	mineralisch	1 E-9	60	
2	Uttershausen	mineralisch	1 E-9	100	große Setzungen
<b>Regierungsbezirk Gießen</b>					
3	Aßlar	mineralisch	1 E-9	60	
4	Schelderwald	mineralisch	1 E-9	60	
5	Allendorf				
6	Beselich				
7	Bastwald	bind. Material	1 E-8	200	Spüllanzen
8	Marburg "Am Stempel"	Kapillarsperre			s. Kapitel 5.1
9	Deiskirchen				in Planung
10	Limburg-Offheim	mineralisch	1 E-9	60	1992 beendet
11	Limburg-Lindenkalzhausen		1 E-10		in Planung
12	Mücke-Ohmnen				
13	Klein-Seelheim	mineralisch		60	Ende 88 ausgeführt
<b>Regierungsbezirk Darmstadt</b>					
14	Offenbach/Schlackedeponie				
15	Offenbach-Grix-Lohwaldhügel		1 E-10	50	
16	Wicker	gem. TA-Si			
17	Frankfurt-Heddernheim/VDM-Deponie	mineralisch	1 E-9	60	
18	Dreieich-Buchsschlag	im Bau	1 E-9	60	
19	Flörsheim-Weilbach	bind. Material		60	
20	Monte Scherbelino	alt: min.	1 E-10	75	neu: gem. TA-Si

Tab. I- 4.3: Tabellarische Auflistung von Oberflächenabdichtungen in Hessen, Daten nach [139]

## 4.2 Oberflächenabdichtung mit Kunststoffdichtungsbahn

### 4.2.1 Reaktionen auf die Belastungen

#### *Setzungen und Sackungen*

Setzungen und Sackungen bedingen meist eine mehraxiale Verformung der Dichtungsbahn. Die durch die Verformung entstehenden Zugspannungen müssen von der Dichtungsbahn aufgenommen werden. Obwohl bezüglich der Aufnahme örtlicher Druckspitzen sowie des Verbundverhaltens dünne und flexible Bahnen, die allen wirkenden Kräften durch eine entsprechende Verformung ausweichen können, von Vorteil sind, sind, unter dem Aspekt der setzungsbedingten Beanspruchung, Dichtungsbahnen mit hoher Festigkeit erforderlich. Sie sind mit den oben und unten liegenden Schichten nur durch die Reibung verbunden. Dadurch können sich die innerhalb der Setzungsmulde auftretenden Zugspannungen in weite Bereiche der

Bahn fortpflanzen, so daß zur Dehnung ebenfalls große Bereiche der Bahn hinzugezogen werden können. Die tatsächlich auftretenden Dehnungen sind dann gering [92].

Relevant werden Setzungen und Sackungen bei ungleichförmigem Verhalten des Deponiekörpers, was im Rahmen der Altlastensanierung bei unbekannter Zusammensetzung der Abfälle durchaus denkbar ist. Es besteht die Gefahr, daß die Bahnen die auftretenden Zugkräfte nicht mehr aufnehmen können und deshalb reißen.

Durch die Dehnung der Kunststoffbahn werden Zugspannungen ausgelöst. Ihre Größe ist abhängig von der maximalen Dehnung, vom zeitlichen Verlauf des Dehnungs- bzw. Setzungsgeschehens und von den Relaxationseigenschaften (entsprechende Spannungsspitzen bauen sich mit der Zeit wieder ab).

Die zulässigen Spannungen sind außer von der Zeit von folgendem abhängig [89]:

- Art des für die Bahnherstellung verwendeten PEHD-Grundstoffes
- Art des Spannungszustandes
- Dauer der Belastung
- Umgebungstemperatur
- chemische Beanspruchung

Für den Festigkeitsnachweis muß der Grundstoff des HDPE bekannt sein (z.B. Vernetzung, Dichte usw.).

Die Art des Spannungszustandes ist von Interesse, da PEHD unter einaxialer Zugbeanspruchung (nach seiner Verstreckung) meist mehrere 100 % Bruchdehnung aufweist, seine Festigkeitsreserven unter zweiachsigem Zug dagegen schon bei ca. 25 - 35 % Dehnung erschöpft sind.

Die Bruchspannung von Dichtungsbahnen ist von der Dauer der Belastung abhängig. Entscheidend für die Haltbarkeit von Dichtungsbahnen ist daher deren Zeitstandfestigkeit (Langzeitfestigkeit). Diese wird über Zeitstandinnendruckversuche an Rohrproben ermittelt [19].

Die durch Setzungsunterschiede ausgelösten Dehnungen rufen in der Regel zweiachsige Spannungszustände in der Dichtungsbahn hervor. Die an Rohren ermittelte Zeitstandfestigkeit gilt auch für isotrop zweiachsige Spannungszustände in der Dichtungsbahn, die durch Setzungsunterschiede ausgelöst werden. Wesentlich kritischer ist die Bruchsicherheit von Schweißnähten unter langfristiger Zug- und Chemikalienbeanspruchung.

Bei einer Setzungsdifferenz von  $s = 1$  m über eine horizontale Entfernung von  $l = 10$  m ( $s/l = 0,1$ ), ist mit einer biaxialen Dehnung der Dichtungsbahn von 2 bis 3 % zu rechnen (Zugrundelegung einer kugelförmigen Setzungsmulde). Nach durchgeführten Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, daß speziell HDPE bei aufgezwungenen Dehnungen in der genannten Größenordnung in der Regel einen Zeitraum von 100 Jahren und länger schadlos überdauert [90].

Die wesentlichen Beanspruchungen von Deponiebahnen entstehen durch örtlich verschiedene Setzungen des Untergrundes unter der Bahn, die beispielsweise zur Bildung von Setzungsmulden führen. Die Dichtungsbahn wird dadurch zweiachsig auf Zug beansprucht. Da das

Setzen ein Vorgang ist, der sich über lange Zeit erstreckt, wirken auch diese Zugbeanspruchungen langfristig auf die Bahn ein.

Das Bahnmateriale muß diese Langzeitzugbeanspruchung (= Zeitstandbeanspruchung) ertragen, d.h. es dürfen bis weit über die Betriebszeit der Deponie hinaus keine Zeitstandrisse entstehen.

Die Ergebnisse von Plattenberstversuchen sind aus Tab. I- I- 4.4 ersichtlich. Die angegebenen Dehnungen wurden unmittelbar vor dem Bersten in Plattenmitte gemessen, in Richtung des Randes nehmen sie ab. Die gewölbte Plattenoberfläche ist daher keine Kugeloberfläche.

<b>Berstversuche mit Platten (1000 mm Durchmesser)</b>			
Dehnung %		Wölbhöhe/Durchmesser	
Min/Max	Mittelwert	Min/Max	Mittelwert
28/34	31	0,23/0,29	0,26
<b>Berstversuche mit geschweißten Platten (1000 mm Durchmesser, Extruderschweißnaht)</b>			
Dehnung %		Wölbhöhe/-Durchmesser	
24/38	33	0,23/0,25	0,24

**Tab. I- 4.4: Berstversuche mit HDPE-Platten [19]**

### *Stauwasserspiegel im Decksustrat*

Da die Durchlässigkeit des Decksustrates ohne Dränage in der Regel nicht ausreicht, um das einsickernde Wasser der Dichtung hangparallel abfließen zu lassen, kommt es zur Bildung eines Stauspiegels im Substrat. Dies führt über Schubkräfte zu einer mechanischen Beanspruchung der Dichtungsbahn. Die Größe der Resultierenden richtet sich nach der hangabwärts gerichteten Gewichtskomponente des überlagernden Bodens und aus dem Strömungsdruck des hang-abwärts fließenden Sickerwassers.

### *Mechanische Beschädigungen*

Dichtungsbahnen sind aufgrund ihrer geringen Dicke (einige mm) gegen mechanische Beschädigungen besonders empfindlich. Als Schutzschicht bietet sich mineralisches Material oder ein Geotextil an. Kies kann insbesondere dünne Folien zerstören [174].

Mechanische Beschädigungen gehören größtenteils der Kategorie Einbaufehler an. Aber z.B. auch eine nachträgliche Befahrung kann sich durch mechanische Beschädigungen auswirken. Wohl in erster Linie auf mechanische Beschädigung zurückzuführen ist die Angabe von 5 Löchern / Hektar mit einer Größe von  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  an Basisabdichtungen [93]. Dieser Wert kann allerdings nur mit Vorsicht auf hiesige Verhältnisse übertragen werden, da er sich auf U.S. amerikanische Materialien und Einbautechniken bezieht. Der daraus resultierende Durchfluß wird hier in einem Wertebereich von 700 - 6300 Liter / Hektar \* Tag bei reinen Kunststoffabdichtungen, die von Geotextilien geschützt sind, angegeben.

### ***Witterungseinflüsse***

Ein Großteil der äußeren Einflüsse tritt bei der Verwitterung auf. Hierbei werden Kunststoffe durch das Zusammenwirken der nachfolgenden Faktoren mehr oder weniger verändert oder abgebaut [94]:

Sonneneinstrahlung: bewirkt einen chemischen Abbau, eine Farbänderung, eine Ausdehnung des Materials sowie Verdunstung des Materials (Weichmacher).

- Feuchtigkeit: verursacht Quellung, Lösungsvorgänge, chemische Umsetzungen.
- Frost: hat eine Sprengwirkung beim Einfrieren des in Poren oder Haarrissen eingedrungenen Wassers zu Folge.
- Die umgebene Erde: beeinflusst durch die Stoffwechselprodukte von Bakterien und Schimmelpilzen sowie durch Bodensäuren das Kunststoffmaterial.

Witterungseinflüsse verursachen in den Kunststoffmaterialien einen fotochemischen sowie ggfs. einen thermooxidativen Abbau und sind damit maßgeblich an der Alterung der Kunststoffe beteiligt.

### ***Chemische Beständigkeit***

Polyethylen hoher Dichte zeigt in verschieden stark aggressiven Medien bei Verformungen zwischen 5 und 10 % gleiches Kriechverhalten wie in normaler Umgebung [95]. Unter Einwirkung von Kohlenwasserstoffen bildet sich eine konstante Streckspannung bzw. Streckdehnung aus. Bei höheren Konzentrationen werden diese Werte erst verspätet erreicht. Die Struktur des HDPE ändert sich aber nicht, da nach Herausnahme der Lösung die Ausgangswerte wieder erreicht werden. Nach einer 90-tägigen Einwirkung von Deponiesickerwasser und Prüfgas war keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften bei Bahnen aus HDPE zu beobachten [96].

Die chemische Beständigkeit ist bei Kunststoffdichtungsbahnen im Bereich der Oberflächenabdichtung kein zentraler Punkt. Deswegen soll hierauf nur am Rande eingegangen werden.

### ***Mikroorganismen und biologischer Einfluß***

Polymere Materialien können je nach den Umständen (Art des Mediums, Zusammensetzung des Materials) von Schimmel, Bakterien und höheren Organismen (z.B. Insekten, Nagetieren, oder Pflanzen) befallen werden. Die häufigste Ursache für biologische Schädigung von Kunststoffen sind Mikroorganismen, vor allem Schimmel. Die Entwicklung der Mikroorganismen beeinflusst neben dem äußerlichen Erscheinen die mechanischen und elektrischen Eigenschaften. Die Beständigkeit der Polymere gegen mikrobiologische Einwirkungen ist abhängig von der Zusammensetzung und Menge des Füllstoffes sowie von Beimengungen, Verunreinigungen usw.. Dabei spielt vor allem eine Rolle, inwieweit diese Stoffe den Mikroorganismen als Nährstoff dienen können.

Die Mehrzahl der Schäden, welche an Kunststoffen und Elastomeren durch höhere Organismen verursacht werden, sind auf den Befall durch Insekten und Nagetiere zurückzuführen. Der Grund, weshalb makromolekulare Stoffe von derartigen Lebewesen angegriffen werden, ist jedoch bis heute noch nicht mit Sicherheit bekannt [94].

Die relative Widerstandsfähigkeit von Polymeren gegen biologische Einwirkungen ist bekannt, hierbei schneidet Polyester am besten ab [97].

Mikroorganismen, vor allem Schimmelpilze, sind die häufigste Ursache der biologischen Schädigung von Kunststoffen und Elastomeren, wodurch deren Gebrauchswert beeinträchtigt wird.

Stark entwickelte Schimmelkolonien begünstigen die Kondensation von Wasserdampf, so daß sich an der Oberfläche des Polymers noch mehr Feuchtigkeit ansammelt. Dadurch wird die Wasseraufnahme des befallenen Stoffes erhöht, was wiederum Veränderungen der mechanischen und der elektrischen Eigenschaften zur Folge hat. Schimmel erleichtert die Anlagerung von Verunreinigungen aus der Atmosphäre, die einen Nährboden für die Entwicklung weiterer Schimmelkolonien bilden. In manchen Fällen kann der Schimmel durch Kunststoffolien hindurchwachsen und damit deren Porosität erhöhen.

Neben den Mikroorganismen können auch deren Stoffwechselprodukte polymeres Material oder deren Zusätze chemisch angreifen. Außer Schimmel können auch Bakterien und Hefepilze die Polymere befallen. Während natürliche Polymere und deren Abkömmlinge für Schimmelpilze und Bakterien einen Nährboden bilden, gilt dies für synthetische Polymere kaum [94].

HDPE wird von Mikroorganismen nicht angegriffen, es ist wurzelfest. Bei ausreichender Dicke ist PE auch gegenüber Nagetieren resistent. Durchgeführte Untersuchungen deuten darauf hin, daß manche Bahnen aus PVC-weich Nagetiere anlocken. ECB-Bahnen gelten als wurzelfest und nagetierbeständig [135].

### ***Einbau***

Folgende Einbaufehler treten beispielsweise auf:

- Quetschfalten und damit vorgegebene Schwachstellen aufgrund des hohen Wärmedehnungskoeffizienten mancher Kunststoffe beim Einbau während hochsommerlicher Temperaturen
- Schweißnähte sind ein prinzipielles Problem
- Wellenschlag aufgrund von Sogwirkung des Windes
- mechanische Beschädigungen, z.B. durch heruntergefallenes Werkzeug
- unsaubere Ausführung von Durchdringungen und Verankerungen

## **4.2.2 Erfahrungen an ausgeführten Maßnahmen**

### ***Laborversuche für die Deponie der Aluminium Rheinfelden GmbH in Karsau***

Die wesentliche Aufgabe für die Untersuchung war die Wirksamkeit der Kontrolldrainage. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Leckagen simuliert [98], die hier wiedergegeben werden.

Die obere und die untere Dichtungsschicht bestand jeweils aus einer 1,5 mm dicken HDPE - Folie. Zwischen den Kunststoffolien wurde eine Zwischenschicht aus einem Kunststoffgitter verlegt. Den Aufbau der gesamten in Karsau eingebauten Dichtschicht zeigt Abb. I- 4.9.

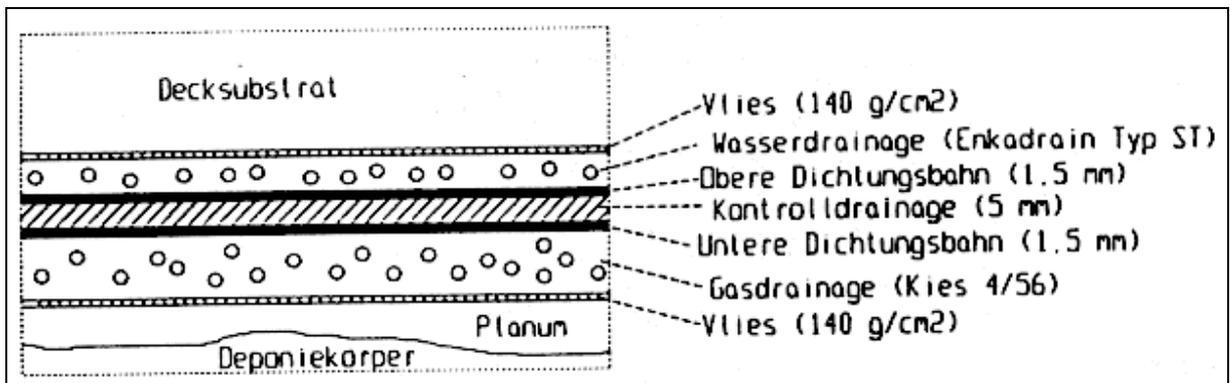


Abb. I- 4.9: Schnitt durch die Abdeckung der Deponie Karsau [98]

Die Beispiele in Abb. I- 4.10 zeigen den Abriß beider Dichtungsbahnen. Es ist ein geringerer oder größerer horizontaler Versatz mit oder ohne Gefälleänderung möglich. Durch die Annahme nicht parallel verlaufender Rißkanten und eines gewissen seitlichen Versatzes, ergeben sich die gezeigten Möglichkeiten. Alle als Beispiel gezeigten Leckageformen können gleichzeitig vorhanden sein.

Ein Leck hat eine endliche Ausdehnung, das heißt, daß selbst bei einem Abriß mit Versatz am Übergangsbereich zur intakten Dichtung, ein Eindringen von Wasser in die Kontrollschicht möglich ist (Abb. I- 4.10 e). Diese Stellen können als punktförmige Leckagen wirken.

Der ungünstigste Fall ist eine Leckage in Dellenlage. Dort würde das Wasser durch das gegenläufige Gefälle der Kontrolldrainage zur Hangneigung vollständig in die Gasdrainage unter der zweiten Dichtungsbahn abfließen (Abb. I- 4.10 d). Bei großem Versatz und Mitabriß der oberen Dränmatte ist auch eine Plombierung der Rißfläche denkbar.

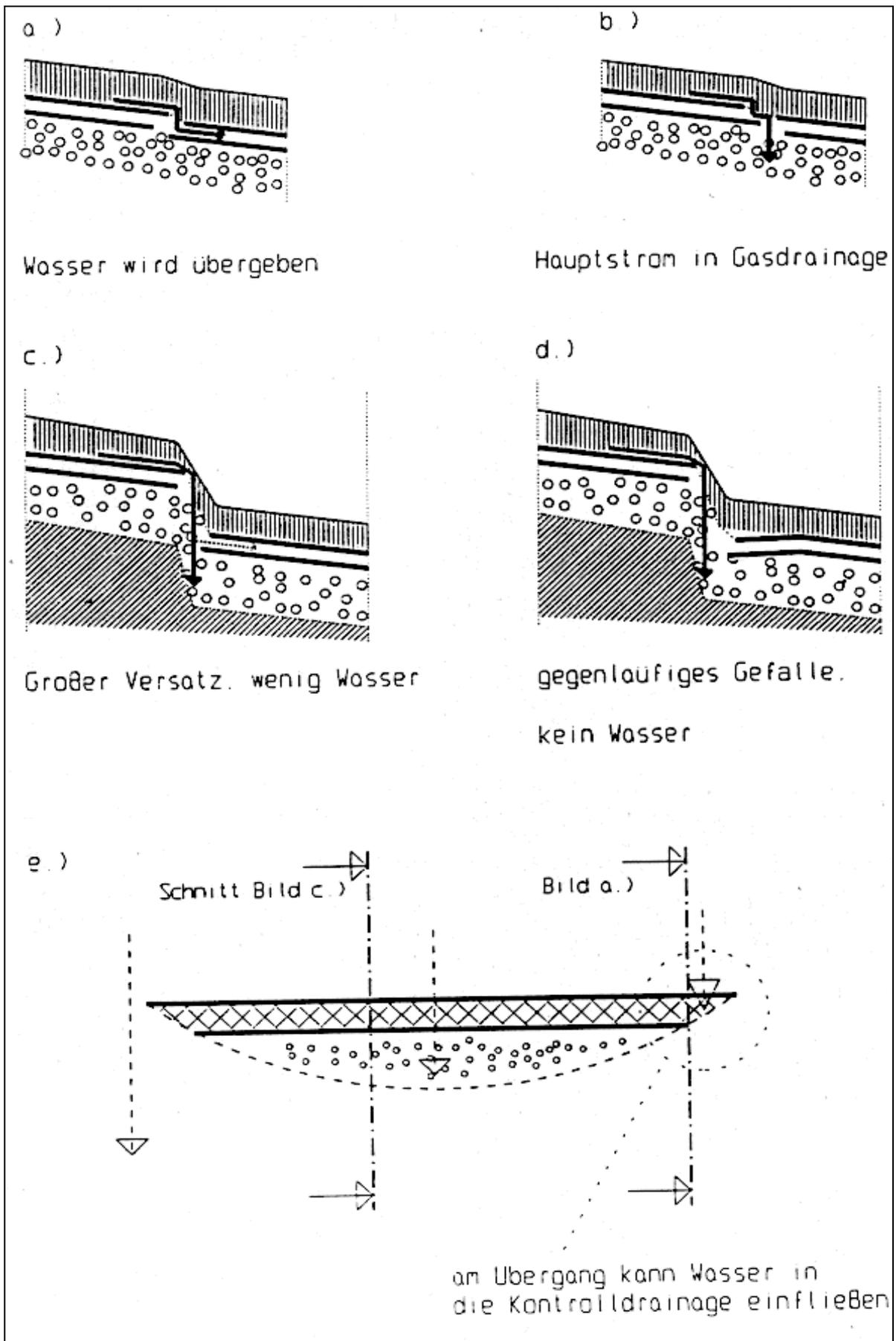


Abb. I- 4.10: Leckagen beim Abriß beider Dichtungsbahnen [98]

Bei der Simulation der Leckagen galt das Hauptaugenmerk kleinen Defekten, die Ergebnisse sollen hier tabellarisch dargestellt werden.

Schadensfall	Beobachtung
Schnitt (10 cm)	geringe Wassermengen
dünnere Schnitt (d = 0,5 mm)	mit Versuchsdauer Abnahme der Durchsickerung (evtl. Verstopfung durch Trübstoffe)
Steindurchstoß	siehe "dünnere Schnitt"
Bohrung r = 0,5 cm Quadrat F = 1 cm <sup>2</sup>	das Verhältnis der Abflüsse aus den Dränagen entspricht den Leckausmaßen, die Hangneigungen und Aufgabemengen gehen nur geringfügig mit ein
Rechteck (l = 10 cm) quer zum Gefälle	siehe Bohrung, bloß Durchflußrückgang bei steilem Gefälle, Durchfluß = f (Leckagelänge)

**Tab. I- 4.5: Einfluß der Schadensart bei einer Folienabdichtung auf den Abfluß in der Kontrolldränage, Daten aus [98]**

Die Wirkungsweise von Leckdetektionssystemen wurde ebenfalls in [93] untersucht. Hier sind die allgemeinen Abflußbeziehungen für die Zwischenschichten aufgeführt. Theoretisch wurde das Leckverhalten für reine Kunststoffabdichtungen untersucht, mit dem Ergebnis, daß sich Lecks gravierender auswirken als bei Kombinationsdichtungen. Praktisch gemessen werden konnten aber an einer Deponie mit einer doppelten Kunststoffdichtung an der Deponiebasis lediglich Einflüsse von:

- "Konstruktionswasser", das während der Bauausführung in das Dichtungssystem gelangt,
- Kompressionswasser, das aus dem Zusammendrücken des verwendeten Dichtmaterials resultiert,
- Konsolidationswasser, das aus einer Tondichtungsschicht stammt, die zum Vergleich ausgeführt wurde,
- und Infiltrationswasser, das aus dem Grundwasser stammt.

Mithin wurde also kein Einfluß von Lecks in dem Untersuchungszeitraum von 30 Monaten festgestellt.

#### ***Materialveränderungen an der HDPE Dichtung der Deponie Gerolsheim***

Auf der Deponie Gerolsheim kam ein Dichtungstyp mit HDPE - Bahn (Testfeld A) zum Einsatz (Abb. I- 4.11) Dieser Abdichtungstyp wurde 1985 eingebaut und 1986 und 1988 untersucht.

	Decksubstrat	400 mm
	Filtervliese	1 mm
	Dränmatte	25 mm
	HDPE-Bahn	2 mm
	Dränmatte	8 mm
Müllkörper		0,44 m

Abb. I- 4.11: Oberflächenabdichtung der Deponie Gerolsheim (Testfeld A) [135]

Die Dichtungsbahn zeigte bei allen Messungen eine größere *Dicke* als der Sollwert bzw. als der Wert einer fabrikneuen Probe. Die Differenzen lagen außerhalb der herstellungsbedingten Toleranzen und sind daher durch evtl. Quellvorgänge im Material zu erklären. So betrug die Dickenzunahme 1986 ca. 16 % gegenüber einer fabrikneuen Probe.

Beim *Elastizitätsmodul* zeigt sich eine deutliche Abnahme zwischen den Untersuchungen 1986 und 1988. Im Jahre 1986 lagen die Werte in Längs- und Querrichtung um ca. 5 % über dem Wert einer fabrikneuen Probe. Im Jahr 1988 lag der E-Modul rund 18 % unter dem Sollwert der neuen Probe, bzw. 22 % niedriger als bei der Probennahme 1986. Daraus kann gefolgert werden, daß die Dichtungsbahn eine einseitige Vordehnung durch Befahrung oder unterschiedliche Setzung erfahren hat.

Bei den Bestimmungen der *Schweißnahtfestigkeit* und des Kurzzeitschweißfaktors ergaben sich keine nennenswerten Veränderungen.

Beim "Kernstück" des Testfeldes, der Dichtungsbahn, zeigten sich im wesentlichen Veränderungen in der Schichtdicke in Form einer Zunahme um bis zu 16 % (wahrscheinlich durch Quellvorgänge im Material) und im Elastizitätsverhalten. Die Abnahme des Elastizitätsmoduls sowie die Unterschiede der Ergebnisse in Längs- und Querrichtung der Dichtungsbahn, lassen auf eine mechanische Beanspruchung schließen. Auch hier fällt auf, daß evtl. eine einseitige Dehnung der Bahn aufgetreten ist, z.B. durch Befahrung, unterschiedliche Setzungen oder aber auch durch Abrutschen beim Überschreiten der Reibungskräfte [99].

### 4.3 Decksubstrat und Wurzelboden

Das Decksubstrat und der Wurzelboden sollen hier als Teil der Oberflächenabdichtung diskutiert werden. Die Einbindung in die Landschaft, die mit dem jeweiligen Substrat möglich ist, soll unter anderem im vierten Aufgabenteil behandelt werden.

Das Decksubstrat ist die oberste Schicht der Abdichtung. Es bildet den Wurzelboden für die später sichtbaren Rekultivierungsmaßnahmen der Deponieoberfläche und trägt somit einen wesentlichen Anteil an der Wiedereingliederung einer Deponie in die sie umgebende Pflanzen- und Tierwelt.

Die *Hauptaufgaben* des Decksubstrates lassen sich daher zu folgenden Punkten zusammenfassen:

- Schutzschicht für die weitaus empfindlicheren, darunter liegenden Schichten, vor allem der Dichtungsschicht. Durch den Wurzelboden werden sehr hohe und sehr niedrige Temperaturen sowie extreme Temperaturschwankungen abgemildert.
- Abminderung und Nivellierung der mit unterschiedlicher Intensität einwirkenden Niederschläge und damit Verminderung der Sickerwasserneubildung. Der Austritt des Wassers in die Wasserdränschicht erstreckt sich damit über größere Zeiträume, so daß die Drainschicht keine starken Kurzregen aufnehmen muß.
- Der Wurzelboden soll einen internen Bodenwasserkreislauf ermöglichen, der den lokalen, klimatischen Bedingungen angepaßt ist.

Die *Anforderungen*, die an das Decksustrat gestellt werden, sind folgende:

- Der Wurzelboden muß eine ausreichende, natürliche Nährstoffversorgung für die spätere Anpflanzung gewährleisten.
- Er muß eine ausreichende Wasserspeicherkapazität haben.  
Das Decksustrat muß gut durchwurzelbar sein und eine ausreichende Kapillarität zur Versorgung der Pflanzen haben.

Die erforderliche Schichtdicke richtet sich nach der zu erwartenden Wurzeltiefe sowie nach den Belangen der Frostsicherheit [99].

Beanspruchungen, die auf eine mineralische Abdichtung zerstörend wirken können, sind für das Decksustrat teilweise nötige Voraussetzungen für eine Durchlebung. Aus dieser Sichtweise wäre eine detaillierte Betrachtung der Bodenentwicklung nötig. Auf eine Beschreibung des Inhaltes allgemeiner Bodenkundebücher soll hier jedoch verzichtet werden.

Stichpunktartig aufgeführt sind dies:

- Auswirkungen des Gefrierens
- Wechselwirkungen zwischen Boden und Wasser
- Einfluß von Pflanzen und Tieren, worauf im folgenden kurz eingegangen wird

### ***Tiere***

Als Schädlinge für die Dichtungsbestandteile kommen Kaninchen, Dachse, Füchse, Ratten, Mäuse und Erdfräser in Frage [103].

In Tonböden können bis zu 50 % des Porenvolumens auf Regenwurmgänge zurückgeführt werden. Diese Gänge reichen u. U. bis in mehrere Meter Tiefe und sind Wegbereiter für Pflanzenwurzeln, die in den Regenwurmängen bessere Wuchsbedingungen vorfinden als in Ton [106]. Unter dem Einfluß tiefer Temperaturen bzw. Austrocknung der Oberfläche ziehen sie sich in größere Tiefen zurück, die bis in die Bereiche von 0,5 - 1,5 m oder auch bis über 3 m reichen. In [122] werden Untersuchungen veröffentlicht, nach denen gewisse Regenwurmartentypen bis in Tiefen von 8 m aufgefunden werden konnten. Allerdings ist anzumerken, daß Regenwürmer aerob lebende Organismen sind und somit wohl kaum in die anaeroben Bereiche einer Deponie vordringen.

## *Pflanzen*

Beeinträchtigungen des Wurzelbodens als Pflanzenstandort sind nur nach vorhergehender Beschädigung der Oberflächenabdichtung zu erwarten und sollen somit außen vor bleiben.

Theoretisch finden die Pflanzenwurzeln in Ton einen nährstoffreichen Boden. Sobald nährstoffreicher Boden jedoch verdichtet ist, ziehen es die Pflanzenwurzeln vor, sich ihre Nahrung in zwar nährstoffärmeren aber lockeren Böden zu suchen. Dieser Sachverhalt wurde durch die Freilegung von Baumwurzeln bestätigt [103, 104]. Der hohe Turgordruck der Pflanzenwurzeln wird offensichtlich erst wirksam, wenn den Wurzeln die Möglichkeit gegeben wird, in Poren und Hohlräume einzudringen. Denkbar wäre es, daß z.B. Regenwürmer hier eine gewisse Vorarbeit in der Durchlebung der eigentlichen Abdeckschicht leisten, die es dann wiederum den Pflanzen ermöglicht, in eine mineralische Dichtschicht einzudringen.

## *Erosion*

Eine Schädigung des Decksubstrates durch Erosion kann eine Schädigung der unterliegenden Dichtschichten, z.B. der Kunststoffolie durch UV-Einstrahlung, nach sich ziehen. Auch kann nur eine Verminderung der Abmessungen der Abdeckschicht in Folge bewirken, daß die Bewältigung der Aufgaben, als Teil der Oberflächenabdichtung, nicht mehr in vollem Umfang gewährleistet ist.

Da Erosionserscheinungen im Bereich der Altlastensanierung eine nicht zu vernachlässigende Größe darstellen, und sie auch in ihrem Ausmaß gut abschätzbar sind, soll hier ein gewisses Gewicht auf die Erosion gelegt werden. Das wohl gebräuchlichste Prinzip zur numerischen Erfassung von Erosionserscheinungen wird in [140] erläutert.

Langjährige Untersuchungen des Abtrages in Dauerparzellen liegen für den mitteleuropäischen Raum kaum vor, jedoch stützen Ergebnisse von Stoffbilanzen an Hängen unter Verwendung künstlicher Niederschäge die ALLGEMEINE BODENABTRAGSGLEICHUNG (ABAG) ab. Eine Möglichkeit die ABAG zu berechnen, ist mit [140] gegeben. Hier sind auch die nötigen Eingangsgrößen für hiesige Verhältnisse quantifiziert.

Eine beispielhafte Auswirkung verschiedener Bodennutzungsarten auf den Bodenabtrag zeigt Tab. I- I- 4.6. Probleme bereitet aber unter natürlichen Verhältnissen die Bestimmung des Oberflächenabflusses (s. auch Teil II dieser Studie). Von daher sind diese Angaben nur bedingt geeignet eine realistische Übertragung vorzunehmen, vielmehr soll die Größenordnung der Erosion in Abhängigkeit des Bewuchses aufgezeigt werden.

Die Tab. I- I- 4.7 zeigt beispielhaft die Auswirkung der Hangneigung und Hanglänge auf das Ausmaß des Bodenabtrags. Genauso wie in Tab. I- I- 4.6 ist das Ausmaß des Bodenabtrages hier wieder relativ zu betrachten.

Vegetationsformen	Abtrag in g/l Abfluß
Mischwald	0,15
Almflächen und Wiesen	0,61
Sanierte Anbruchsflächen	2,09
Ackerland	10,00
Anbruchsflächen	198,40

**Tab. I-4.6: Bodenabtrag bei verschiedener Landnutzung [106]**

<b>Hanglänge 120 m</b>				
Hangneigung (%)	5	10	15	20
Relativer Bodenabtrag	100	293	500	806
<b>Hangneigung 9 %</b>				
Hanglänge (m)	50	100	150	200
Relativer Bodenabtrag	100	139	170	194

**Tab. I-4.7: Zunahme des relativen Bodenabtrags nicht begrünter bzw. bepflanzer Flächen, abhängig von Hangneigung und Hanglänge [106]**

Die erosive Wirkung des Niederschlages wird nach [103] durch eine angepaßte Vegetation in folgender Weise gemindert:

- die Prallwirkung von Regentropfen fällt bei dichter Vegetation nicht entscheidend ins Gewicht,
- die Oberflächenrauheit wird erhöht,
- und die oberen Bodenschichten werden durchwurzelt und quasi festgehalten.

### **Setzung**

Durch Setzungen kann es im Decksstrat zur Spaltenbildung kommen. Dies hat zum einen einen bevorzugten Weg für das Deponiegas nach außen und zum andern einen vorgegebenen Weg für Niederschlagswasser nach innen als Auswirkung. Die Spalte in der Deckschicht allein bewirkt noch keine Undichtigkeit der gesamten Oberflächenabdichtung, jedoch ist davon auszugehen, daß wenn sich im Decksstrat Spalten gebildet haben, die darunterliegenden Dichtmaßnahmen in entsprechender Weise geschädigt worden sind.

Spaltenbildung wird im Rahmen von Begehungen einfach festgestellt und kommt in gewissem Umfang tatsächlich vor [139].

**Abgleiten**

Ein Abgleiten der Deckschicht von der in der Regel darunter liegenden Dränschicht ist denkbar. Die inneren Scherkräfte des Bodens nehmen stark ab, wenn bindiges Bodenmaterial zu quellen beginnt [107]. In der Literatur wird deswegen allgemein eine Begrenzung der Neigungsverhältnisse von 1 : 2,5 bis 1 : 3 gefordert. Die Kräfte, die hierbei wirken, sind sowohl bei der Kombinationsdichtung als auch bei den anderen Dichtmaßnahmen die gleichen.

Beispielhaft aufgestellt werden soll das Kräfteverhältnis für die Kombinationsdichtung in Kapitel 6, da hier aufgrund der eingelegten Kunststoffolie die Gefahr des Abgleitens am größten erscheint.

**4.4 Dränage- Filter- und Schutzschichten**

In der TA-Siedlungsabfall gelten folgende Anforderungen für die Entwässerungsschicht:

*Die Entwässerungsschicht ist in einer Dicke von  $d = 0,3$  m herzustellen. Das Entwässerungsmaterial ist flächig aufzubringen und soll langfristig einen Durchlässigkeitsbeiwert  $k = 1 \cdot 10^{-3}$  m/s nicht unterschreiten. Darüberhinaus ist eine Berechnung der Menge des versickernden Niederschlagswassers und ein hydraulischer Nachweis der Leistungsfähigkeit des Systems (Entwässerungsschicht und Sickerrohre) erforderlich.*

Der letzte Satz wurde in den Änderungen vom März '93 mit folgender Begründung ersatzlos gestrichen,: *Das versickernde Niederschlagswasser kann bei einer Oberflächenabdichtung nicht berechnet werden.*

*Für die Ermittlung der Niederschlagswassermenge aus Dränageschichten von Oberflächenabdichtungen sind weder Modellrechnungen noch gesicherte Bemessungsgrundlagen bekannt.*

Die Ermittlung der insgesamt abzuführenden Niederschlagsmenge ist ein Problem, das für den landwirtschaftlichen Wasserbau zumindest in den Größenordnungen ausreichend abgesichert ist und Eingang in die DIN-Normen (DIN 1185) gefunden hat (s. auch Teil II).

Als ungefähre Anhaltswerte können die in Tab. I- I- 4.8 genannten Zahlen dienen. Die Dränabstandsrechnung mit Saugern und Sammlern wie sie unter anderem in DIN 1185 geschildert wird, ist für Deponieverhältnisse im Bereich der Oberflächenabdichtung prinzipiell nicht geeignet, so daß hierauf nicht näher eingegangen werden soll.

	<b>NNq</b>	<b>Mq</b>	<b>MHq</b>
Flachland	0,0 - 0,02	0,04 - 0,08	0,08 - 0,5
Hügelland	0,01 - 0,03	0,05 - 0,12	0,80 - 2,00
Mittelgebirge	-	0,06 - 0,16	2,00 - 10,00

**Tab. I- 4.8: Anhaltswerte zur Berechnung einer Dränage, in l/s\*ha [131]**

Es wird generell unterschieden zwischen geometrischen und hydraulischen Kriterien. Beim geometrischen Kriterium, auch Kornverteilungskriterium genannt, wird geprüft, ob die Öffnungsweiten des Filters ein Passieren der ausgespülten Dichtungskörner zulassen. Sind die geometrischen Kriterien nicht erfüllt, braucht es trotzdem nicht zur Erosion zu kommen, wenn die hydraulischen Kriterien erfüllt sind. Bei den hydraulischen Kriterien spielen die Kräfte (z. B. Kohäsion), die auf die Bodenpartikel wirken, eine große Rolle [108].

Die Sicherheiten gegenüber Erosionserscheinungen innerhalb der Dichtungsmaterialien können mit den Verfahren nach

- Davidenkoff
- Rehfeld und Zaslavsky/Kassiff
- Leussink/Visweswaraiya/Brendlin

abgeschätzt werden. Außerdem sind bereits Finite-Element-Berechnungen zu dieser Problematik ausgeführt worden, mit dem Ergebnis, daß bei einer Kohäsion von  $c' = 10 \text{ kN/m}^2$  ein Austrittsgradient von  $i_a = 630$  nötig wäre [108]. Die Versuchsergebnisse liegen in ähnlichen Größenordnungen, so daß eine Relevanz für die Oberflächenabdichtung nur bedingt gegeben erscheint.

Im Hinblick auf die Funktionstüchtigkeit der Dränschicht ist die Langzeitfilterwirksamkeit das entscheidende Kriterium. Inkrustationen, beschrieben z.B. in [110], sind bei Oberflächenabdichtungen kaum zu erwarten, da hier wiederum die Beaufschlagung mit Deponiesickerwasser als vorhergehende Belastung notwendig ist, um solche Auswirkungen zu erzielen. Zu Untersuchungen bezüglich Verschlämmungen kann das gleiche angemerkt werden.

Der allgemein in Dränagen übliche Kies 16/32 mm gewährleistet je nach Bodenart keine filterstabilen Verhältnisse. Um ein Einschwemmen von Feinanteilen zu verhindern, sollte oberhalb des eigentlichen Filters ein Geotextil angeordnet werden. Prinzipiell kommt Geotextilien in Zukunft eine wachsende Bedeutung zu, nicht zuletzt deswegen, weil durch Einsatz von Geotextilien auch als Dränschicht Deponievolumen gespart werden kann. Aus diesem Grund soll im nachfolgenden explizit auf Geotextilien eingegangen werden.

In Abb. I- 4.12 ist ein Überblick über die **Beanspruchungsformen von Geotextilien** gegeben.

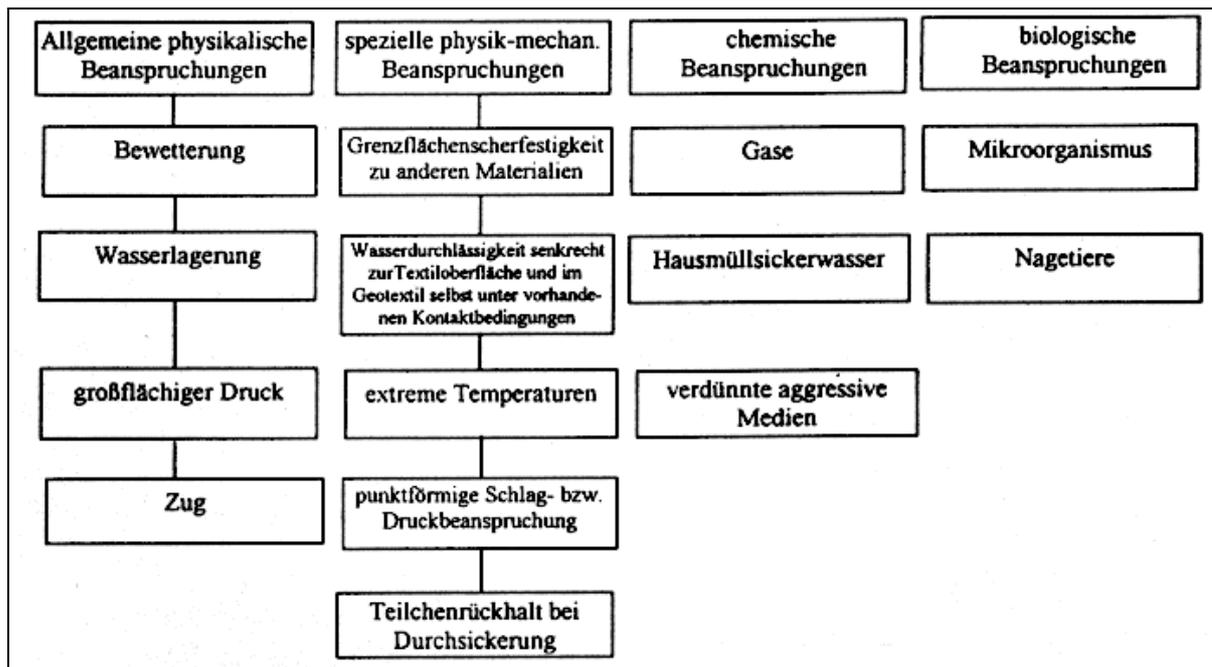


Abb. I- 4.12: Beanspruchungsformen von Geotextilien bei ihrem Einsatz im Deponiebau [109]

Generell werden Geotextilien als Schutzelemente, Trennelemente und wie beschrieben auch als Filterelemente eingesetzt. Daraus resultiert die Vielzahl der auf sie einwirkenden Beanspruchungen.

Im Bereich der Oberflächenabdichtung ist die Beaufschlagung mit Gas relevant. Dazu sei [111] zitiert, wo die Frage der Medienbeständigkeit unter anderem untersucht wurde. Die Medien umfaßten:

- Konzentrierte Lösungen (Richtlinie NRW)
- Verdünnte Lösungen
- Deponiesickerwasser
- Deponiegas

Die Einlagerungszeit betrug bis zu 1,5 Jahren, was einen gewissen Rückschluß auf das Langzeitverhalten zuläßt. Die untersuchten Vliesstoffe aus PEHD, PES und PP schnitten durchweg ohne Ausfallerscheinungen ab. In [111] werden folgende Schlüsse gezogen:

1. *Je nach Abfallart besteht insbesondere bei Verwendung von sehr grobem Dränkies keine Filterstabilität zwischen den Schichten, so daß eine Beeinträchtigung des Dränsystems zu befürchten ist.*
2. Geotextile Filter haben gegenüber mineralischen Filtern den Vorteil des leichteren Einbaus und der geringeren Dicke.
3. Langzeitversuche haben gezeigt, daß in Deponien ohne biologische Aktivität von einer sehr guten Langzeitfilterwirksamkeit ausgegangen werden kann.
4. Für Deponien mit hoher biologischer Aktivität sollte geklärt werden, ob durch entsprechende Betriebsbedingungen die Anfälligkeit für mikrobiologischen Bewuchs reduziert werden könnte.
5. Auswirkungen von Chemikalien auf das Filterverhalten der Geotextilien sind nicht zu erwarten.

Im Vergleich schneiden manche mineralische Dränmaterialien (z.B. Kalkschotter), was die Chemikalienbeständigkeit anbelangt, wesentlich schlechter ab. Hinsichtlich Inkrustationsprozessen besteht wohl kein Unterschied [110].

Allgemein kann die Forderung, daß die Haltbarkeit von Geotextilien der normativen Nutzungszeit des Bauwerks entsprechen soll, nur bejaht werden, obwohl offen ist, welcher Zeitraum als "Nutzungsdauer" bezeichnet werden kann [141].

Hinsichtlich der allgemeinen und speziellen physikalischen Beanspruchungen (s. Abb. I- 4.12) kann, aufgrund der Gleichheit oder zumindest Ähnlichkeit der Werkstoffe, ein Analogieschluß zur Kunststoffdichtungsbahn gezogen werden. Deswegen soll hier auf das entsprechende Kapitel verwiesen werden. Näher erläutert werden soll das Verhalten der Wasserdränmatte, Testfeld C der Deponie Gerolsheim.

Auffallend ist die Abnahme der *Dicke* zwischen den Probennahmen 1986 und 1988 (von 15 mm auf 6,2 mm) in bestimmten Bereichen. Hieraus kann geschlossen werden, daß nachträgliche Verdichtungen (z.B. durch Befahrung) und unterschiedliche Setzungen stattgefunden haben.

Die von der Matte aufnehmbare *Höchstkraft* hat sich bei beiden Schürfungen im Beobachtungszeitraum nicht wesentlich verändert. Zwar ist eine deutliche Abnahme gegenüber fabrikenen Proben festzustellen, jedoch muß sich diese durch eine unvermeidliche Bodeneinlagerung ändern.

Die *Wasserdurchlässigkeitswerte* senkrecht zur Geotextilebene und in der Geotextilebene haben bei den Schürfungen zwischen den Probennahmen 1986 und 1988 um rund eine Zehnerpotenz (von ca.  $10^{-1}$  bis auf ca.  $10^{-2}$ ) abgenommen. Als grundsätzliche Ursachen für den Rückgang der Durchlässigkeit kommen Bodeneinlagerung und insbesondere die eingetretene Reduzierung der Schichtdicke in Frage.

## 4.5 Kombinationsdichtung

### 4.5.1 Grundsätzliches

Durch den Verbund der Elemente mineralische Dichtung und Kunststoffdichtungsbahn soll sich eine addierende Schutzwirkung ergeben. Anschaulich wird dies durch Abb. I- 4.13, auf der das Zusammenspiel von mineralischer Dichtung und Kunststoffdichtungsbahn dargestellt ist. Die Abbildung bezieht sich zwar auf Basisabdichtungen, aber die Vorteile lassen sich auf Oberflächenabdichtungen übertragen, wobei hier die Schadstoffdurchwanderung von oben nach unten von untergeordneter Bedeutung ist.

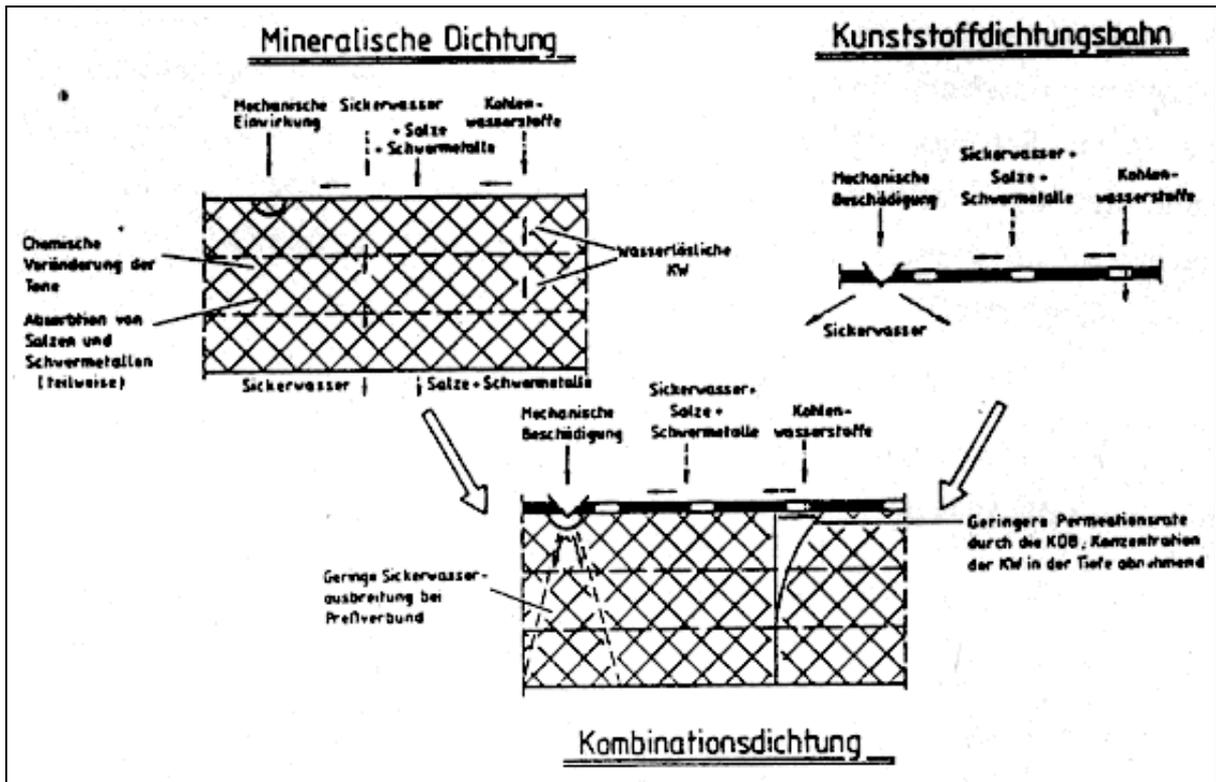


Abb. I- 4.13: Zusammenwirken von mineralischer Dichtung und Kunststoffdichtungsbahn [112]

Ein grundlegendes Problem der Kombinationsdichtung ist jedoch die ordnungsgemäße Ausführung, da die Ansprüche hinsichtlich Einbautechnik, Zeitpunkt und Materialbeschaffenheit relativ groß sind. Um dies zu verdeutlichen sei hier die BAM auszugsweise zur Verlegung der KDB [113] zitiert:

*Die Verlegung erfolgt nach einem von der zuständigen Fachbehörde und dem Fremdüberwacher freigegebenen Verlegeplan. Die Verlegung der Kunststoffdichtungsbahn ist in der Regel nur von April bis einschließlich Oktober statthaft.*

*Ausnahmen sind nur bei sehr günstigen Wetterbedingungen oder dem Einsatz eines Witterschutzes mit Genehmigung der zuständigen Fachbehörde und des Fremdüberwachers möglich, wenn mit keiner Qualitätseinbuße für das Dichtungssystem zu rechnen ist. Bei Lufttemperaturen unter 5°C, bei Niederschlägen aller Art und auf Flächen mit stehendem Wasser ist generell keine Verlegung möglich. Dies gilt auch bei Wind und starker Sonneneinstrahlung, wenn diese die einwandfreie Herstellung des Abdichtungselementes beeinträchtigen.*

Anhand dieses Zitats wird deutlich, wie zeitlich eingeschränkt die Möglichkeiten zur Herstellung einer ordnungsgemäßen Kombinationsdichtung sind. Wenn allerdings ein ordnungsgemäßer Einbau erreicht wird, so ist an Beispielen ausgegrabener Basisabdichtungen [z.B. 114] ersichtlich, daß die Kombinationsdichtung, zumindest für die Verhältnisse an der Deponebasis, ihre Aufgabe erfüllt.

Für die Kombinationsdichtung selber sind hinsichtlich unregelmäßiger Setzungen keine Verformungsnachweise nötig, sondern für ihre einzelnen Elemente. Geprüft werden muß jedoch, ob eine Verbundwirkung überhaupt gegeben ist. Dies erfolgt durch eine Prüfung der allgemei-

nen Kräftebilanz an der Schichtgrenze KDB - mineralische Dichtungsschicht [115]. Diese Kräftebilanz beinhaltet die Aufstellung der Summe für die treibenden Kräfte (Zugspannungsunterschiede, Strömung, Abtriebskraft) und die der widerstehenden Kräfte (Haftreibung, Verbundparameter).

## 4.5.2 Reaktionen auf die Belastungen

### Setzung

Eine Schlüsselstellung bei den Belastungen nimmt auch hier sicherlich die Setzung ein. Für Kombinationsdichtungen stehen bei einer Bewertung des Verhaltens die Überlegungen an erster Stelle, die das Zusammenspiel der einzelnen Elemente berücksichtigen. Hierzu werden in [112] Versuche beschrieben, bei denen die Prüftopfgröße variiert wurde.

*Es hat sich gezeigt, daß die durchschnittlichen Dehnungen bei kleinen Prüftöpfen deutlich höher sind als bei größeren Prüftöpfen, und daß bei größeren Prüftöpfen (z.B. im 1-m-Prüftopf) im Zentrum des Prüfstückes ein etwa im Durchmesser 50 - 60 cm großer Bereich mit erhöhten Dehnungen besteht, während die Dehnungen zum Rande gegen Null gehen.*

Außerdem werden in [112] Versuche gezeigt, bei denen im 1-m-Prüftopf unter Auflast mittig trichterförmige Setzungen in der Unterlage vorgenommen wurden. Hier trat eine Konzentration der Dehnungen an der oberen Setzungskante auf und die Dehnungen gingen in Richtung Prüftopftrand nach etwa 10 cm auf Null zurück (Abb. I- 4.14). Wenn diese Überlegung in die Praxis umgesetzt wird, heißt das, daß die kritische Belastung insbesondere durch kleinräumigere Setzungen gegeben ist.

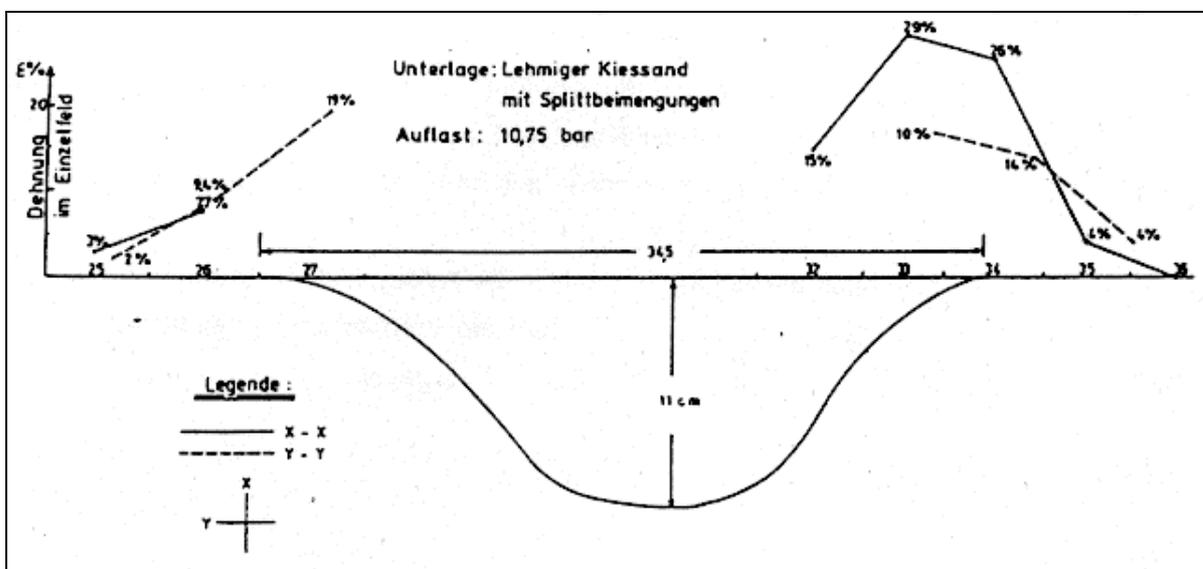


Abb. I- 4.14: Örtliche Spannungs-Dehnungs-Verteilungen über eine Setzungskante bei der Prüfung von HDPE-Bahnen mit einseitiger Reibung im Berstdruckversuch.

Bei einer Größenordnung von 0,5 bis 1 m Durchmesser treten bei einem Stich von 10 cm einaxiale Dehnungen von 2 bis 8 % auf, die am oberen Rand etwa doppelt so hohe Werte aufweisen wie im Zentrum der Mulde. Die Dehnungen liegen also über der oft diskutierten 3 % Grenze.

Anmerken läßt sich außerdem, daß die Höchstwerte der Belastung im Bereich des Wendepunktes der Setzungslinie auftreten.

Diese Aussage muß natürlich gewertet und in Zusammenhang mit folgenden Überlegungen gestellt werden:

- Zeitstandversuche aus der Rohrstatistik
- Relaxation des Kunststoffes

Diese Gedanken werden in Kapitel 5 weiterverfolgt.

### ***Einbaufehler***

Prinzipiell stellen auch die Einbaufehler bei der Kombinationsdichtung eine Summe der möglichen Einbaufehler der mineralischen und der Kunststoffabdichtung dar. Deswegen soll hier nur auf Einbaufehler eingegangen werden, die speziell die Kombinationsdichtung betreffen.

Um den Vorteil der Kombinationsdichtung, nämlich die Addition der Vorteile einer mineralischen und einer Kunststoffdichtung zu erzielen, muß ein Preßverbund erreicht werden. Dem stehen folgende häufige Fehler in der Ausführungspraxis entgegen:

- Walz- und Reifenspuren in der mineralischen Dichtung
- zu geringe Verdichtung der mineralischen Dichtung
- Einsatz steifer Bahnen, die schon beim Abrollen von der Lagerrolle Wellen werfen
- Einbau bei ungünstiger Witterung

In Einzelfällen haben sich nach [112] Flächenanteile von 30 - 40 % ohne Preßsitz ergeben.

Nachträgliche Auflegungen von Basisabdichtungen [116] zeigten, daß neben undichten Nahtstellen in größerem Umfang Rißbildung und Perforation in der Dichtungsbahn einer Kombinationsdichtung festgestellt werden können. Diese Beschädigungen können im wesentlichen auf den Baubetrieb (Einbau des Filtermaterials und Müllauftrag) zurückgeführt werden. Dies ist im vorliegenden Fall von besonderem Interesse, da es sich hier um Testfelder handelt, bei denen allen Beteiligten bewußt war, daß eine Aufgrabung und Untersuchung folgen wird.

Generell muß noch gesagt werden, daß die mineralische Dichtschicht bei Verwendung als Bestandteil einer Kombinationsdichtung speziellen Erfordernissen gerecht werden muß, die über das übliche Maß ihrer alleinigen Verwendung hinausgehen. Die mineralische Dichtschicht dient hier nämlich auch in wesentlicher Form als Auflage der KDB. Aus der Negierung dieser Anforderungen würden sich übliche Einbaufehler ergeben. Diese Anforderungen sind nach [117]

- für die Materialstruktur:  
*Die Oberfläche als Auflageplanum darf keine Körner > 10 mm enthalten. Die Kiesanteile im Erdstoff müssen schwimmend eingelagert und allseitig von bindigem Bodenmaterial umgeben sein. Die Bildung von Kieselnestern ist auszuschließen.*

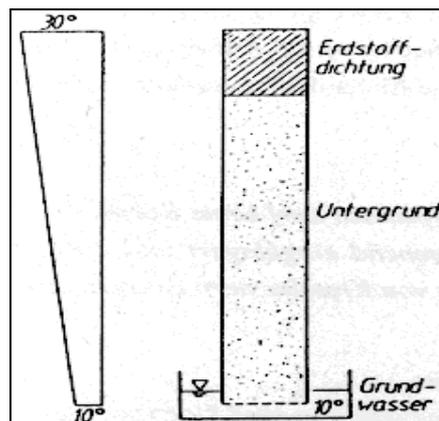
- für die Oberflächengeometrie:

*Über eine Horizontaldistanz von 4 m sind Unebenheiten von nicht mehr als  $\pm 2$  cm tolerierbar. Eindruckunterschiede (abrupte Höhenänderungen/Stufen), zum Beispiel verursacht durch benachbarte Bandageneindrücke, sollen 0,5 cm nicht überschreiten.*

*Nicht tolerierbar sind tiefe Trockenrisse oder eine vernäzte bzw. pulvrig-trockene Mineraloberfläche beim Verlegen der Kunststoffdichtungsbahn, auch wenn die vorgeschriebene Mindestdicke der mineralischen Dichtung davon nicht beeinflusst wird [117].*

### **Austrocknung**

Bei Basisabdichtungen ist das Auftreten von Austrocknung in der Diskussion [118, 24]. Bei Basisabdichtungen wirkt ein Temperaturgradient zum kühleren Grundwasser und eine Gewichtskraft nach unten (Abb. I- 4.15). Dementgegen wirkt die Wasserhaltekapazität der mineralischen Schicht, die mit zunehmender Austrocknung größer wird. Diese Voraussetzungen scheinen für Oberflächenabdichtungen aufgrund des nicht eindeutigen Temperaturgradienten nicht gegeben.



**Abb. I- 4.15: Temperaturgradient an einer Basisabdichtung [118]**

Allerdings wird die These aufgestellt, daß der zeitliche Verlauf des Temperaturgradienten quadratisch proportional zur Dicke der Abdeckschicht ist, wohingegen der Zusammenhang für die Gravitation linear ist. Dies bedeutet, daß Modellversuche, die die Gravitation untersuchen, direkt übertragbar sind, Versuche zum Temperaturgradienten jedoch einer vertieften Betrachtung bedürfen [118].

### **Abgleiten**

Das mögliche Abgleiten einer Kombinationsdichtung stellt wohl mit die Hauptproblematik dieses Abdichtungstyps dar. Abgleiten wird entweder ermöglicht durch die Wahl eines ungünstigen Neigungsverhältnisses an einer Böschung oder durch eine großflächige nachträgliche Setzung, die die hierfür zulässigen Grenzwerte überschreitet.

In Abb. I- 4.16 sind die zu untersuchenden möglichen Gleitfugen im Abdichtungssystem nach TA Siedlungsabfall dargestellt.

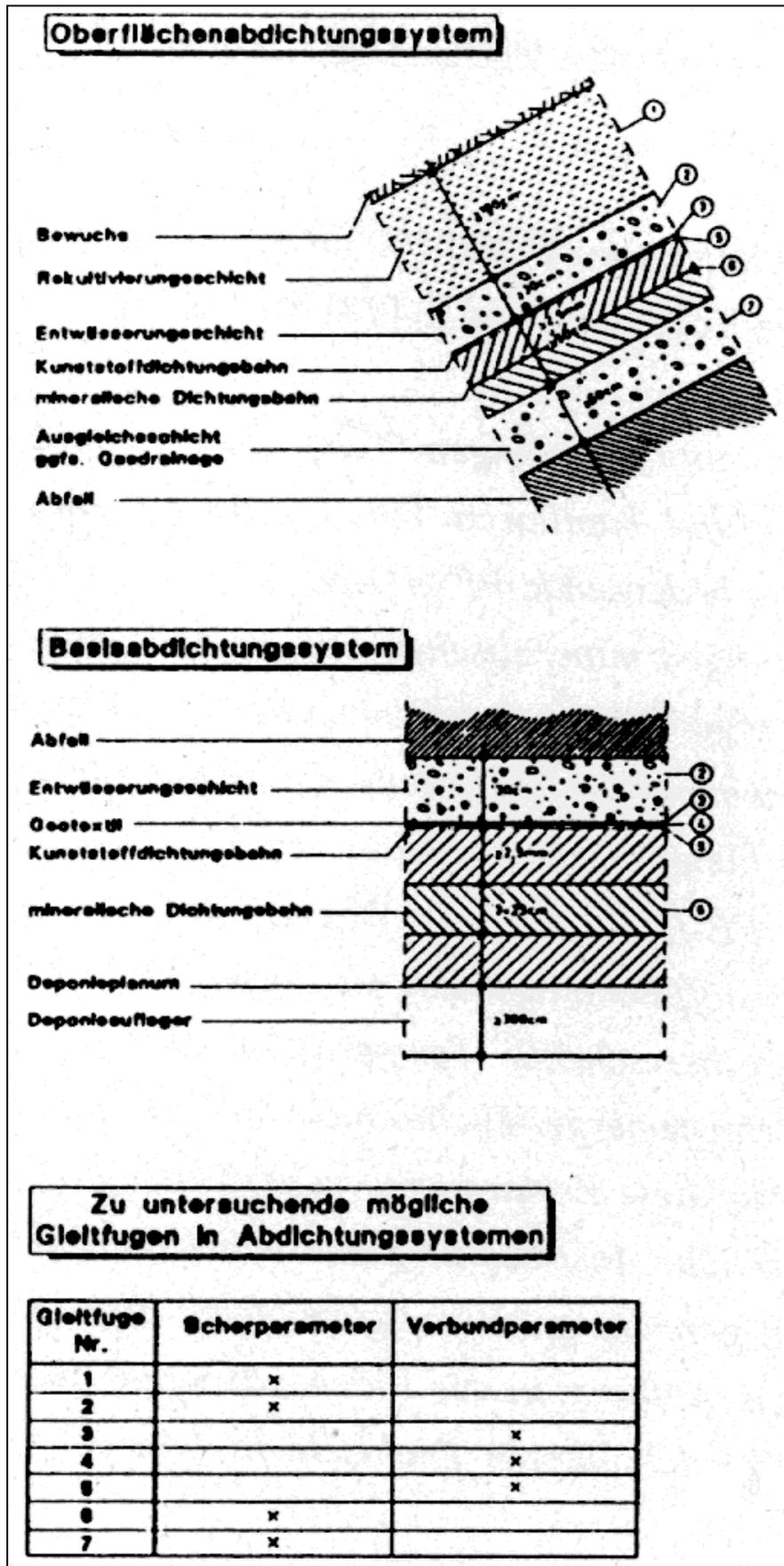


Abb. I- 4.16: Mögliche Scherfugen in einem Oberflächen- und einem Basisabdichtungssystem [115]

Die Gleitfugen Nr. 1, 2, 6 und 7 liegen innerhalb mineralischer Schichten und sind somit auf die Schereigenschaften der Materialien zurückzuführen (z.B. nach DIN 1055). Als spezielle Gleitfugen eines Kombinationsdichtsystems kommen alle Grenzflächen in Frage. Hierfür muß die ungünstigste Kombination unter Berücksichtigung der Verbundparameter gefunden werden [115].

### 4.5.3 Erfahrungen an ausgeführten Maßnahmen

#### ***Kombinationsdichtung aus verschweißten HDPE-Dichtungsbahnen über einer Geschiebemergel-Dichtschicht***

Auf der **Deponie Georgswerder** wurde ein 500 m<sup>2</sup> großes Testfeld mit diesem Dichtungstyp (s. Abb. I- 4.5) ausgeführt. Die Ergebnisse sind in [79] dargelegt:

*Die untersuchten Kombinationsdichtungen (Testfelder F2 und S2) erfüllen ihre Aufgabe sehr gut. Austrocknung aufgrund kapillaren Wasseraufstiegs aus der Geschiebemergel-Dichtschicht ist hier durch die bedeckende PE-HD-Bahn nicht möglich. Nach anfänglicher Porenwassergabe aus der bindigen mineralischen Dichtung im ersten Meßjahr, werden nur noch sehr geringe Wassermengen unter den Dichtsystemen aufgefangen. Dies ist immer interessanterweise im Hochsommer der Fall, wenn die Temperatur, anders als im Winterhalbjahr, oberhalb der Dichtung höher ist als an deren Unterkante. Da in dieser Zeit in der Flächen-drainage oberhalb der PE-HD-Bahn kein Wasser fließt, ist es sehr unwahrscheinlich, daß Leckagen in der Kunststoffdichtungsbahn zu dieser Sickerwasserbildung führen. Vielmehr scheint der im Sommer herrschende Temperaturgradient eine abwärts gerichtete Wasserbewegung aus der Geschiebemergel-Dichtschicht zu bewirken. Dies ist allerdings bisher nicht zweifelsfrei erwiesen. Für diese Erklärung sprechen auch die gemessenen Wasserspannungen, die eine leichte sommerliche Austrocknung und winterliche Wiederbefeuchtung der Geschiebemergel-Dichtung mit ganzjährig abwärtsgerichteten hydraulischen Gradienten zeigen. Gelegentliche sommerliche Abflüsse in der Flächendrainage oberhalb der PE-HD-Bahn führen nicht zu einer Wiederbefeuchtung der Dichtschicht, was bei Leckagen in der Kunststoffbahn der Fall sein müßte.*

Eine Jahresbilanz für den thermisch induzierten Wasserabtransport liegt jedoch nicht vor. Dies liegt daran, daß ungeklärt ist,

- ob der thermisch induzierte Wassertransport in flüssiger oder dampfförmiger Phase stattfindet,
- ob eventuelle Phasenübergänge auftreten,
- in welchen Bereichen des Porensystems der Geschiebemergel-Schicht im Sommer Wasser entzogen wird und wohin es im Winter wieder gelangt.

Gravitationsbedingter Abfluß scheint keine Rolle zu spielen oder wird zumindest durch wasserdampfgesättigtes Deponiegas überlagert.

#### ***Kombination aus unverschweißten HDPE-Bahnen über Geschiebemergel-Dichtschicht***

Als Standardaufbau für die Oberflächenabdichtung der Deponie Georgswerder kam eine HDPE-Bahn (in Gefällerrichtung dachziegelartig überlappend verlegt und nicht verschweißt) über einer Geschiebemergel-Dichtschicht zum Einsatz (s. Abb. I- 4.5).

Die bislang vorliegenden Ergebnisse sind in [79] festgehalten.

*Die Wirksamkeit ist bislang gut und wird vor allem durch die PE-HD-Dichtungsbahn erreicht. Der Verzicht auf ein Verschweißen der isohypsenparallelen Stöße der PE-HD-Bahn ist jedoch nachteilig. Über diese Überlappungsbereiche kann Wasser gasförmig nach oben abtransportiert werden und somit eine Austrocknung der Geschiebemergel-Schicht forciert werden. Gravierender ist jedoch der Nachteil, daß über diese Überlappung bei hohen Abflüssen in der Flächendränage Wasser auf die Geschiebemergeloberfläche gelangt. Ein auf F3 durchgeführter Tracerversuch und das Abflußverhalten im Winter 1990/91 belegen, daß solche Umläufigkeiten an den Überlappungen zu einer Durchsickerung der Mergeldichtung führen. Der Tracerversuch gibt außerdem Hinweise darauf, daß diese Durchsickerung auch hier entlang schnell leitender Makroporen erfolgt.*

Die Einbautechnologie ist aus folgenden Gründen [79] fehleranfällig:

- kapillarer Wasseraufstieg ist als Ursache für Rißbildung nicht möglich
- aufgrund der gemessenen Wasserspannungen ist eine Neubildung von Schrumpfrissen unwahrscheinlich
- der Einbau erfolgte unter günstigen Bedingungen im Spätsommer.

#### ***Kombinationsdichtung aus einer HDPE-Bahn über Schluff***

Dieser Dichtungstyp, der in Abb. I- 4.17 dargestellt ist, kam auf der **Deponie Gerolsheim** zum Einsatz.

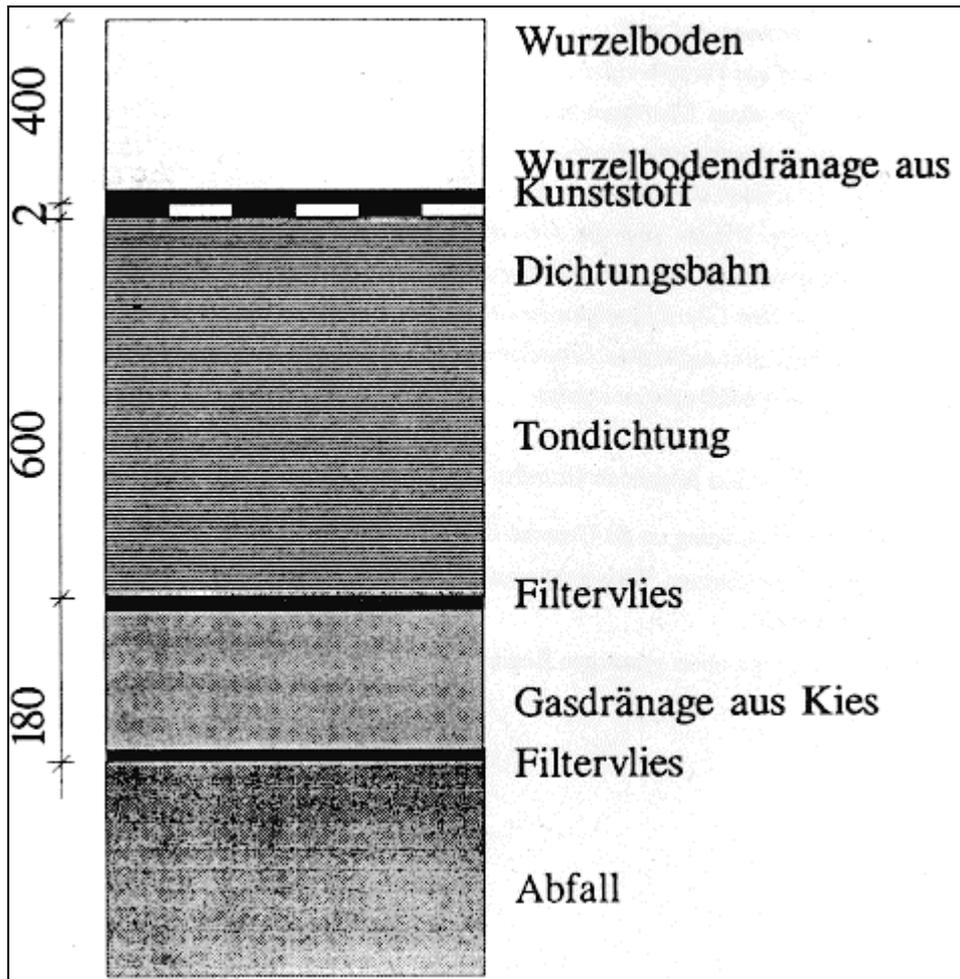


Abb. I- 4.17: Kombinationsdichtung der Deponie Gerolsheim

Die untersuchten Materialveränderungen sollen mit Hilfe der Daten aus [99] tabellarisch veranschaulicht werden.

Parameter	Wurzelboden	Deckschicht
Kornverteilung	teilweise Abnahme der Feinbestandteile am Böschungsfuß	Schwankungen im Toleranzbereich
Wassergehalt	deutliche Abnahme an der Unterkante	nicht einheitlich
Organikgehalt	verändert sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt	kein Einfluß von Organismen feststellbar
Dichte und Porenanteil	keine erkennbaren Veränderungen	Auflockerung in Deckschichtmitte
Luftporengehalt	Zunahme von 0,9 auf 9,2 %	nicht einheitlich
Wasserdurchlässigkeit	von $3,7 \cdot 10^{-10}$ auf $1,1 \cdot 10^{-7}$ m/s	nicht einheitlich

Tab. I- 4.9: Untersuchungen an der Deponie Gerolsheim und Veränderungen der Parameter (Kombinationsdichtung) im Zeitraum von 1985 - 1988, Daten aus [99]

Anhand dieser Daten und weiteren Beobachtungen läßt sich schlußfolgern, daß die Kombinationsdichtung auf diesem Testfeld ihre Aufgabe, im wesentlichen die Trennwirkung, im Beobachtungszeitraum gut bewältigt hat. Eine Prognose allerdings auf einen längeren Zeitraum, aufgrund dieses doch relativ kurzen Untersuchungszeitraumes, scheint nicht angemessen. Der Tab. I- I- angefügt werden muß, daß ein Eintrag von Feinanteilen in die Gasdränschicht wahrscheinlich durch Suffosion stattgefunden hat. Bemerkenswert sind auch noch teilweise Bodenverlagerungen vom Böschungskopf zum Böschungsfuß, aber um hier eindeutige Aussagen zu machen liegen zu wenige Meßergebnisse vor.

Auffällig ist die Abnahme des Wassergehaltes des Wurzelbodens am Böschungsfuß, der wohl durch einen Lufteintrag durch die Dränschicht erklärt werden kann. Weiterhin ist der zweilagige Einbau der mineralischen Deckschicht ursächlich für Veränderungen an dieser Stelle.

Die Untersuchungsergebnisse der Kunststoffdichtungsbahn zeigen keine wesentlichen Veränderungen bis auf eine Zunahme der Schichtdicke um ca. 5 % und Zunahme der Reißdehnung um bis zu 32 %. Diese Werte wirkten sich offensichtlich nicht auf die anderen Untersuchungen zur Elastizitätsbestimmung aus.

## 5. Bewertung und Vergleich der Dichtsysteme

### 5.1 Alternative Dichtsysteme

#### *Wasserglasvergütete mineralische Abdichtungsschicht*

In der Henkel-Deponie Monheim (1962 - 1972) wurden Bauschutt, Kesselschlacken und Industrierückstände in einer ehemaligen Kiesgrube abgelagert. Die Deponie weist eine Gesamtfläche von etwa 42.300 m<sup>2</sup> auf. Die Mächtigkeit des Deponiekörpers beträgt im Mittel 6,50 m, die Sohle liegt oberhalb des Grundwasserspiegels.

Als mineralisches Ausgangsmaterial wurden ortsüblicher Lößlehm und Auenlehm gewählt. Die Eignungsprüfung der beiden Abdichtungslagen erbrachte, daß durch Zugabe von etwa 2 kg/m<sup>2</sup> pulverförmigem Wasserglas je Lage (d = 25 cm) und ausreichender Verdichtung auf  $D_{pr} > 95 \%$  bei den vorgenannten Bodenarten Durchlässigkeitsbeiwerte von  $k_f < 5 \cdot 10^{-10}$  m/s erreicht werden [119].

Die wasserglasvergütete mineralische Abdeckungsschicht sollte, gemäß den behördlichen Vorgaben, einen Mindest-Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s aufweisen. Die erzielten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen zwischen  $k_f = 2 \cdot 10^{-10}$  m/s und  $k_f = 7 \cdot 10^{-11}$  m/s. Bei zu trockenem Einbau wurden vereinzelt Dichtigkeitsbeiwerte von etwa  $2 \cdot 10^{-9}$  m/s gemessen. Hier wurden eine Nachberieselung und eine Nachverdichtung angeordnet.

Um die Effizienz dieser Abdichtung aufzuzeigen, wurden ständige Messungen des Deponie-sickerwasserspiegels durch Brunnen durchgeführt. Schon innerhalb weniger Wochen war eine merkliche Absenkung zu verzeichnen.

Die unter Langzeitwirkung erhaltenen Ergebnisse der Dichtigkeit lassen auf eine hohe Beständigkeit auch der Basisabdichtung mit Wasserglas schließen [120]. So wurden nach 7-jähriger Betriebsphase Aufgrabungen vorgenommen, die eine Messung des  $k_f$ -Wertes ermöglichten. Das Ergebnis war ein Wert von  $1,1 \cdot 10^{-10}$  m/s im Vergleich zu einem Wert in der Bauphase von  $6,1 \cdot 10^{-9}$  m/s.

#### *Kapillardichtung*

Der Aufbau einer Kapillarsperre wird im folgenden geschildert.

Das Dichtungssystem **Kapillarsperre** (Abb. I- 5.1) besteht aus mehreren geneigten Schichten:

- der Abdeckschicht mit kulturfähigem Oberboden und evapotranspirierender Vegetation
- der Kapillarschicht aus einem Feinsand möglichst steiler Sieblinie
- dem Kapillarblock, einem Grobsand steiler Sieblinie aber filterstabil gegenüber dem Feinsand
- und der über dem Müllkörper liegenden Ausgleichsschicht, als möglichst ebene stabile Unterlage für die Verdichtung der darüber liegenden Schichten

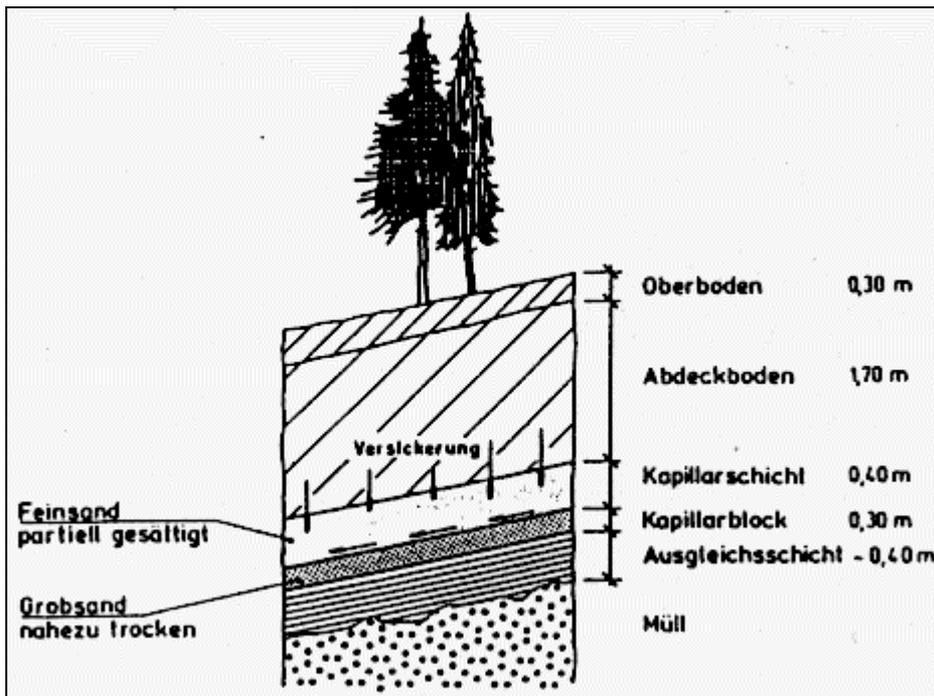


Abb. I- 5.1: Aufbau einer Kapillarsperre [121]

Die Abdeckschicht mit Vegetation hat die Aufgabe den Niederschlag zwischenzuspeichern und über die Vegetation möglichst viel davon zu evapotranspirieren. Darüberhinaus versickerndes Wasser wird gleichmäßig an die Kapillarschicht abgegeben. Bei Starkregen soll die Vegetation auch erosions sicheren Abfluß gewährleisten.

Im Feinsand der Kapillarschicht baut sich durch einsickerndes Wasser ein Kapillarsaum über die Schichtgrenze zum Grobsand des Kapillarblockes auf, in der das Sickerwasser lateral hangabwärts (interflow) fließt und am Fuß durch Dräns gefaßt wird.

Der deutliche Sprung in der Porengröße von Kapillarschicht und -block verhindert weitgehend den Eintritt und die vertikale Weiterleitung von Wasser aus dem darüberliegenden Kapillarsaum. Beim Übergang von feinen zu groben Poren, bilden sich auch am unteren Ende des Kapillarsaums Menisken, die das Wasser dort halten [39].

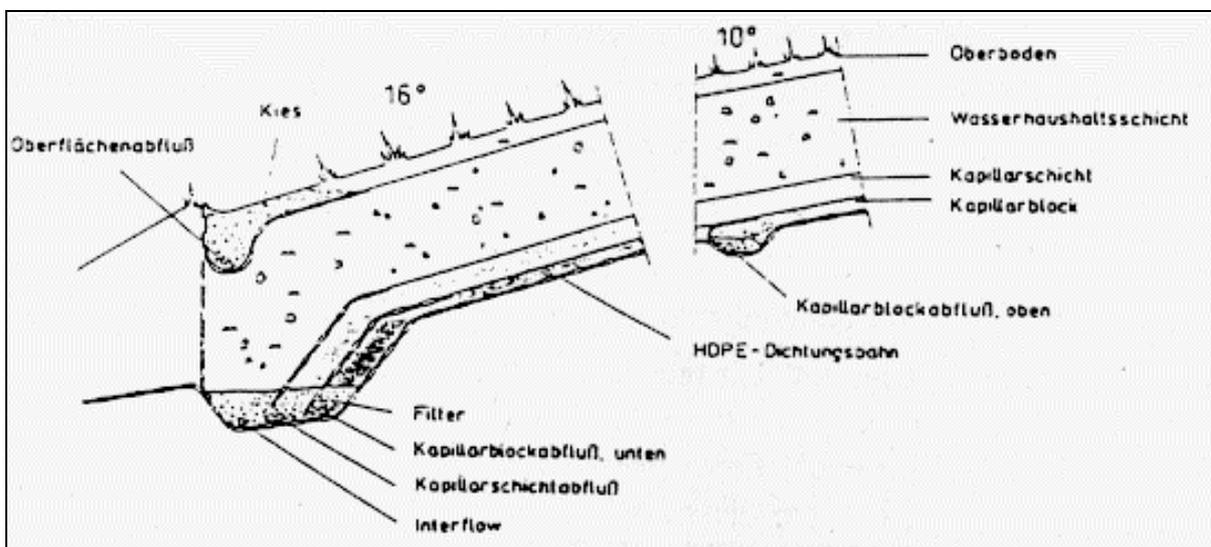
Zu dem oben erwähnten Starkregen muß allerdings hinzugefügt werden, daß nach einer längeren Trockenperiode auch ein Durchbruch von Wasser aus dem Kapillarblock beobachtet wurde [136].

Das Institut für Wasserbau der TH Darmstadt hatte mehrere Versuchsrinnen in Betrieb, um verschiedene Materialkombinationen, Störungen in der Schichtung und den Einsatz von Geotextilien in zeitaufwendigen Versuchen zu prüfen.

Die ehemalige Hausmülldeponie "Am Stempel" des Landkreises Marburg-Biedenkopf hat ein 3300 m<sup>2</sup> großes Testfeld mit einer Kapillarsperre als Oberflächenabdichtung erhalten. Nach neunmonatiger Beobachtungszeit wird ihr hier, so wörtlich, "hervorragendes Dichtungsverhalten" attestiert [122]. Der Aufbau (s. Abb. I- 5.2) besteht von unten nach oben aus:

- einem Kapillarblock der Körnung 0,71/2 mm aus Basaltsplit mit einer Mächtigkeit von 0,30 m über einer Ausgleichsschicht von 0,40 m Stärke,
- einer Kapillarschicht der Körnung 0/1 mm aus Feinsand mit einer Mächtigkeit von 0,40 m,
- einer 1,70 m dicke Schicht aus bindigem Aushubmaterial als Wasserhaushaltsschicht.

Die Funktionstüchtigkeit einer Kapillarsperre hängt unter anderem von einer annähernd ebenen Grenzschicht zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock ab. Die Probleme, die dadurch bei einem großflächigen Einbau auftreten, sind nach den Ausführungen in [122] als gelöst zu bezeichnen. Eine Fläche von ca. 1000 m<sup>2</sup> konnte mit einer üblichen Planierdrape einschließlich des Erosionsschutzes eingebaut werden. Die Kosten lagen mit ca. 180 DM/m<sup>2</sup> in der Größenordnung einer Kombinationsdichtung, wobei es sich hier aber um einen Einbau im Probestadium handelte, der vermutlich größere Kosten als ein Einbau im Regelbetrieb verursacht.



**Abb. I- 5.2: Aufbau des Dichtungssystems mit Wasserfassung auf der Deponie "Am Stempel" [122]**

Weiterhin sind 4 Meßfelder mit Kombinationsdichtung bindig mineralisch über Kapillarsperre und Kapillarsperre über Kapillarsperre in Vorbereitung [121].

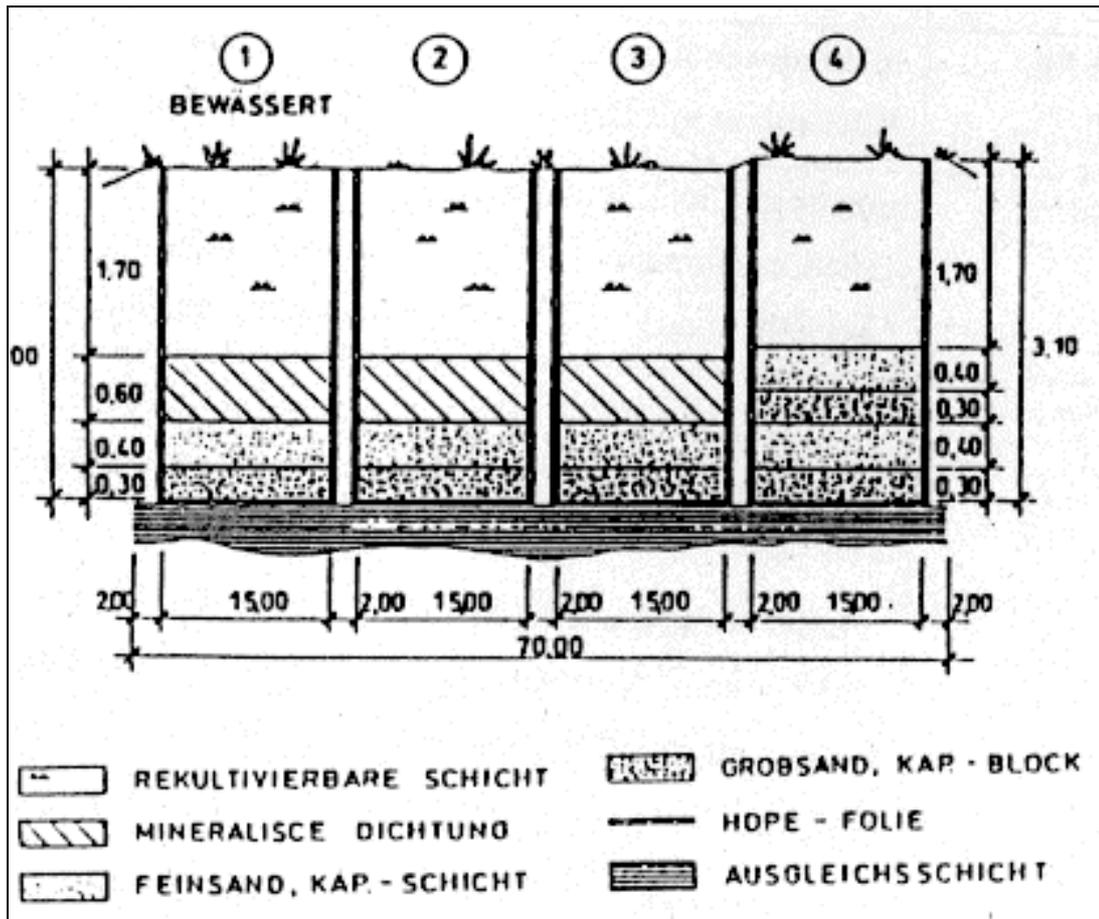


Abb. I- 5.3: Geplante Probefelder 15 \* 40 m mit Kombinationsdichtung auf dem Monte Scherbelino, Frankfurt a. M. [121]

Die Ergebnisse auf der Deponie Georgswerder [79] liegen im Einklang mit diesen Schilderungen. Von denen in diesem Großversuch getesteten Dichtungen schnitt die Kapillarsperre am besten ab. Weiterhin wird hier, bei hohem Schadstoffpotential, eine Kapillarsperre mit darüberliegender Kunststoffolie analog zur Kombinationsdichtung, vorgeschlagen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Kombinationsdichtung wäre hier eine echte Kontroll- und somit Repariermöglichkeit gegeben.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Gegenüberstellung von mineralischer Dichtung und Kapillarsperre. Dies soll hier tabellarisch geschehen.

Aspekt	Kapillarsperre	Mineralische Dichtung
Wiederaufforstung	möglich, Einwachsen von Wurzeln unschädlich	hohe Überdeckung notwendig (Wurzeltrieb)
nachträglicher Einbau von Rohren	Fremdkörper, selbst offene Löcher werden umströmt	nur mit besonderem Aufwand möglich
Gasdichtigkeit	Kapillarschicht bleibt durchlässig	bedingt vorhanden, sofern keine Ribbildung
Gefahr der Austrocknung	Austrocknung ist unschädlich	vorhanden (Ribbildung, Makroporen)
Abdichtung von großen Flächen mit kleinem Gefälle	nicht anwendbar, es sei denn im Rückenbau mit Drän	möglich, doch Filter und Dräns notwendig
Setzungsempfindlichkeit	unempfindlich, Setzungsrisse fallen zusammen (Selbstheilung)	je nach Plastizität und Langzeitverhalten empfindlich bis sehr empfindlich, Ribbildung
Kostenfaktoren		
- Material	günstig, da teilweise Abfallkörnung	meistens aufwendige Beschaffung
- Einbau	relativ einfach, nur Glattwalzen, keine Verdichtung, wenig witterungsempfindlich	erfordert bestimmten Wassergehalt, hohe Verdichtung und Sorgfalt, witterungsempfindlich
- Materialüberwachung	einfach	relativ aufwendig
- Sickerwasserableitung	nur Fangdräns erforderlich	meist Flächenfilter und Dräns notwendig

**Tab. I- 5.1: Vergleich Kapillarsperre - Mineralische Dichtung [121]**

### ***Gemischtkörniges Dichtungsmaterial Wülfrather Mineraldecke - Wülfralit***

Dieses Material wurde bereits erprobt und beschrieben [123]. Allerdings ist hier keine Depo- nie mit überwiegendem Hausmüllanteil gesichert worden, sondern ein mit Schwermetallen belasteter Boden in einem Wohngebiet (Essen, Zinkstraße).

Als Grundlage für die Entwicklung eines geeigneten Dichtungsmaterials wurde das bei der Deutschen Bundesbahn bereits seit mehreren Jahren für Planumschutzschichten eingesetzte Mineralgemisch herangezogen. Dieses Mineralgemisch besteht aus einem gebrochenen Natur- stein der Körnung 0/45 bzw. 0/32 und weist neben einer hohen Tragfähigkeit bereits Durch- lässigkeitsbeiwerte von  $k \leq 1 \cdot 10^{-6}$  m/s auf.

Zur Optimierung der Durchlässigkeitseigenschaften wird der Feinanteil dieses Materials durch Zugabe von natürlichen Füllern erhöht. Diesem Grundmaterial wird in einem für diesen Zweck umgerüsteten, chargenweise arbeitenden Zwangsmischer Bentonit und Wasser zuge-

geben. In einem ersten Schritt erfolgt die Zugabe der Bentonitmenge entsprechend der Rezeptur und eine intensive Durchmischung mit dem Grundmaterial. Anschließend wird der Einbauwassergehalt unter Berücksichtigung des Wassergehaltes des Grundmaterials eingestellt.

Nach den Ergebnissen der Eignungsprüfung ist zur Erzielung eines Durchlässigkeitsbeiwertes  $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$  m/s eine Bentonitzugabe von 3 Gew.-% und zur Unterschreitung des Durchlässigkeitsbeiwertes von  $k \leq 1 \cdot 10^{-10}$  m/s eine Bentonitzugabe von 5 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Trockengewicht des Grundmaterials, erforderlich. Der Feinkornanteil, vorwiegend bestehend aus natürlichen Füllern, darf 14 Gew.-% nicht unterschreiten. Die günstigsten Durchlässigkeitsbeiwerte werden in der Regel bei Wassergehalten oberhalb des Proctoroptimums erzielt.

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist je nach Erfordernis bis zu  $k \leq 10^{-10}$  m/s im Labor einstellbar. Durch den hohen Feststoffanteil ergibt sich eine hohe Trockenraumdicke und eine geringe Schrumpfungsfahr. Die günstige Kornverteilung bewirkt eine hohe Tragfähigkeit des Dichtungsmaterials. Die hohe Scherfestigkeit ermöglicht auch den Einbau an stark geneigten Flächen. Da die Dicke der Vegetationsschicht mit 1,0 m vorgegeben war, ließ sich die Gesamtmächtigkeit der Abdeckung nur durch die Wahl des Dichtungssystems beeinflussen. Zur Vermeidung von Fehlstellen wurde die Dichtungsschicht in zwei Lagen in Dicken von 20 und 15 cm hergestellt (Abb. I- 5.4).

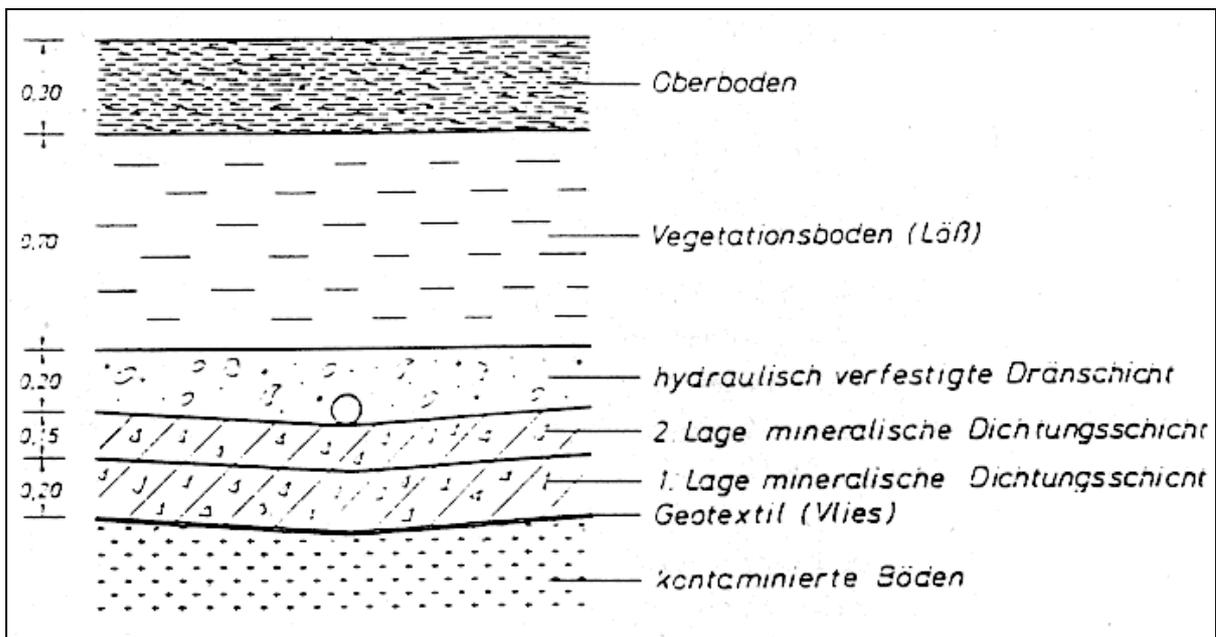


Abb. I- 5.4: Konstruktive Ausbildung der Abdeckung "Essen, Zinkstraße" [123]

Zur Abführung des auf der Dichtungsschicht aufgestauten Niederschlagswassers wurde hier eine Dränschicht oberhalb der Dichtungssperre angeordnet. Da diese Schicht hier gleichzeitig als "Spatensperre" dienen sollte, wurde ein gebrochenes, kornabgestuftes Mineralgemisch gewählt, das durch Zugabe von ca. 4 Gew.-% Zement hydraulisch abbindet und zusammen mit der tragfähigen Dichtungsschicht eine für den Einbau von Versorgungsleitungen sowie des Vegetationsbodens befahrbare Tragschicht bildet. Für die Vegetationsschicht wurde ein feinkörniger Schluff verwendet.

### *Sonstige Systeme*

In diesem Zusammenhang sei ein neuartiges System [124] genannt, bei dem Elemente aus Recycling-Kunststoff verwendet werden sollen. Dies ist deswegen interessant, da laut TA-Siedlungsabfall Recyclingmaterialien bevorzugt werden. Bei diesem System ist daran gedacht, Plattenelemente nach dem "Mönch und Nonne" - Prinzip zu verlegen. Dieses System könnte eventuell an der Hausmülldeponie Böblingen in einem Versuchsfeld Anwendung finden.

Asphaltbeton könnte auch für Oberflächenabdichtungen in Betracht kommen [125]. Bei Hausmülldeponien jedoch, ist diese Abdichtungsart wohl als kritisch zu beurteilen. Dies ist begründet in der Gefahr der unsteten Setzung und der Empfindlichkeit des Materials gegenüber Scherbeanspruchungen. Durch Auswaschung, biologischen Abbau und Gasinhaltsstoffe würde dieser Dichtungstyp wahrscheinlich nicht beeinträchtigt werden [126, 125].

Weiterhin denkbar, aber im Rahmen dieser Literaturstudie als ausgeführte Beispiele einer Oberflächenabdichtung nicht vorliegend, sind folgende Varianten:

- wasserglasvergütete Dichtsysteme aus Abfallstoffen und Recyclingmaterialien [127]
- diverse (z.B. mit Bentonit) vergütete Materialien (z.B. Sande) [128]

Das Thema der Hochsicherheitsdeponien [z.B. 129, 130] soll hier ausgeklammert bleiben, da aufgrund ihrer Philosophie keine Vergleichbarkeit zu den übrigen Dichtsystemen gegeben ist.

## **5.2 Bewertung der Dichtsysteme**

Aus den in der Literatur gewonnenen Daten lassen sich gewisse Unterschiede im Materialverhalten der Dichtsysteme aufgrund von Belastungen feststellen. Die meisten Erfahrungen und Untersuchungen liegen für die mineralische Dichtung vor, über Kombinationsdichtungen, zumindest im Bereich der Oberflächenabdichtung, ist die Datenbasis dünn.

Eine besondere Stellung bei den Beanspruchungen nehmen die Einbaufehler ein. Sie sind zum einen keine "Beanspruchung" im eigentlichen Sinne und ziehen zum andern bei allen Abdichtungsmaßnahmen gleichermaßen wahrscheinlich zahlenmäßig die größten Schäden nach sich, wobei konkrete Zahlenangaben hierüber jedoch noch ausstehen.

Die Verwendung von rein mineralischen Abdichtungen scheint aufgrund von Austrocknung und Durchwurzelung bedenklich zu sein, obwohl auch Vorteile für eine mineralische Abdichtung sprechen. So wird z.B. die Durchlässigkeit, aufgrund des vorgeschriebenen Prüfverfahrens mit  $i = 30$ , allgemein zu hoch angenommen.

An den im Kapitel 4.2.3 angesprochenen rein mineralischen Oberflächenabdichtungen sind jedenfalls Austrocknungserscheinungen nachgewiesenermaßen aufgetreten. Die Steigerung der gemessenen Durchflußmenge auf der Deponie Georgswerder um ca. die sechsfache Menge innerhalb zweier Jahre spricht für sich. Außerdem sprechen Tracerversuche und das gleichzeitige Ansteigen von durchsickertem Wasser mit dem Oberflächenabfluß für die Existenz von Makroporen.

Zugute halten muß man der mineralischen Oberflächendichtung, daß die Überdeckung mit Mutterboden bei den Standorten, an denen Austrocknung beobachtet werden konnte, eine zu

geringe Mächtigkeit aufwies. So ist die Dichtung in Georgswerder mit einer 75 cm starken Schicht bedeckt und die in Gerolsheim gar nur mit 40 cm. Dadurch wird die Abdichtung auch stark durch Frost/Tau-Zyklen beansprucht. In der TA-Siedlungsabfall wird hingegen eine Rekultivierungsschicht mit einer Mächtigkeit größer als 100 cm gefordert. In der Praxis werden aus diesem Grund Rekultivierungsschichten mit einer Dicke von bis zu 200 cm ausgeführt. Die Schichtdicke wird jedoch durch das dafür verlorene Deponievolumen begrenzt. Angemerkt werden soll hier noch, daß quellfähige Tone gegenüber Frost empfindlicher sind.

Ein Vorteil der mineralischen Dichtung, der oft angeführt wird, nämlich die Möglichkeit der "Selbstheilung", kann im Bereich der Oberflächenabdichtung weder durch Laborversuche noch durch ausgeführte Maßnahmen in der vorliegenden Literatur bestätigt werden. Dies erklärt sich daraus, daß zum Effekt der Selbstheilung eine gewisse Auflast nötig ist.

Der entscheidende Vorteil einer mineralischen Dichtung ist die relative Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Die Scherfestigkeit nimmt jedoch mit ansteigendem Porenwasser ab, d.h. nach einem Versagen der Drainage können auch Auflasten, beispielsweise durch Befahren, zu einem Versagen führen. Bei größerer Schichtdicke zeigt die mineralische Abdeckung einen Übergang zur plastischen Verformung.

In die Kategorie der mechanischen Beanspruchungen gehört auch das Verhalten gegenüber ungleichmäßigen Setzungen. Hierzu liegen umfangreiche Untersuchungen, die das Reaktionsverhalten betreffen vor, die allerdings nicht die tatsächlich auftretenden Setzungsunterschiede beinhalten. Festhalten läßt sich jedoch, daß Krümmungsradien von  $R = 200$  m im allgemeinen problemlos aufgenommen werden können.

Beginnende Durchwurzelung konnte an der mineralischen Dichtung der Deponie Gerolsheim festgestellt werden. Die untersuchten Parameter, die hierfür relevant sind, nämlich Luftporengehalt und Organikgehalt, lagen nach einem Untersuchungszeitraum von drei Jahren bereits in der Größenordnung des Wurzelbodens. Dieser allerdings war sehr gering durchlässig und verfestigte sich im Laufe der drei Jahre noch.

Durch eine einfache mineralische Oberflächenabdichtung, ohne weitergehende Maßnahmen wie Drainage und Einlegen von Geotextilien, läßt sich eine Reduzierung von 4 - 9 % der Sickerwassermenge bezogen auf eine Vergleichsfläche ohne Oberflächenabdichtung erreichen. Wie lange die mineralische Oberflächenabdichtung allerdings ihre Dichtfunktion wahrnehmen kann, hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab.

Bei reinen Kunststoffabdichtungen ist die Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen wohl am größten. Hier kann von vornherein mit einem gewissen Maß an Einbaufehlern aufgrund dieser Empfindlichkeit gerechnet werden. Ein Vergleich von Daten hierzu ist für hiesige Verhältnisse aus der vorliegenden Literatur nicht möglich. Gut untersucht ist hingegen das reine Werkstoffverhalten. Bei vorgegebenen Belastungen und bekannten Randbedingungen, wäre es möglich das Verhalten in gewissen Grenzen abzuschätzen.

Im Vordergrund bei einer Kunststoffdichtung steht die Bestimmung der zwei axialen Zugfestigkeit, da diese bei einer Belastung durch Setzung bzw. Sackung ausschlaggebend ist. Plattenberstversuche ergaben für Material aus HDPE eine Dehnung von bis zu 30 % bis Rißtritt. Bestimmt werden müssen aber auch im Einzelfall die mitwirkenden Reibungskräfte. Weiterhin ist die Dauer und die Geschwindigkeit der Belastung für die Haltbarkeit der Dichtung

tungsbahn mitentscheidend. Die Geschwindigkeit der unregelmäßigen Setzungen wird sich in den gleichen Größenordnungen wie die der regelmäßigen bewegen und somit nicht minimierend sein.

Die chemische Beständigkeit scheint aufgrund von Untersuchungen an Basisabdichtungen gegeben zu sein. Weitgehend ungeklärt hingegen ist, zumindest liegen kaum Veröffentlichungen im Rahmen dieser Literaturrecherche vor, das Verhalten gegenüber dauerhaftem Einfluß von Mikroorganismen und das Ausmaß von Schäden durch allgemeinen biologischen Einfluß. Denn anders als bei Untersuchungen zur mechanischen Haltbarkeit und der Resistenz gegenüber chemischen Angriffen, lassen sich diese Vorgänge, beispielsweise durch Erwärmung, kaum beschleunigen und extrapolieren.

Entscheidend für eine langanhaltende Funktionsfähigkeit der Dichtungsbahn ist eine ordnungsgemäße Ausführung. Einbaufehler stellen auch hier wohl das Gros der Undichtigkeiten. Beschädigungen der Dichtungsbahn treten beim Transport, Verlegen und anschließendem Einbau der darüber liegenden Schichten auf. Vergleichende Untersuchungen an mehreren Deponien zum Ausmaß dieser Beschädigungen liegen für hiesige Verhältnisse, den verwendeten Materialien und Methoden nicht vor. Festgestellt worden ist jedoch, daß sich lokale Schäden nur gering auf die absolute Durchflußmenge auswirken.

Auf der Deponie Gerolsheim wurde die Dichtungsbahn nach drei Jahren umfassend untersucht, mit dem Ergebnis, daß die Dicke zu- und der E-Modul abnahm. Diese Veränderungen sind wohl auf Quellen der Dichtungsbahn einerseits und mechanische Beanspruchungen wie nachträgliche Befahrung und unterschiedliche Setzungen andererseits zurückzuführen. Betont werden muß aber, daß die Dicke des Wurzelbodens mit 40 cm nicht die Anforderung der TA-Siedlungsabfall erfüllt und somit die teilweise große Veränderung der Materialparameter auch der Konfiguration anzulasten ist.

Generell kann gesagt werden, daß der Wurzelboden auch als Pflanzenstandort dient und somit für alle Abdichtungsmaßnahmen eine Erosionsvorbeugung bedeutet, die nicht mit den anderen Abdichtungsbestandteilen verglichen werden kann.

So sind die Einflüsse der Durchlebung für den Wurzelboden unabdingbar, hingegen für die Bestandteile wie Dränmatten und Dichtungsschichten funktionszerstörend.

Die innerhalb dieser Literaturrecherche vorliegenden Kombinationsdichtungen erfüllen ihre Aufgabe gut. Der Einbau von Kombinationsdichtungen stellt jedoch hohe Anforderungen an die ausführenden Unternehmen, so daß ein gewisses Maß an "Fehlstellen" wahrscheinlich erscheint. Über dieses Maß liegen bislang nur vereinzelt Aussagen vor. Außerdem scheint fraglich, ob die mineralische Abdichtung lange nach Beschädigungen der Kunststoffolie intakt bleibt. Dies leitet sich aus Untersuchungen an der Deponie Georgswerder ab, bei der die Kunststoffdichtung lediglich überlappend über der mineralischen Abdichtung angeordnet wurde. Hier wurden schon nach relativ kurzer Zeit Umläufigkeiten und Makroporen festgestellt.

Ein genereller Kritikpunkt an der TA-Siedlungsabfall, nämlich die Festlegung auf ein vorgeschriebenes Dichtsystem, ist mit den Änderungen vom März '93 entkräftigt. Hier werden alternative Systeme ausdrücklich zugelassen, wenn der Nachweis der Gleichwertigkeit erbracht ist. Eine Definition des Begriffes der Wertigkeit steht allerdings noch aus.

## 6. Kriterien zur Beurteilung des Langzeitverhaltens

### 6.1 Langzeitverhalten der Dichtmaßnahme

Kriterien zur Beurteilung des Langzeitverhaltens resultieren aus den in den vorigen Kapiteln angesprochenen Reaktionen auf das Langzeitverhalten.

Allgemein werden in der Literatur keine nachvollziehbaren Angaben gemacht, die auf ein unmittelbares Versagen nach einem gewissen Zeitpunkt schließen lassen. Vielmehr wird aufgrund der als realistisch zu erachtenden Beanspruchungen von einer Haltbarkeit des Gesamtbauwerkes von mehreren 100 Jahren ausgegangen. Hingegen werden aber auch nur Zeiträume von mehreren Jahrzehnten in die Diskussion gebracht, ohne diese Angaben näher zu begründen.

Eine rechnerische Beurteilung ist nur von beschränkter Aussagefähigkeit, da die hierfür notwendigen Lastannahmen (z.B. aus unregelmäßigen Setzungen) nur ungenügend erforscht sind. Trotzdem sollen einige Aspekte und Mechanismen näher betrachtet werden.

Unmittelbar verbunden mit einer Langzeitabschätzung der Dichtungsmaßnahme sollte eine Risikoanalyse sein, die sowohl die Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen Maßnahmen umfaßt, als auch die Auswirkungen des Versagens mit berücksichtigt. Aber eben für eine solche Risikoanalyse [57] sind die nötigen Eingangsparameter ungenügend geklärt.

Schwerlich quantifizierbar sind ebenfalls die Einbaufehler, die als Resümée aus der Literatur einen großen Teil der Versagensursachen darstellen. Als besonders anfällig gegenüber Einbaufehlern scheinen die Kunststoffdichtungsbahnen zu sein. Bei Freilegungen wurden neben undichten Nahtstellen in größerem Umfang Ribbildung und Perforation in den Dichtungsbahnen festgestellt [116].

#### ***Kontrolle der Verbundwirkung***

Die Herstellung und dauerhafte Wahrung eines Preßverbundes ist eine der Hauptanforderungen an eine Kombinationsdichtung, und eine vorherige Kontrolle unabdingbar für eine vollständige Funktion. Wenn davon ausgegangen wird, daß ein Preßverbund zur Zeit  $t = 0$  (Vollendung des Bauwerks) erreicht wurde, stellt sich als nächstes die Frage, wie lange dieser unter bestimmten Bedingungen bestehen kann. Zur Kontrolle des Verbundes bietet sich in erster Näherung eine Kräftebilanz, bei der treibende und haltende Kräfte gegenübergestellt werden, an. Dies führt zur Formel (s.a. Kapitel 4.5.2):

$$\Delta \varepsilon * E_{KDB} * A_{KDB} + S + \Sigma G \sin \beta > (a + \sigma * \tan \delta') * A_k$$

mit:

$\Delta \varepsilon$	:	Dehnungsdifferenz im Bereich dx [-]
$E_{KDB} * A_{KDB}$	:	Dehnsteifigkeit der Dichtungsbahn [kN/m]
$S$	:	Strömungskraft (falls vorhanden) [kN/m]
$\Sigma G \sin \beta$	:	Abtriebskraft [kN/m]
$a + \sigma \tan \delta'$	:	Haftreibung [kN/m <sup>2</sup> /m]
$A_k$	:	Kontaktfläche zwischen KDB und Dichtung [m <sup>2</sup> ]

### Gl. 6.1: Kräftebilanz einer Kombinationsdichtung

Wenn diese Relation erfüllt ist, liegt zwischen KDB und mineralischer Dichtungsschicht kein Verbund mehr vor [115]. Ein Gleitvorgang setzt ein, der zur Folge hat, daß Spannungsspitzen abgebaut und Relaxation berücksichtigt werden muß. Als erstes stellt sich die Frage, welche Parameter in diese Bedingung eingehen, die durch ihr Langzeitverhalten eine Veränderung des Gleichgewichtes oder des Sicherheitsfaktors bewirken können?

An erster Stelle steht hierbei die Dehnungsdifferenz  $e$ , denn der Hauptuntersuchungsgegenstand muß das Verhalten auf Setzung und der damit verbundenen Dehnungen sein. Deswegen soll die Bedingung nach  $e$  aufgelöst dargestellt werden:

$$\Delta \varepsilon = \frac{(\sigma \tan \delta') * A_k - \Sigma G \sin \beta}{E_{KDB} * A_{KDB}}$$

### Gl. 6.1 a: Kräftebilanz einer Kombinationsdichtung, nach $e$ aufgelöst

Das Gleichheitszeichen drückt aus, daß zu dem Zeitpunkt, an dem  $e$  erreicht wird, die Bedingungen für einen Verbund nicht mehr gewährleistet sind. Aus den in Kapitel 4.3.2 genannten Gründen werden die Adhäsion  $a'$  und die Strömungskraft  $S$  nicht berücksichtigt.

Nun sollen in Abhängigkeit von  $e$  folgende Parameter diskutiert werden:

- Neigung  $\beta$
- Höhe der Auflast  $h$
- Dehnsteifigkeit  $EA$  der Dichtungsbahn

Die Neigung verändert sich durch regelmäßige Setzungen (s. Kapitel 3.2) zur sicheren Seite hin. Durch unregelmäßige Setzungen jedoch besteht auch die Möglichkeit einer ungünstigen Beeinflussung und außerdem übt das Eigengewicht aufgrund der Neigung eine Kraft auf die KDB aus, die im Langzeitverhalten beachtet werden muß.

Um den Einfluß der Neigung zu veranschaulichen, sind eine Wichte des Deckssubstrates von  $g = 16 \text{ kN/m}^3$ , eine Bedeckung mit Mutterboden von  $d = 1,0 \text{ m}$ , eine Verbundfläche von  $8 \text{ m}^2$ ,

eine Hanglänge von 10 m, ein E-Modul von  $E_{KDB} = 25 \text{ N/mm}^2$  mit einer 2,5 mm dicken Folie angenommen worden. Wobei hier  $\phi = 30^\circ$  (kann auch mit Formel in Abhängigkeit des Luftporengehaltes berechnet werden), und  $\mu_\phi = 0,8$  für eine glatte HDPE-Folie angenommen wurde. Aus diesen Annahmen ergibt sich die Grenzbedingung als:

$$\Delta \varepsilon = 0,98 - 2,6 \sin \beta$$

### Gl. 6.1 b: Kräftebilanz für eine Dehnung $\varepsilon$ in Abhängigkeit der Neigung $\beta$ unter definierten Voraussetzungen

Vereinfacht bedeutet dies mit den getroffenen Annahmen, daß bei einer waagrechten Fläche ein Verbund seitens der KDB bis zu einer Dehnung von 98% und ohne Dehnung bis zu einer Neigung von  $\beta = 22,2^\circ$  die Verbundwirkung als gegeben zu betrachten ist.

Die Bedingung berücksichtigt allerdings lediglich einen Streifen von 1 m Breite und ist somit nur begrenzt geeignet dreidimensionale Verhältnisse, wie sie z.B. in einer großflächigen Setzungsmulde vorliegen, zu beschreiben. Weiterhin wurden in dieser Betrachtung, wie eingangs erwähnt, die Adhäsion  $a'$  und die Strömungskraft  $S$  vernachlässigt. Die Adhäsion würde eine Erhöhung der zulässigen Dehnung und  $S$  eine Erniedrigung zur Folge haben. Weiterhin ist erkennbar, daß die hangabwärtstreibende Gewichtskraft  $G$  mit betrachteter Hanglänge  $dx$  linear ansteigt, was bei einer realistischen Betrachtung nicht der Fall sein kann.

Wenn die Höhe der Auflast, sie findet Eingang in der Spannung  $\sigma$  und dem Eigengewicht  $G$ , variiert wird, schlägt sich das in der Bedingung folgendermaßen nieder:

$$\Delta \varepsilon = h \frac{\gamma \cdot \tan \delta \cdot A_K}{E_{KDB} \cdot A_{KDB}} - \frac{G \sin \beta}{E_{KDB} \cdot A_{KDB}}$$

### Gl. 6.1 c: Kräftebilanz für eine Dehnung in Abhängigkeit von der Auflast

Hieraus ist ersichtlich, daß die zulässige Dehnung mit zunehmender Auflast (Überdeckung) durch Berücksichtigung eines Neigungswinkels  $\beta$  linear zunimmt bzw. parallel versetzt wird.

Die Höhe der Auflast  $h$  kann durch Erosionserscheinungen in größeren Zeiträumen erniedrigt bzw. durch Bewuchs erhöht werden.

Die gleiche Betrachtung für die Dehnsteifigkeit  $EA$  angestellt, ergibt ein umgekehrt proportionales Verhältnis für die Bedingung.

$$\Delta \varepsilon \approx \frac{l}{E_{KDB} \cdot A_{KDB}}$$

### Gl. 6.1 d: Umgekehrt proportionales Verhältnis der Dehnung $\varepsilon$ von den Dehnsteifigkeiten

Hieraus ist erkennbar, daß bei geringeren Dehnsteifigkeiten, wie sie in Gerolsheim an Dichtungsbahnen beobachtet wurden, die Verbundwirkung auch bei größeren Dehnungen gegeben ist.

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, daß eine dauerhafte Verbundwirkung nicht unbedingt gegeben sein muß. Dies aber wiederum ist für das Abbauen von Spannungsspitzen positiv, für die eigentliche Aufgabe der Kombinationsdichtung hingegen negativ zu beurteilen.

### ***Dehnung der Dichtungsbestandteile***

Die Dehnung und Zugfestigkeit bindiger mineralischer Stoffe ist ein Bereich, in dem weltweit geforscht wird [27]. Im Rahmen dieser Literaturrecherche liegen jedoch schon einige Angaben vor, die sich hauptsächlich auf SCHERBECK, 1992 [132] beziehen. Die Veröffentlichungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" [23] beruhen in wesentlichen Punkten auch auf dieser Arbeit.

Auch hier soll die Dehnung aufgrund einer nachträglichen ungleichmäßigen Setzung betrachtet werden. Für die Dehnung der Randfaser wird folgende Formel angegeben:

$$e_{RF} = - 0,0075 \cdot a^2 - 0,04 \cdot a \cdot d$$

### **Gl. 6.2: Dehnung $e$ der Randfaser in Abhängigkeit der Absenktiefe $a$ und der Schichtdicke $d$**

Diese Formel läßt sich nach der Absenkung  $a$  auflösen. Für  $e_{RF}$  ist ein Wert von 0,5 %, bei einer Dicke  $d = 1$  m aus Konturen einer Setzungsmessung [27] abgreifbar. Das Ergebnis bei dieser Vorgehensweise ist ein Setzungsunterschied von ca. 5 m. Dieser Wert ist als Setzungsunterschied nicht realistisch und kann mithin im Rahmen der Altlastensanierung nur durch unterschiedliche Schüttungen, die nebeneinanderliegend eingebaut wurden, erreicht werden (Abb. I- 6.1). Das Verhalten der Dichtung in einem solchem Fall ist in Abb. I- 6.2 dargestellt. Große Setzungsunterschiede sind bei Einbau eines inerten Materials (z.B. Bauschutt) neben einem Material mit einem hohen Anteil an abbaubarem Kohlenstoff zu erwarten.

Bei diesen geschilderten Verhältnissen, ist mit einem Krümmungsanteil und einem Dehnungsanteil zu rechnen. Die verkraftbaren Dehnungen liegen bei 2,5 m dicken Tonschichten bei 3,5 % und bei 1 m dicken bei 0,5 %. Die Spannbreite der zulässigen Krümmungsradien reicht von 200 m (bei  $d = 60$  cm) bis 50 m (bei  $d = 3$  m).

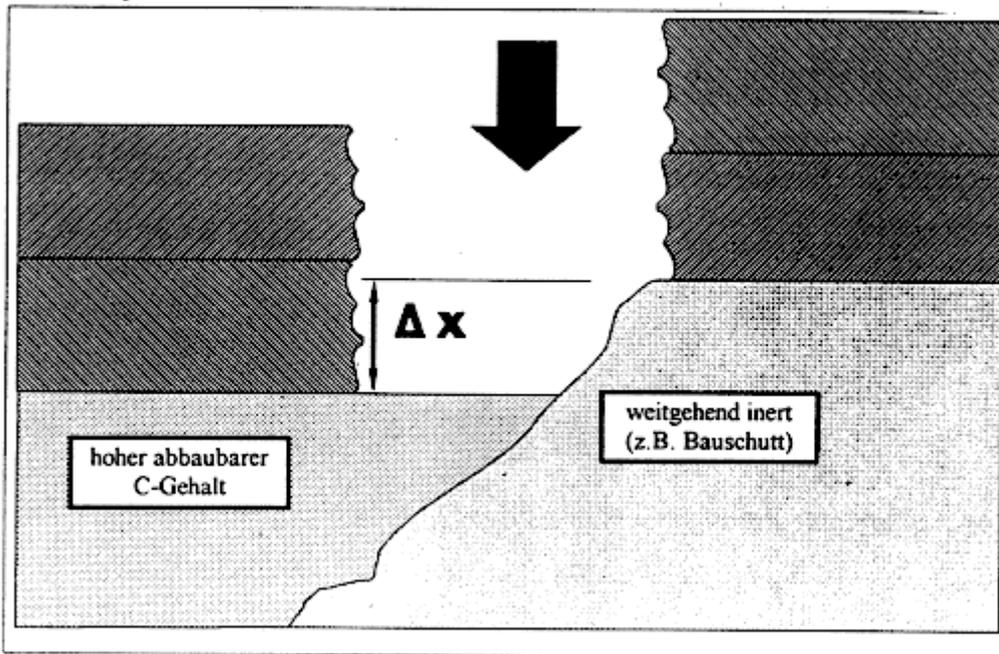


Abb. I- 6.1: Eine mögliche Voraussetzung für unregelmäßige Setzung

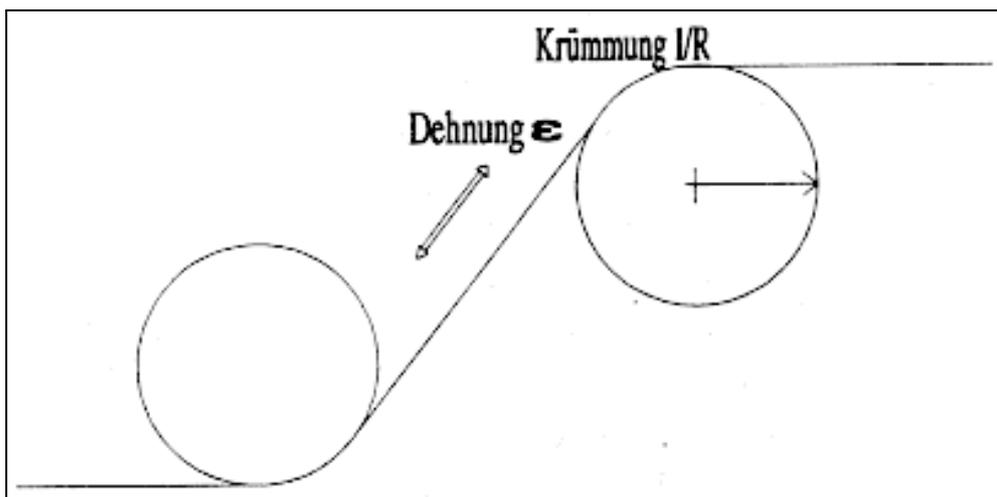


Abb. I- 6.2: Reaktion der Dichtung auf unterschiedliche Setzungen

Das Zusammenspiel dieser beiden Komponenten ist in Abb. I- 6.2 dargestellt. Bei einer gesamten Schütthöhe von ca. 40 Meter wären die Grenzwerte nach wenigen Jahren erreicht.

Die Krümmung dürfte für die darüber liegende Kunststoffschicht nicht minimierend sein. Dies läßt sich aus einer Betrachtung der Rohrstandzeiten und des Hook'schen Gesetzes herleiten. Die ertragbaren Dehnungen einer KDB liegen in etwa um eine Zehnerpotenz höher als die einer mineralischen Dichtungsschicht. Wenn angenommen wird, daß die Kunststoffdichtungsbahn an der Relaxation durch einen bestehenden Verbund gehindert wird, muß die tatsächliche Spannung (aufgrund einer Dehnung) mit der Kurve der Zeitstandfestigkeit zum Schnitt gebracht werden (Abb. I- 6.3).

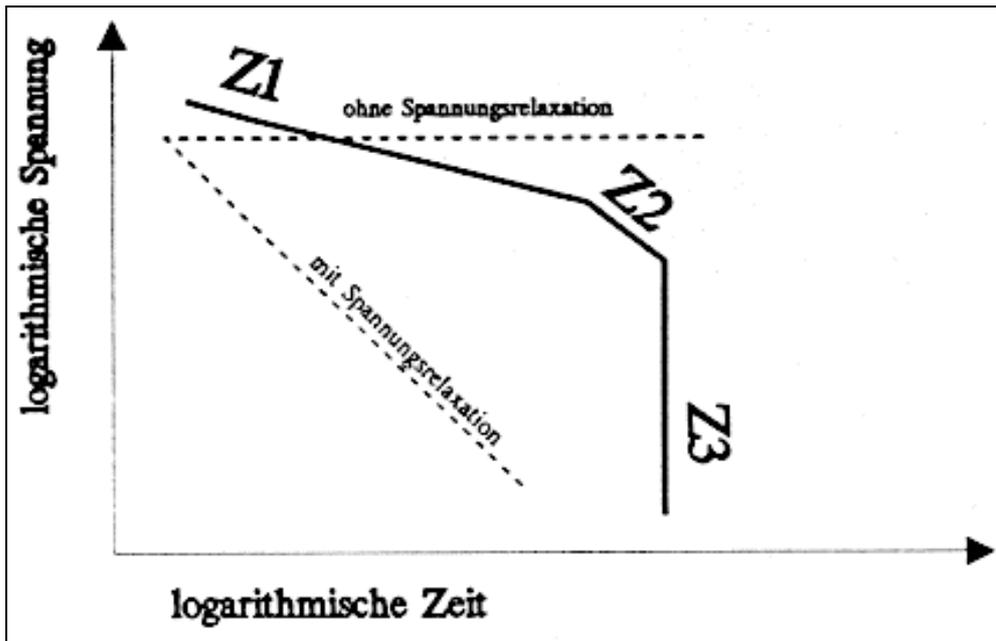


Abb. I- 6.3: Schnitt mit der Zeitstandfestigkeit

Hieraus ließe sich dann die Zeit ablesen, nach der ein Versagen aufgrund dieser Beanspruchung auftritt. Die Spannungen, die hierfür nötig wären, würden jedoch Dehnungen voraussetzen, bei denen die mineralische Schicht längst gerissen sein müßte und somit die Relaxation nicht hätte behindern können. Als Zahlenbeispiel sei eine Spannung von  $\sigma = 8 \text{ N/mm}^2$  und ein E-Modul von  $E = 25 \text{ N/mm}^2$  angegeben. Daraus folgt nach dem Hook'schen Gesetz ( $E = \sigma/\epsilon$ ) eine Dehnung  $\epsilon = 32 \%$ . Die Größenordnung dieser Dehnung bei Versagen ist durch Versuche bestätigt [112].

Weiterhin maßgeblich in diesem Zusammenhang, ist die Geschwindigkeit mit der die Setzung auftritt.

Für die Deponie Lübars wurde folgende Beziehung für die Setzungsgeschwindigkeit aufgestellt:

$$s = s_{\max} * e^{-kt}$$

wobei:

s: 3,1 mm/a

$s_{\max}$ : 84 mm/a

k: 0,3 mm/m\*a

### Gl. 6.3: Beobachtete Setzungsgeschwindigkeit auf der Deponie Lübars

Eine Auflösung nach der Zeit mit den Daten für die Deponie Lübars ergibt eine "kritische Zeit"  $t_{\text{krit}}$  von ca. 11 Jahren unter Zugrundelegung einer zu ermittelnden Setzung von 5 m. Dieser Zeitraum scheint realistisch, nicht zuletzt aufgrund des Setzungsverlaufes und Informationen von der Behördenseite [139].

Als zusammenfassende Aussage dieser Überlegungen läßt sich festhalten, daß mit einem Versagen bei einem ordnungsgemäßen Einbau der Abfälle aufgrund von Setzungen nicht zu rech-

nen ist. Bei Altablagerungen jedoch, die nur bedingt oder gar nicht einer Kontrolle und Verdichtung beim Einbau unterworfen waren, ist zu erwarten, daß unregelmäßige Setzungen in bedenklicher Größenordnung auftreten.

### *Erosion des Deckssubstrates*

Erosionserscheinungen sind mit Hilfe der allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) abschätzbar. Die Genauigkeit der Prognose hängt in erster Linie von der Genauigkeit der verwendeten Parameter ab [140]. Die ABAG lautet in ihrer allgemeinen Form:

$$A=R*K*L*S*C*P$$

### **Gl. 6.4: Allgemeine Bodenabtragungsgleichung**

Hierin bedeuten:

- A: Langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag in t/ha\*a als zu errechnende Größe.
- R: Regen und Oberflächenabflußfaktor: Er ist ein Maß für die gebietsspezifische Erosionskraft (Erosivität) der Niederschläge und wird aus der kinetischen Energie und der Niederschlagsintensität aller erosionswirksamen Einzelregen während des Jahres berechnet.
- K: Bodenerodierbarkeitsfaktor: Er stellt den jährlichen Abtrag eines bestimmten Bodens pro R-Einheit auf dem Standardhang (22 m lang, 9 % Gefälle, dauernde Schwarzbrache) dar. Er ist ein Maß für die Erodibilität eines Bodens und wird von einer Reihe von Bodeneigenschaften bestimmt.
- L: Hanglängenfaktor: Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Länge zu dem des Standardhanges (22 m Länge) unter sonst gleichen Bedingungen an.
- S: Hangneigungsfaktor: Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Neigung zu dem des Standardhanges (9 % Gefälle) unter sonst gleichen Bedingungen an.
- C: Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor: Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges mit beliebiger Bewirtschaftung (Kulturpflanze, Bedeckungsgrad, Bearbeitungsverfahren, etc.) zu dem unter Schwarzbrache an.
- P: Erosionsschutzfaktor: Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages mit beliebigen Erosionsschutzmaßnahmen wie Konturnutzung, Streifennutzung, Terrassierung usw. zu dem bei Bearbeitung in Gefällerrichtung und ohne Schutzmaßnahmen an.

Nach dieser allgemeinen Erläuterung soll ein Beispiel folgen, um die Zusammenhänge zu verdeutlichen. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß die ABAG darauf abzielt, die errechneten Werte mit Toleranzgrenzen zu vergleichen, die für Nutzungsflächen hinnehmbar scheinen. Mithin steht also nicht die Angabe von absoluten Mengen im Vordergrund, sondern ein eher relatives Maß zur Beurteilung der Erosionsgefährdung einzelner vorgegebener Böden unter definierten Umständen. Die Angabe der Toleranzgrenzen bewegt sich, je nach diesen Umständen zwischen 1 - 10 t/ha. Hinzugefügt werden muß, daß das eigentlich anzustrebende Maß die Bodenneubildungsrate wäre, wobei dann aber die Toleranzgrenze auf fast 0 herabgesetzt würde.

Variiert werden soll hier der Einfluß der Topographie, der sich im Faktor L\*S widerspiegelt. Die Neigungsverhältnisse sind deswegen von Interesse, da hier eine Beeinflussung auch für andere Belastungszustände relevant ist.

R-Faktor: Er kann aus Regressionsrechnungen ermittelt werden, oder, wie in diesem Falle, aus Tabellen für Bayern entnommen werden. Gewählt wurde ein R-Faktor von  $72 \text{ kJ} \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$  für Neu-Ulm.

K-Faktor: Der K-Faktor wird aus den Bodeneigenschaften ermittelt, sofern diese vorliegen. Aus der Bestimmungsgleichung geht hervor, daß ein Boden umso erosionsanfälliger ist,

- je höher der Schluff- plus Feinstanteil,
- je geringer der Tongehalt,
- je geringer der Humusgehalt,
- je gröber die Aggregate und
- je geringer die Wasserdurchlässigkeit ist.

Mit Feinstanteil sind Teile gemeint, die nur über geringe bindige Kräfte verfügen. Bei bekannter Bodenart ist es möglich, mit Hilfe von Tabellen in [140] den Faktor abzuschätzen. Gewählt wurde eine Parabraunerde aus Lößlehm der lehmigen Albüberdeckung mit einem K-Faktor von 0,53.

P-Faktor: Für dieses Beispiel wird ein Erosionsschutzfaktor von  $P = 1$  angenommen. Das bedeutet, daß keine Erosionsschutzmaßnahmen getroffen wurden.

C-Faktor: Der Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor ist am schwersten abzuschätzen. Angaben liegen lediglich für bestimmte Vegetationsarten (Nutzpflanzen) und Bodenbearbeitungsverhältnisse vor (Zustände des Bodens beim Ackerbau). Der C-Faktor hängt außerdem von einer Vielzahl zusätzlich nötiger Angaben ab, so daß hier eine Untersuchung über die Übertragbarkeit, Umstände und zahlenmäßige Angabe für Deponieverhältnisse erst noch erfolgen müßte. Um trotzdem zu einer qualitativen Aussage zu kommen, wurde ein Faktor von  $C = 0,24$  für einen mit Kartoffeln bedeckten Boden gewählt.

Der Topographiefaktor L\*S kann entweder formelmäßig berechnet oder aus Nomogrammen abgegriffen werden. Eine Variation führt zu dem Ergebnis, daß für die getroffenen Annahmen eine Erosionsgefährdung auf jedenfall bei einer Neigung von 10 % und einer Länge des Hanges von 60 m gegeben ist. In Tab. I- I- 6.1 wurde der L\*S-Faktor nicht explizit angegeben, sondern der sich daraus ergebende, resultierende Abtrag, der wiederum schon auf einen 1 m breiten Streifen normiert wurde.

Hanglänge	5 %	10 %	20 %
20	2,7	6,7	19,6
40	3,8	9,8	29,4
60	4,5	11,6	35,5
100	5,6	13,4	44,7

**Tab. I- 6.1: Abhängigkeit des Abtrages [ $\text{kg}/\text{ha} \cdot \text{a} \cdot \text{m}$ ] von Hanglänge und Neigung, zugrunde liegende Daten aus [140]**

Daraus ist zu schließen, daß Erosionserscheinungen bereits vor Erreichen eines Abgleitens auftreten können und somit die zu übertragenden Kräfte aufgrund des Schwundes an Eigengewicht verringert werden.

## 6.2 Langzeitverhalten der Durchlässigkeit

Wenn die ungünstigen Einbaubedingungen des Abfalls aus dem vorhergehenden Kapitel zugrunde gelegt werden, kann auf ein flächiges Versagen der mineralischen Schicht geschlossen werden. In [98] wird vorgeschlagen, einen mittleren  $k_f$ -Wert  $k_m$  zu berechnen. Unter Zugrundelegung einer mittleren Rißbreite von  $b = 0,1$  mm auf einem Flächenanteil  $R_a = 1$  % ergibt sich ein Durchflußbeiwert  $k_m$  in der Größenordnung von  $10^{-3}$  m/s. Das ist ein Wert, der für Dränagen gefordert wird. Mit aus diesem Grund hängt die Langzeitwirksamkeit der Dichtmaßnahme von der Beständigkeit der Kunststoffbahn ab.

Für die Dichtungsbahn liegen Untersuchungen vor aus denen geschlossen werden kann, daß auch bei punktuellen Versagen der Bahn eine gewisse Dichtwirkung erhalten bleibt [124]. Diese zu quantifizieren ist leider nicht möglich. Eine Angabe über Fehlstellen in Dichtungsbahnen [93] ermöglicht aber die Annahme, daß umgerechnete  $k_f$ -Werte für eine alleinige Wirkung der Kunststoffdichtung erreicht werden, die ebenfalls in der Größenordnung von Dränageschichten liegen. Fehlstellen haben ihre Ursache in Einbaufehlern oder in ungenügender Dimensionierung von Schutzschichten. Letzteres kann beispielsweise zum Durchstoßen spitzer Steine aus der Dränageschicht führen.

Verdeutlichen soll dies folgendes Beispiel mit der Annahme eines konstanten Energieliniengefälles. Es gilt allgemein die Definition der Energiehöhe  $H$ :

$$H = h + z$$

**mit der Druckhöhe  $h$  und der geodätischen Höhe  $z$ .**

**Gl. 6.5: Allgemeine Energielinienhöhe**

Aufgelöst für Verhältnisse des Druckabflusses folgt

$$v = \sqrt{2 * g * h}$$

**mit  $h$  als Aufstauhöhe und  $g$  als Erdbeschleunigung.**

**Gl. 6.6: Abflußgeschwindigkeit bei Druckabfluß**

Bei einer Anzahl der Fehlstellen von 1 % und einer Aufstauhöhe von  $h = 20$  cm, ergibt sich umgerechnet ein  $k_f$ -Wert von  $4 * 10^{-3}$  m/s. Dieser Wert ist mit Sicherheit, selbst bei realistischer Annahme der Fehlstellen, zu hoch angesetzt. Er berücksichtigt nicht:

- Umläufigkeiten am Leck
- Neigungsverhältnisse
- Zeitlicher Verlauf des Zuflusses
- Reibungsverluste

Dennoch wird deutlich, daß bei einer Annahme von Fehlstellen, in Verbindung mit einer gewissen Aufstauhöhe, die durch unregelmäßige Setzung entstandene Senken ermöglichte, mit einem hohen Durchfluß zu rechnen ist.

In [112] wird ein Wert für Fehlstellen mit 8 Löchern auf 3 ha angegeben, ohne über Größe, Form und Ursache Auskunft zu geben. Hier wird mit einer Steigerung des  $k_f$ -Wertes von  $k = 0$  auf  $k = 5 * 10^{-12}$  m/s bei einer Durchlässigkeit der mineralischen Dichtungsschicht von  $k = 1 * 10^{-9}$  gerechnet.

## 7. Zusammenfassung Teil I

Es wird eine technische Betrachtung der Oberflächenabdichtung vorgenommen, wobei der Schwerpunkt auf der Langzeitwirksamkeit von Abdichtungsmaßnahmen liegt.

Die Ergebnisse dieser Abhandlung beruhen auf einer Literaturrecherche mittels EDV unter Nutzung verschiedener Datenbanken. Weiter wurden Landesbehörden kontaktiert und persönliche Beziehungen genutzt. Es wurde eine Datenbank mit 520 Literaturstellen aufgebaut, die nach Stichwörtern und deren Kombinationen abfragbar ist.

Die sich aus der Literatur ergebenden wesentlichen *Versagensgründe* für Oberflächenabdichtungen sind:

- Austrocknungserscheinungen,
- Reaktion der Dichtung auf verschiedene Belastungen, bei denen an erster Stelle Setzungen und Sackungen stehen,
- vorinduziertes Versagen durch Einbaufehler.

Unterschiedliche Setzungen sind besonders kritisch bei Anböschungen an Altdeponien, beim Einbau von Bermen im Deponiekörper und bei Grubendeponien. Setzungen können in verschiedene Phasen (Verformung, Verdichtung, Entwässerung, Einpressung und biologischen Abbau) eingeteilt werden.

Anhand von Messungen an Betriebsdeponien lassen sich Größenordnungen der Setzungen von bis zu 25 % der Ausgangshöhe angeben.

Unregelmäßige Setzungen verursachen Dehnungen und Krümmungen in der Dichtung.

*Mineralische Dichtungen* können Krümmungsradien von bis zu 200 m aufnehmen. Die Randfaserdehnungen liegen in einem Bereich von 0,5 bis 3,5 %. Das Einwirken von Frost und unpassender Gerätetechnik gehören in die Kategorie der Einbaufehler. Austrocknungserscheinungen hingegen lassen sich auch an fertiggestellten Oberflächenabdichtungen beobachten.

Die an ausgeführten Maßnahmen gewonnenen Erkenntnisse, deuten darauf hin, daß mineralische Oberflächenabdichtungen unter den beschriebenen Umständen nur bedingt in der Lage sind, langfristige Dichtfunktionen wahrzunehmen. So wurde auf der Deponie Georgswerder innerhalb zweier Jahre eine 5 bis 7 fache Steigerung der Durchsickerungsrate unterhalb der Dichtung aufgezeichnet. Hinzu kommt eine beginnende Durchwurzelung der Dichtung auf der Deponie Gerolsheim innerhalb dreier Jahre.

*Oberflächenabdichtungen mit Kunststoffolie* sind in der Lage, sich um etwa 30 % zu dehnen. Das reine Werkstoffverhalten unter verschiedenen Bedingungen ist bekannt und kann im Rahmen der Oberflächenabdichtung als nicht allein ausschlaggebend für die langfristige Wirksamkeit angesehen werden, denn aus den Belastungen, sofern sie bekannt und quantifizierbar sind, würden sich Zeiträume von mehreren hundert Jahren ergeben. Dies wiederum scheint im Hinblick auf die Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen als hoch gegriffen. Wegen dieser Empfindlichkeit ist ein gewisses Maß an Fehlstellen vorindu-

ziert, wobei bei örtlichen Undichtigkeiten nicht von einem flächigen Versagen ausgegangen werden kann. Die Datenbasis hierzu ist jedoch als dünn zu bezeichnen. Die beobachteten Materialveränderungen (Abnahme des E-Moduls und Zunahme der Dicke) auf der Deponie Gerolsheim sprechen gegen eine Lebenserwartung von mehreren hundert Jahren.

Als wesentliche Bestandteile einer Kombinationsdichtung nach TA-Siedlungsabfall sind auch das **Decksubstrat und die Drainage-, Filter- und Schutzschichten** zu bezeichnen. Das Decksubstrat wird in erster Linie durch Erosion angegriffen, wobei die Größenordnung hier stark von örtlichen Gegebenheiten abhängt und sich nicht verallgemeinern läßt. Die Anforderungen an die Drainage-, Filter- und Schutzschichten scheinen erfüllt werden zu können, wenn der derzeitige Kenntnisstand für die Belastung der Oberflächenabdichtung zugrunde gelegt wird. Beobachtet wurde jedoch ein Rückgang der Wasserdurchlässigkeitswerte bis zu einer Zehnerpotenz.

Gemäß den aus der Literaturrecherche zur Verfügung stehenden Informationen erfüllen **Kombinationsdichtungen** ihre Aufgabe gut. Mit einem Versagen ist nur unter Annahme ungünstiger Bedingungen hinsichtlich des deponierten Materials zu rechnen. Die Kombinationsdichtung stellt hohe Anforderungen an den Einbau, die möglicherweise in der Praxis nicht eingehalten werden können. Beachtet werden muß weiterhin die Gefahr des Abgleitens, die der Verwendung der Kombinationsdichtung bei steilen Verhältnissen (wie sie bei Altablagerungen in Baden-Württemberg teilweise gegeben sind) Grenzen setzt.

Die Dichtwirkung der Kombinationsdichtung beruht in erster Linie auf der eingelegten Kunststoffbahn. Bei einem Versagen der Bahn erscheint die Langzeitwirksamkeit fraglich.

Bei **Alternativen** zur Kombinationsdichtung liegen bis auf das System der Kapillarsperre keine Erfahrungen vor, die es ermöglichen würden, das Langzeitverhalten abzuschätzen. Die Kapillarsperre wird in Zukunft bei Diskussionen zu Oberflächenabdichtungen zu berücksichtigen sein, da die Ergebnisse, die bislang vorliegen, erfolgversprechend sind.

Wenn das **Langzeitverhalten der Dichtmaßnahme** untersucht wird, ist eine Kontrolle der Verbundwirkung vorzunehmen, da diese bei großen Neigungen eventuell langfristig nicht gewährleistet ist. Ferner müssen die möglichen Dehnungen der Dichtungsbestandteile einer Kombinationsdichtung untersucht werden. Da die Kunststoffdichtungsbahn den zehnfachen Betrag an Dehnungen einer mineralischen Dichtungsschicht verträgt, muß ein Versagen der mineralischen Dichtung vorangehen. Bei dem in Kapitel 6 konstruierten Beispiel versagt die Kombinationsdichtung nach ca. 11 Jahren.

Das **Langzeitverhalten der Durchlässigkeit** ist speziell bei der Kombinationsdichtung schwerlich abzuschätzen. Unter der Voraussetzung einer gewissen Anzahl von Fehlstellen, bedingt durch Einbaufehler oder nachträgliche Belastungen, können sich die umgerechneten Durchlässigkeitsbeiwerte in Größenordnungen bewegen, die es ermöglichen, von einem flächigen Versagen zu sprechen. Angefügt werden muß allerdings, daß die zugrunde liegenden Annahmen nur grob abgeschätzt wurden.

## 8. Ausblick Teil I

Allgemein kann die Datenbasis zum Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen als dünn bezeichnet werden. Auffallend im Rahmen dieser Literaturrecherche war weiterhin, daß die Erfahrungen mit Oberflächenabdichtungen nicht gesammelt vorliegen.

Daraus ergibt sich folgende weitere Vorgehensweise:

- Sammlung der Erfahrungen mit Oberflächenabdichtungen vor Ort:
  - Recherche, wo welche Oberflächenabdichtungen mit welchem Erfolg ausgeführt worden sind
  - Auswahl einiger Deponien nach vorher festgelegten Gesichtspunkten
  - Untersuchungsprogramm zur Beurteilung des Langzeitverhaltens

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung über aufgetretene Belastungen und dem damit verbundenen Verhalten der Oberflächenabdichtung.

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN, Sondergutachten Altlasten, Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/6191, Sachgebiet 212903.01.90
- [2] GLÄSER, E.; Bautechnische Lösungen für Abdichtungssysteme an Deponien, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Bd. 19, Deponietechnik heute und morgen, S.115 - 138, Berlin 1985, Erich Schmidt Verlag
- [3] TÖNSMANN, FRANK; Rekultivierung von Altlasten und Deponien, Müll und Abfall, S.404 - 408, Berlin, 11.90, Erich Schmidt Verlag
- [4] LÜHR, H.-P.; Emissionspfade von Altlasten, Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 1.3.1, Heidelberg, 7.91, R. v. Deckerer`s Verlag, G. Schenk
- [5] RUBIO, MIGUEL A. et al.; Sanierungsfall Love Canal/USA, Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 8.1, Heidelberg, 1988, R. v. Deckerer`s Verlag, G. Schenk
- [6] CREMER, S. et al.; Langzeitverhalten von Feststoffen mobilisierten Schwermetallen in unterschiedlichen pH-Redox-Milieus, Hrsg.: Böhnke, B.; Seminar am 22. und 23.03.1990 in Roetgen, Gewässerschutz, Wasser, Abwasser; Bd. 118, S.131 - 155, Aachen, 1990, Eigenverlag
- [7] JESSBERGER, HANS LUDWIG et al.; Eine Bewertungsmethodik als Entscheidungsgrundlage zur Auswahl geeigneter Sanierungsverfahren; Gossow, Volkmar (Hrsg.), Altlastensanierung, S.39 - 55, Wiesbaden, 1992, Bauverlag
- [8] ANONYM; Sanierungsverfahren für Grundwasserschadensfälle und Altlasten - Anwendbarkeit und Beurteilung, DVWK - Schriften, Bd.98, Hamburg, 1991, Verlag Paul Parey, Kommissionsvertrieb
- [9] MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND FORSTEN Ba-Wü; Altlasten Handbuch Teil 1 - Altlastenbewertung, Stuttgart, 1987,
- [10] KRISCHOK, ANNEGRET; AGAPE- Ein Modell zur Abschätzung des Gefährdungspotentials altlastenverdächtiger Flächen; Brandt, Edmund (Hrsg.), Altlasten, Untersuchung, Sanierung, Finanzierung, S.51 - 56, Taunusstein, 1988, Eberhard Blottner Verlag
- [11] GEIL, MAGRET; Erfahrungen mit der Sanierung einer Abfalldéponie mittels Dichtwandum-schließung; Gossow, Volkmar (Hrsg.), Altlastensanierung Wiesbaden, 1992, Bauverlag
- [12] MESECK, HOLGER; Bauverfahren zur Einkapselung von Altlasten; Entwicklung und Stand der Technik, Entsorgungs Praxis, S.234 - 243, 5.89,
- [13] HERRMANN, THOMAS; Nachträgliche Herstellung einer Dichtsohle unter Altlasten, BMT, S.19 - 20, 1.86
- [14] PAURAT, ROLAND; Sicherung kontaminierter Erdschichten mit dem Paurat - Verfahren, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.557 - 572, Berlin, 1992, EF- Verlag
- [15] RICHTER, HANS; Das Richter- Verfahren zur Sicherung von Altdeponien und kontaminierten Standorten, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.543 - 556, Berlin, 1992, EF- Verlag,
- [16] SCHERZER, THOMAS; Sanierungs- und Sicherungstechniken; Preise, Grenzen und Möglichkeiten, Müll und Abfall, S.234 - 245, Berlin, 4.92, Erich Schmidt Verlag

- [17] MESECK, H. et al.; Generelle Verfahren der Einkapselung von Altlasten Überblick, Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 5.3.0, Heidelberg, 6.89, R. v. Deckerer`s Verlag, G. Schenk
- [18] STIEF, KLAUS; Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien, Müll und Abfall, S.15 - 20, 1.86,
- [19] KOCH, ROLF et al.; Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen, Müll und Abfall, S.348 - 361, Berlin 8/88, Erich Schmidt Verlag
- [20] BUNDESMINISTER FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, Entwurf, Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), 27.08.92
- [21] ENGELMANN; Telefonische Auskunft, Umweltbundesamt, 30.03.93,
- [22] BEINE, R.; Schadstofftransportberechnungen als Grundlage für die Dimensionierung von Deponieabdichtungen und zusätzliche technische Maßnahmen, Hrsg.:Fehlau/ Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1991, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.47 S.99-124, Berlin, 1992, Erich Schmidt Verlag
- [23] EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES "GEOTECHNIK D. DEPONIE U. ALTLASTEN", Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Berlin, 1990, Verlag Ernst und Sohn
- [24] BORTZ, S. et al.; Wasserhaushaltsuntersuchungen an Altlasten - Dargestellt am Beispiel der Deponie Georgswerder/Hamburg, Inst. f. Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München; Hrsg.: Bechtler, W. et al.; Folgen Anthropogener Einflüsse a. d. Wasserhaushalt u. d. Wasserbewirtschaftung, Mitteilungen, Bd. 38 b, S.413 - 425, München, 1990, Eigenverlag
- [25] FARQUHAR, G. J. et al., Grundlagen der Gasentstehung, Abfallwirtschaft an der TU Berlin, Bd. 5; Hrsg.: Jäger und Wiemer, Aktuelle Deponietechnik, S.139 - 174, Berlin, 1980, Druckhaus Norden GmbH
- [26] SCHÄFER, JOSEF; Oberflächenabdichtungen von Deponien - Dichtheit und ihre Einflußfaktoren, Müll und Abfall, S.427 - 432, Berlin, 7/90, Erich Schmidt Verlag
- [27] COLLINS, H.J. et al.; Nachrichten aus Wissenschaft und Forschung, Forschungsvorhaben zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Abfallstoffen, Geotechnik, S. 85 - 91, 2/92
- [28] SCHMIDT, W.; Oberflächenabdichtungen von Siedlungsabfalldeponien, Einfluß von Setzungen und Sackungen auf die Konstruktion des Dichtungssystems, persönliche Mitteilung
- [29] STEGMANN, RAINER; Vorgänge in kommunalen Abfalldeponien - Grundlagen der chemisch-physikalischen und biochemischen Prozesse, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Technik, Wirtschaft, Umweltschutz, Deponie: Ablagerung von Abfällen, S.271 - 291, Berlin, 1987, EF-Verlag
- [30] WIEMER, KLAUS; Grundlagen zur Abdichtung und Kapselung von Deponien, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Technik, Wirtschaft, Umweltschutz, Deponie: Ablagerung von Abfällen, S.394 - 418, Berlin, 1987, EF-Verlag
- [31] WIEMER, K.; Untersuchungen zur Ablagerungsdichte und zum Setzungsverhalten geordneter Deponien, 8. Abfallwirtschaftsseminar an der TU Berlin, Aktuelle Probleme der Deponietechnik, Bd. 3, S.126-145, Berlin 1978, Verlag Jürgen Kleindienst
- [32] HESSEL, J. et al.; Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen, Kunststoffe, Jg. 78, Nr.2, S.155 - 160, 1988

- [33] HEIL, H.; Der Einfluß der Steifigkeit von Stahlbetonskelettbauten auf die Verformung und die Beanspruchung von Gründungsplatten auf Ton, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau der TH Darmstadt, Heft 8, 1971,
- [34] Jäger, B. et al; Sicherung der Nutzung abgeschlossener Deponien, TU Berlin, Fachgebiet Abfallwirtschaft, BMFT-Forschungsbericht T 84-237; Berlin 1984
- [35] WIEMER, K. et al.; Verhalten des Deponiekörpers, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, Heft 44, S. 31 - 46, 1985
- [36] WIEMER, K.; Die Lagerungsdichte von Abfällen in Deponien, Abfallwirtschaft an der TU Berlin, Bd. 8, S. 6 - 24, 1981
- [37] STEGMANN, RAINER; Vorgänge in kommunalen Abfalldeponien - Grundlagen der chemisch-physikalischen und biochemischen Prozesse, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Technik, Wirtschaft, Umweltschutz, Deponie: Ablagerung von Abfällen, S.271 - 291, Berlin 1987, EF-Verlag
- [38] WIEMER, K.; Untersuchungen zur Ablagerungsdichte und zum Setzungsverhalten geordneter Deponien, 8. Abfallwirtschaftsseminar an der TU Berlin, Aktuelle Probleme der Deponietechnik, Bd. 3, S.126-145, Berlin 1978, Verlag Jürgen Kleindienst
- [39] RETTENBERGER, G.; Setzungsberechnungen für Hausmülldeponien im Zusammenhang mit der Planung von Deponieoberflächenabdichtungssystemen und Entgasungsanlagen, Hrsg.:Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1989, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.30, S.143-151, Berlin 1989, Erich Schmidt Verlag
- [40] WIEMER, K.; Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien, Abfallwirtschaft an der TU Berlin, 1982
- [41] ANONYM; Geologische und hydrogeologische Untersuchungen zur Sicherung bzw. Sanierung der SAD Malsch, Rhein - Neckar - Kreis (Landratsamt Umweltschutzamt), Gutachten vom 30.03.90
- [42] STEFFEN, H.; Konzeption und Ausführung von Zwischen- und Oberflächenabdichtungen an Deponien, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Bd. 19, Deponietechnik heute und morgen, S.87 - 114, Berlin 1985, Erich Schmidt Verlag
- [43] REUTER, E.; Untersuchungen über das Verformungsverhalten der Zentraldeponie Hannover, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 7., Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 59, S. 93 - 118, Nürnberg 1991, Eigenverlag LGA
- [44] DRESCHER, J., Standsicherheit von Deponiekörpern - Festigkeit des Deponiegutes, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 6., Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 56, S.91 - 108, Nürnberg 1990, Eigenverlag LGA
- [45] JESSBERGER, H. L., Einige geotechnische Aspekte bei Entwurf und Bauausführung von Deponiebauwerken, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 6., Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 56, Nürnberg 1990, Eigenverlag LGA
- [46] SCHUHMANN, HUGO; Standfestigkeitsberechnung für Hausmülldeponien - Praktische Erfahrungen, Hrsg.:Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1989, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.30, S.153-179, Berlin 1989, Erich Schmidt Verlag
- [47] MESECK, H. et al.; Eignungsüberprüfung und Güteüberwachung mineralischer Deponieabdichtungen, Müll und Abfall, Beiheft 24, S.34 - 42, 1987

- [48] JESSBERGER, H. L. et al., Eigenschaften und Anforderungen mineralischer Abdichtungsmaterialien bei Oberflächenabdichtungen, Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 5.3.2.0.2, Heidelberg 1988, R. v. Deckerer`s Verlag, G. Schenk
- [49] KOHLER, E. et al., Mineralogische Untersuchungen an Abdichtungsmaterialien, Müll und Abfall, Beiheft 24, S.69 - 79, 1987
- [50] MESECK, H. et al.; Prüfung und Bewertung der Durchlässigkeit mineralischer Dichtungsmaterialien - Ergebnisse Braunschweiger Laborversuche, Hrsg.: Thomé- Kozmiensky, K. J.; Technik, Wirtschaft, Umweltschutz, Deponie: Ablagerung von Abfällen, S.491 -525, Berlin 1987, EF-Verlag
- [51] ECHLE, W. et al.; Tonmineralogische, chemische und geotechnische Veränderungen in mineralischen Basisabdichtungen nach langjährigem Deponiebetrieb, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 4, S.99 - 121, Karlsruhe 1988, Eigenverlag
- [52] MOCK, J. et al.; Kapillardichtungen für Deponieoberflächendichtungssysteme - Realisierungsmöglichkeiten, Hrsg.:Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1991, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.47, S.243- 259, Berlin 1992, Erich Schmidt Verlag
- [53] BRACKE, R. et al.; Geochemische Veränderungen in der Tonbasisabdichtung der Deponie Geldern-Pont nach 8jährigem Deponiebetrieb, Müll und Abfall, S.409 - 420, 7/91,
- [54] DANIEL, DAVID E.; Can clay liners work?, Civil engineering ASCE, Jg.55, Nr.4, S. 48 - 49, USA 1985
- [55] RAMPAZZO, N. et al.; Veränderung von Bodenmineralien durch saure Immissionen aus der Luft, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 4, S.21 - 46, Karlsruhe 1988, Eigenverlag
- [56] RUDAT, DIETER et al.; Lagerung von unbehandeltem Abfall, Abwassertechnik, S.12 - 14, 4/91
- [58] HELING, D.; Versuche zur Messung des kf-Wertes toniger Böden mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 4, S.63 - 80, Karlsruhe 1988, Eigenverlag
- [59] GABNER, H.-G.; Filtergesetze zur Bestimmung der Durchlässigkeit mineralischer Abdichtungen, Müll und Abfall, Beiheft 24, S.43 - 54, 1987
- [60] KLOTZ, DIETMAR; Probleme bei der Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften von bindigen Deponieabdichtungen, Abfallwirtschaftsjournal 3, Nr.4, S. 215 - 220, Berlin 1991, EF-Verlag
- [61] DEGEN, W. et al.; Durchströmung und Diffusion in Tonen, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 4, S.123 - 139, Karlsruhe 1988, Eigenverlag
- [62] REUTER, E.; Eignungsuntersuchungen von natürlichen Dichtungsmaterialien für Deponien, Veröffentlichungen Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 17, S.37 - 69, 1985
- [63] TABASARAN, O.; Grundsätzliches zum Problem Deponiegas, Universität Stuttgart, Begleitunterlagen zur Vorlesung Abfallbehandlung

- [64] LUTTON, R. J. et al.; Design and Construction of Covers for Solid Waste Landfills, U.S. EPA Cincinnati, Ohio 45268
- [65] MENDE, D. et al.; Physik - Gleichungen und Tabellen, Leipzig, VEB Fachbuchverlag
- [66] RETTENBERGER, G.; Methoden zur Sanierung von Schäden infolge Gasmigrationen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Heft 17, 1984
- [67] MÜLLER-KIRCHENBAUER, Hanno et al.; Einfluß der Versuchsrandbedingungen auf die Ergebnisse von Dichtmassenuntersuchungen, Bautechnik 68, H.12, S.421 - 425, 1991
- [68] DRESCHER, I.; Geowissenschaftliche Aspekte bei der Anlage von Deponien, Technische Universität Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Heft 17, Braunschweig 1985, Eigenverlag
- [69] LAUF, G.; Mineralische Oberflächenabdichtungen, Müll und Abfall, Beiheft 24, S.55 - 57, 1987
- [70] XIANG, W.; Quantitativer Zusammenhang zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit von Ton-zwischenschichten, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 4, S.181 - 198, Karlsruhe 1988, Eigenverlag
- [71] HENNE, J.; Versuchsgerät zur Ermittlung der Biegezugsteifigkeit von bindigen Böden, Geotechnik 12, Heft 2, S. 96 - 99, 1989
- [72] SAVIDIS, STAVROS et al.; Zur Problematik der Schließung von Rissen mineralischer Dichtungen von Deponien, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.359 - 372, Berlin 1992, EF- Verlag
- [73] EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES "GEOTECHNIK DER DEPONIEEN UND ALT-LASTEN" GDA der Deutschen Gesellschaft Erd- und Grundbau e.V., Berlin 1990, Ernst und Sohn
- [74] MÜLLNER, B.; Erosionsbeständigkeit mineralischer Abdichtungen bei hydraulischer Belastung, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 6., Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 56, S.245 - 278, Nürnberg 1990, Eigenverlag LGA
- [75] SCHABABERLE, R. et al., Der Einfluß von Frost-Tau-Zyklen auf das Gefüge von Tonen, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 4, S.247 - 273, Karlsruhe 1988, Eigenverlag
- [76] KOMODROMOS, Andreas; Gezielte Durchlässigkeitsüberprüfung mineralischer Deponie-dichtungen, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.343 - 358, Berlin 1992, EF- Verlag
- [77] STEFFEN, H.; Herstellung von mineralischen Basisabdichtungen, Müll und Abfall, Beiheft 24, S.21 - 31, 1987
- [78] KOMODROMOS, ANDREAS; Einsatz von licht- und rasterelektronen- mikroskopischen Untersuchungsmethoden bei der Eignungsprüfung von mineralischen Deponieabdichtungen, Müll und Abfall, S. 253 - 263, Berlin, 5/89, Erich Schmidt Verlag
- [79] MELCHIOR, STEFAN et al.; Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Abdeck-systeme für Deponien und Altlasten, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.453 - 476, Berlin 1992, EF- Verlag

- [80] URBAN-KISS, S.; Auswahl und Optimierung geeigneter Oberflächenabdichtungssysteme gegen Regenwasserzutritte und Gasemissionen, erarbeitet von der Gesellschaft zur Beseitigung von Sonderabfällen, Rheinland- Pfalz und der Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfalltechnik; Verbundvorhaben: Neue Verfahren zur Sicherung von Altlasten am Beispiel der Deponie Gerolsheim, unveröffentlicht, 1989
- [81] WOHNLICH, S.; Auswirkungen nachträglicher Grundwasserschutzmaßnahmen auf den Wasserhaushalt, von Deponien unter besonderer Berücksichtigung von Oberflächenabdichtungen, Hrsg.: Czurda, K. et al.; Schriftenreihe angewandte Geologie, Band 1, Karlsruhe 1987
- [82] BALTHAUS, HANSGEORG; Geomechanisches Verhalten von Kunststoffdichtungsbahnen, Bautechnik, S.58 - 63, Berlin, 2/87, Wilhelm Ernst und Sohn
- [83] BEINE R. et al., Standsicherheitsnachweise für Kombinationsdichtungen, Hrsg.: Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1992, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 54, S. 187 - 213, Berlin 1993, Erich Schmidt Verlag
- [84] BATEREAU, CH.; Der Reibungswinkel zwischen Folie und nichtbindigem Lockergestein, Wasserwirtschaft/Wassertechnik (WWT), 11/76
- [85] SIMONS, HANNS et al.; Neuartige, gereckte, hochfeste, Kunststoffe als Gitter zur Stabilisierung von Böden, Straße und Autobahn, S.238 - 242, Bad- Godesberg, 6/84, Kirschbaum Verlag
- [86] HESSEL, JOACHIM et al., Langzeitfestigkeit von Schweißverbindungen aus Polyethylen, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.389 - 394, Berlin 1992, EF- Verlag,
- [87] HESSEL, J. et al.; Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen, Kunststoffe, Jg. 78, Nr.2, S.155 - 160, 1988
- [88] COLLINS, H.-J.; Verminderung der Sickerwassermenge aus hochverdichteten Abfalldeponien durch gezielte Ausnutzung der potentiellen Verdunstung, Leichtweiß - Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Endbericht, Nr. 482, Braunschweig 1980, Eigenverlag
- [89] GLÜCK, LEOPOLT et al.; Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungsmittel im Grundwasserschutz, Teil 2: Stand der Technik, Stand der Erkenntnisse, Müll und Abfall, Beiheft 22, S.33 - 41
- [90] NAGEL, DIETER; Deponie-Abdichtung mit PE-HD Kunststoffdichtungsbahnen, Müll und Abfall, S. 1 - 11, Berlin 1/99, Erich Schmidt Verlag
- [91] TAPROGGE, RAINER; Das Langzeitverhalten von Kunststoffdichtungsbahnen bei über lagerten Beanspruchungen, Müll und Abfall, Beiheft 22, S.61 - 67, Berlin 1985, Erich Schmidt Verlag
- [92] KNIPSCHILD, F.W.; Werkstoffauswahl und Dimensionierung von Kunststoffdichtungsbahnen für Grundwasserschutzmaßnahmen, Müll und Abfall, Beiheft 22, 1985, Erich Schmidt Verlag
- [93] GROSS, B.A. et al.; Evaluation of flow from landfill leakage detection layers, Hrsg.: Den Hoedt, Geotextiles, Geomembranes and Related Products, S. 481 - 486, Rotterdam 1990, Balkema
- [94] BIHLMAIER, BERND et al.; Erarbeitung von Grundlagen zur Abschätzung des Langzeitverhaltens des Deponiekörpers, Abschlußbericht zu EFP VI, unveröffentlicht, 1988
- [95] MENGES SCHMACHTENBERG, E.; Das Verformungsverhalten von Kunststoffdichtungsbahnen bei mehrachsiger Beanspruchung, Müll und Abfall, Sonderheft 22, S. 61 - 67, 1985
- [96] KNIPSCHILD, F.W.; Langfristiger Grundwasserschutz mit Kunststoffdichtungsbahnen, (wlb) Wasser, Luft und Betrieb, S. 64 - 69, 10/84

- [97] DOLEZEL, B.; Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi, München 1978, Carl Hauser Verlag
- [98] MÜSKEN, J. et al.; Untersuchung einer Deponieoberflächenabdichtung aus zweilagiger HDPE-Folie, Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Projekt Wasser-Abfall-Boden, Förderkz. PD 88069, Stuttgart 1991, unveröffentlicht
- [99] BARTH, KARL; Materialveränderungen in Oberflächenabdichtungssystemen, Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Abt. Abfalltechnik, Diplomarbeit, 7.2.90
- [100] HARTGE, KARL HEINRICH; Einführung in die Bodenphysik, Stuttgart 1978, Ferdinand Enke Verlag
- [102] VAN VEEN, F. et al.; Altlastensanierung in den Niederlanden, Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 1.4.3.2, Heidelberg 1988, R. v. Deckerer's Verlag, G. Schenk
- [103] JÄGER, B. et al.; Untersuchungen zur Verminderung des Eintritts von Niederschlagswasser in Deponien, Texte des Umweltweltbundesamtes Berlin, Forschungsvorhaben 103 02 209 /01, UBA - FB 79-010, Berlin 1979, Eigenverlag
- [104] NEUMANN, UWE et al.; Rekultivierung von Deponien und Müllkippen, Müll und Abfall, Beiheft 16, Berlin 1978, Erich Schmidt Verlag
- [105] JÄGER, B. et al.; Sicherung der Nutzung abgeschlossener Deponien, TU Berlin, Fachgebiet Abfallwirtschaft, BMFT-Forschungsbericht T 84-237; Technologische Forschung und Entwicklung, Berlin 1984
- [106] SCHACHTSCHABEL, P. et al.; Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart 1989, Ferdinand Enke Verlag
- [107] BRAUNS, A.; Praktische Bodenbiologie, Stuttgart 1968, Fischer Verlag
- [108] MÜLLNER, B.; Erosionsbeständigkeit mineralischer Abdichtungen bei hydraulischer Belastung, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 6., Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 56, S.245 - 278, Nürnberg 1990, Eigenverlag LGA
- [109] BIEDERMANN, B.; Der Einsatz von Geotextilien zum Schutz von Kunststoffdichtungsbahnen bei Kombinationsdichtungen, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 6. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 56, S.279 - 284, Nürnberg 1990, Eigenverlag LGA
- [110] RAMKE, H.-G.; Funktionsfähigkeit der Entwässerungssysteme von Hausmülldeponien - Auswahl geeigneter Dränmaterialien, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 7. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 59, S. 207 - 252, Nürnberg 1991, Eigenverlag LGA
- [111] KISSKALT, J., Geotextile Filter in Deponien, Hrsg.: Gartung, E.; Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien; 7. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 59, S. 253 - 262, Nürnberg 1991, Eigenverlag LGA
- [112] STEFFEN, HEINZ; Anforderungen an die stofflichen Eigenschaften und den Einbau der Dichtungselemente in einer Kombinationsdichtung, Hrsg.: Fehlaue /Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1990, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.36, S.227-254, Berlin 1991, Erich Schmidt Verlag
- [113] BAM; Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien

- [114] HUTTEN, ALOYS; Langzeiterfahrungen mit Deponiebasisabdichtungen aus PE-HD am Beispiel der Deponie Glurns, Müll und Abfall, S. 314 - 323, 5/92
- [115] BEINE, R. et al.; Standsicherheitsnachweise für Kombinationsdichtungen, Hrsg.: Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1992, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 54, S. 187 - 213, Berlin 1993, Erich Schmidt Verlag
- [116] HOFFMANN, HARTMUT et al.; Schadensanalyse von Deponiebasisabdichtungen mit mineralischen Dichtstoffen und Kunststoffdichtungsbahnen, Müll und Abfall, S.404 - 408, Berlin 7/91, Erich Schmidt Verlag
- [117] SCHICKETANZ, ROLF; Wirkungsweise der Kombinationsdichtung und Anforderung an die mineralische Oberfläche, Müll und Abfall, S. 287 - 295, 5/92
- [118] HOLZLÖHNER, ULLRICH; Zur Austrocknung mineralischer Dichtungsschichten in Kombinationsdichtungen, Hrsg.:Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1990, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.36, S.281-303, Berlin 1991, Erich Schmidt Verlag
- [119] BELOUSCHEK, PETER; Wasserglasvergütete mineralische Dichtsysteme zur Abdeckung von Altdeponien und Altlasten unter dem Aspekt der aktiven Rißsicherung, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, Karl Joachim, Abdichtung von Deponien und Altlasten, S.227 - 248, Berlin 1992, EF-Verlag
- [120] BELOUSCHEK, PETER; Wasserglasvergütete mineralische Dichtungssysteme - eine physikalische, chemische und kolloidwissenschaftliche Analyse, Hrsg.:Fehlau /Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1989, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.30, S.83-101, Berlin 1989, Erich Schmidt Verlag
- [121] MOCK, J. ET AL.; Kapillardichtungen für Deponieoberflächendichtungssysteme - Realisierungsmöglichkeiten, Hrsg.:Fehlau/Stief; Fortschritte der Deponietechnik 1991, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.47, S.243- 259, Berlin 1992, Erich Schmidt Verlag
- [122] JELINEK, D.; Probebau einer Kapillarsperre auf der Deponie "Am Stempel", Wasser und Boden, S. 242 - 264, 4/93
- [123] HEINRICHSBAUER, JOHANNES et al.; Oberflächenabdeckung mit Hilfe der Wülfrather Mineraldecke "Wülfralit"- Fallbeispiel Wohngebiet Zinkstraße in Essen- Borbeck, Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 5.3.2.1.5, Heidelberg 12/90, R. v. Deckerer's Verlag, G. Schenk
- [124] TEICHEN, K. T.; Verfahren zur permanenten Abdichtung der Oberflächen von Abfalldeponien gegen Deponiegas und Oberflächenwasser, ausgehändigt anlässlich einer Besprechung im Landratsamt Böblingen, 01.93
- [125] SCHÖNIAN, ERICH; Asphaltbeton - Dichtungen im Deponiebetrieb, Müll und Abfall, S.12 - 19, Berlin 1/91, Erich Schmidt Verlag
- [126] KRASS, KLAUS et al.; Elution von Asphaltgranulat und anderen bituminösen Ausbaustoffen, Strasse und Autobahn, S.326 - 330, 8/90
- [127] BELOUSCHEK, P. ET AL.; Zur Prüfung von wasserglasvergüteten Dichtsystemen aus Abfallstoffen und Recyclingmaterialien, Hrsg.: Böhnke, B.; Seminar am 22. und 23.03.1990 in Roetgen, Gewässerschutz, Wasser, Abwasser; Bd. 118, S.205 - 228, Aachen 1990, Eigenverlag
- [128] DÜLLMANN, H. et al; Möglichkeiten des Grundwasserschutzes im Bereich von Mülldeponien durch horizontale und vertikale Abdichtungen, Mitteilungen zur Ingenieurgeologie- u. Hydrogeol., 13, S.173-209, Aachen 1982
- [129] ANONYM; Das Deponie- System Dywidag-Steuler, TIS, S.318 - 320, 6/88

- [130] FENSCH, LUDWIG; Die Rollins Hochdeponie mit neuen Kontrollsystemen, BMT, S.196 - 200, 4/87
- [131] MAROTZ, G.; Landwirtschaftlicher Wasserbau, Vorlesungsumdruck, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stand 1991
- [132] SCHERBECK, RAINER; Geotechnisches Verhalten mineralischer Deponieabdichtungsschichten bei ungleichmäßiger Verformungseinwirkung, Sammelband: Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Heft 16, Ruhruniversität Bochum, Eigenvelag, 1992
- [133] POPP, K.H.; Mikrobielle Vorgänge in Altablagerungen, Hrsg.: Keune, Heinz; Altlasten, Altdeponien- kontaminierte Standorte, Sammelband: Umwelttechnik Bd. 269; S.66-75, Ehningen, 1989, Expert-Verlag
- [134] XIANG, W.; Quantitativer Zusammenhang zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit von Ton, Hrsg.: Czurda und Wagner; Tone in der Umwelttechnik; Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe, Sammelband: Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd.4, S.181-198, Karlsruhe, 1988
- [135] URBAN-KISS, S.; EEP II: Auswahl und Optimierung geeigneter Oberflächenabdichtungssysteme gegen Regenwasserzutritte und Gasemissionen, Sammelband: Begleitstudie, Stuttgart 7.88
- [136] MELCHIOR, STEFAN et al.; Ergebnisse der Langzeitüberwachung von Oberflächendichtsystemen auf der Deponie Georgswerder (Hamburg), Sammelband: Altlastensanierung '93, S.849-858, 1993
- [137] HÖTZL, Heinz et al.; Sickerwasserreduzierung am Beispiel der Deponie Dreieich-Buchsschlag, Sammelband: Handbuch der Altlastensanierung, Kapitel 1.3.2.1.2, Heidelberg, 1988, R.v.Deckerer's Verlag, G. Schenk
- [138] NEFF, H.; Großdeponie Dreieich-Buchsschlag, Sammelband: Baugrundtagung Düsseldorf 1984, S.205-277, Düsseldorf, 1984
- [139] DARSCHIN, et al.; Erfahrungsaustausch im Wasserwirtschaftsamt Wiesbaden bezüglich ausgeführten Oberflächenabdichtungen, 4.93
- [140] SCHWERTMANN, U. et al.; Bodenerosion durch Wasser, Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen, Stuttgart, 1987, Ulmer-Verlag
- [141] BATEREAU, CH.; Einige Aspekte zum Einsatz von Geotextilien im Deponiebau, Sammelband: Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der LGA Bayern, H.56, S.285-302, Nürnberg, 1990, Eigenverlag LGA
- [142] BRAUNS, J. et al.; Laborversuch zum Feuchthalten thermisch belasteter Kombinationsdichtungen, Sammelband: Geotechnik 13, S.135-141, 1990
- [143] AUGUST, HANS et al.; Neuere Forschungsergebnisse zur Sperrwirkung von Kombinationsdichtungen für Deponien, Hrsg.: Fehlau/Stief; Fortschritte in der Deponietechnik, Sammelband: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd.36, S.209-226, Berlin, 1991, Erich Schmidt Verlag
- [144] GOSSOW, V.; Deponietechnik und Risikoanalyse, Sammelband: Baumarkt, S.694-701, Düsseldorf, 10.89
- [145] BURGMEIER, HARALD; Schutz der Beschäftigten im Bereich kontaminierter Standorte, Sammelband: Abdichtung von Deponien und Altlasten, S. 613-630, Berlin, 1992, EF-Verlag
- [146] GEIß, AXEL; Überblick über Zugfestigkeitsversuche an bindigen Böden, Sammelband: Seminarvortrag Institut für Geotechnik, 1992

# Teil II: Mathematische Betrachtung; Rechenmodelle

## 1. Einleitung

Während die Gesamtproblematik, die mit einer nachträglichen Oberflächenabdichtung verbunden ist, bereits dargestellt wurde (s. Teil I), wird in diesem Teil die Frage nach der rechnerischen Erfäßbarkeit der Emissionssituation gestellt. Bei den Emissionen nimmt die Fragestellung nach dem Sickerwasseranfall bezüglich Quantität und Qualität eine zentrale Stellung ein. Aus diesem Grund ist es notwendig Rechen- bzw. Gedankenmodelle zu dieser Thematik zusammenzustellen, die es ermöglichen, eine zeitliche Abschätzung der Emissionen vorzunehmen.

Eine Möglichkeit zur Abschätzung des Wasserhaushaltes von Deponien oder Altablagerungen bietet das **Computerprogramm HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance)**. Hierbei kann der Wasserhaushalt der gesamten Deponie oder nur der Deckschichten bzw. der Oberflächenabdichtung durchgerechnet werden. Der Schwerpunkt der Beschreibung des Programmes liegt auf Version 1.0, da uns zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie mit Ausnahme der Niederschläge nur monatliche Klimadaten zur Verfügung standen, während für die Version 2.0 Tageswerte benötigt werden. Die Version 2.0 kam nachdem auch die anderen Klimadaten als Tageswerte verfügbar waren zur Anwendung, jedoch erst kurz vor Fertigstellung der Studie, so daß die Erfahrungen mit dieser Version des Programmes nicht mehr in die Studie einfließen konnten.

## 2. Vorgehensweise

Die Arbeit zur Situation des **Wasserhaushaltes** einer Deponie konzentriert sich aus folgenden Gründen auf die Verwendung des Programmsystems HELP:

- Das Programm ist für Teile der mitteleuropäischen Klimazonen validiert, sofern es sich um eher kontinentale bzw. ozeanische Klimabereiche handelt. Für die klimatischen Übergangsbereiche sowie kleinräumig stark wechselnde Witterungsverhältnisse, wie sie in weiten Teilen der Bundesrepublik zu finden sind, steht eine Validierung noch aus (s. Kapitel 5).
- Alternative Programme zur komplexen Beschreibung der Verhältnisse an einer Altablagerung mit nachträglicher Oberflächenabdichtung liegen nicht vor.
- Denkbar wäre es, Programme aus verschiedenen Bereichen zu kombinieren, die dann aber ihrerseits erst eine Kalibrierungsphase durchlaufen müßten. Sinnvoller ist es, ein "bewährtes" Programm auf eine definierte Fragestellung anzuwenden.

Als definierte Fragestellung werden in Kapitel IV anhand zweier konkreter Standorte die Notwendigkeit und die Auswirkungen der nachträglichen Aufbringung einer Oberflächenabdichtung mit Hilfe des HELP-Computermodells bewertet. Die Standorte werden in Teil IV detailliert beschrieben, so daß in diesem Teilbericht auf die Situationsbeschreibung und Simulation des Teils IV verwiesen wird.

In diesem Teil der Studie erfolgt nach einer allgemeinen Beschreibung des Wasserhaushaltes einer Altablagerung, eine Erläuterung der Vorgehensweise des Programmsystems HELP, wobei diese in den entsprechenden Kapiteln kommentiert wird. Einer Zusammenstellung der Literatur, die Erfahrungen mit HELP beinhaltet, folgt eine Abschätzung des Schadstoffausstrags. Auch hier sind die Ergebnisse der Berechnung in Teil IV dokumentiert.

### 3. Wasserhaushalt einer Ablagerung

Der **Wasserhaushalt** einer Ablagerung ist entscheidend für das Emissionsverhalten. So wird auch in der TA-Siedlungsabfall (im Hinblick auf den Anhang G der TA-Abfall) eine Bilanzierung der Ein- und Ausgangsgrößen gefordert.

Im folgenden sollen die Einflußgrößen auf den Wasserhaushalt untersucht und eine Beschreibung derselben gegeben werden.

Eine erstmalige mathematische Beschreibung des Sickerwasserabflusses und der damit verbundenen Eingangsgrößen wurde wohl von FRANZIUS, 1977 [301] vorgenommen. Danach ist als wesentliche Eingangsgröße der Niederschlag zu nennen. In Betracht kommen ebenso Oberflächen- und Grundwasserzufluß. Die Ausgangsgrößen für den Wasserhaushalt sind Oberflächen- und Sickerwasserabfluß, ergänzt durch die Versickerung und einen Term, der die Speicherung berücksichtigt. Eine ebenfalls sehr entscheidende Größe ist die Verdunstung.

Ausformuliert bedeutet dies:

$$N + O_{zu} + G_{zu} = O_{ab} + V + SW + S + V_s + G_{ab}$$

N :	Niederschlag
O <sub>zu</sub> :	Oberflächenwasserzufluß
G <sub>zu</sub> :	Grundwasserzufluß
O <sub>ab</sub> :	Oberflächenwasserabfluß
V :	Verdunstung
SW :	Sickerwasser
S :	Speicherung
V <sub>s</sub> :	Versickerung
G <sub>ab</sub> :	Grundwasserabfluß

#### Gl.3.1: Wasserbilanzgleichung eines idealisierten Abfallsegmentes

Veranschaulicht werden diese Zusammenhänge in Abb. II- 3.1, wobei hier auf die Darstellung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtung gesondert eingegangen werden soll.

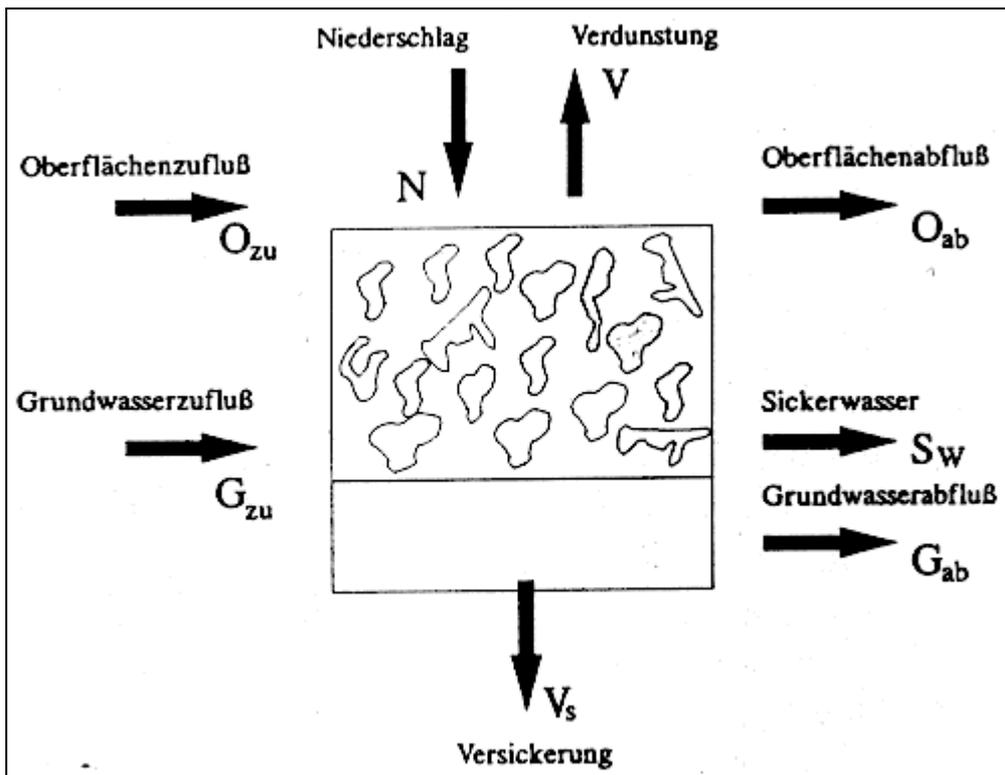


Abb. II- 3.1: Idealisiertes Abfallsegment mit Ein- und Ausgangsgrößen

Sickerwasser im hier eingezeichneten Sinn, entsteht nur bei Vorhandensein einer abdichten- den Schicht an der Basis. Ansonsten wird das "Sickerwasser" den Weg der Versickerung ein- schlagen. Das Sickerwasser könnte danach auch als Grundwasserabfluß bezeichnet werden.

FRANZIUS, 1977 [301] bezog sich in seiner Arbeit auf den modelltheoretischen Ansatz von REMSON et al., 1968 [302], nach dem ein in Schichten unterteilter Müllkörper bei Erreichen der Wasserkapazität Schicht für Schicht von oben nach unten von Wasser durchströmt wird. Um das Modell von Franzius zu betreiben, ist es nötig, eine Reihe von meteorologischen und mülltechnischen Parametern zu ermitteln. Dies ist jedoch bei Altablagerungen nachträglich nur bedingt möglich. Generell ist es aber einsichtig, daß der Abfallkörper selbst, trotz seiner Inhomogenitäten, erst in ein Modell eingehen muß, um ein wirklichkeitsnahes Modell auf- stellen zu können.

Folgende Abfallparameter werden von FRANZIUS berücksichtigt:

- Art des Abfalls
- Wassergehalt des Abfalls
- Dichte des Abfalls

Weiterhin sind wassermengenorientierte Laborversuche mit Müllproben notwendig, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen. FRANZIUS selbst gibt an, daß eine exakte Über- einstimmung gemessener und simulierter Werte einen Idealfall darstellt, der nicht realisierbar ist. EHRIG, 1980 [303] bestätigt dies und empfiehlt als zwischenzeitliche Lösung einen stati- stischen Ansatz zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Sicker- wasser.

Zum Verfahren von FRANZIUS, 1977 [301] wird angemerkt, daß die Parameterfindung aufgrund der relativ kleinen Probekörper letztendlich auch ein statistisches Problem darstellt, wobei der Ansatz selbst positiv bewertet wird.

Das von HELMER, 1977 [304] vorgeschlagene Verfahren, bei dem eine Einheitsganglinie aufgrund von Meß- und Reihenwerten einer 1,5 - 1,8 m dicken Müllschicht über einer Kiesschüttung aufgestellt wurde, wird in [303] als untauglich bewertet. Zum einen treten Unstetigkeiten, die an Betriebsdeponien nicht beobachtet wurden, auf und zum anderen kann der Abfluß aus einer Abfallstoffschicht nur begrenzt mit der aus einer Kiesschüttung verglichen werden.

Festzuhalten sind aus Messungen an 14 Betriebsdeponien folgende allgemeine Angaben bezüglich des Sickerwasseranfalls:

- Deponien mit lockerer Oberfläche 30 - 50 % des Niederschlags
- Deponien mit verdichteter Oberfläche 20 - 25 % des Niederschlags
- Bei Rottedeponien werden 20 % des Niederschlags als unterer Grenzwert angegeben.

Bevor jedoch die einzelnen Parameter bzw. Einflußgrößen detailliert untersucht werden, soll eine allgemeine Betrachtung erfolgen. Mengenmäßig nimmt die Verdunstung den größten Anteil am Niederschlag ein.

	Mittelwert (%)	Bereich (%)
nackter Boden	30	18 - 55
Acker	40	30 - 55
Gras	60	42 - 87
Wald	65	45 - 95

**Tab. II- 3.1: Mittelwerte und Bereiche des Verdunstungsanteils an Niederschlag in Prozent [305]**

Grob überschlägig kann die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung als Versickerung angesehen werden. Der Oberflächenabfluß ist nach [306] bei unbefestigten Flächen weniger relevant. Bestätigt werden diese Angaben z. B. durch Wasserhaushaltsuntersuchungen an der Deponie Georgswerder [307]. Anhand dieser Untersuchungen sollen die Ausdrücke aus Gleichung 3.1 exemplarisch quantifiziert werden. Der Niederschlag  $N$  beträgt im Bilanzjahr 1987, 980-1080 mm. Die Verdunstung  $V$  mit einem hohen Anteil an unbewachsenem Boden 370 - 450 mm.

Der Oberflächenabfluß  $O_{ab}$  plus Deckschichtenabfluß (Interflow) beträgt 20 - 30 mm. Eine Speicherinhaltsänderung  $S$  konnte mittels Beobachtung von Stauwasserhorizonten nicht festgestellt werden. Der Grundwasserabfluß  $G_{ab}$ , angegeben als laterale Aussickerung, kam auf 530 - 650 mm. Das Sickerwasser  $SW$  wurde nicht aufgefangen, so daß sich die Versickerung  $V_s$  zwischen 0 und 200 mm/a bewegen wird, wobei nach BORTZ et al., 1990 [307] sich der wahrscheinlichste Wert zwischen 50 und 100 mm/a befindet.

Generell läßt sich keine allgemein gültige Angabe darüber machen, wie die Sickerwasseremissionen sich kurz-, aber auch langfristig quantitativ verändern. Dies liegt in der Inhomo-

genität des Abfalls im Vergleich zu verschiedenen Böden begründet [308]. Die organische Fraktion beispielsweise, nimmt torfähnlichen Charakter an, wohingegen andere Abfallbestandteile stark klüftig sind und somit vom Durchlässigkeitsverhalten eher einem felsigen Untergrund ähneln.

Auch EHRIG, 1987 [308] schlägt vor, die langfristige Sickerwassermenge aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung zu ermitteln, wobei er als Ausgangswert für eine Bemessung eine Angabe von 25 % macht, nicht ohne darauf hinzuweisen, daß z. B. bei Depo- nien in Hanglagen die Maxima den Mittelwert um das Fünf- bis Zehnfache übersteigen können.

Neben pauschalen Angaben sollten konkrete standortbedingte Einflüsse nicht außer acht gelassen werden [309]:

- Durch Einfluß der geodätischen Höhe werden in bestimmten Regionen (z.B. Hessisches Ried-Odenwald), bei einer Entfernung von 20 km, Niederschlagsunterschiede von 40 % festgestellt.
- Der Einfluß der Sonnenstrahlung ist höher einzuschätzen als der des Windes. Dies zeigt sich an einem Vergleich der Wirkung von Strahlung, Konvektion und Niederschlagstätigkeit.

## 4. Kommentierte Beschreibung des HELP-Modells

In den folgenden Kapiteln wird eine kommentierte Beschreibung der Einflußfaktoren für das HELP-Modell Version 1.0 vorgenommen. Der Universität Stuttgart stand auch das HELP-Modell Version 2.0 zur Verfügung, das jedoch bei der Eingabe eigener Klimadaten tägliche Einstrahlungs- und Temperaturwerte benötigt. Diese standen uns zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung. Das Programm bietet hauptsächlich für Anwender in den USA gegenüber der Version 1.0 einige Vorteile, die insbesondere in dem vorgegebenen Datenpool einer Vielzahl amerikanischer Städte und deren spezifischen Klima- und Vegetationsdaten bestehen.

### 4.1 Allgemeine Beschreibung

Das **HELP-Modell** wurde entwickelt, um die Wasserhaushaltsgrößen von Sonderabfalldeponien abschätzen zu können. Das Modell ist quasi zweidimensional und deterministisch. Es beruht auf einer Weiterentwicklung des **HSSWDS (Hydrologic Simulation Model for Estimating Percolation at Solid Waste Disposal Sites)**-Modells der U.S. Umweltbehörde (U.S. Environmental Protection Agency) und des **CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)**-Modells des U.S. Departements of Agriculture (USDA).

Das HELP-Modell benötigt klimatologische Daten, Bodencharakteristiken und die Abmessungen der Deponie. Die klimatologischen Daten bestehen aus täglichen Niederschlagsmengen, mittleren monatlichen Temperaturen, mittleren monatlichen Einstrahlungswerten, Blattflächenindizes, Evaporationstiefen und Winterbedeckungsfaktoren.

Die Bodencharakteristiken schließen Porosität, Feldkapazität, Welkepunkt, hydraulische Durchlässigkeit und die "runoff-curve"-Nummer (Oberflächenabfluß) des Soil Conservation Service (SCS) mit ein. Bei den Abmessungen der Deponie geht die Anzahl der Boden- bzw. Deckschichten mit Typ, Dicke, Neigung und maximaler Entfernung zur Dränage ein. Das HELP-Modell bietet 21 Bodentypen an, falls für die zu untersuchende Deponien keine spezifischen Analysen der Bodentypen vorliegen.

Das Modell läßt sich in einem "Konversations"-Modus, der eine interaktive Ein- und Ausgabe ermöglicht, betreiben. Der Benutzer braucht also keine vertieften Computer-Kenntnisse mitzubringen, außer wenn die direkte Manipulation von Datenfiles gewünscht wird.

Die Definitionen eines typischen **Deponieprofiles** sind aus Abb. II- 4.1 zu entnehmen.

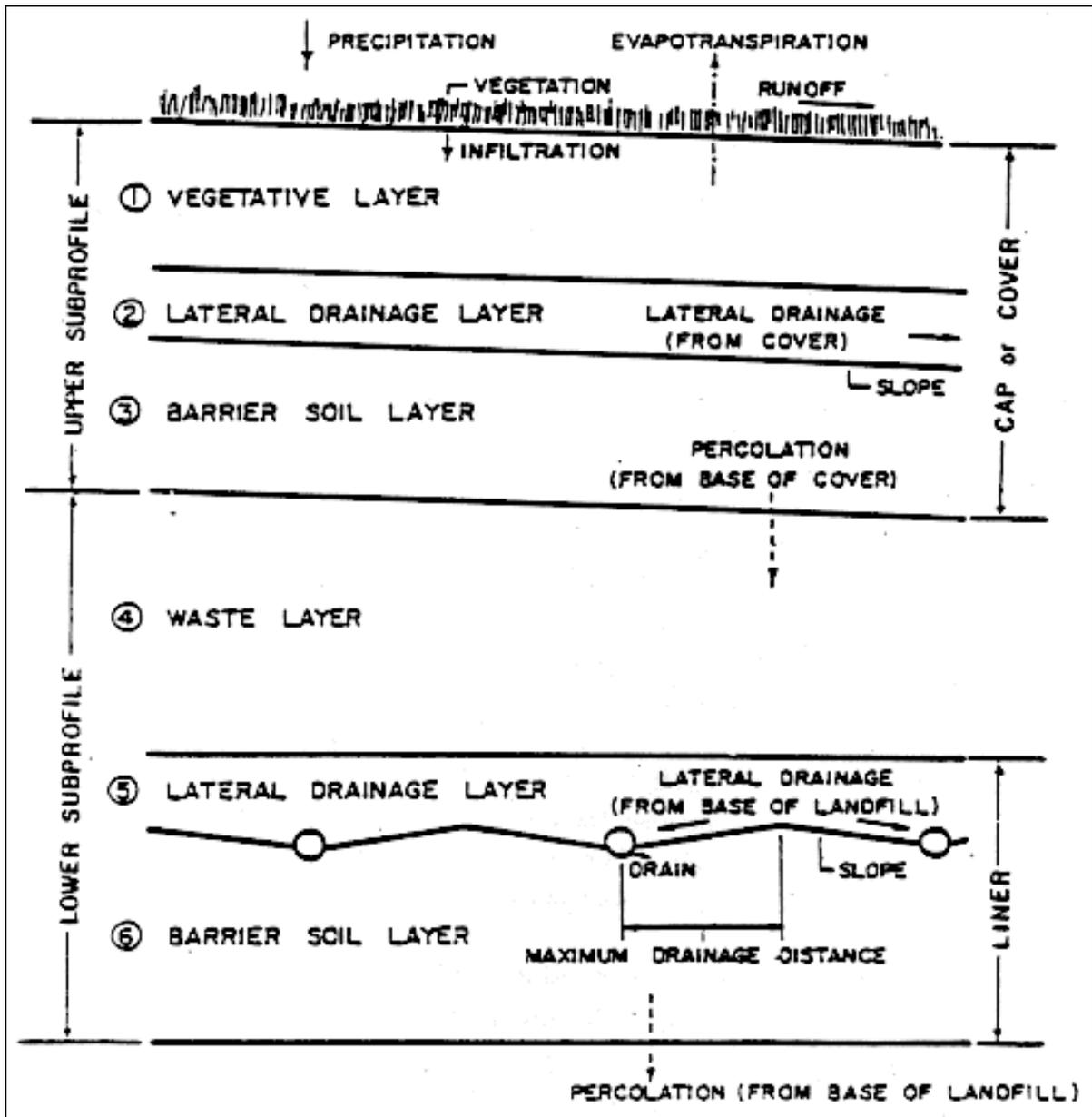


Abb. II- 4.1 : Typisches Deponieprofil

In dieser Abbildung sind sechs Schichten zu sehen, drei im oberen Subprofil und drei im unteren Subprofil. Versickerungsschichten werden mit einer Durchlässigkeit angenommen, die eine Perkolation nicht signifikant beeinträchtigt (siehe Lage 1 in Abb. II- 4.1). Eine laterale Dränage in dieser Schicht ist nicht vorgesehen, jedoch kann Wasser infolge Evaporation kapillar aufsteigen. Die Perkolation wird als unabhängig von einem sich eventuell ausbildenden Stauhorizont angenommen.

Für die Dränschicht wird eine Durchlässigkeit vorausgesetzt, die größer oder gleich der darüber liegenden Schicht ist. Die Dränmenge wird als eine Funktion von Neigung, Wasserspiegel und horizontalen Entfernungen errechnet.

Abdichtungsschichten sollen eine Durchlässigkeit haben, die geringer ist als die der übrigen Schichten. In die Berechnung geht der Stauwasserhorizont mit ein. Eine Kombinationsdich-

tung ist möglich, wobei eine Schadensabschätzung der Kunststoffbahn vom Benutzer selbst vorgenommen werden muß. Das Modell berücksichtigt keine Alterung der Folie.

Die Wasserbewegung durch die Abfallschichten wird in gleicher Weise wie bei Versickerungsschichten erfaßt.

## 4.2 Vorgehensweise des HELP-Modells

Der Niederschlag wird, um eine vollständige Bilanz zu erreichen, in Oberflächenabfluß, Evapotranspiration, Versickerung und Dränwasser aufgeteilt.

Die Verfahren, nach denen die einzelnen Komponenten berechnet werden, sind in Tab. II- 4.1 mit den Literaturverweisen aufgelistet.

Komponente	Verfahren	Literaturstelle
Oberflächenabfluß	curve-number method	[402]
Versickerung	Darcy	[403]
Dränwasser	Boussinesq	[404]
Evapotranspiration	Penman, modifiziert von Ritchie	[405], [406], [407]

Tab. II- 4.1: Literaturstellenverweise der Verfahren

Im folgenden sollen die einzelnen Komponenten und Verfahren näher besprochen und kommentiert werden.

### 4.2.1 Oberflächenabfluß

Der **Oberflächenabfluß** nach dem Verfahren des Soil Conservation Service (SCS) wird als Differenz zwischen dem potentiellen Oberflächenabfluß und der potentiellen Retention berechnet.

$$Q = P' - S'$$

mit

- Q: aktueller Oberflächenabfluß  
 P': maximaler potentieller Oberflächenabfluß oder aktueller Niederschlag, nachdem Oberflächenabfluß eingetreten ist  
 S': potentielle maximale Retention

#### Gl. 4.1: Aktueller Oberflächenabfluß

Die aktuelle Retention verhält sich zur potentiellen Retention wie der Abfluß zum Niederschlag:

$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P'}$$

mit:  $F = P' - Q$ , d.h. aktuelle Retention, nachdem Oberflächenabfluß eingesetzt hat.

Der Wert von  $I_a = 0,25$  in Abb. II- 4.2 wurde anhand einer großen Anzahl von Feldversuchen empirisch bestimmt. Umgeformt ergibt sich die allgemein bekannte Schreibweise des SCS:

$$Q = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{(P + 0,8)}$$

#### Gl. 4.2: Oberflächenabfluß nach dem Soil Conservation Service (SCS)

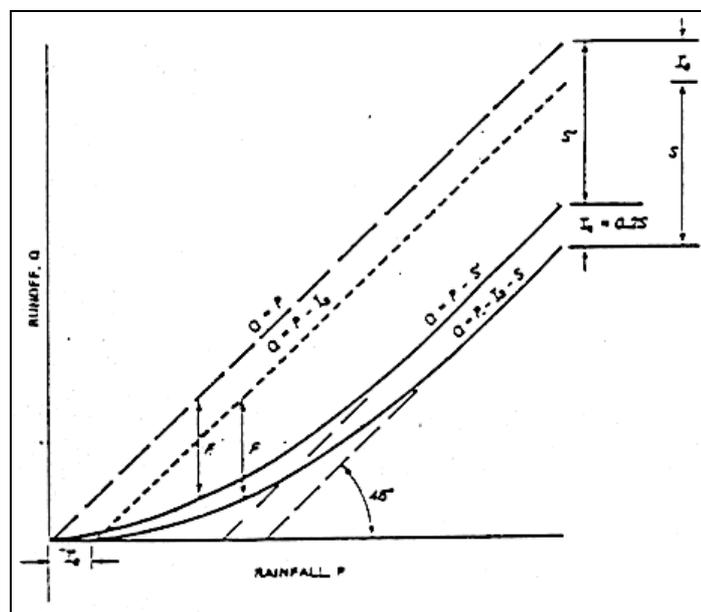


Abb. II- 4.2: Beziehungen zwischen Oberflächenabfluß, Niederschlag und Retention [401]

Die Retention wird durch die **Curve Number (CN)** bestimmt.

$$S' = \frac{1000}{CN} - 10$$

mit: CN: Curve Number

#### Gl.4.3: Bestimmung der Retention mit der Curve Number

Außerdem wird die Retention tiefengewichtet durch den Wassergehalt, Welkepunkt und dem Wasserhaltevermögen ermittelt. Diese Werte gehen, lediglich boden- und vegetationsabhängig, in den CN-Faktor mit ein.

Die Übertragbarkeit des Verfahrens des SCS auf mitteleuropäische Verhältnisse ist jedoch nicht ausreichend gesichert [408]. Hinzu kommt, daß der Geltungsbereich nur für Starknieder-

schläge > 30 mm allgemein akzeptiert wird [409] . Dies ist jedoch ein Wert, der unter hiesigen Verhältnissen selten erreicht werden kann.

Prinzipiell gehen nicht in die Berechnung mit ein:

- Neigung der Oberfläche
- das Niederschlagsereignis selbst mit seiner Intensität und Dauer.

Möglich ist jedoch, daß z.B. durch Messungen vor Ort ein CN-Faktor gefunden wird, der die Verhältnisse realistisch widerspiegelt. Dies widerspricht zum einen der Philosophie des HELP-Modelles, Prognosen mit einem sehr geringen Aufwand aufzustellen, und zum anderen stellt dies auch ein gewisses praktisches Problem dar (Installation einer festen Meßanlage oder Präsenz vor Ort während des Ereignisses).

Allerdings nimmt der Oberflächenabfluß innerhalb einer Gesamtwasserbilanz bei einer entsprechenden Vegetation eine untergeordnete Rolle ein (im Bereich weniger Prozent oder darunter). Bei steilen Verhältnissen findet der Oberflächenabfluß in bevorzugten Bahnen statt, d.h., es kommt zu Erosionserscheinungen [410].

Eine Berücksichtigung des Niederschlagsereignisses, selbst bei einer Veränderung der entsprechenden Unterroutine, hätte einen ungleich größeren Aufwand bei der Dateneingabe als Folge. Trotzdem kann empfohlen werden, speziell diesen Punkt bzw. diese Unterroutine in Zusammenarbeit mit einem Hydrologen neu zu überdenken. Ohne detaillierter auf geeignete Verfahren eingehen zu wollen, sei auf Zusammenstellungen zu diesem Thema verwiesen [411], [412].

## 4.2.2 Infiltration

Die **Infiltration** ist die Differenz zwischen den täglichen Niederschlägen, den täglichen Oberflächenabflüssen, der Oberflächenevaporation und der Interzeption. Wenn die mittlere tägliche Temperatur niedriger als 0° C ist, wird der Niederschlag als Schnee an der Oberfläche gespeichert und trägt somit nicht zu Infiltration bzw. zum Oberflächenabfluß bei.

$$0 \quad \text{für } T_i \leq 32 \text{ oder } SNO_{i-1} = 0$$

$$M_i = 0,06(T_i - 32) \quad \text{für } T_i > 32 \text{ und } SNO_{i-1} > 0,06(T_i - 32)$$

$$SNO_i \quad \text{für } T_i > 32 \text{ und } SNO_{i-1} \leq 0,06(T_i - 32)$$

mit:

$M_i$ : Menge der Schneeschmelze am Tag i [in]

$T_i$ : mittlere Temperatur am Tag i [°F]

$SNO_{i-1}$ : Menge des Niederschlages als Schnee am Ende des Tages i-1 [in]

### Gl. 4.4: Berechnung der Schneeschmelze

$$\text{SNO}_{i-1} + \text{PRE}_i - \text{ESS}_i \text{ für } T_i \leq 32$$

$$\text{SNO}_i = \text{SNO}_{i-1} - M_i \text{ für } T_i > 32 \text{ und } \text{ESS}_i \leq M_i + \text{PRE}_i$$

$$\text{SNO}_{i-1} - \text{ESS}_i \text{ für } T_i > 32 \text{ und } \text{ESS}_i > M_i + \text{PRE}_i$$

$\text{PRE}_i$ : aktueller Niederschlag am Tag  $i$  [in]

$\text{ESS}_i$ : Oberflächenwasserevaporation am Tag  $i$  [in]

#### Gl. 4.5: Berechnung der Höhe der gefrorenen Niederschläge

Der tägliche Oberflächenabfluß  $Q_i$  wird berechnet, indem der effektive Niederschlag  $P_i$  eingeführt wird:

$$P_i = \text{PRE}_i + \text{SNO}_{i-1} - \text{SNO}_i - \text{ESS}_i$$

#### Gl. 4.6: Definition des effektiven Niederschlages

Daraus folgt, daß die effektive Infiltration sich als

$$\text{IN}_i = P_i - Q_i$$

#### Gl. 4.7: Berechnung der effektiven Infiltration

ergibt, wobei die effektive Infiltration als  $\text{IN}_i$  bezeichnet wird.

Die Abschmelzvorgänge fester Niederschläge werden von ROTH-KLEYER, 1988 [508] als nicht zufriedenstellend gelöst bezeichnet. Dies wird von Lysimetermessungen und Angaben aus der Literatur [504], [505] unterstützt. Insgesamt erscheint dieser Anteil nicht ausschlaggebend zu sein.

### 4.2.3 Evapotranspiration

Um den nachfolgenden Teil verständlicher zu gestalten, werden die grundlegenden Begriffe kurz erklärt:

- *Evaporation*: Verdunstung von Wasserflächen und der mehr oder weniger feuchten Bodenoberfläche
- *Transpiration*: Verdunstung durch die Pflanzen
- *Interzeption*: derjenige Teil des Niederschlags, der von der Oberfläche der Pflanzen verdunstet, ohne die Bodenoberfläche zu erreichen.
- *Evapotranspiration*: Gesamtheit von Bodenverdunstung, Pflanzenverdunstung und Verdunstung aus der Interzeption
- *Potentielle Evapotranspiration*: die Wassermenge, die vom Boden verdunstet und von den Pflanzen abgegeben wird, wenn genügend Wasser zur Verfügung steht.
- *Aktuelle Evapotranspiration*: läßt sich praktisch nur durch Messungen ermitteln.

Die Evapotranspiration stellt neben dem Niederschlag in der Regel die mengenmäßig größte Komponente des Wasserhaushaltes einer Deponie dar. Aus diesem Grund soll hier der Evapotranspiration besonderer Raum gegeben werden, trotz der Unsicherheiten, die eine Berechnung enthält.

Die Evaporation von einer Deponieoberfläche ist eine Funktion der verfügbaren Energie, der Vegetation, der Durchlässigkeit des Bodens und des Wassergehaltes des Bodens. Die potentielle Evapotranspiration wird im HELP-Modell mittels einer modifizierten Penman-Formel errechnet.

$$E_{oi} = \frac{1,28 * A_i * H_i}{(A_i + G) * 25,4}$$

- $E_{oi}$ : potentielle Evapotranspiration am Tag [in]  
 $A_i$ : Neigung der Sättigungsdampfdruckkurve am Tag i  
 $H_i$ : effektive Sonneneinstrahlung am Tag i in Langleys  
 $G$ : psychrometrische Konstante, wird hier als 0,68 angenommen

#### **Gl. 4.8: Potentielle Evaporation mit modifizierter Penman-Formel**

$A_i$  wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$A_i = \frac{5304}{TK_i^2} * e^{(21,255 \frac{5304}{TK_i})}$$

**Gl. 4.9: Neigung der Sättigungsdampfdruckkurve, wobei  $T_{Ki}$  die mittlere Temperatur am Tag i in [°K] ist.  $H_i$  kann wie folgt bestimmt werden:**

$$H_i = \frac{(1-L) * R_i}{58,3}$$

#### **Gl. 4.10: Effektive Sonneneinstrahlung**

mit:

- $L$ : Albedo für Sonneneinstrahlung, wird hier als 0,23 angenommen  
 $R_i$ : Sonneneinstrahlung am Tag i in Langleys

Alle täglichen Temperaturen und Sonneneinstrahlungen werden aus mittleren monatlichen Werten mittels einer Fourier-Reihe interpoliert.

Die tägliche potentielle Evaporation bezieht sich in erster Linie auf das an der Oberfläche verfügbare Wasser. Wenn genug Wasser vorhanden ist, wird kein Wasser dem Boden entzogen, andernfalls setzen Bodenevaporation bzw. Pflanzentranspiration ein.

Die Evaporation aufgrund von Oberflächenfeuchtigkeit  $ESS_i$ , ergibt sich somit als eine Summe von Schneeschmelze und Niederschlagswasser, wobei die obere Grenze durch die potentielle Evaporation gebildet wird.

Sowohl die aktuelle Bodenevaporation  $ES_i$  als auch die aktuelle Pflanzentranspiration,  $EP_i$  werden gleich Null gesetzt, wenn die Temperatur den Gefrierpunkt unterschreitet. Das HELP-

Modell berechnet diese beiden Komponenten getrennt. Die potentielle Bodenevaporation,  $ES_{oi}$ , durch die Oberfläche wird durch folgende Gleichung bestimmt, falls die Evaporation nicht durch die Transmissivität begrenzt ist:

$$ES_{oi} = E_{oi} * e^{-0,4LAI}$$

mit:

$S_{oi}$ : potentielle Bodenevaporation am Tag i [in]  
 $AI_i$ : Blattflächenindex am Tag i

#### **Gl. 4.11: Potentielle Bodenevaporation**

Während der Nichtwachstumsperiode kann der LAI, der auf den Blattflächen von aktiv transpirierenden Pflanzen beruht, gegen Null gehen. Trotzdem bleibt auch im Winter ein Teil des Bodens mit Pflanzen bedeckt, was sich negativ auf die Bodenevaporation auswirkt.

$$ES_{oi} = E_{oi} * e^{-0,4WCF}$$

mit:

WCF: Winterbedeckungsfaktor

#### **Gl. 4.12: Abhängigkeit der Bodenevaporation vom Winterbedeckungsfaktor**

Bodenevaporation findet in zwei Stufen statt. Stufe eins wird lediglich durch die verfügbare Energie beeinflusst, während die zweite Stufe durch die Wasserdurchlässigkeit des Bodens begrenzt wird.

Die täglichen Summen der Bodenevaporation, Oberflächenevaporation und Pflanzentranspiration können nicht die potentielle Evapotranspiration übersteigen.

Die potentielle Pflanzentranspiration ergibt sich aus:

$$EP_{oi} = \frac{E_{oi}^{LAI}}{3}$$

mit:

$P_{oi}$ : potentielle Pflanzentranspiration am Tag i

#### **Gl. 4.13: Potentielle Pflanzentranspiration am Tag i**

Die aktuelle Pflanzentranspiration ist gleich der potentiellen Pflanzentranspiration, außer wenn sie durch zu niedrige Bodenfeuchte limitiert wird oder wenn die täglichen Summen der Oberflächenevaporation, Bodenevaporation und Pflanzentranspiration die tägliche potentielle Evaporation übersteigen.

Die potentielle Pflanzentranspiration errechnet sich aus der potentiellen Evaporation nach Penman in Verbindung mit dem Blattflächenindex (LAI), der exponentiell eingeht.

Es wird angenommen, daß die aktuelle Pflanzentranspiration der potentiellen entspricht, solange die Summe aus aktueller Pflanzentranspiration, Oberflächenevaporation und aktueller Bodenevaporation kleiner ist als die potentielle Evaporation. Nach Überschreitung dieser Grenze wird von der potentiellen Evapotranspiration die Oberflächenevaporation und die aktuelle Bodenevaporation abgezogen. Der so errechnete Wert stellt allerdings einen oberen Wert dar, der in der Regel durch einen Term abgemindert wird, der den Bodenwassergehalt, den Welkepunkt und die Feldkapazität berücksichtigt. Die drei letztgenannten Einflußgrößen werden tiefengewichtet. Diese gewichteten Größen begrenzen außerdem den Blattflächenindex. Bei Erreichen eines bestimmten Wertes steigt der LAI nicht mehr über den des Vortages an, d.h. er stagniert bis die Verhältnisse wieder einen größeren LAI zulassen.

Die gesamte Evapotranspiration ergibt sich aus der Summe der Bodenevaporation und der Pflanzentranspiration. Dies gilt solange bis die Summe aus aktueller Bodenevaporation und aktueller Pflanzentranspiration kleiner als die potentielle Evapotranspiration abzüglich der Oberflächenevaporation ist. Dann bildet diese Summe die gesamte Evapotranspiration.

Insgesamt zeigt die von HELP berechnete Evapotranspiration eine gute bis sehr gute Übereinstimmung sowohl mit Messungen als auch mit Vergleichsrechnungen (siehe Kapitel 5). Diese guten Übereinstimmungen sind jedoch nur erreichbar, wenn folgende kritische Parameter genau definiert sind:

- Blattflächenindex (BFI oder LAI)
- Winterbedeckungsfaktor (WCF)
- Evapotranspirationstiefe

Aus der Dokumentation des HELP-Programmes sind Werte für diese Parameter für "nackten Boden" bis "ausgezeichnetes Gras" zu entnehmen. Für diese Vegetationsformen ist das HELP-Modell auch ausreichend verifiziert. Problematisch erscheint jedoch die Übertragbarkeit auf Altablagerungen, die meist eine größere Artenvielfalt bezüglich der Vegetation entwickelt haben. Die Evaporationstiefe läßt sich aus der Durchwurzelungstiefe abschätzen, wobei eine klare Definition über die Verteilung von Fein- und Tiefwurzeln und deren Anteil an der Evapotranspiration schwerlich zu treffen ist. Denkbar wäre es jedoch, falls der Einsatz des HELP-Modells an einer großen Anzahl von Altablagerungen gewünscht ist, die für Altablagerungen häufig auftretenden Vegetationsformen bei gebräuchlichen Bodentypen zu katalogisieren und somit einen allgemeinen Zugriff zu ermöglichen.

Ähnlich gelagert ist die Problematik beim Blattflächenindex, der, obwohl er einfach als Verhältnis der Summen der Blattflächen zur Bodenfläche definiert ist, große Spannweiten in der Literatur zeigt. Dies rührt wohl von einer gewissen Anzahl an Einflußparametern her, wie z.B. Höhe, Breitengrad und den zur Verfügung stehenden Niederschlägen. Beispielhaft ist der Einfluß der Meereshöhe in Abb. II- 4.3. dargestellt.

Zu diesem Thema sind bei der Angabe des BFI innerhalb der deutschsprachigen Literatur extreme Schwankungen festzustellen (z.B. bei Gras bzw. Wiese zwischen ca. 3 und 11,6). Dies kann auf nicht einheitliche Verfahren bei der Bestimmung des BFI sowie auf unklare Definitionen der Vegetationszustände zurückgeführt werden.

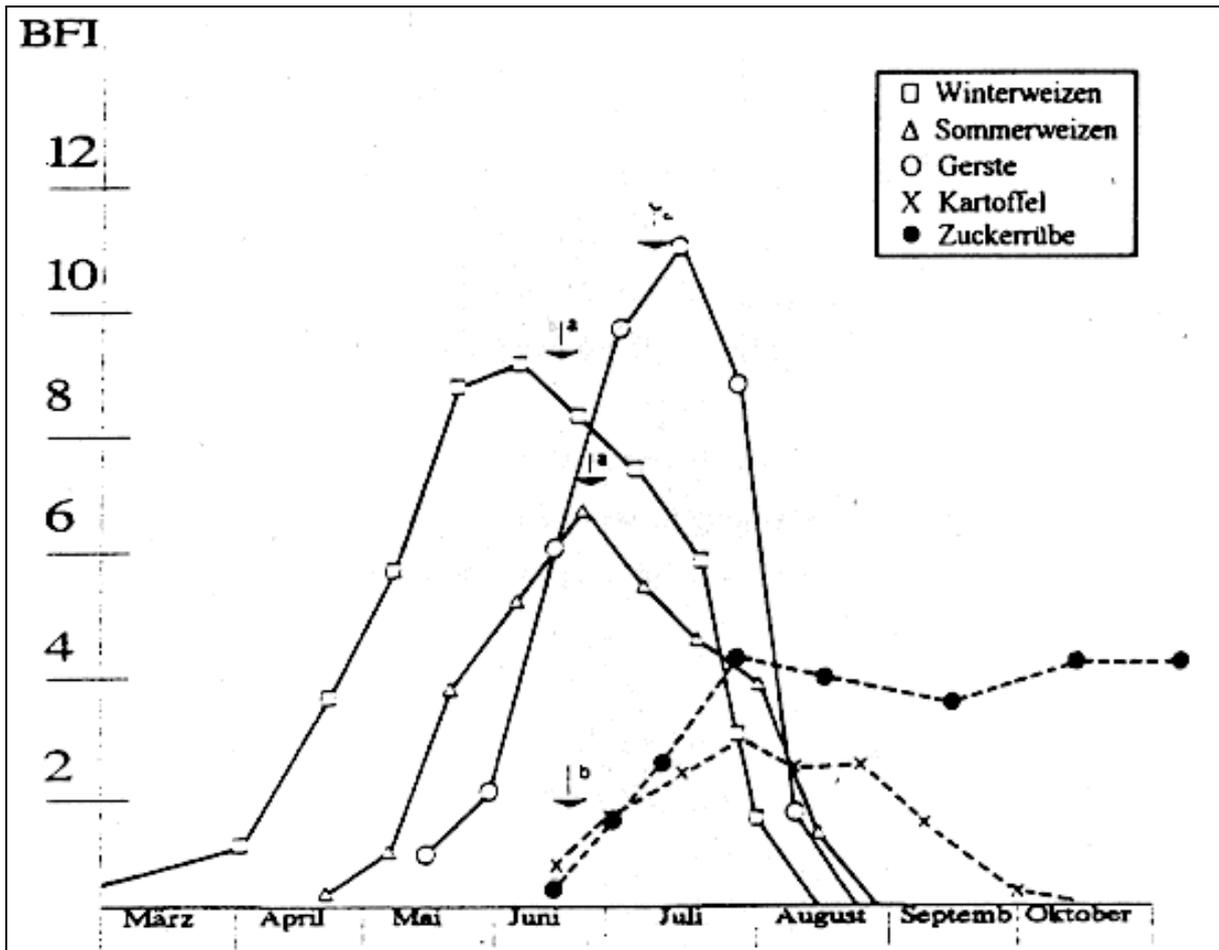


Abb. II- 4.3: Blattflächenindex verschiedener Vegetationstypen entlang eine Stufenfolge in den Alpen, zitiert von [413].

Vegetationseinheit	Blattflächenindex Spanne	Blattflächenindex häufigster Wert
tropische Regenwälder	6 - 16	8
regengrüne Wälder		5
Sommergrüne Wälder	3 - 12	5
Boreale Wälder	7 - 15	12
Trockenbusch und Hartlaubgehölz	4 - 12	4
Wiesen und Steppen		3,6
landwirtschaftliche Pflanzungen	4 - 12	4

Tab. II- 4.2: Blattflächenindex verschiedener Vegetationsformen und deren Spanne [413].

Neben dem maximalen Wert des BFI ist auch dessen zeitlicher Verlauf von ausschlaggebender Bedeutung. Angaben hierüber sind der vorliegenden Literatur nur für landwirtschaftlich genutzte Pflanzen zu entnehmen [414]. Hier wird ein maximaler Wert von über 10 für Gerste im Juli angegeben. Eine mögliche Methode zur Bestimmung der BFI wird von ELLENBER-

GER, 1986 [415] beschrieben. So sollen unmittelbar nach der Entlaubung im Herbst alle frisch gefallenen Blätter von Probeflächen aufgesammelt und planimetriert werden. Dies verdeutlicht den Aufwand bei einer exakten Bestimmung, trotzdem gilt auch hier das gleiche wie zur Bestimmung der Evapotranspirationstiefe.

Um hier eine vertrauenswürdige Datenbank aufzubauen, wäre die Begleitung durch eine entsprechende Institution wünschenswert. Die Methode der Berechnung scheint hinreichend genau.

## 4.2.4 Bodenwasserhaushalt

Der Bodenwassergehalt errechnet sich aus der Infiltration, Versickerung, Dränage und Evaporation; wobei die Vortageswerte berücksichtigt werden. Eine Unterteilung in bis zu neun Abdichtungsschichten und sieben Segmenten in der Vegetations- bzw. Evaporationszone ist möglich. Das Modell nimmt an, daß der Bodenwassergehalt einer Abdichtungsschicht nur bis zur Feldkapazität absinken kann, die Schichten aber für die Versickerung als wassergesättigt betrachtet werden.

Der Bodenwasserhaushalt ist nur von mittelbarem Interesse, da er weder eine Eingangs- noch eine Ausgangsgröße darstellt. Allerdings wird in der Version 1.0 keine längerfristige Speicherung berücksichtigt, was bei der Betrachtung von Altablagerung ein Manko darstellen kann, da diese oft mit bindigen Bodenschichten hoher Speicherkapazität abgedeckt sind.

## 4.2.5 Vertikale Durchsickerung

Das Untermodell zur Berechnung der vertikalen Durchsickerung nimmt an, daß die einzelnen Schichten hinsichtlich der hydraulischen Durchlässigkeit, der Porosität und der Feldkapazität aus diskreten und homogenen Segmenten bestehen. Das Bodenprofil wird unterteilt in bis zu drei Unterprofile oder "Modelleinheiten". Das oberste Subprofil besteht aus sieben Segmenten der Evaporationszone. Das zweite Subprofil besteht aus je einem Segment für jede Schicht zwischen der obersten Abdeckschicht und der zweiten Abdeckschicht plus einem Segment für die zweite Abdeckschicht. Das dritte Subprofil beschreibt den Boden mit je einem Segment pro Schicht. Der vertikale Versickerungsfluß wird nach Darcy berechnet.

$$q = k \cdot \frac{dh}{dL}$$

mit

$q$ :	Durchsickerungsrate [in/hr]
$k$ :	hydraulische Durchlässigkeit [in/hr]
$h$ :	gravimetrische Höhe [in]
$L$ :	Länge in Fließrichtung [in]

### Gl. 4.14: Durchsickerung nach Darcy

Für jedes Segment über einer Abdichtungsschicht wird freier Abfluß angenommen. Diese Annahme ist gerechtfertigt, solange die Durchlässigkeit nicht mit der Tiefe abnimmt. Die hydraulische Durchlässigkeit in Gl. 4.14 ist eine Funktion der Bodenfeuchte und variiert von

Null bis zur gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit. Diese Verhältnisse werden linear angenähert.

## 4.2.6 Lateraler Durchfluß

**Lateraler Durchfluß** entsteht in der Dränageschicht. Dieser Abfluß wird nach Boussinesq berechnet.

$$f \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left[ (h - x \alpha) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + R$$

mit

$f$ :	dimensionlose Porosität
$t$ :	Zeit [d]
$h$ :	gravimetrische Höhe [in]
$k$ :	effektive gesättigte laterale hydraulische Durchlässigkeit [in/d]
$x$ :	laterale Koordinate in Richtung der Drainage [in]
$a$ :	dimensionslose Neigung
$R$ :	Zuströmung senkrecht zum lateralen Fluß [in/hr]

### Gl. 4.15: Boussinesqgleichung

Die Zuströmung ist gleich der Infiltration abzüglich der Evaporationsrate. Die allgemeine Boussinesqgleichung wird mit den Annahmen

$$\frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

für kurze Zeitabstände und einen elliptischen Verlauf mit Ortskoordinaten vereinfacht.

## 5. Verifizierung des HELP-Modells

Auf die umfangreichen Erfahrungen mit dem HELP-Modell in den USA soll hier nicht näher eingegangen werden, sondern der Schwerpunkt soll auf Verifizierungen des Programms für die klimatischen Verhältnisse des mitteleuropäischen Raumes liegen. Die praktischen Erfahrungen in den USA wurden von MARKWARDT, 1989 [501] zusammengetragen [502], [503], [504], [505], [506].

Eine erste Veröffentlichung über das HELP-Modell liegt wohl von MARKWARDT, 1987, [507] vor. Hier wird der Aufbau eines Testfeldes der Deponie Gerolsheim simuliert, wobei jedoch auf eine Gegenüberstellung von Simulations- und Meßwerten verzichtet wurde. Trotzdem wird hier das Modell als praxisnah bezeichnet.

Eine Überprüfung des Modells durch Lysimeterversuche wurde von ROTH-KLEYER et. al., 1988 [508] vorgenommen. Der Bodenmonolith der Lysimeteranlage Berlin-Dahlem hat eine Höhe von 135 cm, die verdunstende Oberfläche beträgt 1 m<sup>2</sup>. Die Klimadaten (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Strahlungsintensität und -dauer) konnten einer direkt zugeordneten Klimastation entnommen werden. Eine Untersuchung in einem Lysimeter hat den entscheidenden Vorteil, daß Randeinflüsse, im Vergleich zu Felduntersuchungen, eine untergeordnete Rolle spielen. So ist z. B. das Bodenprofil eindeutig bekannt.

Das **Bodenprofil** wird in Tab. II- 5.1 beschrieben, wobei die Angaben wie folgt abgekürzt sind:

Bodenart nach DIN 4220; Dichte, Feldkapazität (FK) permanenter Welkepunkt (PWK) nach DIN 19684; Gesamtporenvolumen (GVP), Wasserdurchlässigkeit (kg-Wert) Evaporationskoeffizient (Evapo.k) geschätzt.

Tiefe [cm]	Boden- art	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	GPV [%]	FK [Vol %]	PWP [Vol %]	k <sub>f</sub> [m/s]	Evapo.k [(mm/d) <sup>0,5</sup> ]
0 - 38	Sl	1,7	41	26,6	3,95	7,1*10 <sup>-6</sup>	3,4
38 - 56	S	1,74	31	21,5	1,27	2,1*10 <sup>-5</sup>	3,3
56- 135	Ls	1,85	43	29,6	15,99	7,1*10 <sup>-6</sup>	4,5

Tab. II- 5.1: Kenndaten des Bodenprofils im Lysimeter in Berlin- Dahlem [508]

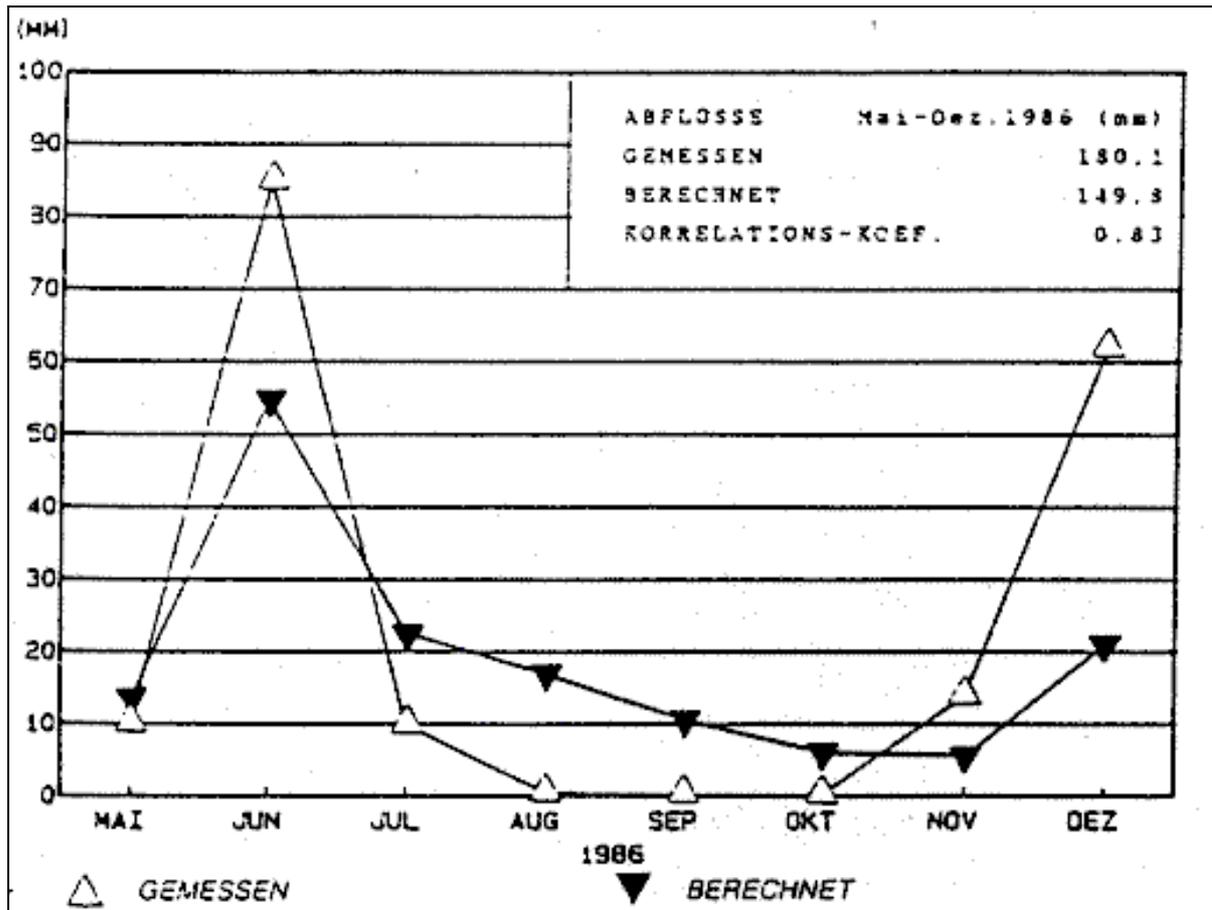


Abb. II- 5.1: Monatswerte der gemessenen und berechneten Abflüsse Mai - Dezember 1986 am Lysimeter in Berlin-Dahlem [508]

Die Oberfläche des Lysimeters ist mit deutschem Weidelgras bewachsen, das eine aktuelle Durchwurzelungstiefe von 35 cm aufweist. Angemerkt sei hier, daß dieser letztgenannte Parameter ein in bezug auf Ablagerungen schwierig zu bestimmender Wert ist.

Aufgrund der Messungen an den Lysimetern ist es möglich, die berechneten und gemessenen Werte mittels einer Korrelationsrechnung zu vergleichen. So zeigen dann die Abflüsse in der Tendenz eine gute Übereinstimmung ( $r = 0,83$ ), wie in Abb. II- 5.1 graphisch dargestellt ist.

Im Hochsommer (Juni) wird die Evaporation von HELP überschätzt (Abb. II- 5.2), so daß die berechneten Abflüsse zu gering ausfallen. Außerdem sei darauf verwiesen, daß die Abschmelzvorgänge fester Niederschläge nach [508] durch HELP noch nicht zufriedenstellend gelöst sind [503], [505].

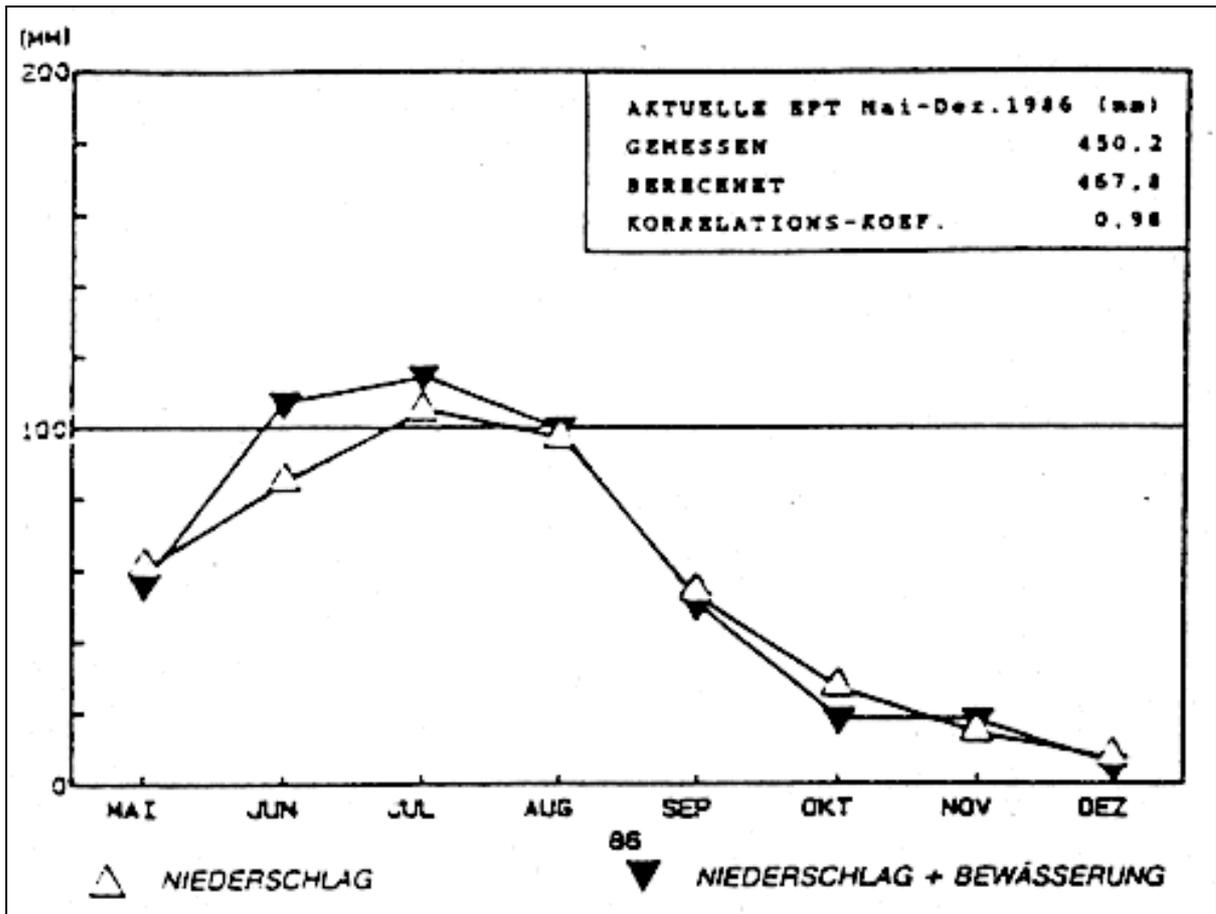


Abb. II- 5.2: Monatswerte der gemessenen und berechneten aktuellen Evapotranspiration Mai - Dezember 1986 am Lysimeter Berlin-Dahlem [508]

Die Evapotranspiration wurde von HELP mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,98$  nachvollzogen. Dies zeugt von einer sehr guten Übereinstimmung der Werte und somit kann aus diesem 8-monatigen Versuch eine für das HELP positive Bilanz gezogen werden. Allerdings kann aufgrund des eher kontinentalen Klimas in Berlin, das vergleichbar mit dem einiger Städte der USA ist, nicht allgemein von einer Verifizierung des Programms für die Bundesrepublik oder Mitteleuropa ausgegangen werden

In [501] sind Berechnungen beschrieben, die eine langjährige Untersuchung (1960 - 1967) an wägbaren Lysimetern mit dem HELP-Modell nachvollziehen. Hierbei ist zu vermerken, daß die für das Modell notwendigen Eingabedaten nicht vollständig vorlagen, und somit aus der Dokumentation des Modells entnommen werden mußten. Trotzdem werden auch hier, zumindest in den Summenberechnungen bei der Evapotranspiration und Versickerung, sehr gute Übereinstimmungen erzielt, die auf den zweijährigen Untersuchungszeitraum beruhen. Bei Berechnungen hingegen, die auf Monatssummenwerten basieren, lassen sich Abweichungen erkennen (Abb. II- 5.3 bis 5.8). Aufgetragen sind hier aktuelle Evaporation und Versickerung in drei Varianten:

- a) unbewachsener Boden
- b) ungedüngter Grasbewuchs
- c) gedüngter Grasbewuchs

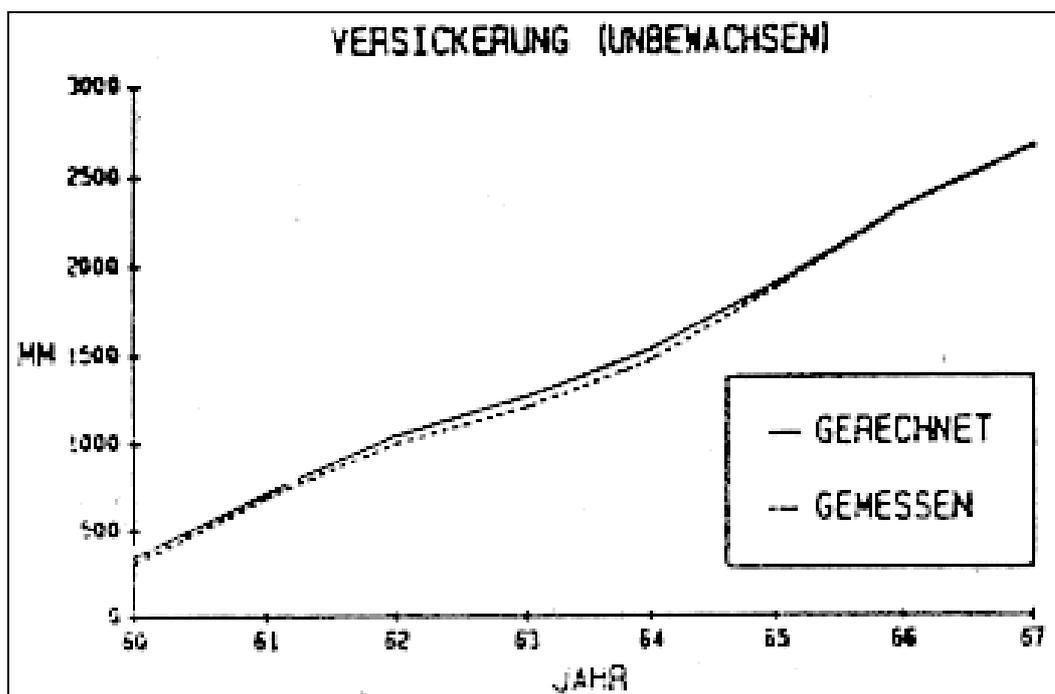
Für den gesamten Untersuchungszeitraum ergeben sich die Werte in Tab. II- 5.2 für die aktuelle Evapotranspiration in Prozent des Niederschlags.

Variante	aktuelle Evaporation [%]
unbewachsen	50
ungedüngt	65
gedüngt	80

**Tab. II- 5.2: Aktuelle Evapotranspiration in Prozent des Niederschlags bei drei Varianten, Werte aus [501].**

Aus Abb. II- 5.7 geht hervor, daß die Versickerung zeitweilig bei gedüngtem Grasbewuchs gegen Null gehen kann.

Zusammenfassend ließ sich für diese Vergleichsberechnung sagen, daß langjährige Modellierungen die Realität sehr gut treffen, die Dynamik des Wasserhaushaltes hingegen gewisse Abweichungen aufweist. Dies bedeutet, daß langjährig eine gute Korrelation erreichbar ist, kurzfristige Einzelergebnisse eventuell nur ungenügend berücksichtigt werden.



**Abb. II- 5.3: Versickerung Variante unbewachsen [501].**

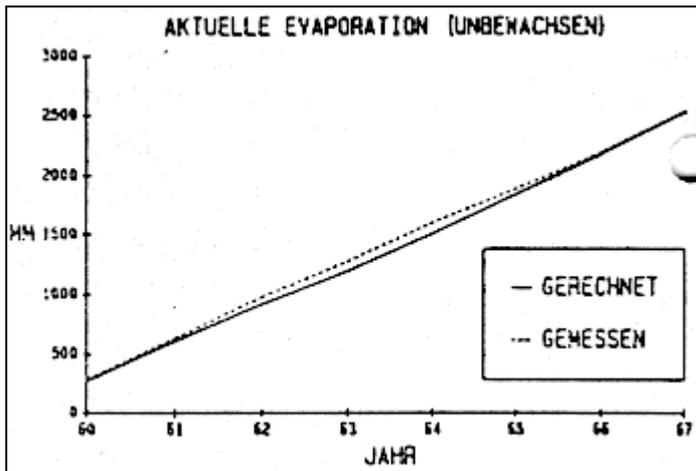


Abb. II- 5.4: Aktuelle Evapotranspiration Variante unbewachsen [501].

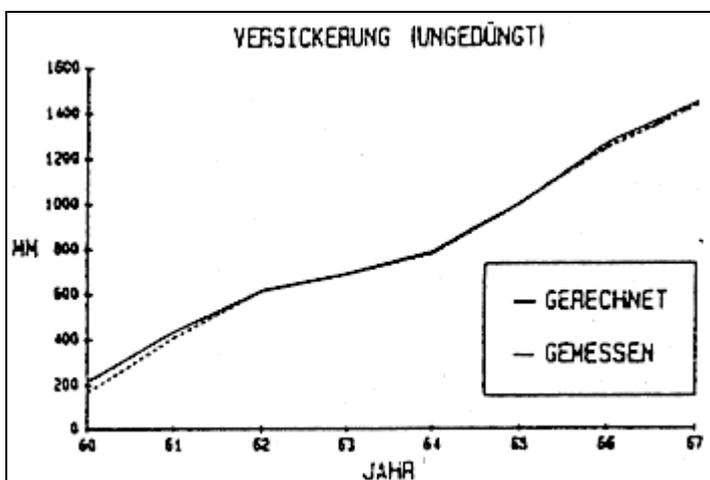


Abb. II- 5.5: Versickerung Variante Gras ungedüngt [501].

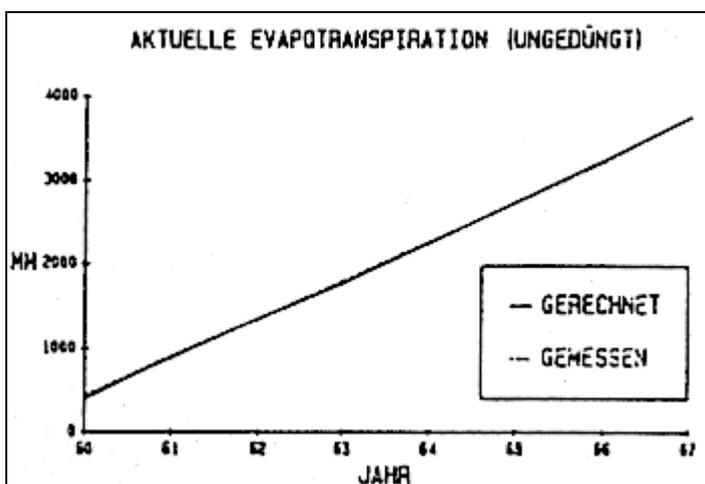


Abb. II- 5.6: Aktuelle Evapotranspiration Var. Gras ungedüngt [501].

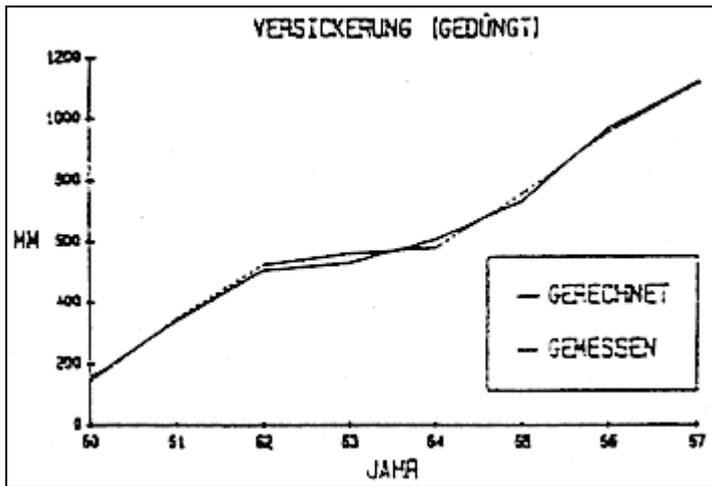


Abb. II- 5.7: Versickerung Variante Gras gedüngt [501].

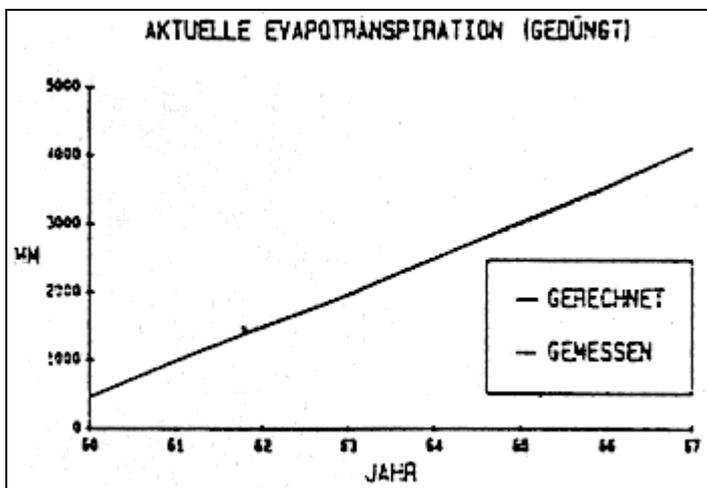


Abb. II- 5.8: Aktuelle Evapotranspiration Variante Gras gedüngt [501].

Von MARKWARDT, 1990 [509] werden umfangreiche Untersuchungen, auch mit Modifikationen des HELP-Programms der Version 1.0, vorgestellt. Diese Modifikationen wurden von der Universität Stuttgart sowohl für die Version 1.0 als auch für die Version 2.0 übernommen.

In dieser modifizierten Version wurden die Einstrahlungswerte dahingehend verändert, daß Hangneigungen und Exposition bei der Berechnung der Evaporation miteinfließen, was in der Ausgangsversion nicht der Fall ist. Um die hiesigen Klimaverhältnisse besser wiederzugeben, wurde nach MARKWARDT der Faktor für die Berechnung der Evaporation verändert.

Konkret wurde das Modell am Großlysimeter II der Deponie Dreieich-Buchschlag validiert. Das Oberflächenabdichtungssystem der Deponie ist in Abb. II- 5.9 dargestellt.

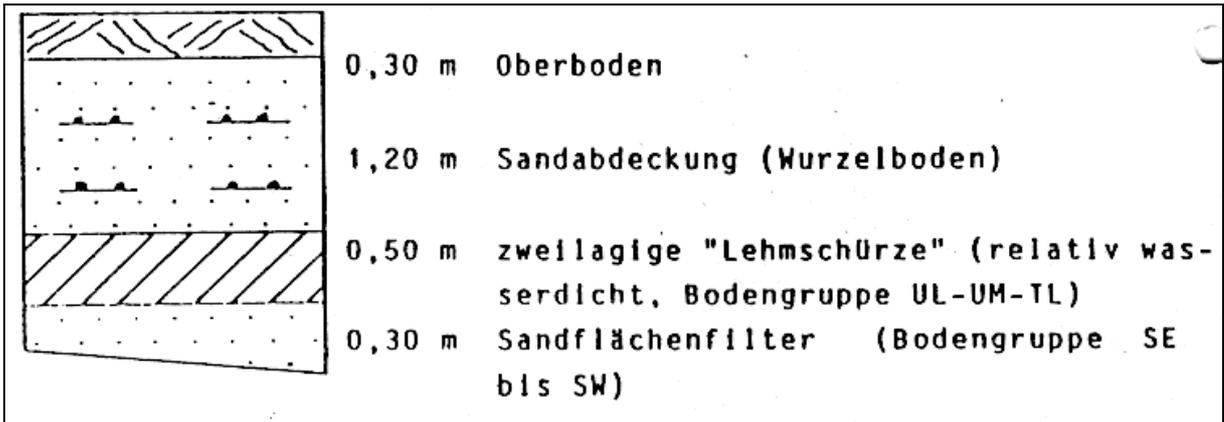


Abb. II- 5.9: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems der Deponie Dreieich-Buchsschlag [510].

Die Niederschlagsdaten wurden direkt auf der Deponie gemessen, die anderen Klimadaten wurden von den Wetterstationen Frankfurt und Gießen bezogen. In der Abb. II- 5.10 sind die gemessenen und gerechneten Werte der Versickerung als Summenkurve für die hydrologischen Jahre 1986 und 1987 dargestellt.

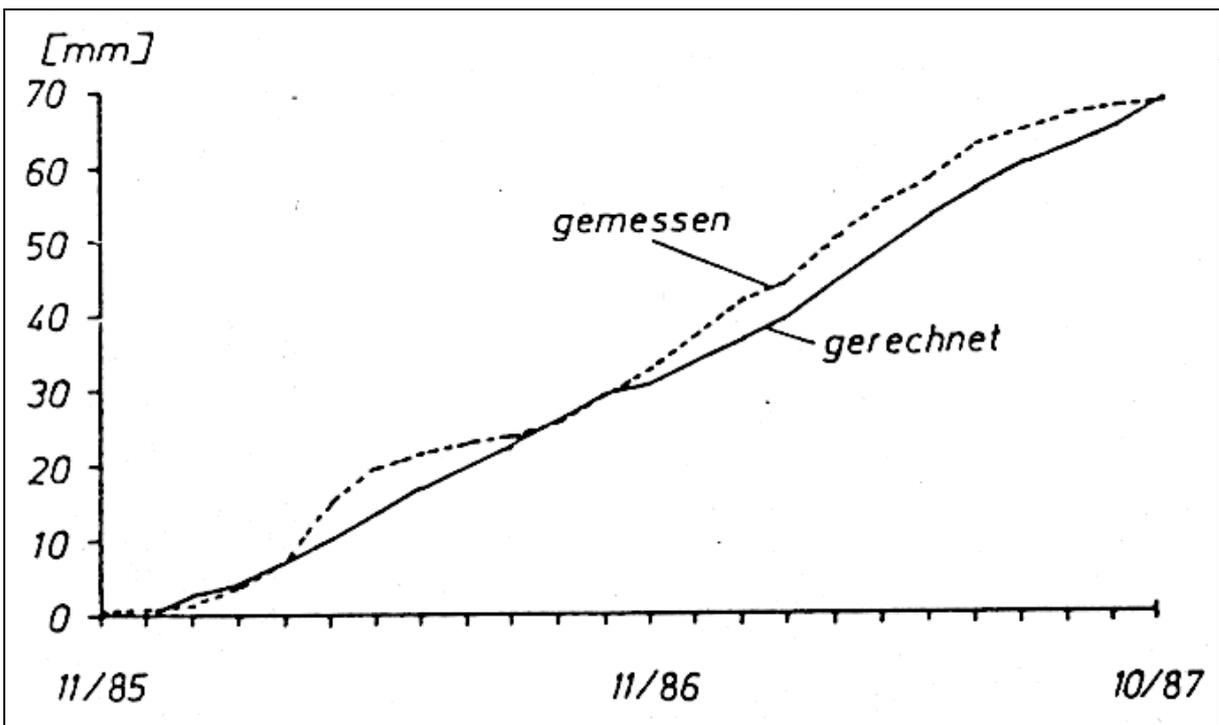


Abb. II- 5.10: Gemessene und berechnete Versickerung durch die Abdichtungsschicht der Deponie Dreieich-Buchsschlag [509].

Zu erkennen sind eindeutige Abweichungen zwischen gerechneten und gemessenen Werten, die sich allerdings am Ende der zwei Jahre ausgleichen (gemessen: 68,6 mm, gerechnet: 69,1 mm). Somit wird deutlich, daß mögliche Gefügeveränderungen des Bodens, gerade im oberflächennahen Bereich, der Berechnung der Versickerung (vgl. Kap. 4) für kürzere Zeitintervalle Grenzen setzen.

Angewendet wurde die modifizierte Version 1.0 zur Bilanzierung des Wasserhaushaltes der Deponieabdeckung Berlin-Kladow [509]. Hierzu wurde die betreffende Deponie in Teilflächen unterteilt, deren spezifische Gegebenheiten getrennt berücksichtigt wurden.

Problematisch zeigte sich die Annahme homogener Deckschichten bei sehr inhomogenen Verhältnissen, wobei sich diese Schwierigkeit durch genügend Probennahmen statistisch lösen läßt.

Ebenfalls praktisch angewendet wurde das Modell von BAUR, 1990 [511] auf die Deponie Bärenal, wobei auch hier die unterschiedlichen Expositionen durch umgerechnete Strahlungsintensitäten berücksichtigt wurden.

Ein Beispiel für eine weitere Einsatzmöglichkeit des HELP-Programmes gibt REUTER, 1992 [512]. Anhand einer fiktiven Deponie im norddeutschen Raum wurden verschiedene Varianten an Oberflächenabdichtungen simuliert. Als Grundvariante diente Variante C in Abb. II-5.11.

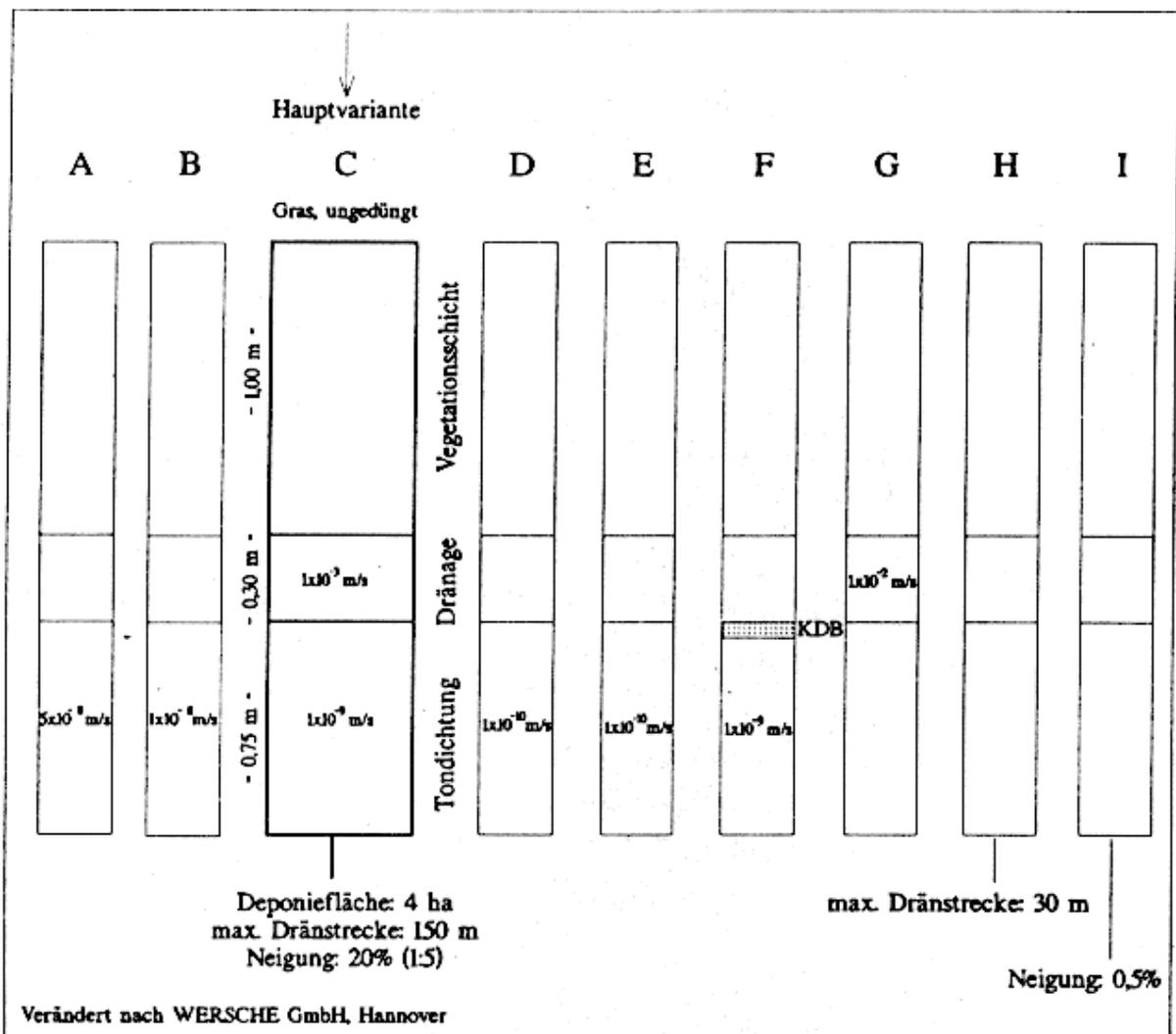


Abb. II- 5.11: Gegenüberstellung von berechneten Varianten [512]

In Variante F wurde eine Kombinationsdichtung gegenübergestellt, die bei vollkommener Dichtheit keine Durchsickerung ergibt. In den Varianten G - I wurde die Qualität der Dränschicht variiert:

- G :             $k = 1 * 10^{-2}$  m/s (statt  $10^{-3}$  m/s in Variante C)  
M :            max. Dränstrecke = 30 m (statt 150 m in Variante C)  
I :            Drängefälle = 0,5 % (statt 20 % in Variante C)

Die Resultate dieses Vergleichs werden in Abb. II- 5.12 dargestellt. Ersichtlich ist, daß die Wirkung der Gesamtdichtung in erster Linie von ihrem Durchlässigkeitswert  $k$  abhängt. So ergibt sich eine Verringerung der Durchlässigkeit von  $5 \times 10^{-8}$  auf  $1 \times 10^{-10}$  m/s eine Annahme der Versickerung von 30 % auf unter 1 %.

Die Varianten A und B haben eigentlich keine praktische Bedeutung mehr, jedoch ist bei rein mineralischen Abdichtungen schon eine Abnahme der Durchlässigkeit bis auf diese Größenordnungen beobachtet worden [513].

Der Vergleich der Varianten G und F (Erhöhung des  $k$  Wertes der Dränschicht auf  $10^{-2}$  ..) zeigt ähnliche Ergebnisse. Das heißt, daß eine Optimierung der Dränage unter Umständen auch die kostengünstigere Alternative sein kann. Wenn es möglich ist, ein Gefälle von 1:5 anzulegen, kann dies die Versickerung von 10 % auf 1,3 % reduzieren.

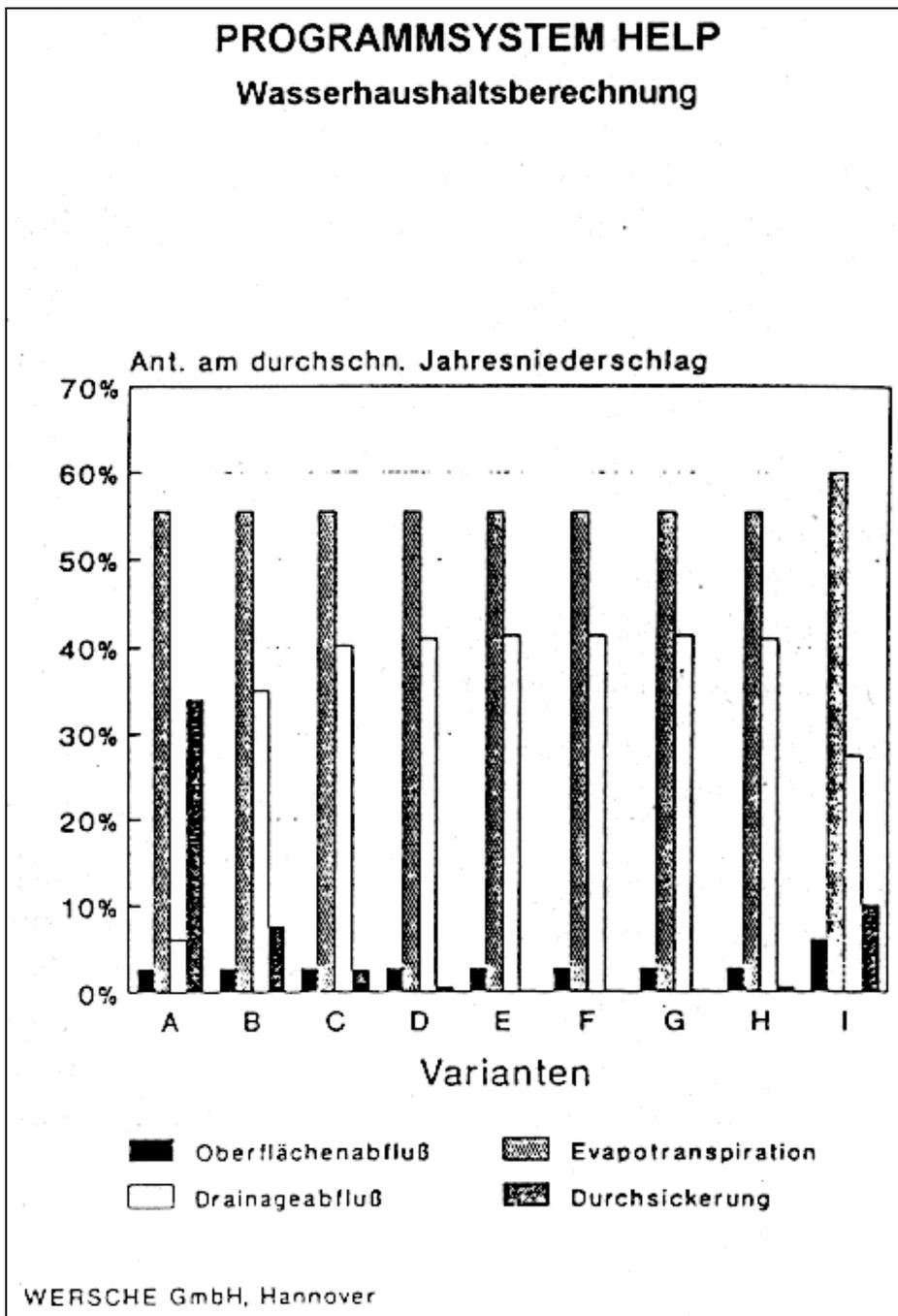


Abb. II- 5.12: Ergebnisse der einzelnen Varianten [512].

### Anmerkungen zum *HELP*

Neben der Kritik an einzelnen Berechnungsverfahren hat das *HELP*-Programmsystem auch generelle Schwachpunkte, die bei Betrachtung der errechneten Ergebnisse nicht außer acht gelassen werden sollten.

Das Programm ermöglicht es den gesamten Wasserhaushalt einer Deponie abzuschätzen, wobei der Abfallkörper lediglich als Bodenschicht eingeht. Dies ist keine realistische Beschreibung, da hier eine weitere Anzahl von Einflußfaktoren vorliegt, wie z. B. nachträgliche Setzungen oder mikrobieller Abbau [512].

Zweidimensional ist das HELP-Modell nur in bezug auf das Dränagesystem, d.h. seitliche Zuflüsse bei Deponien in Grubenlage können nicht berücksichtigt werden. Außerdem bleiben Alterungsprozesse und andere im folgenden aufgeführte Aspekte von Abdichtungssystemen von der Betrachtung ausgeschlossen:

- Gasdichtigkeit
- Setzungsunempfindlichkeit
- Erosionssicherheit gegen oberflächlich abfließendes Wasser
- Standsicherheit
- Frostsicherheit
- Austrocknung bei mineralischen Dichtungen
- Beständigkeit gegen den Angriff von Mikroorganismen
- Rekultivierbarkeit
- Begeh- und Befahrbarkeit

Eine Beurteilung des Wasserhaushaltes einer Deponie oder Altablagerung lediglich aufgrund von Berechnungen mit dem HELP-Programmsystem sind daher kritisch zu betrachten. Trotzdem bietet dieses Programm, unter der Voraussetzung seiner richtigen Anwendung, eine Möglichkeit zur Abschätzung des Wasserhaushaltes dar. Dennoch besteht die Notwendigkeit das Modell auf hiesige Klimaverhältnisse zu modifizieren und auch deponiespezifische Parameter, die speziell auf die amerikanischen Verhältnissen angepaßt sind, entsprechend zu verändern.

## 6. Abschätzung des Schadstoffverhaltens

Der Abschätzung des **Schadstoffverhaltens** bei einer Altablagerung kommt besondere Bedeutung zu. Deshalb ist das Schadstoffverhalten ausschlaggebend für die Umweltrelevanz. Im folgenden soll auf diese Problematik eingegangen werden,

- indem das Schadstoffpotential, d.h. die Schadstoffmengen, die im Hausmüll ursprünglich vorhanden sind, als maximal austragbare Größe betrachtet wird;
- durch Versuche den zeitlichen Verlauf des Schadstoffaustrages zu beschreiben.

Auf konkrete Berechnungen wird in Teil IV eingegangen. Die im folgenden aufgeführten Angaben haben keinen allgemein gültigen Charakter, sondern machen vielmehr mit der Bandbreite und der Größenordnung von Schadstoffen vertraut.

### 6.1 Schadstoffpotential im Hausmüll

Die Vielzahl der möglichen Schadstoffe im Hausmüll soll hier nicht diskutiert werden. Vielmehr sollen vorhandene Untersuchungen einen Anhaltspunkt für die Größenordnung des Schadstoffpotentials geben.

Ein Beispiel für die gängigsten Schadstoffe sei von FUCHS, 1984 [601] in Tab. II- 6.1 gegeben.

Schadstoffe	Papier/Pappe	Kunststoffe	Feinmüll	Vegetabilien	Analysenmüll
Cu	171	616	40	1582	2417
Na	3111	1744	3126	9606	17630
Fe	3979	4590	14413	18736	41839
Zn	762	1189	1330	2004	5301
Mn	165	109	749	762	1785
Pb	235	896	637	2219	4066
Cd	3	18	3	12	35
Mg	0,3	1	0,4	5	7
F	63	17	38	9	123
Cl	5875	25704	1645	3624	35434
S	1736	1883	1399	2334	7365

**Tab. II- 6.1: Chemisch-Physikalische Untersuchung von Siedlungsabfällen (Hausmüll), Schadstofffrachten BRD, Massenraten in mg/Jahr [601].**

Es liegen nur zur Angabe von Schwermetallen im Hausmüll liegen verwertbare Aussagen vor. So enthält der Hausmüll der alten BRD im Schnitt [602]:

TS Cd	2,87 mg/kg
TS Pb	605 mg/kg
TS Mg	0,44 mg/kg
TS Zn	585 mg/kg

**Tab. II- 6.2: Schwermetallgehalte nach bundesweiter Hausmüllanalyse 1979/80 [602]**

Ebenfalls für die Schwermetallgehalte liegt von TABASARAN, 1984 [603] eine Sammlung von Werten vor:

Schwermetall	Bereich in mg/kg TS
Cd	0,5 - 3,6
Pb	110 - 600
Cr	5 - 62,4
Cu	20 - 210
Mg	0,3 - 14
Zn	150 - 1000

**Tab. II- 6.3: Schwermetallgehalte im Hausmüll bei verschiedenen Untersuchungen [603].**

## 6.2 Verlauf des Schadstoffaustrags

### 6.2.1 Sickerwasserinhaltsstoffe

Um den zeitlichen Verlauf des Austrags von Schadstoffen zu verstehen, ist es nötig, die Vorgänge im Deponiekörper zu untersuchen. Dies soll im Teil III dieser Arbeit geschehen, während an dieser Stelle nur der "Output" betrachtet wird.

Damit die Sickerwasserqualität allgemein besser beurteilt werden kann, wurden von der TU Braunschweig 20 Deponien unterschiedlichen Alters und Betriebstechnik untersucht [604].

Für die organischen Inhaltsstoffe liegen relativ wenig Informationen vor. Am aussagekräftigsten sind jedoch die Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> sowie ihr Verhältnis zueinander. Das Verhältnis schließt Verdünnungseffekte aus, und macht es somit möglich, auch natürlich abgedichtete Deponien, die oftmals Fremdwasserzuflüsse haben, zu beurteilen. In Abb. II- 6.1 sind die Werte aller anaeroben Deponien dargestellt. Eingetragen sind weiterhin Werte aus der Literatur [605], [606].

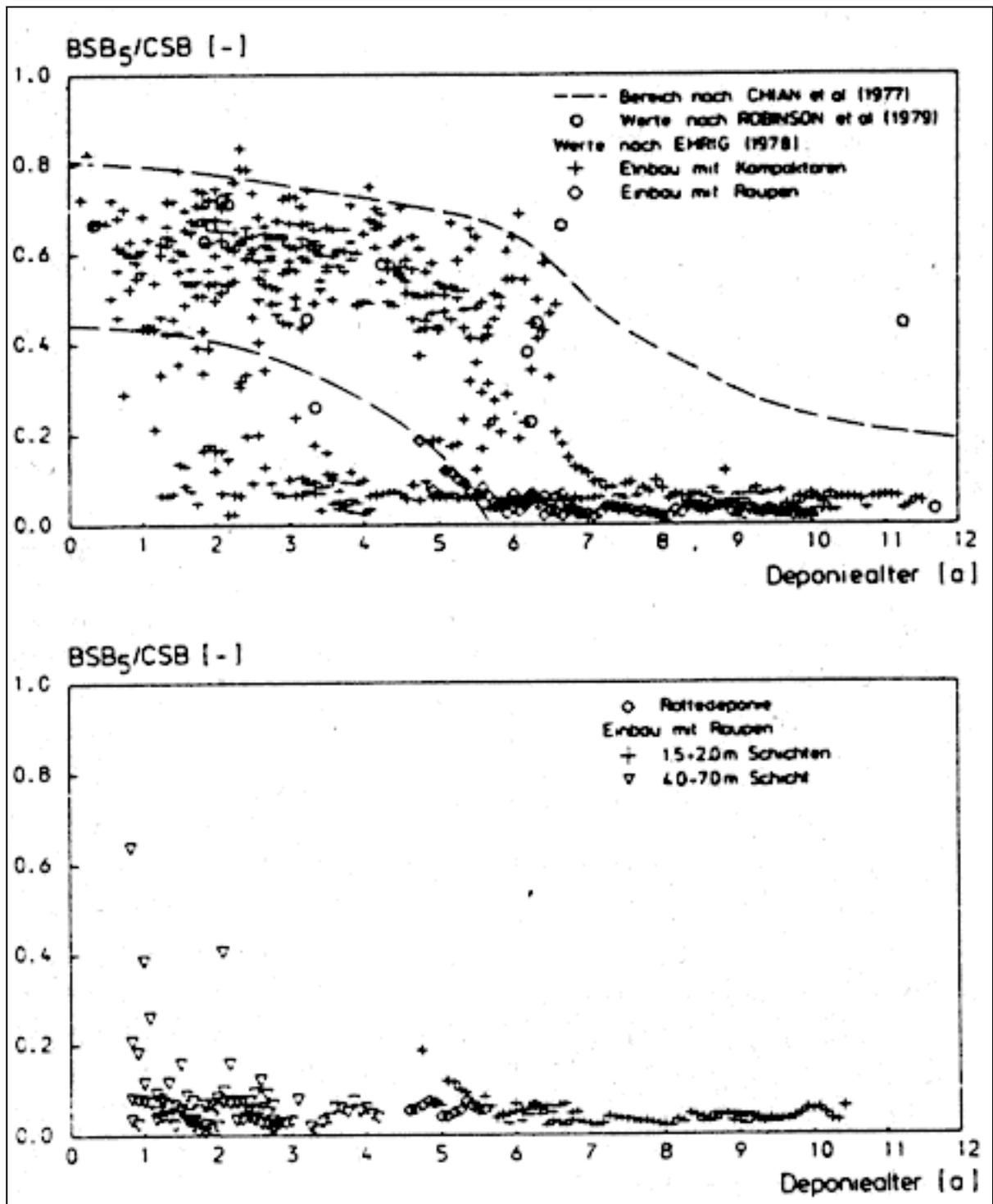


Abb. II- 6.1:  $BSB_5/CSB$ -Relationen in Abhängigkeit vom Deponiealter [604]

Zu erkennen ist eine deutliche Abnahme des Quotienten in den ersten Jahren von 0,4 - 0,8 auf Werte  $< 0,1$ .

Ein Überblick über die Bandbreite möglicher Inhaltsstoffe wird von EHRIG, 1987 [308] in Tab. II- 6.4 gegeben.

(mg/l)	1. Phase 1)		2. Phase 2)	
	$\bar{x}$	Bereich	(mg/l)	$\bar{x}$ Bereich
pH(-)	6,1	4,5-7,5		8 7,5-9
BSB <sub>5</sub>	13000	4000-40000		180 20-550
CSB	22000	6000-60000		3000 500-4500
BSB <sub>5</sub> /CSB(-)	0,58	-		0,06 -
Sulfat	500	70-1750		80 10-420
Calcium	1200	10-2500		60 20-600
Magnesium	470	50-1150		180 40-350
Eisen	780	20-2100		15 3-280
Mangan	25	0,3-65		0,7 0,03-45
Zink	5	0,1-120		0,6 0,03-4
Strontium	7	0,5-15		1 0,3-7
keine signifikanten Konzentrationsänderungen bei Phasenwechsel				
NH <sub>4</sub> -N	750	30-3000	org. N	600 10-425
Chlorid	2100	100-5000	ges. N	1250 50-5000
Alkalität (mgCaCO <sub>3</sub> /l)	6700	300-11500	Öle + Fette (petroläther- extrahierbar)	1 0,1-3
NO <sub>3</sub> -N	3	0,1-50	AOX (µg/l)	2000 320-3350
NO <sub>2</sub> -N	0,5	0-25	polyzykl. Aroma- ten (µg/l)	0,1 0,02-1
ges. P	6	0,1-30		
Abdampf- rückstand	8000	300-50000		
Natrium	1350	50-4000		
Kalium -	1100	10-2500		
(µg/l)	$\bar{x}$	Bereich	obere 95%-Grenze <sup>3)</sup>	
Arsen	160	5-1600	680	3) Unterhalb dieser Werte liegen 95% aller Messungen (nach log. Normal- verteilung)
Blei	90	8-1020	660	
Cadmium	6	0,5-140	30	
Chrom	300	30-1600	1110	
Kobalt	55	4-950	270	
Kupfer	80	4-1400	490	
Nickel	200	20-2050	740	
1) hohe organische Belastung		2) geringe organische Belastung		

Tab. II- 6.4: Mittelwerte, Bereiche und zum Teil obere 95 %-Grenze verschiedener Sickerwasserinhaltsstoffe [308].

Die Werte in Tab. II- 6.4 sind in eine erste und zweite Phase eingeteilt, wobei die zweite Phase von einer gewissen Stabilität gekennzeichnet werden soll.

## 6.2.2 Austrag der Schadstoffe

Zur Abschätzung von Sickerwasseremissionen aus Hausmülldeponien hat BAUMANN, 1985 [608] einen wesentlichen Beitrag geleistet. Anhand der Versuchsdeponien Geldern und Münster mit insgesamt 30.000 Einzeldaten, wurde ein Modell erstellt, das es ermöglicht, bei Bekanntheit eines Parameters drei weitere abzuschätzen. Angemerkt sei hier, ohne näher auf die Gründe einzugehen, daß von ursprünglich 10 Versuchsdeponien nur 4 übrig blieben. Dies waren Basisabdichtungen aus Ton, Asphalt, Bitumen und Ethylen-Copolymerisat (ECB).

Aufgrund der Einflüsse von Randparametern ist der zeitliche Verlauf von qualitativen Sickerwasseremissionen modellhaft schwierig zu beschreiben. Die hier angeführte Untersuchung beschränkt sich deshalb auf Hausmülldeponien, die ohne Abdeckung in 1,5 - 2 m Schichten befüllt wurden, wobei Kompaktoren zum Einsatz gelangten. Weiterhin sind Niederschlag, Verdunstung, Lufttemperatur und -druck ortsspezifisch.

Die Sickerwasserqualität bewegte sich zwischen 1 - 1,25 m<sup>3</sup>/ha\*d, dies entspricht ca. 8,5 % vom Niederschlag. In [608] wird die Ansicht vertreten, daß die Umgebungstemperatur beim Einbau entscheidenden Einfluß auf das zeitliche Erreichen und das Ausmaß der Minimal- und Maximalkonzentrationen hat.

Dieser Einfluß nimmt mit steigender Schichtenanzahl ab. Es lassen sich folgende Fakten festhalten:

- Die maximale Wachstumsrate der Säurebildner liegt bei pH 6.
- Je schneller der pH-Wert in der Anfangsphase absinkt, um so geringer ist die zu erwartende Schadstoffkonzentration.
- Je früher der pH-Wert wieder ansteigt, um so geringer ist langfristig die zu erwartende Sickerwasserkonzentration.
- Von stabilen Verhältnissen bei einer Deponie kann bei pH-Werten zwischen 7,2 - 7,8 ausgegangen werden.

Eine Unterscheidung zwischen zwei Typen bei zeitabhängigen Schadstoffkonzentrationskurven im Sickerwasser ist möglich.

Bei Typ A (s. Abb. II- 6.2) nimmt nach Erreichen einer Maximalkonzentration  $c_{\max}$  die Konzentration  $c$  auf eine relativ konstante Restkonzentration  $c_{\min}$  ab. Durch die Kurve Typ B läßt sich der zeitliche Verlauf von Parametern beschreiben, die nach Erreichen einer Maximalkonzentration auf hohem Niveau bleiben. Bis zu diesem Punkt stellen sich die Verluste ähnlich dar.

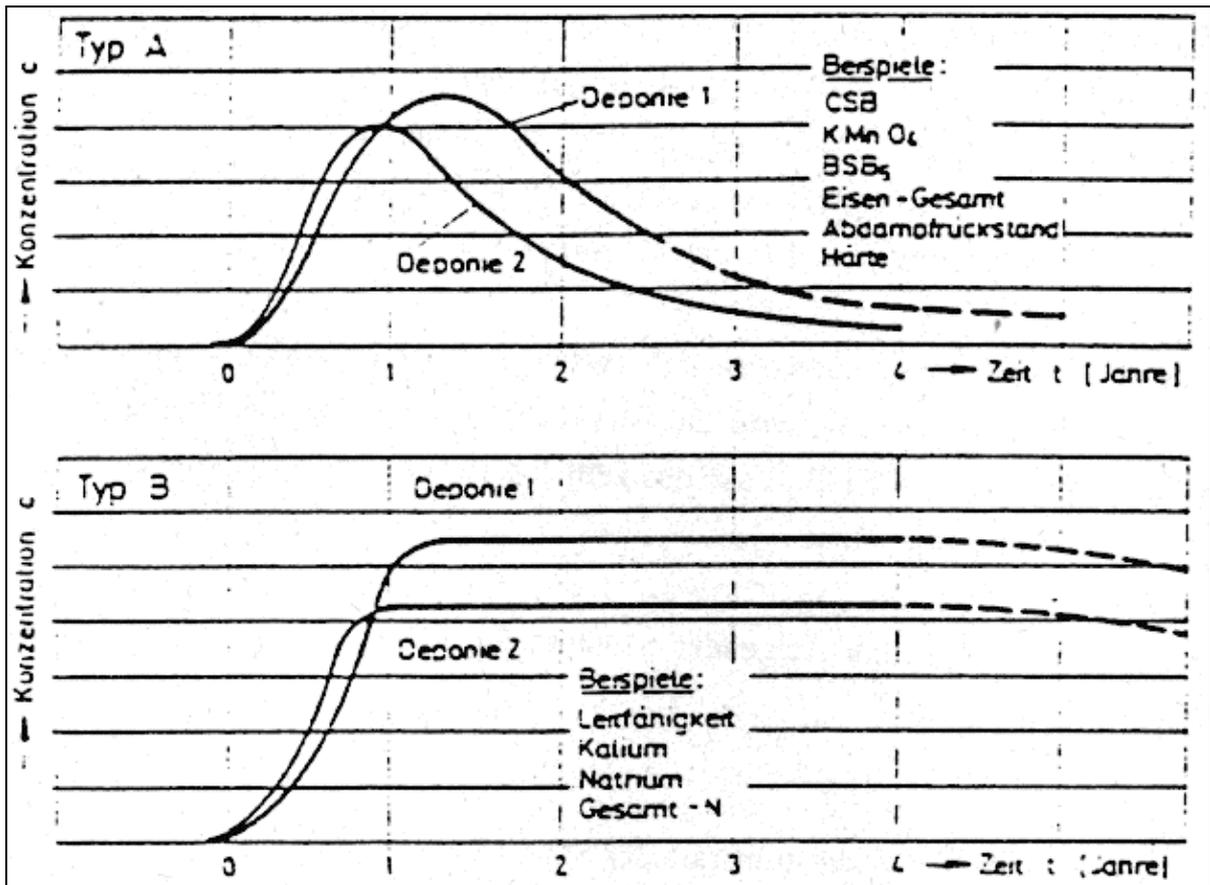


Abb. II- 6.2: Schematische Darstellung der beiden typischen, zeitunabhängigen Konzentrationsverläufe von Schadstoffen im Sickerwasser [608]

In Abb. II- 6.3 sind die beiden Kurventypen eingetragen, die die Anfangsphase der meisten Inhaltsstoffe beschreiben. In Tab. II- 6.5 sind durchschnittliche gemessene Anfangskonzentrationen  $C_0$  zusammengestellt.

$K_1$  und  $K_2$  sind Proportionalstützfaktoren, die durch Milieubedingungen wie z.B. Temperatur, Dichte des Abfalls, Wassergehalt etc. beeinflusst werden. In Abb. II- 6.4 sind die Koeffizienten in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur beim Einbau aufgetragen. Die Meßpunkte stammen aus den Deponien Geldern (G) und Münster (M).

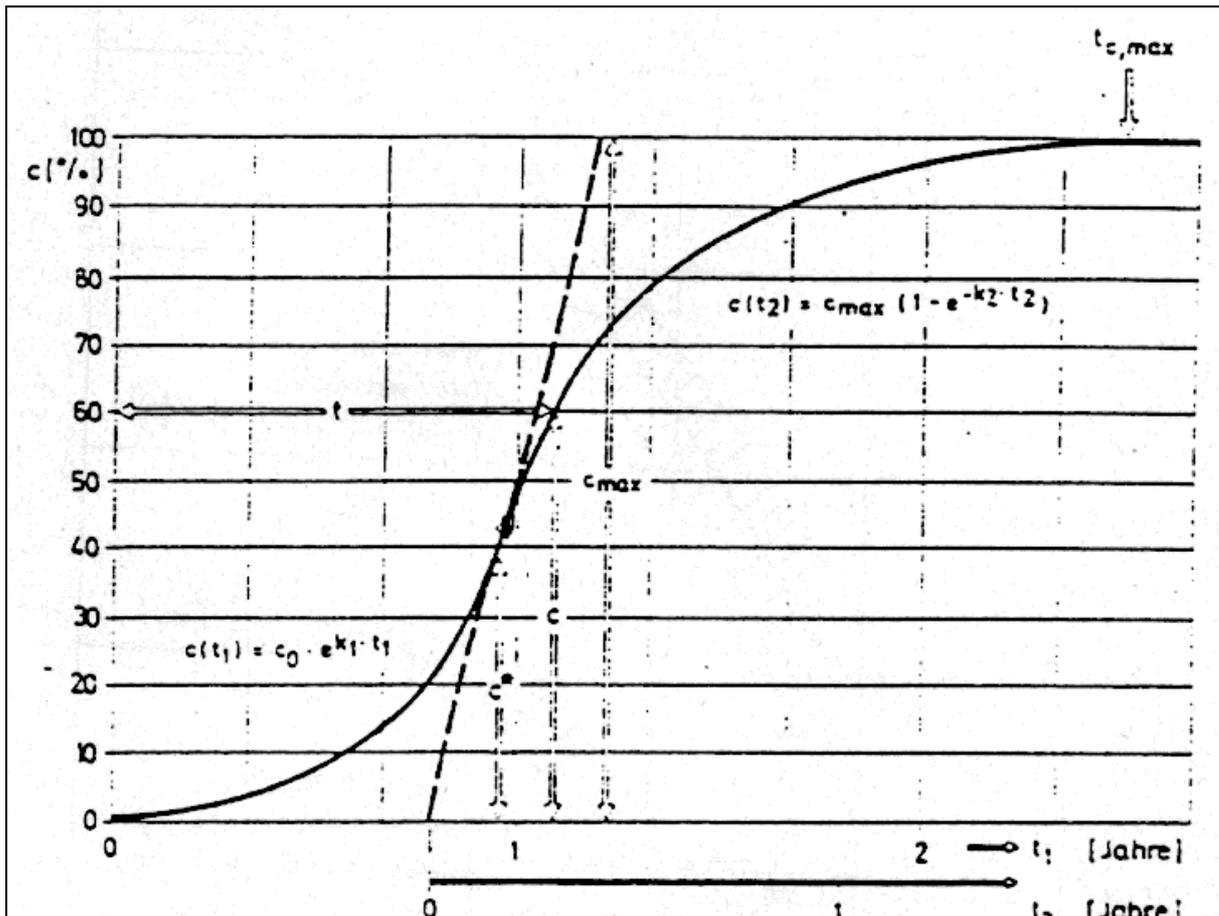


Abb. II- 6.3: Schematische Darstellung der Kurvenfunktionen zur Beschreibung des Konzentrationsverlaufs von Schadstoffen im Sickerwasser [608]

Parameter	$C_0$
CSB [mg/l]	5
BSB <sub>5</sub> [mg/l]	3
Abdampfrückstand [mg/l]	100
Leitfähigkeit [mS/cm]	100
Chlorid [mg/l]	10
N-Gesamt [mg/l]	5
Eisen [mg/l]	1
Phenol [mg/l]	1

Tab. II- 6.5: Anfangskonzentrationen verschiedener Sickerwasserparameter [608].

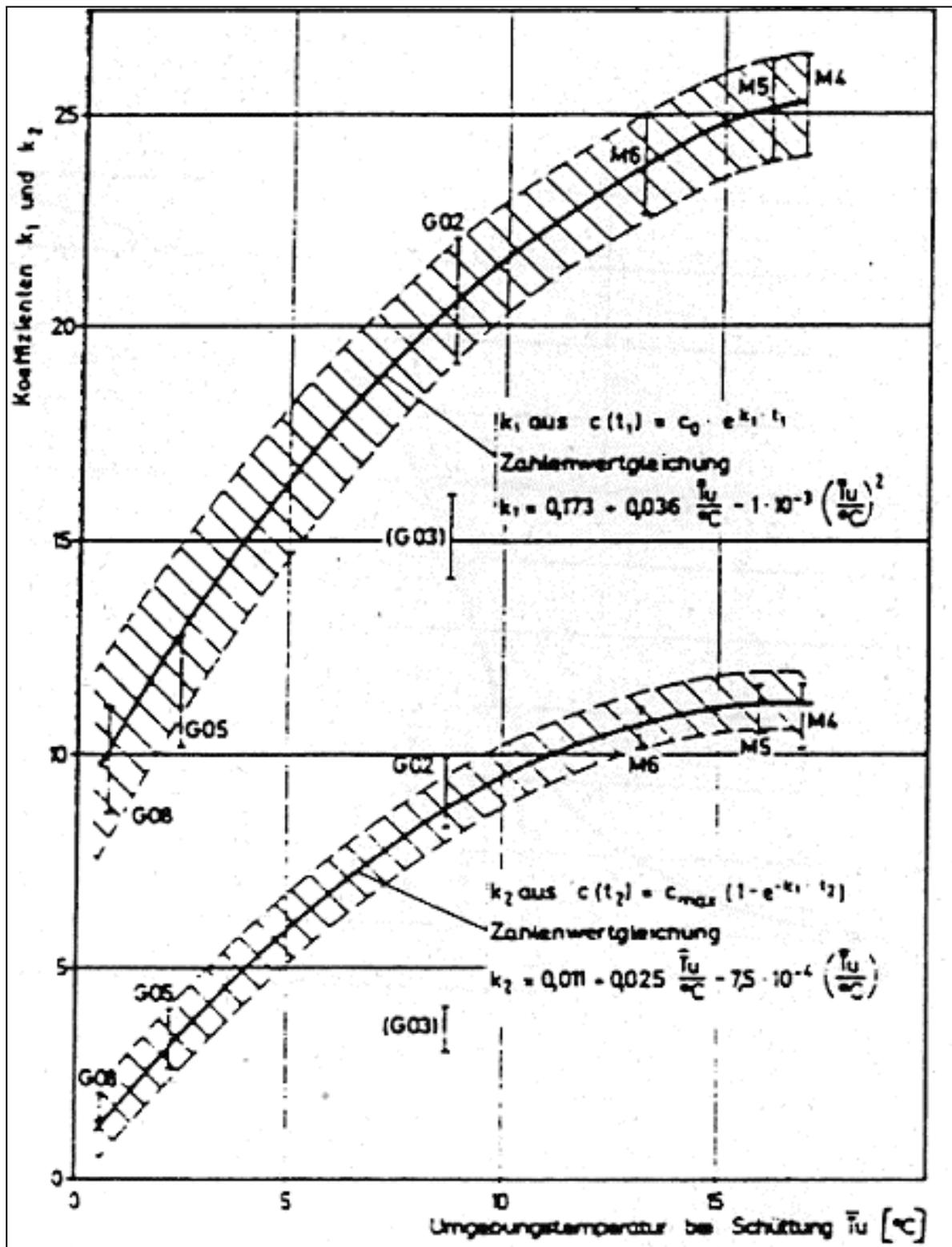


Abb. II- 6.4: Koeffizienten  $K_1$  und  $K_2$  in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bei Schüttung der ersten Müllage [608].

Die Proportionalstützfaktoren  $K_1$  und  $K_2$  spielen bei der Beschreibung der Vorgänge in der Deponie eine entscheidende Rolle, jedoch dürften sie bei Altablagerungen nur bedingt zu ermitteln sein. Für bestimmte Leitparameter ist ein Nomogramm zur Bestimmung von  $K_2$ ,  $C_{max}$  und  $t_2$  aufgestellt worden.

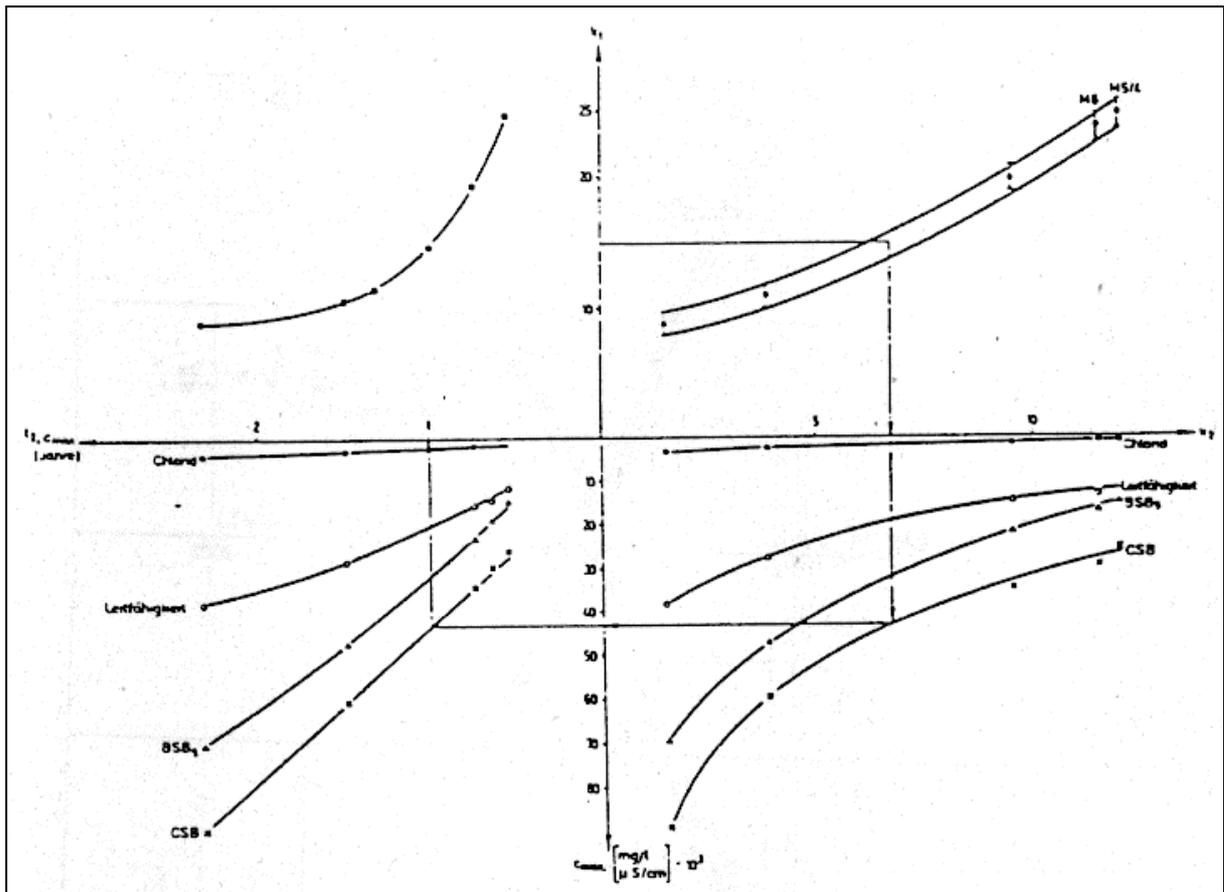


Abb. II- 6.5: Nomogramm zur Ermittlung von  $k_2$ ,  $C_{\max}$  und  $t_2$  [608]

Die angesprochene Abschätzung weiterer Parameter aus bereits vorhandenen, wird mittels Korrelationsdiagrammen vorgenommen. Abb. II- 6.6 zeigt ein Korrelationsdiagramm für Chlorid, Kalium, Natrium und Leitfähigkeit. Ein Korrelationsdiagramm für Eisen, CSB, BSB<sub>5</sub> und Abdampfückstand ist in Abb. II- 6.7 dargestellt.

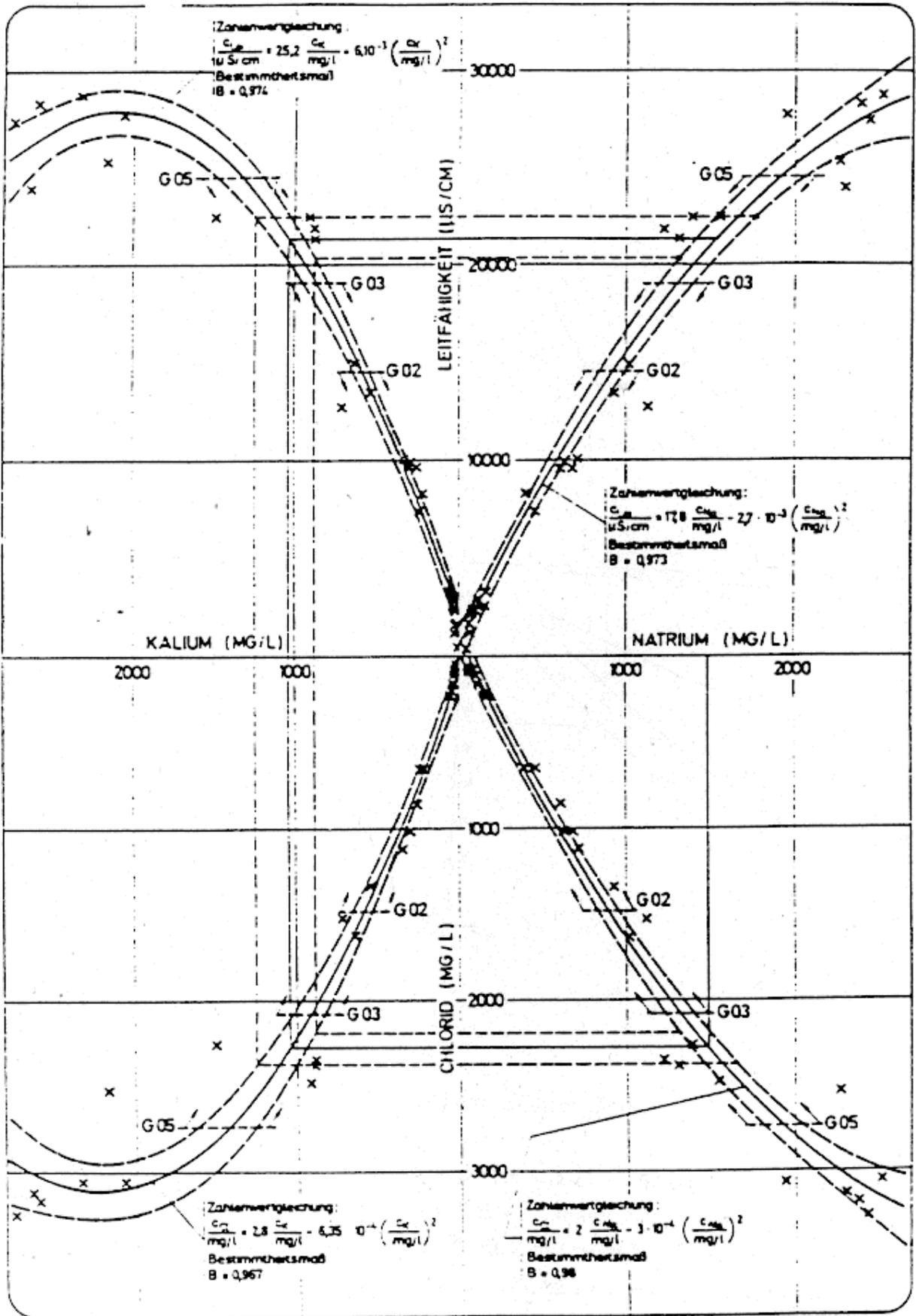


Abb. II- 6.6: Korrelationsdiagramm für Chlorid, Kalium, Leitfähigkeit und Natrium [608].

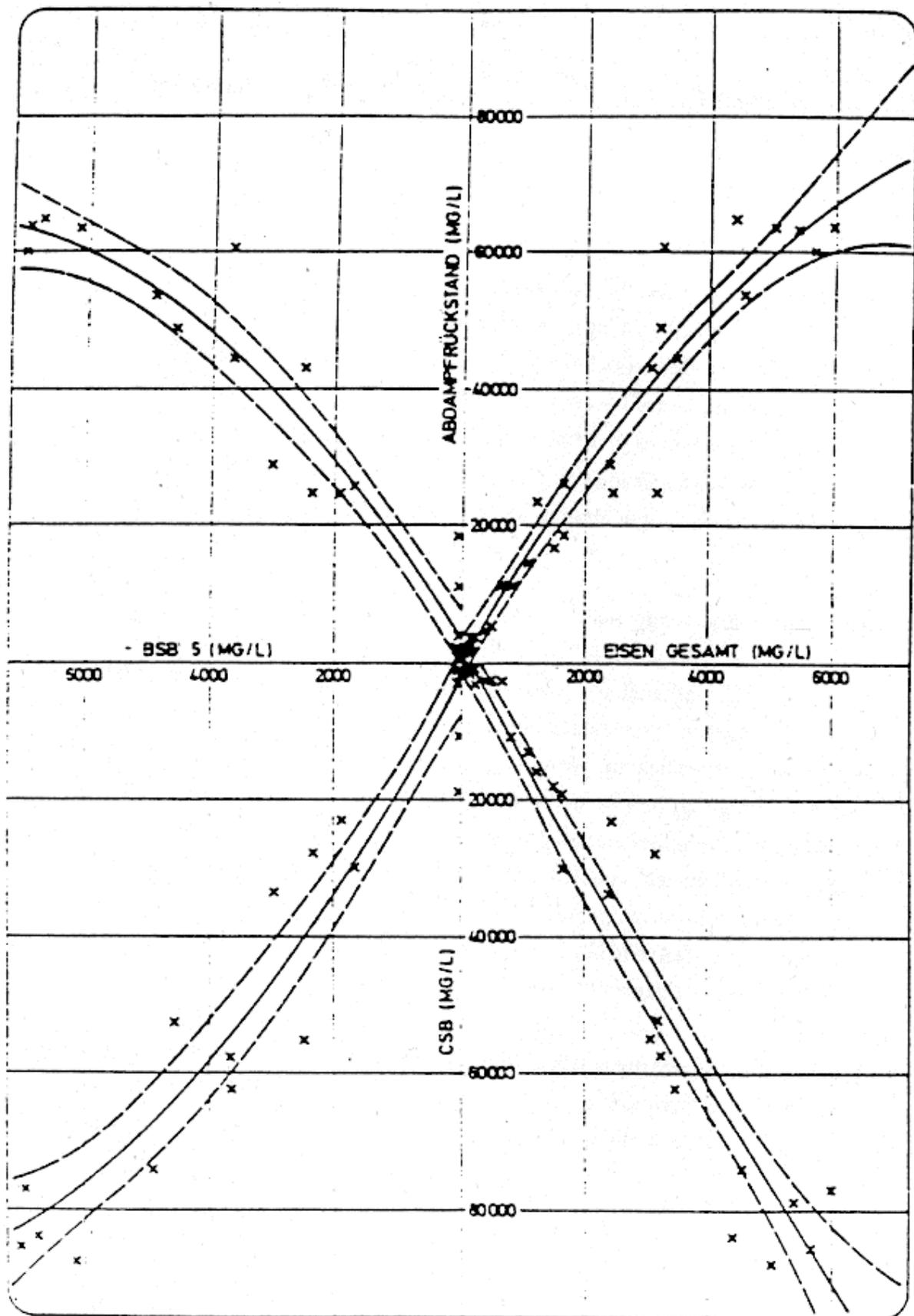


Abb. II- 6.7: Korrelationsdiagramm für Eisen, CSB, BSB<sub>5</sub> und Abdampfrückstand.

COLLINS, 1986 [609] gibt eine Formel an, die sich an den Austrag von Salz im Boden anlehnt:

$$D \cdot c_d = P \cdot K \cdot C_n + P(1-k)C_m + C_m(\Delta R + \Delta W_{syn})$$

mit:

D :	Dränabfluß [m <sup>3</sup> ]
C <sub>d</sub> :	Konzentration des Dränwassers [g/m <sup>3</sup> ]
P :	Anteil des Niederschlags, der perkoliert
k :	Anteil des infiltrierten Niederschlags, der keine Stoffe auslöst [/]
C <sub>n</sub> :	Konzentration des Niederschlagswassers [g/m <sup>3</sup> ]
C <sub>m</sub> :	Konzentration des im Müll gespeicherten Wassers [g/m <sup>3</sup> ]
ΔR :	zeitliche Verzögerung des Abflusses (langsam dränendes Wasser)
W <sub>syn</sub> :	Differenz von gebildetem und verbrauchtem Wasser

### Gl. 6.1: Konzentrationsgleichgewicht

Aus dieser Gleichung ist erkennbar, daß die Schadstofffracht wesentlich vom Faktor K abhängt. Bei lockerer Lagerung (schlechter Einbau) nimmt K wahrscheinlich im Laufe der Zeit ab und die Schadstofffracht wächst an. Wenn dagegen von Anfang an eine sehr gute Verdichtung erfolgte, sind nur wenige grobe Poren vorhanden, durch die das Wasser ungehindert abfließen kann. Das führt zu frühzeitig hohen Sickerwasserkonzentrationen. Diese Gedanken decken sich mit den vorher beschriebenen von BAUMANN, 1985 [608]. Die Löslichkeit hingegen zu quantifizieren wird als schwierig erachtet, da dies neben dem zu lösenden Stoff von der Art der Bindung und dem lösenden Medium abhängt. Konkrete Angaben werden hier noch von SPILLMANN, 1986 [610] gemacht.

Die Dauer des Schadstoffaustrages läßt sich möglicherweise aus einer abschätzenden Extrapolation vornehmen [607]. Beispielhaft wird dies in Abb. II- 6.8 für den CSB vorgenommen, wobei bei organischen Belastungen ein Teil des Kohlenstoffes mit dem Deponiegas ausgetragen wird.

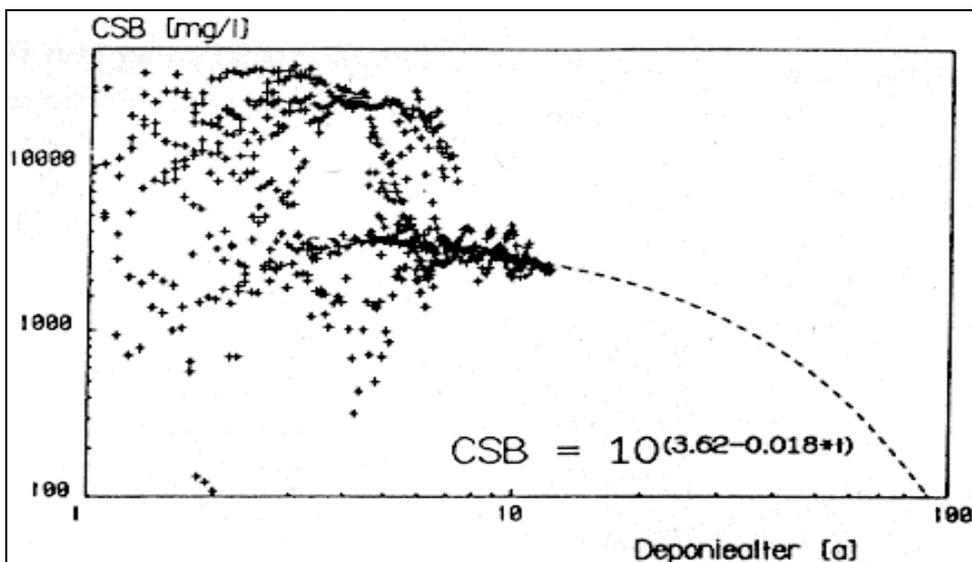


Abb. II- 6.8: CSB-Werte verschiedener Deponien in Abhängigkeit vom Deponiealter und er-rechnetem Trend, der in der Methanphase stabilisierenden Werte [607].

Von HENSLER et al., 1985, [611] zitiert von [607] wurde ein Versuch gemacht, die Emissionsdauer einzelner Inhaltsstoffe abzuschätzen. Vereinfachend wurde dabei von konstanten Emissionsraten bis zur Entfernung aller löslichen Bestandteile ausgegangen. Außerdem stellt sich die Frage nach dem Anteil mobilisierbarer Komponenten (in Abb. II- 6.9, 20 - 80 % des gesamten Stickstoffs).

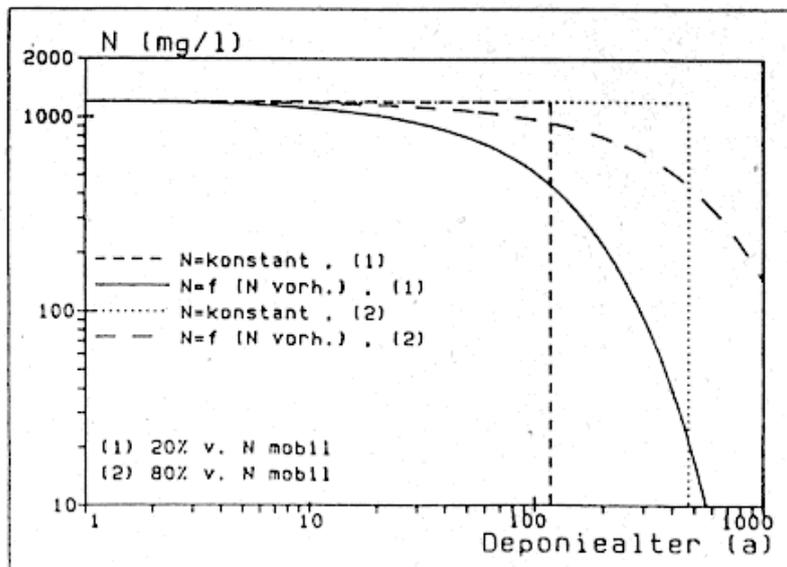


Abb. II- 6.9: Versuch der Abschätzung der Dauer von Stickstoffemissionen aus einer Deponie [611].

Weiterhin wird in Tab. II- 6.6 die Zeit angegeben, die bis zur Auslagerung von 10 % der in der Deponie vorhandenen Schwermetalle bei konstanten Sickerwasserkonzentrationen vergeht.

	$C_0$ (nach (8)) (mg/kg)	K (mg/kg a)	t (gerundet) a
Cd	1,7-50	$8,0 \cdot 10^{-5}$	2000-62000
Pb	110-600	$1,2 \cdot 10^{-3}$	9000-50000
Cr	5-2810	$4,0 \cdot 10^{-3}$	120-70000
Cu	60-532	$1,1 \cdot 10^{-3}$	5600-50000
Zn	300-1000	$8,0 \cdot 10^{-3}$	3700-125000

(je 10 % mobilisierbar, Deponiehöhe = 20 m, Sickerwasser = 20 % von N)

( $C_0$  = Schwermetallgehalte von Hausmüll, K = jährliche Austragsrate, t = Dauer des Austrages bei K = konstant)

Tab. II- 6.6: Zeit bis zur Auslagerung von 10 % der in Deponien vorhandenen Schwermetalle.

Aus diesen Angaben wird deutlich, daß die Emissionen, die zu erwarten sind, innerhalb zeitlicher Maßstäbe liegen, die deutlich außerhalb der Lebenserwartung von üblicherweise erstellten Bauwerken liegen.

## 7. Zusammenfassung

In diesem Teil der Studie wird ein Überblick über die wesentlichen Einflußgrößen auf den Wasserhaushalt einer Deponie bzw. Altablagerung gegeben. Die Modelle hierzu, die innerhalb dieser Literaturrecherche vorlagen, werden beschrieben und verglichen.

Der Einstieg einer modellhaften Beschreibung der Sickerwasserproblematik liegt mit dem Modell von FRANZIUS, 1977, vor. Dies Modell ließ sich jedoch nur ungenügend verifizieren, ebenso wie andere Modelle, die den Gesamtkomplex der Sickerwasserbildung berücksichtigen. Die Ursache liegt in den schwer erfaßbaren Randbedingungen, wie z.B. Methode des Abfalleinbaus, verwendete Geräte oder auch die Art des Abfalls, die in der Regel speziell bei Altablagerungen nur unzureichend bekannt sind.

Der Wasserhaushalt einer Oberflächenabdichtung läßt sich mit dem Programmsystem HELP (**H**ydrologic **E**valuation of **L**andfill **P**erformance) beschreiben. HELP simuliert den zeitlichen Verlauf des Oberflächenabflusses, der Evapotranspiration, der Abflüsse in Dränsystemen sowie die Restdurchsickerung in Abhängigkeit von den Klimadaten sowie der technischen Konzeption der Abdichtungsmaßnahme einer Deponie. HELP berücksichtigt jedoch keine anderen Möglichkeiten des Wassereintrages, wie z.B. Schichtwasser, in die Deponie.

Die Vorgehensweise des HELP-Programmes wird kommentiert geschildert, wobei es verschiedene Ansatzpunkte zur Kritik gibt. Die Veröffentlichungen von Arbeiten mit dem Programmsystem HELP lassen für bestimmte Klimabereiche der Bundesrepublik eine genügend genaue Validierung annehmen.

Da HELP lediglich eine quantifizierte Angabe bezüglich des Sickerwasseranfalls liefert, muß anschließend eine Betrachtung des Schadstoffpotentials und dessen mögliche Mitteilung zur Umwelt vorgenommen werden. Eine Abschätzung des Austrags durch die Sickerwasserinhaltsstoffe erscheint größenordnungsmäßig möglich.

## 8. Anmerkungen zu den verschiedenen Versionen des HELP-Programmsystems

### *HELP-Programm Version 1.0*

Mit der Version 1 des HELP-Programmes wurden bestehende Programme wie z.B. das Programm zur Simulation des Wasserhaushalts von Sondermülldeponien (HWSSWDS) deutlich weiterentwickelt und verbessert. Das HWSSWDS-Modell konnte nur für die Simulation des Abdeckungssystem eingesetzt werden, der laterale Abfluß zwischen den Drainageschichten konnte jedoch nicht berechnet werden. Der vertikale Abfluß konnte ebenfalls nur in sehr eingeschränkter Form berücksichtigt werden. Für die Berechnung von Infiltration, Perkolation und Evapotranspiration wurden für das HELP-Modell die im CREAMS-Modell (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) verwendeten Formeln nahezu identisch übernommen. Die Berechnungsgrundlagen für den Oberflächenabfluß und die Infiltration beruhen schwerpunktmäßig auf denjenigen des Hydrologic-Section of National Engineering Handbook. Die Version 1 des HELP-Programmes, beinhaltet ein Modell zur Berechnung des unter der Oberfläche stattfindenden lateralen Abflusses, einen verbesserten ungesättigten Abfluß, sowie die Möglichkeit eventuelle Leckagen für Abdichtungen in die Berechnungen einzubeziehen.

### *HELP-Programm Version 2.0*

Diese Version 2 (1988) des Programms bedeutet eine deutliche Steigerung der Möglichkeiten gegenüber Version 1. Es wurde ein von der USDA (U.S. Department of Agriculture) entwickelter, synthetischer Wettergenerator in das Programm integriert. Dieser Wettergenerator ermöglicht es aus monatlichen Werten der Niederschläge, der Einstrahlung und der Temperatur Tageswerte zu generieren. Dadurch daß die durchschnittlichen Monatswerte durch Tageswerte ersetzt werden, verbessern sich die Genauigkeiten bei der Berechnung des Schnees sowie der Evapotranspiration.

Desweiteren wurde ein Berechnungsmodell für das Pflanzenwachstum aufgenommen, um den täglichen Blattflächenindex zu bestimmen. Für die Parameter ungesättigte Wasserleitfähigkeit, Durchfluß und lateraler Abfluß, wurden die jeweiligen Berechnungsmodelle verbessert, wodurch sich die Genauigkeit erhöht. Auch die Bodenkennwerte der einzelnen Böden oder Schichten der Deponie wurden überarbeitet. Zusätzlich wurde die Auswahl an vorgegebenen Schichten erweitert und die Möglichkeit zur Auswahl eines Anfangswassergehaltes für die Schichten eingerichtet. Die Datenein- und -ausgabe wurde bedienerfreundlicher gestaltet und bei den Ergebnissen wird jeweils die Standardabweichung mit angegeben.

Neben den Verbesserungen der Berechnungsgrundlagen bietet die Version 2 insbesondere für amerikanische Standorte Vorteile gegenüber der Version 1. So können viele Eingabeparameter, mit Eingabe der dem Standort am nächsten gelegenen Stadt, sowohl direkt abgerufen als auch aus Monatswerten für einen Standort Tageswerte generiert werden. Aufgrund des entweder stark ausgeprägten kontinentalen oder ozeanischen Klimas sowie der Wüstenklimate, ist eine Nutzung der vorgegebenen Klimadaten für US Amerikanische Städte nur sehr beschränkt auf mitteleuropäische Klimaverhältnisse übertragbar.

### ***HELP-Programm Version 3***

Die Version 3 des HELP-Programmes bietet ebenfalls eine Vielzahl an Verbesserungen gegenüber Version 2. Die Anzahl der Schichten die berechnet werden können wurde erhöht. Die Liste der Bodenarten wurde erweitert und enthält zusätzliche Werte für Abfall, Geomembranen (Kunststoffdichtungsbahnen), Drainagenetze sowie verdichtete Schichten. Außerdem erlaubt diese Version die Verwendung benutzerdefinierter Vorgaben für Bodenarten und deren Kennwerte. Das Programm wurde um die Möglichkeit zur Berechnung der Rezirkulation des Sickerwassers erweitert. Darüberhinaus berechnet Version 3 Leckagen an Geomembranen, die entweder durch den Herstellungsprozeß (Nadelstiche) oder durch den Einbau (Risse, Löcher, Nahtrisse) sowie durch Gasdiffusion durch die Membran verursacht wurden. Für die Berechnung des Oberflächenabflusses wird weiterhin die Methode des SCS (Soil Conservation Service) verwendet, allerdings unter Verwendung täglicher Werte für die Schneeschmelze und den Niederschlag. Die Abschätzung des Oberflächenabflusses wurde soweit verbessert, daß auch längere Hänge und größere Neigungen von Deponien berücksichtigt werden. Das Modell zur Berechnung der Schneeschmelze wurde als eine energetische Funktion der Lufttemperatur, der Einstrahlung und des Niederschlags angenommen.

Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration wird mit der Penman Formel, die sowohl Wind- und Feuchtigkeitseffekte als auch langwellige Austrahlungsverluste berücksichtigt, durchgeführt. Zur Verbesserung der Berechnung von Infiltration und Oberflächenabfluß in kalten Regionen, wurde das HELP-Programm um ein Modell, das in der Lage ist die Bodengefornis in die Berechnungen zu integrieren, erweitert. Das Berechnungsmodell für die ungesättigte vertikale Drainage wurde durch einen Speicherterm verbessert.

Die in Version 2 benutzten Daten für eine Deponie können ohne größeren Aufwand in Version 3 übertragen werden. Bei einer neuen Eingabe der Daten, kann zwischen dem metrischen System und dem Duodezimalsystem (amerikanische Maßeinheiten) gewählt werden.

Die gesamten Ein- und Ausgabefiles des Programmes sind sehr anwenderfreundlich gestaltet worden, so daß sich die Einarbeitungszeit für die Anwender deutlich reduziert. Der Wermutstropfen für europäische Anwender bezüglich der verwendeten Penman-Formel bleibt aber weiterhin bestehen. Die hier geforderten Tageswerte für Temperatur, Niederschlag und Einstrahlung sind z.B. für die Bundesrepublik nur von sehr wenigen Wetterstationen zu erhalten. Falls diese Daten vorliegen, können sich dadurch weitere Probleme ergeben, daß die Daten meist nicht, bzw. nicht in einer programmkompatiblen Form, auf Disketten erhältlich sind, wodurch eine zeitaufwendige manuelle Dateneingabe erforderlich wird. Diesbezügliche Verbesserungen von seiten der Wetterdienste wären wünschenswert.

## 9. Literaturverzeichnis

- [301] FRANZIUS, VOLKER: Der Sickerwasserabfluß aus Mülldeponien. Ein mathematisches Modell. Dissertation, Darmstadt 1977
- [302] RENSON, J. et al: Water Movement in an Unsaturated Sanitary Landfill. Journal of the Sanitary Engineering Division, Vol. 94, 1968, Sa2, S. 307 - 317
- [303] EHRIG, H.-J.: Menge und Verteilung von Sickerwasser aus Mülldeponien. Müll und Abfall 3/80, S. 80 - 88
- [304] HELMER, R. et al.: Simulation geohydrologischer Vorgänge in einer Deponieschüttung über Kiesgrund. Müll und Abfall 6/77, S. 159 - 166
- [305] BRECHTEL, H.-M.: Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Mülldeponien. Müllhandbuch Ltg. 5/ 84, Kap. 4623
- [306] EHRIG, H.-J.: Sickerwasserentstehung in Altlasten und ihre Problematik. Handbuch der Altlastensanierung, Grundwerk Kap. 1.2.2
- [307] BORTZ, S., SOKOLLEK, V.: Wasserhaushaltsuntersuchungen an Altlasten. Dargestellt am Beispiel der Deponie Georgswerder/Hamburg. Mitteilungen des Institutes für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, Bd 386, 1990, S. 413 - 425
- [308] EHRIG, H.-J.: Wasserhaushalt von Deponien: Ablagerung von Abfällen, Hrsg.: Thome-Kozmiensky, EF Verlag, Berlin, 1987, S. 311 - 334
- [309] JÄGER, B., WIEMER, K.: Untersuchungen zur Verminderung des Eintrittes von Niederschlagswasser in Deponien, VBA Texte, Forschungsvorhaben 103 02 209/01, 1979
- [401] SCHROEDER et al.: The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model-Engineering Documentation, EPA/530- SW-84-010; Cincinnati OH, 1984
- [402] USDA, SOIL CONSERVATION SERVICE: National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1972
- [403] FREEZE, R.A., CHERRY, J.A.: Groundwater. Orentis Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1979
- [404] SHAGGS, R.W.: Modification to DRAIMOND to Consider Drainage from an Seepage through a Landfill. Dratt Report, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1982
- [405] RITCHIE, J.T.: A Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with incomplete Cover. Water Resources Research, Vol. 8, No. 5, 1972, pp. 1204 - 1213.
- [406] SHANHOLTZ, V.O., LILLARD, J.B.: A Soil Water Model for Two Contrasting Tillage Practices. Bulletin 38, Virginia Water Resources Research Center, VPISU, Blacksburg, VA, 1970
- [407] SAXTON, K.E. et al.: Modelling Evapotranspiration and Soil Moisture. In: Proceedings of American Society of Agricultural Engineers 1971 Winter Meeting, St. Joseph, MI, 1971. No. 71 - 7636
- [408] GIESECKE: Begleitunterlagen zur Vorlesung Hydrologie, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
- [409] RENGER, M. et al.: Deckschichteneigenschaften und Wasserhaushalt des Monte Scherbelino. Abschlußbericht im Auftrag des Magistrats der Stadt Frankfurt am Main, Berlin, 1989

- [410] LUTZ, W.: Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (IHW), Heft 24, Karlsruhe, 1984
- [411] SCHIFFLER, G. R.: Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (IHW) Heft 40, Karlsruhe, 1992
- [412] LARCHER, W.: Ökologie der Pflanzen. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1984
- [413] GEISLER, G.: Pflanzenbau: Ein Lehrbuch; biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin, 1988
- [414] ELLENBERGER, H.: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1986
- [501] MARKWARDT, N.: Modifizierung und Verifizierung des HELP-Modells anhand von Lysimetermessungen. Müll und Abfall 8/89, S. 415 -420
- [502] BARNES, F.J. et al.: The Role of Water Balance in the Long-Term Stability of Hazardous Waste Site Cover Treatments. 12 Annual Research Symposium, 1986. EPA Cincinnati, OH,
- [503] GEE, J.R.: Predicting Leachate in Landfills. A New Method. 16. Mid Atlantic Industrial Waste Conference, 1984
- [504] PETERS, N. et al.: Applicability of the HELP-Model in Multilayer Cover Design: A Field Verification on Model Assessment, 12 Annual Research Symposium, 1986, EPA, Cincinnati, OH.
- [505] PEYTON, L./ SCHROEDER, P.R.: Verification of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model Using Field Data, 12 Annual Research Symposium, 1986, EPA, Cincinnati, OH.
- [506] SCHROEDER, P.R., PEYTON, R.L.: Verification of the Hydraulic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model Using Field Data, EPA 600/2 -87 - 050, 1987, EPA, Cincinnati, OH:
- [507] MARKWARDT, N., REICH, G.: Das Programmsystem HELP zur Wasserhaushaltsberechnung von Deponien. Müll und Abfall, 12/87, S. 503 - 506
- [508] ROTH-KLEYER, ST., MARKWARDT, N.: Die Überprüfung eines Versickerungsmodells durch Lysimeterversuche. Wasser + Boden, 12/88, S. 689 - 691
- [509] MARKWARDT, N.: Der Bodenwasserhaushalt in Deponieabdeckschichten. Dissertation am Institut für Landschaftsbau der Technischen Universität Berlin, 1990
- [510] WOHNLICH, S.: Auswirkungen nachträglicher Grundwasserschutzmaßnahmen auf den Wasserhaushalt von Deponien unter besonderer Berücksichtigung von Oberflächenabdichtungen. Schriftenreihe angewandte Geologie Bd. 1, Karlsruhe, 1987
- [511] BAUR, A.: Simulation des Wasserhaushaltes einer Deponie. Studienreihe Abfall Now Bd. 7, Stuttgart, 1990
- [512] REUTER, E., LÜCKEWILLE, W.: Anwendung des HELP-Programmes beim Entwurf von Oberflächenabdichtungen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 47, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1992, S. 141 - 172
- [513] MELCHIOR, S. et al.: Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Abdichtung von Deponien und Altlasten, Hrsg: Thomé-Kozmiensky, EF-Verlag, Berlin 1992, S. 453 - 476

- [601] FUCHS, D.: Schadstoffentfrachtung im Bundesgebiet, Stand und Tendenzen. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 16, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld, 1984, S. 11 -28
- [602] BURGHOORN, M. et al.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1979/80, Forschungsbericht 10302500, Umweltbundesamt Berlin, 1981
- [603] TABASARAN, O.: Separierung schwermetallhaltiger Hausmüllkomponenten durch Absieben. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 16, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld, 1984, S. 93 - 122
- [604] EHRIG, H.-J.: Sickerwasser aus Mülldeponien. Abfallwirtschaft an der Technischen Universität Berlin, Bd. 5, Hrsg: Jäger, B./ Wiener, K., Berlin, 1980, S. 316 - 348
- [605] CHIAN, E.W.K. et al.: Evaluation of Leachate Treatment, Volume I Characterisation of Leachate, EPA-Report, EPA - 600/2-77-186a, 1977
- [606] ROBINSON, H.D. et al.: Leachate from Domestic Waste: Generation, Composition and Treatment. A Review. Water Research Centre, Technical Report 108, 1979
- [608] BAUMANN, W.: Minimierung und langfristige Abschätzung von Sickerwasseremissionen aus Hausmülldeponien. INFU-Werkstattreihe Heft 15, Verkehrs- und Wirtschafts-Verlag Borgmann, Dortmund, 1985
- [609] COLLINS, H.-J.: Zeitliche Veränderung des Austrittes von Schadstoffen aus Hausmülldeponien. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 16, Hrsg: Fehlau/Stief, ESV, Berlin, 1986, S. 203 - 224
- [610] SPILLMANN, P.: Wasser- und Stoffhaushalt von Abfalldeponien und deren Wirkungen auf Gewässer. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1986
- [611] HENSELER, G. et al.: Langfristige Entwicklung der Emissionen einer Siedlungsabfalldeponie, EAWAG -Jahresbericht 1985

# Teil III: Vorgänge im Deponiekörper

## 1. Einleitung

Im Teilbericht III werden die Auswirkungen der Oberflächenabdichtung auf die Vorgänge im abgelagerten Material dargestellt.

Dabei sollen zunächst die biologischen Vorgänge charakterisiert und die chemisch/physikalischen Veränderungen bzgl. Schadstoffaustrag und Gashaushalt aufgezeigt werden.

Die Aussagen und Darstellung beruhen auf einer Auswertung der aktuellen Literatur und den darin formulierten wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Der zentrale Parameter bzw. die entscheidende Einflußgröße ist das Wasser. Ohne Wasser ist kein Leben denkbar, ohne Wasser findet keine Eluation von Stoffen statt und das Wasser ist ein Faktor für die Stabilität der Ablagerung.

Die Frage vor dem Hintergrund der Abfallgesetzgebung ist, ob Altablagerungen mit einfacher Bodenabdeckung und Vegetationsschicht oder wie häufig praktiziert mit toniger Abdeckung weiterhin beibehalten werden können oder ob eine Sanierung mit einer Kombinationsdichtung mit Kunststofffolien sinnvoller bzw. angebracht wäre.

Die im folgenden aufgeführten Erkenntnisse sollen zur Entscheidungshilfe beitragen.

Hausmüll ist aus einer Vielzahl organischer und anorganischer Stoffe und Stoffgruppen zusammengesetzt, wobei ein Teil der organischen Stoffgruppen als biochemisch abbaubar und der andere Teil als nicht oder nur in sehr langen Zeiträumen abbaubar bezeichnet werden kann.

Die anorganischen Bestandteile können unter anaeroben Bedingungen als Sauerstoffdonatoren fungieren.

## 2. Grundlagen der Vorgänge im Deponiekörper

Für biochemische Umsetzungs- und Abbauprozesse ist das Vorhandensein von verfügbarem Wasser von entscheidender Bedeutung. Ohne Wasser ist kein Leben möglich, und somit gibt es keine biologische Aktivität. Wasser tritt infolge von Niederschlag und Wasserleitern aus den Randgebieten in den Deponiekörper ein oder ist in den Abfallstoffen als solches direkt enthalten.

Der verfügbare Wassergehalt für mikrobielles Leben wird i.a. mit > 15 - 20 % angegeben.

Die Vorgänge im Deponiekörper können in Abhängigkeit von der schwankenden stofflichen Zusammensetzung des Hausmülls, der Art seiner Ablagerung und den spez. Bedingungen des Deponiestandortes unterschiedlich sein. Bei den vorkommenden Vorgängen handelt es sich um hydrolytisch-katalytische, autoxidative und mikrobielle-biochemische Prozesse.

Die Dauer und Intensität der ablaufenden Prozesse sind also abhängig von

- der Müllzusammensetzung (organischer Anteil, Nährstoffverhalten, Gehalt an Inertstoffen)
- der Einbautechnik (Schichten, dick, dünn)
- der Einbauhöhe (tägliche Abdeckung des Materials)
- der Einbaudichte (schwach- oder hochverdichtet)
- den klimatischen Verhältnissen (Niederschlag, Temperatur).
- Milieubedingungen wie pH-Wert, Wassergehalt, Porenverteilung etc.

Die Abschätzung von zeitlichen Abläufen der Prozesse im Deponiekörper und der damit verbundenen Dauer der Schadstoffemissionen gestaltet sich äußerst schwierig.

### 2.1 Biochemische Vorgänge

Je nach Zusammensetzung des abgelagerten Hausmülls können biochemische Prozesse mehr oder weniger intensiv ablaufen. Im wesentlichen besteht der Hausmüll aus bis zu 30 % Papier und Pappe sowie aus 30 - 40 % nativ-organischen Küchen- und Gartenabfällen. Diese Fraktionen sind für den biologischen Abbau mehr oder weniger leicht zugänglich. Vertreter von Bakterien und Pilzen vermögen dieser Stoffgruppen unter aeroben und anaeroben Bedingungen abzubauen bzw. umzusetzen.

#### 2.1.1 Aerobe Prozesse

Die vorliegende Betrachtung befaßt sich mit Altablagerungen. Deshalb werden die Abbau- und Umbauprozesse beim Einbau von Frischmüll nicht betrachtet. Allerdings laufen an Deponien mit gestörten Oberflächenabdichtungsbereichen an den Grenzen Luft/Abfall ähnliche Prozesse ab.

Auf folgenden Wegen kann Sauerstoff in die Deponie gelangen bzw. eingetragen werden:

- durch die Oberflächenbereiche
- durch Schächte und Klüfte
- beim Einbau der Abfälle

Nur in den ersten Wochen und Monaten laufen in einer Deponie aerobe Prozesse ab, die sich mit zunehmender Gärungsaktivität (anaerob) abschwächen.

Für aerobe Mikroorganismen verschlechtern sich die Bedingungen nach Einbau des Mülls in die Deponie im Laufe der Zeit. Sie finden keine optimalen Bedingungen bzgl. Sauerstoff, Wasser, Temperatur und Nährstoffe. Die aeroben Mikroorganismen können also im wesentlichen nur in der Anfangsphase der Deponierung organische Stoffe in  $\text{CO}_2$  und Wasser umsetzen.

Mit der Zeit, über Jahre hinweg, verändern sich die Zustände im Deponiekörper zugunsten des anaeroben Milieus und durchschreiten verschiedene Phasen bzw. Stufen der Gärung.

### **2.1.2 Anaerobe Prozesse**

In verdichteten Deponien finden die wesentlichen Um- und Abbauprozesse unter Sauerstoffmangel statt. Der Abbau der Organik erfolgt prinzipiell nach folgender Gleichung (schematisch):

**Organik --->  $\text{CH}_4$  +  $\text{CO}_2$  + Bakterien + Wärme (gering)**

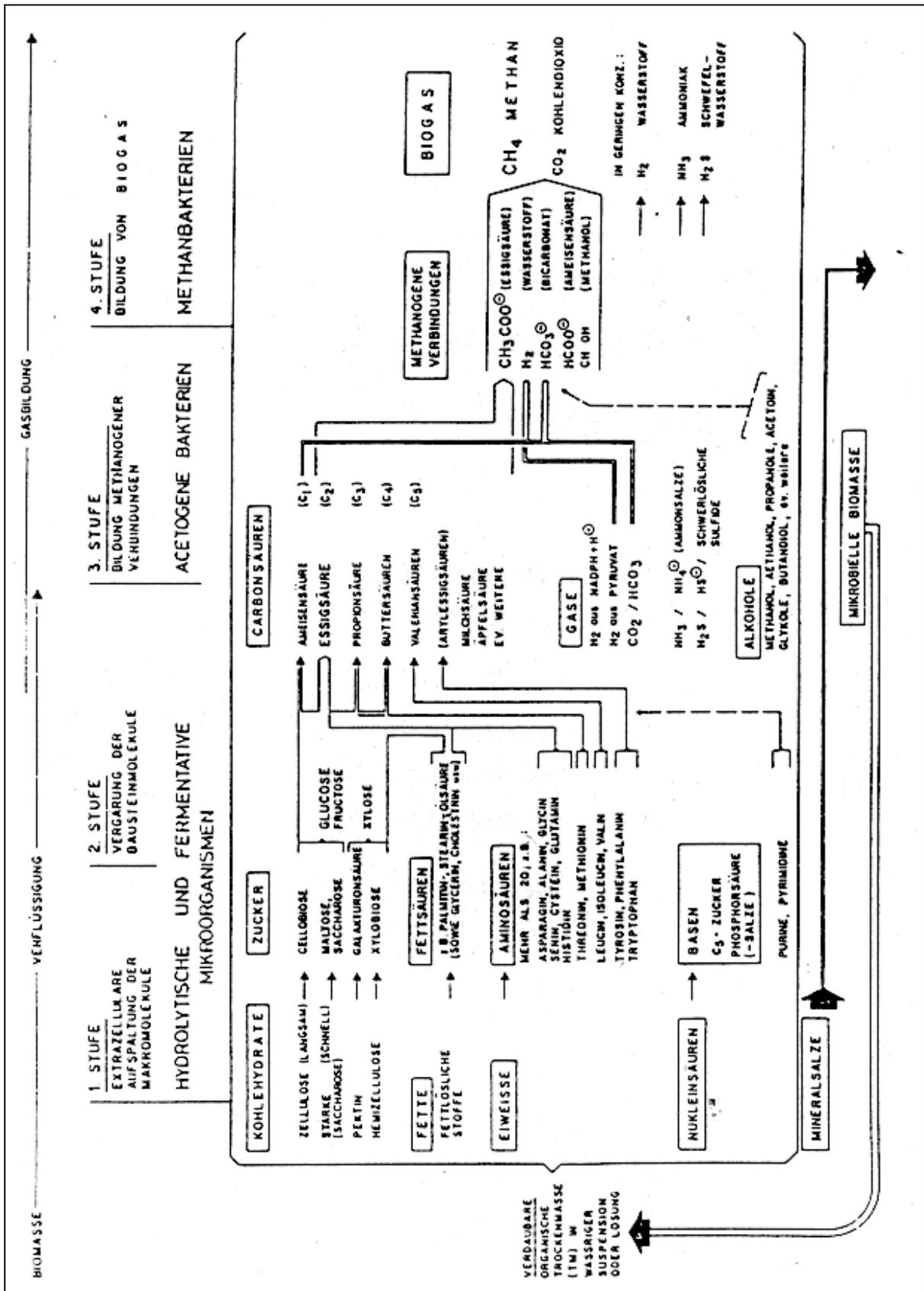


Abb. III- 2.1: Schematische Darstellung anaerober Abbauprozesse [14]

Die Vergärung durchläuft folgende Phasen:

1. Hydrolyse
2. Acidogene Phase
3. Acetogene Phase
4. Methanogene Phase

Die aufeinanderfolgenden Phasen treten im Sickerwasser und in der Gasphase in Erscheinung.

Zunächst treten im Sickerwasser hohe Konzentrationen organischer Säuren auf. Dies äußert sich in einer deutlichen pH-Werterniedrigung.

Nach Erreichen der stabilen Methanphase sinkt die Säurekonzentration stark ab, der pH-Wert erhöht sich auf über 7.

Über lange Zeiträume in der Deponie stellt sich ein Gleichgewicht zwischen säurebildenden Bakterien und Methanbakterien ein.

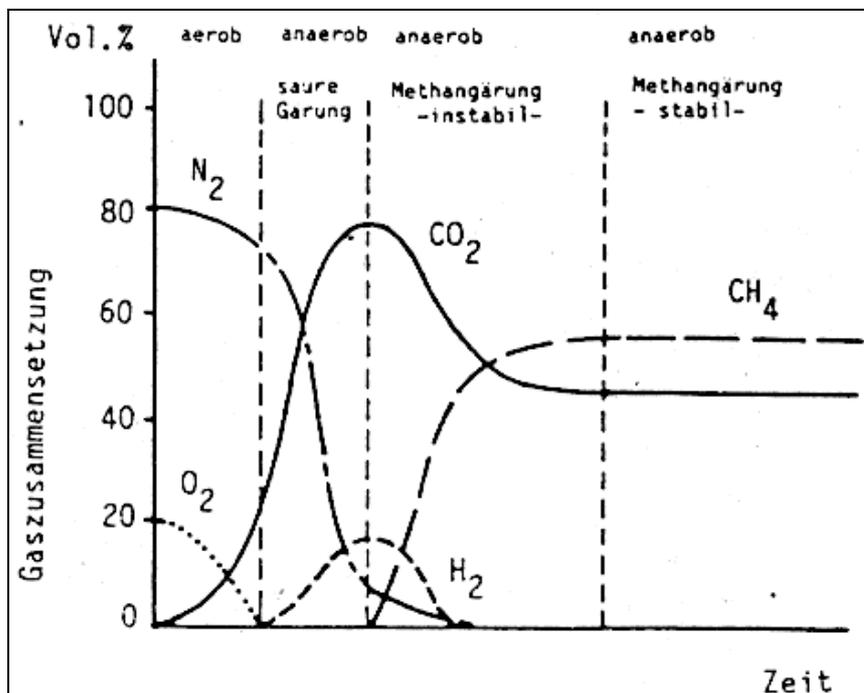


Abb. III- 2.2: Gaszusammensetzung während des Abbaus von Hausmüll [9]

Von Heidenreich (1987) [14] wurde eine mathematische Gleichung zur Abschätzung der spezifischen Deponiegasmenge aus früheren Modellen von Tabasaran et. al. [14] entwickelt:

$$G_t = G_e \times (1 - 0,5^{t/H})$$

$G_t$  = Gassumme zur Zeit  $t$

$H$  = Halbwertszeit in Jahren

$G_e$  = Produzierte Gasmenge pro  $t$  Abfall

Nach Baccini et. al. [1] überwiegt nach etwa 20 Jahren die Sickerwasserbildung, die Gasbildung wird vernachlässigbar klein.

Für lange Zeiträumen, die für Altablagerungen von Interesse sind, liegen allerdings noch sehr wenige Messungen zur Überprüfung obiger Modellvorstellungen vor.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die beteiligten Mikroorganismen eine ausreichende freie Wassermenge benötigen (Methanbakterien > 50%), so daß bei einer Trockenstabilisierung die Population der Mikroorganismen erheblich gehemmt werden kann.

Dadurch ist eine Verlangsamung der biologischen Aktivität gegeben, die sich bei Wassereintritt, etwa nach einer defekten Oberflächenabdichtung, eventuell wieder deutlich erhöhen kann. Dabei spielt allerdings eine große Rolle, ob in einem solchen Fall sich das Wasser fein im Deponiekörper verteilen kann oder ob es in "Kanälchen" schnell durchläuft und zu den Mikroorganismen nur schlecht vordringen kann.

### **2.1.3 Zusammenfassung**

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die mikrobiologischen bzw. biochemischen Umbau- und Abbauprozesse zum großen Teil für Geruchsbildungen, Setzungsvorgänge sowie für die Gas- und Sickerwasserbildung verantwortlich sind.

## **2.2 Physikalisch-chemische Vorgänge**

Hierher gehören vor allem die Auslaugung, die Absorption, die Adsorption und die Fällung.

Diese Prozesse werden in der Deponie vor allem durch das Redoxpotential, den pH-Wert und die Feldkapazitäten bzw. Porenvolumen der Abfallstoffe bestimmt. Sie stehen also in enger Beziehung mit den mikrobiologischen Prozessen.

Mit zunehmender Methanproduktion, also nach einer längeren Deponiezeit, steigt der pH-Wert infolge der Verminderung der Carbonsäuren an, so daß Mikroorganismen Sulfatverbindungen zu Schwefelwasserstoff reduzieren vermögen (Sulfatatmung). Dieser reagiert mit Metallverbindungen zu schwerlöslichen Metallsulfiden. Infolgedessen ist im Sickerwasser eine deutliche Abnahme der Schwermetallkonzentrationen sowie von Mn, Co und Fe feststellbar. Dies bedeutet, daß nach einer gewissen Zeit im Deponiekörper Schwermetalle festgelegt und somit dem Emissionspfad entzogen werden.

Auch hierbei ist darauf hinzuweisen, daß Veränderungen der Oberfläche und der Eintrag von Niederschlagswasser in den Deponiekörper durch biologische Aktivitätssteigerung und direktem "sauren Regen" zu einer Herabsetzung des pH-Wertes und damit zu einer Remobilisierung der Schwermetalle führen können.

### **2.2.1 Wasserhaushalt**

Je nachdem, wie der Müll in der jeweiligen Deponie eingebaut wurde, verteilt sich das Wasser. Die Deponiehöhe, also die Auflast und die Verdichtung, bedingt Ausquetschungen bzw. Verdrängungen von Wasser, so daß es zum einen von bestimmten Abfallstoffen (z.B. Papier) aufgesogen werden kann oder infolge des hohen Druckes als Sickerwasser austritt. Verdichtungen des Mülls haben die Herabsetzung von Fließwiderständen zur Folge, so daß gegenüber

unverdichtetem Müll (ca. 5-10 % des Niederschlags) die im Sickerwasser wieder austretende Niederschlagsmenge auf über 23 % ansteigen kann

**Die Feldkapazität von Abfall beträgt nach Ehrig (1986) [7] 45 - 72 % der Trockenmasse.**

Niederschlagswasser kann zum einen aufgesogen werden (gewisse Aufnahmekapazität des eingelagerten Müll: Feldkapazität) oder kann Stoffe lösen bzw. auslaugen. Niederschlagswasser führt über die Kanälchen und Einsickerungen auch gewisse Mengen an Sauerstoff, zumindest in die oberen Schichten, ein. Mikroaerobien sind somit über lange Zeiträume auch bis in tiefere Zonen möglich.

Eine Erhöhung des Wassergehaltes und damit der gelösten Stoffe hat eine Steigerung der biochemischen Abbau- und Umsetzprozesse zur Folge.

Das Wasser und seine Verteilung hat einen unmittelbaren Einfluß auf die Temperatur im Deponiekörper. Zum Beispiel ist zu beobachten, daß in Trockenperioden die Temperatur in der Deponie deutlich ansteigt. So ist bei höheren Temperaturen ein um bis zu 7 % geringerer Sickerwasseranfall nach Regen feststellbar.

Der Wasserhaushalt des Deponiekörpers wird also von eindringendem Niederschlagswasser, der Temperatur, der Verdichtung, der Korngrößenverteilung und der mikrobiellen Aktivität (Wasserbildung beim Abbau von Organik) bestimmt. Je nach Gewichtung dieser Einflußgrößen kommt es zu einer mehr oder minder großen Sickerwasser- und Gasbildung oder einer allmählichen Austrocknung des Deponiekörpers und einhergehender Verringerung der Sickerwasser- und Gasbildung.

## **2.2.2 Setzungen**

Nach Huitric und Stegmann ist die wichtigste Einflußgröße von Setzungen der Abbau von nativer Organik. Setzungen von bis zu 25 % der Deponiehöhe sind dadurch möglich.

Weitere Parameter sind die Verringerung des freien Porenvolumens und die Verdichtung durchnäbter Schichten infolge von Auflast (Konsolidierung).

Die Verringerung des freien Porenvolumens kann ebenfalls Setzungen bis zu 25 % der Deponiehöhe zur Folge haben.

Für die Mikrobiologie bedeutet dies, daß dieses verringerte freie Porenvolumen weder als Besiedelungsraum noch als Raum für Wasser zur Verfügung steht.

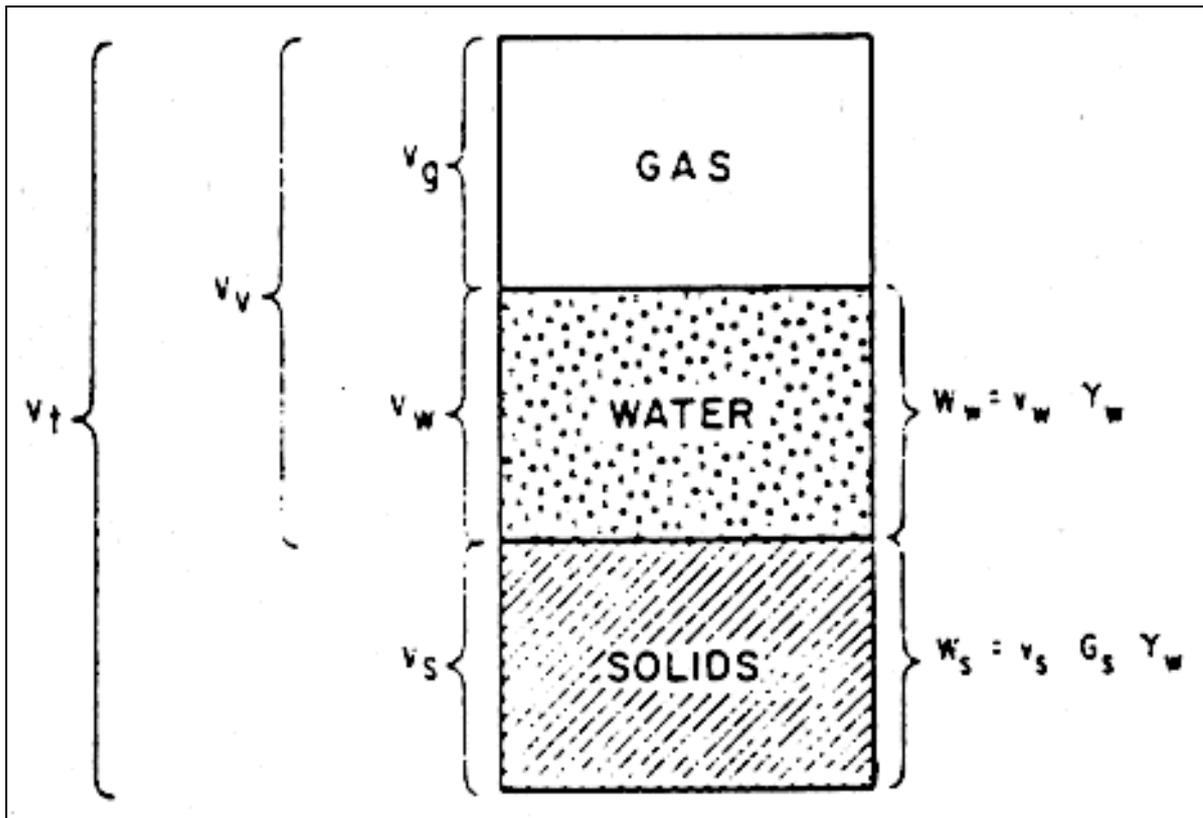


Abb. III- 2.3: Schematische Darstellung des Abfalls als Dreiphasensystem [Haug R.T. 1980]

Daraus ergibt sich auch ein Einfluß auf die potentielle Besiedelungsmöglichkeit von Mikroorganismen nach einem Wassereinbruch bei gestörter Oberflächenabdichtung.

## 3. Schadstoffproblematik

### 3.1 Schwermetalle

Nach Bidlingmaier (1990) [2] sind im Hausmüll größenordnungsmäßig folgende Schwermetallgehalte zu erwarten:

a. ermittelt aus Verbrennungsschlacke [mg SM/ kg TS]

Blei	700
Cadmium	22
Chrom	150
Kupfer	400
Nickel	75
Zink	1700

Hierbei ist zu beachten, daß keine Aussortierung von Metallen aus dem Hausmüll vor der Verbrennung stattgefunden hat. Diese Werte stellen also ein Maximum an zu erwartenden Schwermetallgehalten im Hausmüll dar.

b. Nachfolgend sind Schwermetallgehalte von Hausmüll aufgeführt, bei dem durch Vorsortierung größere massive Metallteile fehlen [mg SM / kg TS]:

Blei	271
Cadmium	4
Chrom	20
Kupfer	45
Nickel	12
Zink	320

70-90% der im Hausmüll enthaltenen Schwermetalle werden über die Stoffgruppe Metalle in die Deponie eingetragen. Die höchsten Konzentrationen befinden sich im Feinanteil des Abfalls (< 20 mm) und sind deshalb, bevor die Sulfidbildung eingesetzt hat, sehr mobil und können leicht eluiert werden.

Die Schwermetallmobilisierung ist im wesentlichen vom pH-Wert, d. h. von der biochemischen und chemischen Säurebildung, abhängig. Es ist entscheidend, ob saures Niederschlagswasser eindringt und in welcher Phase (Saure Gärung oder Methanisierungsphase) sich der Deponiekörper befindet.

### 3.2 Organische Schadstoffe

Hausmüll enthält eine Fülle von xenobiotischen organischen Substanzen und Stoffen, die zum Teil sehr leicht mikrobiologisch abgebaut, die meisten aber sehr schwer oder "überhaupt nicht" verändert werden können. Es werden oft aus verschiedenen Komponenten im Deponiekörper toxische Stoffe neugebildet.

<b>Bezeichnung</b>	
Trichlorfluormethan (R11)	Hexan
Dichloridfluormethan (R12)	Benzol
Dichlorfluormethan (R21)	Toluol
Chloridfluormethan (R 22)	Ethylbenzol
1,1,2-Trichlortrifluorethan (R113)	o-Xylol
1,1,2,2-Tetrafluor-1,2-dichlorethan (R114)	m,p-Xylol
Dichlormethan	
Trichlormethan	
1,1,1-Trichlorethan	
Monochlorethan (Vinylchlorid)	
cis-1,2-Dichlorethen	
Trichlorethen	
Tetrachlorethen	

**Tab. III- 3.1: Beispielhaft aufgeführte leichtflüchtige Einzelstoffe im Hausmüll [11]**

In einer Arbeit von Stegmann und Deipser (1993) [11] werden die produzierten bzw. verbrauchten leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe abgeschätzt und mit den im Abfall vermutlich auftauchenden Mengen in Beziehung gesetzt. So gelangen z. B. etwa 10 % der Treibgase Trichlorfluormethan und Dichloridfluormethan über weggeworfene Spraydosen in den Hausmüll, es ergeben sich daraus ca. 130 mg/kg Hausmüll (Gesamthausmüllmenge ca. 20 Mio. t/a). Solche leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe treten aus der Deponie sowohl übers Sickerwasser als auch über die Gasphase aus. Dies ergibt einen deutlichen Hinweis auf den Nutzen einer gasdichten Oberflächenabdichtung.

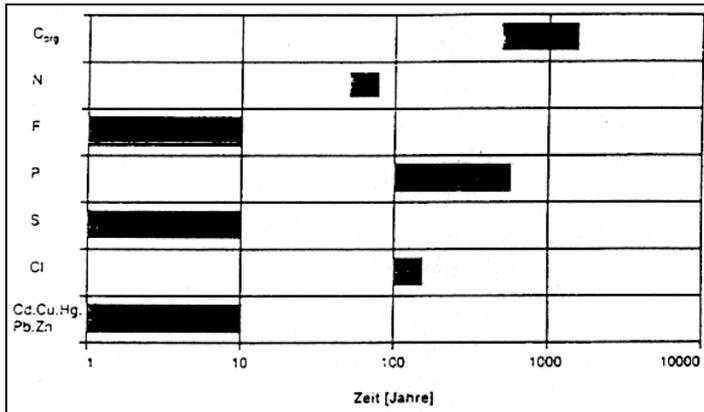


Abb. III- 3.4: Abgeschätzte Zeitspannen, bis umweltverträgliche Frachten im Sickerwasser einer Siedlungsabfalldéponie erreicht werden [1]

Ein Grund für diese langen Zeiträume ist z.B. der Einbau und damit Fixierung von aromatischen Kohlenwasserstoffen ins Ligningerüst der Huminstoffe, die sich in großer Menge als mikrobielle Abbau- und Umbauprodukte im Abfall nachweisen lassen. Bei diesen Prozessen fällt eine Erklärung noch äußerst schwer, wobei hier vor allem noch nicht bekannt ist, wie lange diese aromatischen Schadstoffe so fixiert bleiben, ob sie mit dem Lignin abgebaut werden und ob und wann sie wieder frei werden.

### 3.3 Zusammenfassung

Nach der intensiven Gasbildungsphase nach ca. 10 - 20 Jahren sind immer noch 99,9 % der Metalle und mehr als 90 % der Nichtmetalle (ohne Kohlenstoff) in der Déponie gelagert. Es ist also immer noch ein hohes Schadstoffpotential vorhanden.

Das Sickerwasser muß gemäß heutiger Schutzziele so lange behandelt werden, bis die Elementfrachten die Umwelt nicht mehr negativ beeinflussen können.

Element	Jährliche mittlere Konzentration im Sickerwasser am Ende der intensiven Reaktorphase [mg/L]	Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer [23] [mg/L]
C <sub>org</sub>	750	10-15
N <sub>org</sub>	1200	5 <sup>a)</sup>
F	0.7	10
P	7	0.8
S	3	30 <sup>b)</sup>
Cl	1300	100 <sup>c)</sup>
Cu	0.1	0.5
Zn	0.6	2
Pb	0.07	0.5
Cd	0.002	0.1
Hg	0.0005	0.01

a) Qualitätsziel (VO 1975). b) Zehnfaches des Qualitätsziels für die Summe NH<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. c) Qualitätsziel für Sulfat-Schwefel.

Tab. III- 3.2: Jährliche mittlere Konzentration der wichtigsten Elemente im Sickerwasser nach der intensiven Phase und Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer (Schweizerische Einleiterbestimmungen) [1]

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Schwermetalle, Fluor und Schwefel im Deponiekörper stark fixiert werden und im Sickerwasser in Konzentrationen unterhalb der Anforderungen an Einleitungen in Gewässer zu liegen kommen (Schweizerische VO).

Anders sieht es für Stickstoff, Chlor, Phosphor und den organischen Kohlenstoff aus. Sie treten voraussichtlich noch einige Jahrhunderte übers Sickerwasser aus.

## 4. Deponietechnik (Auswirkungen auf den Deponiekörper)

Die Umsetzungs- und Laugungsprozesse sollten so kurz wie möglich gehalten werden. Dies kann allerdings nur bei neu zu verfüllenden (aufzuschüttenden) Deponien beeinflusst werden. Für Altablagerungen ist die Einbautechnik meist unbekannt, oder es wurde früher einfach nur ein "Loch" verfüllt, ohne große Systematik beim Einbau zu verfolgen. Daher ist von einer starken Heterogenität des eingelagerten Hausmülls auszugehen.

### 4.1 Mülleinbau

Eine Methanisierungsschicht, also eine locker verdichtete Basisschicht auf der Sohle eingebaut, könnte die Methanisierungsprozesse beschleunigen, zur Sohle sickende organische Säuren würden damit schneller umgesetzt und treten im Sickerwasser nicht mehr in Erscheinung.

Eine beschleunigte Initiierung der Methanphase kann durch den Einbau von gut homogenisiertem (gehäckselten) Abfall in dünnen Schichten erreicht werden. Eine Sickerwasser-Kreislaufführung hat einen positiven Einfluß auf die Umsetzungskinetik und verringert das in die öffentliche Kanalisation einzuleitende Sickerwasser erheblich.

Bei der Sanierung einer Deponie könnte so vorgegangen werden, daß die Altablagerung ausgegraben und nach obigen Kriterien in dünnen Schichten vorgerottet unter optimaler Befeuchtung und eventueller Wertstoffabschöpfung neu eingebaut und mit einer kombinierten Oberflächenabdichtung nach dem Stand der Technik und unter Erfüllung der Abfallgesetzgebung versehen wird.

Bisher ist weitestgehend unbekannt, wie sich die unter anaeroben Bedingungen gebildeten Metallsulfide nach abgeschlossenen biochemischen Prozessen, also nach langen Zeiträumen, verhalten. Es ist bekannt (Lagerkvist, A. 1986), daß wenn nach abgeschlossener Methanphase Sauerstoff in den Deponiekörper eindringt, die Löslichkeit von Schwermetallen wieder ansteigt.

Allerdings sind bisher über die Vorgänge, die Kinetik und die Auswirkungen, kaum Aussagen und Erkenntnisse bekannt.

### 4.2 Oberflächenabdichtung

#### 4.2.1 Mineralische Abdichtung

Eine einfache Abdeckung der Deponie führt auf längere Sicht zu unbeherrschbaren Problemen im Hinblick auf die unkontrollierbare Durchlässigkeit von Niederschlägen und Gasemissionen sowie großen Mengen hoch belasteten Sickerwassers. Die Gasausbeute liegt bei 50 % der möglichen Gasproduktion. Probleme treten bei der Rekultivierung auf und es kann zu starken Geruchsbelästigungen führen. Dieses Vorgehen sollte der Vergangenheit angehören [16].

Die bis heute weit verbreitete und meist angewandte Abdichtungsmaßnahme, ist die bis zu 2 m mächtige Abdeckung mit Ton, schluffigem Ton, tonigem Schluff, sandigen Tönen sowie Bentonit. Diese in Verbindung mit einer Dränschicht und einer Vegetationsauflage stellt eine mittelfristig taugliche Oberflächenabdichtung dar. Je nach Setzungs- und Rutschungsvorgängen im Deponiekörper kann eine Haltbarkeit von ca. 50 - 80 Jahren angenommen werden. Reparaturen sind meist nur unter großen Umständen zu bewerkstelligen oder gänzlich unmöglich.

Bei Austrocknungen können vermehrt Gase durch die Abdichtung hindurchtreten.

### **4.2.2 Kunststoff-Abdichtungssysteme**

Es kommen Folien von ca 2 mm Dicke meist aus Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylen (HDPE) zum Einsatz. Beim PVC besteht die Gefahr der Versprödung durch UV-Bestrahlung und organische Lösungsmittel, die aus dem Deponiekörper ausdiffundieren [16].

Ethylen-Copolymerisat mit Bitumenschicht (ECB) wird als sehr beständig angesehen und eignet sich hervorragend für eine Deponieabdeckung [16].

Solche Oberflächenabdichtungen lassen sich reparieren. Sie stellen so über Jahrhunderte eine sinnvolle Maßnahme dar.

## 5. Auswirkungen von Oberflächenabdichtungen

### 5.1 Deponiekörper

Die derzeitigen Oberflächenabdichtungen, bestehend aus Ton, weisen nach Stegmann [10] nur eine relative und keine absolute Dichtigkeit auf.

Oberflächenabdichtungen mit Kunststofffolien führen ohne im Kreis geführtes Sickerwasser zu einer allmählichen Austrocknung des Deponiekörpers. Eine sogenannte Trockenstabilisierung findet statt. Nach Weber betragen die Sickerwasserabflußspenden  $q$  im 1. Jahr der Deponierung  $2 \text{ m}^3 / \text{ha} \times \text{d}$  und im 10. Jahr  $< 1 \text{ m}^3 / \text{ha} \times \text{d}$ . Die biochemischen Umsetzungsprozesse verlangsamen sich, so daß das Ziel einer schnell zu durchlaufenden Methanisierungsphase (siehe die Ausführungen oben) in die Ferne rückt. Die Probleme würden so in die Zukunft verlagert. Ein ausgeglichener Wasserhaushalt muß gewährleistet sein.

Trockenstabilisierte Altablagerungen erfahren bei defekter Oberflächenabdichtung eine Remobilisierung der biologischen und chemischen Vorgänge, so daß mit erneut auftretender Sickerwasser- und Gasbildung zu rechnen ist.

Nach Rettenberger [9] ist nach Aufbringung einer gasdichten Abdichtungsmaßnahme ein Gasstau zu beobachten, der sich in einem Druckanstieg von 2-3 mbar bemerkbar macht (Spitzen bis zu 50 mbar).

Wie oben beschrieben hat die Oberflächenabdeckung einen entscheidenden Einfluß auf den Deponiekörper. Alleinige Bodenabdeckung führt zu unkontrollierbaren Vorgängen, die sich durch Instabilität, diffuse Gas- und starke Geruchsemission sowie hohem Sickerwasseranfall bemerkbar machen.

Tonige Oberflächenabdichtungssysteme mit Dränschicht tragen zu einer starken Verbesserung der Vorgänge in der Deponie bei. Die Sicherheit ist allerdings nur mittelfristig gegeben, so daß vor allem infolge Setzungen und Rutschungen Niederschlagswasser nach und nach in den Deponiekörper eindringen kann. Wassereintritt hat biochemische Prozesse und Instabilitäten der Deponie zur Folge.

Die Kombination von verdichtetem Einbau mit einer Oberflächenabdichtung verlängert den Zeitraum signifikanter Deponie-Emissionen (Wiedemann 1982).

Insgesamt läßt sich sagen, daß die Migration von Sickerwasser wegen der Inhomogenität eines Deponiekörpers modellartig schwer zu fassen ist [1].

## **5.2 Kosten/Nutzen-Betrachtung**

Nach Weber [16] wird die Bilanz selbst bei sehr teuren ECB-Oberflächenabdichtungen aus Ersparnis (Verringerung der Sickerwassermenge) und Gewinn (erhöhte Deponiegasmenge, bessere Qualität des Gases) gegenüber den Mehrkosten in naher Zukunft positiv sein, da für die Sickerwasserbehandlung und -entsorgung eine rasante Kostenentwicklung zu erwarten ist. Der Volumenstrom des abzuführenden Sickerwassers läßt sich durch das System der Oberen Abdichtung und der Kreislaufführung stark vermindern.

## **5.3 Umgebung (Umweltverträglichkeit)**

Die Auswirkungen von Deponien und deren Oberflächenabdichtungsmaßnahmen werden in Teil IV dieser Arbeit anhand ausgewählter Beispieldeponien näher betrachtet.

## 6. Zusammenfassung

Dichtungssysteme sowohl an der Sohle wie auch an der Oberfläche einer Deponie haben einen großen Einfluß auf den Deponiekörper und die in ihm ablaufenden biochemischen und physikalischen Prozesse.

Oberflächenabdichtungen nehmen Einfluß auf den Wasserhaushalt, den Gasaustausch und die Temperatur. Diese Parameter sind entscheidend für die Biologie, den Chemismus und die Stabilität der Deponie. Oberflächenabdichtungen ermöglichen eine weitestgehende Gasfasung inclusive den Geruchsstoffen und einen kontrollierten Wasserhaushalt. Oberflächenwasser und Niederschläge können nicht in den Deponiekörper eindringen. Sie dienen als ein gewisser Regelmechanismus, über den sich der Deponiekörper beeinflussen läßt.

Mineralische Dichtungssysteme lassen sich nur mittelfristig, kombinatorische Dichtungssysteme mit Folien längerfristig einsetzen.

Das Oberflächendichtungssystem muß geeignet sein, über lange Zeiträume, d. h. über Jahrhunderte eine gute Haltbarkeit zu gewährleisten [1],[10].

Die zitierten Autoren weisen auf großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf bezüglich Langzeitverhalten der Deponie an sich und der Abdichtungssysteme im besonderen hin. Des weiteren ist noch weitestgehend unbekannt, wie sich die Schwermetalle und organischen Schadstoffe im Deponiekörper verteilen, wie mobil diese sind, ob sie ab- bzw. umgebaut werden und ob sie nach zwischenzeitlicher Fixierung bei gewissen Vorkommnissen wieder frei werden und übers Sickerwasser oder über die Gasphase wieder emittieren. Weiterhin wurde bisher nur in Laborversuchen getestet, wie sich trockenstabilisierter Müll wiederbefeuchten läßt. Konkrete Untersuchungen an Ablagerungen direkt sind erst in den Anfängen.

## 7. Literatur

- [1] Baccini P.; Belevi H.; Lichtensteiger T.: Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft, Forschung & Technik, GAIA, 1992, Nr.1, S. 34 - 49
- [2] Bidlingmaier W.: Schwermetalle im Hausmüll, Stuttgarter Berichte, Band 42, 1990
- [3] Bidlingmaier W. et. al.: Schwermetalle in verschiedenen Hausmüllkomponenten, Forschungsbericht Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten BW, 1982
- [4] Collins H.-J.; Münnich K.: Temperaturen in Siedlungsabfalldeponien auf die Basisabdichtung, Müll und Abfall, 4/93
- [5] Collins H.-J.; Spillmann P.: Wasser- und Stoffhaushalt von Abfalldeponien und deren Wirkungen auf Gewässer, 1986, DFG Forschungsbericht.
- [6] Collins H.-J.; Spillmann P.: Lagerungsdichte, Abbautemperaturen, Sickerwasseranfall und -belastung in einer Rottedeponie in Abhängigkeit von der Vorbehandlung des Mülls, Müll und Abfall 3/74, S. 71 -81
- [7] Ehrig H.-J.: Untersuchungen zur Gasproduktion aus Hausmüll, Müll und Abfall, 5/86, S. 173 - 183
- [8] Herbold R.; Vorwerk V.: Die Entwicklung der Abfallwirtschaft: Deponiesickerwasser als Risiko und die Entstehung einer neuen Disziplin, Müll und Abfall 5/93, S. 355 - 364
- [9] Rettenberger G.; Dorn E.: Gasförmige Emissionen in den deponienahen Luftraum, Stuttgarter Berichte Nr. 24, Zeitgemäße Deponietechnik, 1987, S. 9 - 30
- [10] Stegmann R.: Vorstellung eines Konzeptes zur Vorbehandlung und trockenen Ablagerung von Reststoffen, Abfallwirtschaftsjournal 5, 1993, Nr. 1; S. 22 - 28
- [11] Stegmann R.; Deipser A.: Untersuchungen von Hausmüll auf leichtflüchtige Spurenstoffe, Müll und Abfall, 2/93, S. 69
- [12] Stegmann R.; Knoch J.: Sickerwasserqualität von Rottedeponien, Müll und Abfall 2/75, S. 36 - 43
- [13] Stegmann R.; Spendlin H.-H.: Vorgänge in kommunalen Abfalldeponien, Grundlagen der chemisch-physikalischen und biochemischen Prozesse, EF-Verlag 1987, Technik, Wirtschaft, Umweltschutz, Deponie; S. 271 -291
- [14] Spendlin H.-H.; Stegmann R.: Gasentstehung in Altdeponien und ihre Problematik, Handbuch der Altlastensanierung, 3/89
- [15] Weber B.: Gas- und Wasserhaushalt von Deponien, Abfallwirtschaftsjournal 5, 1993, Nr. 1
- [16] Weber B.: Minimierungen von Emissionen der Deponie, Forschungsbericht Universität Hannover, 1990
- [17] Wilderer P.; Hartmann L.: Untersuchung über Menge und Abbaubarkeit von Sickerwasserinhaltsstoffen aus einer Mülldeponie, Müll und Abfall, 3/72, S. 82 - 87

# Teil IV: Beziehung zwischen Altablagerung und Umgebung

## 1. Einleitung

Die von Altablagerungen ausgehenden negativen Umwelteinflüsse, wurden in den vergangenen Jahren in einer Vielzahl von Veröffentlichungen dargestellt. Bei der Bewertung des von Altablagerungen ausgehenden Gefahrenpotentials stand anfangs fast ausschließlich die Gesundheit des Menschen im Vordergrund. Durch die ökosystemare Forschung wurde festgestellt, daß der Mensch nicht nur durch direkte Schadeinwirkung allein belastet wird, sondern auch durch Schadstoffeinträge in Ökosysteme aufgrund deren Vernetzung gefährdet ist.

In Baden-Württemberg wird die Bewertung von Altablagerungen in der Regel nach dem ALTLASTEN-HANDBUCH durchgeführt. Die Entscheidung über den Handlungsbedarf wird mittels einer Gefährdungsabschätzung der Schutzgüter Grundwasser, Oberflächengewässer, Boden und Luft getroffen.

Werden aufgrund des für die Schutzgüter bestehenden Gefährdungspotentials Sanierungsmaßnahmen eingeleitet, so ist nach LAGA (1990) folgendes zu beachten:

*"Bei der Festlegung der Sanierungsziele ist neben der Würdigung der naturwissenschaftlichen und technischen Gesichtspunkte des Einzelfalls insbesondere der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu berücksichtigen, wonach die zu treffenden Maßnahmen geeignet, erforderlich und auch angemessen sein müssen (LAGA 1990)."*

Inwieweit die nachträgliche Aufbringung einer Oberflächenabdichtung auf eine Altablagerung den LAGA-Anforderungen entspricht, soll im Rahmen dieser Arbeit unter einer geoökologischen Sichtweise behandelt werden. Bei der üblichen Vorgehensweise, sind Betrachtungen einer Altablagerung bezüglich ihrer ökologischen Standortseigenschaften, der Vegetationszusammensetzung sowie der Einpassung in das Landschaftsgefüge der Umgebung von nur untergeordneter Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wird dagegen die Geoökologie des Untersuchungsgebietes in den Vordergrund gestellt. Dies vor allem in Hinblick auf die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung, da durch diese technische Maßnahme das derzeit bestehende Ökosystem beseitigt und durch ein neu zu schaffendes ersetzt wird.

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit liegt in der Betrachtung der standortkundlichen Verhältnisse der Altablagerung hinsichtlich des darin enthaltenen Potentials zur Emissionsverminderung.

Die geoökologischen Untersuchungen sollen dazu beitragen einerseits dieses Potential abzuschätzen und andererseits die bestehende ökologische Situation aufzuzeigen, um sie gegen die

Wirkung der Oberflächenabdichtung selbst und deren Auswirkung auf den Landschaftshaushalt abzuwägen.

Am Ende bleibt zu beurteilen, ob die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung eine erforderliche und damit dem Gefährdungspotential der Deponie angemessene Maßnahme für die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft darstellt, wodurch eine weitgehende Zerstörung der bestehenden ökologischen Gegebenheiten als unvermeidlich in Kauf genommen werden muß, oder sollen aufgrund der Verhältnismäßigkeit, Erforderlichkeit und Angemessenheit (LAGA 1990), am Standort vorhandene Emissionen akzeptiert und durch alternative, weniger aufwendige Methoden soweit wie möglich begrenzt werden.

Bei der Abwägung beider Gesichtspunkte ist das Langzeitverhalten der bestehenden Altablagung bezüglich ihres Schadstoffpotentials (Teil III) und das Langzeitverhalten einer Oberflächenabdichtung hinsichtlich einer langfristigen Barrierewirkung (Teil I) in die Überlegungen mit einzubeziehen.

Die endgültige Entscheidung über die weitere Vorgehensweise, sollte immer als Einzelfallentscheidung auf der Basis der größtmöglichen Umweltverträglichkeit getroffen werden, aber Alternativen nicht außer acht lassen.

## 2. Problemstellung

Die generelle Problematik von Altdeponien besteht darin, daß die durch die Vorgänge im Deponiekörper entstehenden Emissionen über einen langen Zeitraum andauern. Eine besondere Gefährdungsrelevanz kommt dabei dem Sickerwasser zu, dessen Inhaltsstoffe zu Immissionen bei Grundwasser, Gewässer und Böden der Umgebung führen können. Neben dem Sickerwasser ist das Deponiegas ein weiterer wichtiger Emissionspfad, der vor allem für das Schutzgut Luft relevant ist.

Um langfristig eine Vermeidung des Schadstoffeintrages zu erreichen, werden heute für neue Deponien neben einer Abdichtung der Deponiebasis auch Oberflächenabdichtungen gefordert, die eine Infiltration von Niederschlägen in den Deponiekörper ausschließen und eine weitestgehende Erfassung des Deponiegases gewährleisten sollen. Das Problem des Sickerwassers besteht auch für Altablagerungen, so daß Überlegungen angestellt werden, hier durch eine nachträgliche Aufbringung von Oberflächenabdichtungen die Sickerwasserrate zu minimieren sowie durch Gaserfassungssysteme die Deponiegasemissionen zu kontrollieren.

Die nachträgliche Aufbringung einer Oberflächenabdichtung, die nach TA Siedlungsabfall für die Deponieklasse II aus einer Kunststoffdichtungsbahn, einer mineralischen Dichtung sowie einer Rekultivierungsschicht besteht, setzt voraus, daß die bei Altablagerungen in der Regel bestehende Vegetationsdecke sowie gegebenenfalls die vorhandene Deckschicht entfernt werden müssen. Der Aufbau der Oberflächenabdichtung bedingt, daß zur Vermeidung von Schäden an der Kunststoffdichtung für die spätere Begrünung nur flachwurzeln Pflanzen, insbesondere Gräser, Verwendung finden dürfen, die in unseren Breiten eine regelmäßige Unterhaltung erfordern. Für Oberflächenabdichtungen der Deponieklasse I, die nur eine mineralische Dichtung vorsieht, gelten bezüglich der Begrünung der Rekultivierungsschicht dieselben Anforderungen.

Unter dem Aspekt der Einbeziehung von Altablagerungen in das bestehende Landschaftsgefüge, stellt sich die Frage inwieweit eine Altablagerung durch ihre Vegetationsdecke, die Beschaffenheit der Deckschichten und ihre geomorphologische Ausprägung, bereits Teil der sie umgebenden Landschaft geworden ist. Hat bereits eine Eingliederung in die Landschaft stattgefunden, stellt die Aufbringung der Oberflächenabdichtung einen deutlichen Eingriff dar.

**Damit ergibt sich das Problem einer Abwägung zwischen Oberflächenabdichtungen als mögliche Maßnahme zur Sicherung der Schutzgüter Wasser, Luft, Boden und Organismen und einem daraus resultierenden Eingriff in einen Prozeß der Einfügung in den bestehenden Landschaftshaushalt.**

**Diese Abwägung soll im Rahmen dieser Arbeit an zwei Standortbeispielen von Altablagerungen durchgeführt werden, wobei noch ein weiterer Aspekt die Entscheidung über eine Oberflächenabdichtung maßgeblich beeinflusst.**

**Dieser besteht in der Frage, inwieweit die im Zuge der Rekultivierung entstandene Boden- und Vegetationsbedeckung in der Lage ist durch Speicherung und Verdunstung ein Eindringen der Niederschläge in den Deponiekörper zu begrenzen und damit zumindest teilweise die Funktionen einer Oberflächenabdichtung zu übernehmen.**

### 3. Vorgehensweise bei der Beurteilung von Oberflächenabdichtungen

Die in dieser Arbeit angestellten Überlegungen beziehen sich auf ehemalige kommunale Deponien sowie Kreismülldeponien oder sogenannte "Dorfkippen". Sondermülldeponien oder Deponien, deren Gefährdungspotential als hoch eingestuft wird, sind nicht Gegenstand der Untersuchungen, da dort eine alleinige Oberflächenabdichtung außer Frage steht.

In Baden-Württemberg stellt das Altlasten-Handbuch die Bewertungsgrundlage für das Gefährdungspotential von Altablagerungen dar, wobei die Ermittlung des Handlungsbedarfs auf unterschiedlichen Ebenen verläuft. Die erste Ebene, die Historische Erkundung bietet durch Datenerhebung z.B. Abfallmenge- und -zusammensetzung, geologische Verhältnisse, sowie der Analyse der Sickerwasserinhaltsstoffe, eine erste Möglichkeit der Abschätzung des Gefährdungspotentials. In einer weiterführenden technischen Erkundung können, falls erforderlich, beispielsweise geophysikalische Untersuchungen, Müllanalysen sowie detaillierte Sickerwasseruntersuchungen, eine genauere Einschätzung der Gefährdungsrelevanz bieten.

Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht vorgesehen technisch aufwendige Untersuchungen durchzuführen. Die hier betrachtete Fragestellung, die boden- und vegetationskundliche Aspekte in den Vordergrund stellt, wird mit anerkannten Feldmethoden untersucht.

Die Beurteilung von Oberflächenabdichtungen erfolgt unter den Aspekten

**a) die Altablagerung und ihre Einfügung in den Landschaftshaushalt**

**b) Verringerung des Eintrags von Niederschlägen in den Deponiekörper aufgrund der Deckschicht und der Vegetation**

Zur Charakterisierung der Standorte ist den eigentlichen Geländeaufnahmen eine kurze *historische Erkundung* vorangestellt. Diese beinhaltet müllspezifische Parameter sowie Angaben über die Sickerwasserbeschaffenheit sowie die geologischen Gegebenheiten am Standort.

Die zur Beurteilung der Oberflächenabdichtung herangezogenen Parameter lassen sich entsprechend den beiden Aspekten der Untersuchung aufgliedern:

**unter a)**

- **Beschreibung der Gegebenheiten am Standort und Umgebung bezüglich:**
  - *Lage und landschaftliche Einordnung*
  - *Nutzung*
  - *Klima*
  - *Geologie / Hydrologie*
  - *Geomorphologie*
  - *Böden*
  - *Vegetation*
  - *Infrastruktur*

- **Untersuchungen auf der Altablagerung unter geoökologischem Aspekt:**
  - *Geomorphologische Aufnahmen bezüglich Einpassung in die Umgebung*
  - *Deckschicht und ihre Voraussetzungen als Pflanzenstandort*
  - *Vegetationsaufnahmen und deren ökologische Bewertung*
  - *Schadwirkung an Pflanzen durch Deponiegas*
  - *Beobachtungen zur Fauna*

unter b)

- **Anwendung der Untersuchungen auf den Aspekt der Verringerung des Eintrags von Niederschlägen**
  - *Beurteilung der Geomorphologie bezüglich Oberflächenabfluß*
  - *Deckschicht und ihre Fähigkeit zur Wasserspeicherung*
  - *Beurteilung der Vegetation bezüglich der Verdunstung*
  - *Simulation der Deckschicht mit dem "HELP"- Modell*

Die unter **a)** aufgeführten Untersuchungskriterien werden dabei immer unter dem Gesichtspunkt der Einpassung in die Umgebung betrachtet.

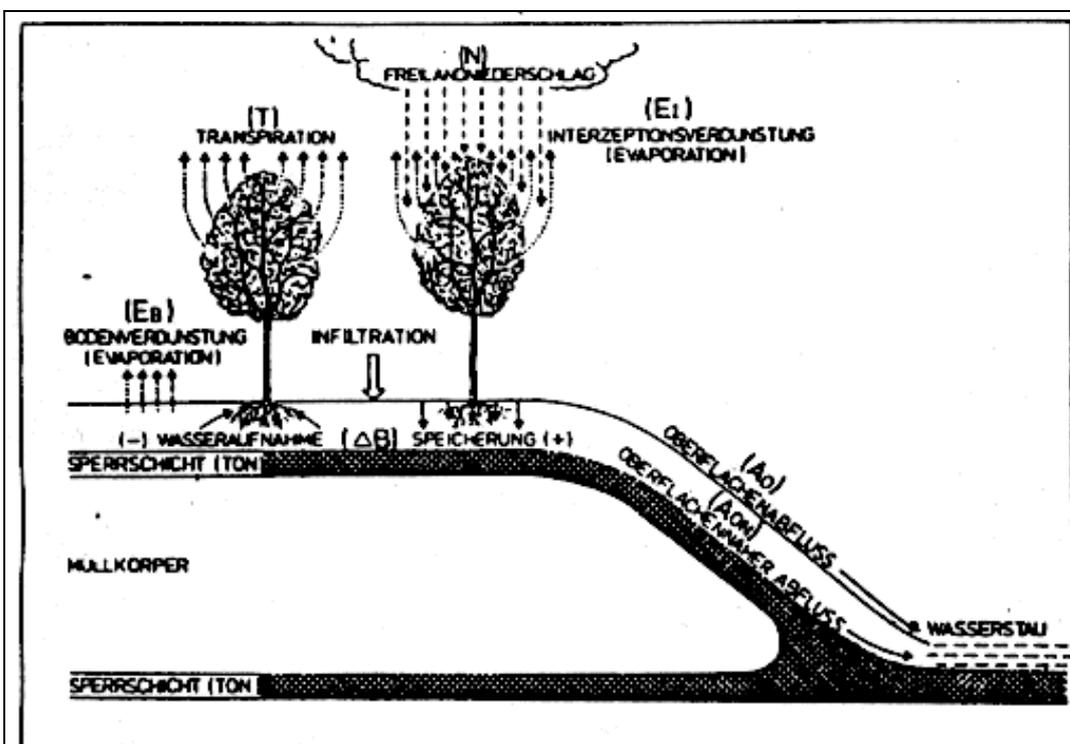
Die angeführten Untersuchungen und die Bewertung der Ergebnisse dienen einer Einschätzung der IST-Situation auf der Altablagerung. Zur Entscheidungsfindung für oder gegen eine Oberflächenabdichtung, wird der IST-Situation ein Szenario gegenübergestellt, das die Auswirkungen der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung aufzeigt. Das Szenario beinhaltet neben landschaftsökologischen Gesichtspunkten auch eine Simulation der Altablagerungen mit dem "HELP"- Modell unter der Annahme einer mineralischen Oberflächenabdichtung.

## 4. Wasserbilanzen von Deckschichten

### 4.1 Allgemeines

Für die Beschreibung der Wasserbilanz kann die folgende Gleichung herangezogen werden. Diese ist trotz der Einschränkungen bezüglich ober- und unterirdischer Zuflüsse zutreffend, da in diesem Kapitel die Betrachtung von Deckschichten und nicht des Gesamtwasserhaushaltes von Deponien im Vordergrund steht.

$$N = E_I + E_b + T + A_o + A_{on} + A_s + \Delta B$$



**Freilandniederschlag (N):** Niederschlag auf einer Bezugsfläche unmittelbar über dem Pflanzenbestand bzw. auf einer Fläche ohne Vegetationseinfluß.

**Interzeptionsverdunstung ( $E_i$ ):** Evaporation von den Oberflächen oberirdischer Pflanzenorgane und am Boden liegender toter Pflanzenteile (Bodenstreu)

**Bodenverdunstung ( $E_b$ ):** Evaporation aus dem Boden

**Transpiration (T):** Verdunstung aus den Pflanzen von überwiegend aus dem Boden aufgenommenen Wasser

**Oberflächenabfluß ( $A_o$ ):** Oberirdischer Abfluß von nicht in den Boden infiltriertem Niederschlagswasser

**Infiltration:** Zugang von Wasser in den Boden

**Oberflächennaher Abfluß ( $A_{on}$ ):** Laterale Absickerung von Bodenwasser

**Änderung der Bodenwasserspeicherung ( $\Delta B$ ):** Aufgrund von Wasseraufnahme (-) durch die Wurzeln und durch Bodenverdunstung sowie aufgrund von Speicherung (+)

**Tiefenversickerung ( $A_s$ ):** Vertikale Absickerung aus dem wurzelbeeinflussten Bodenprofil (im Bild  $A_s = 0$ , da Sperrschicht)

Abb. IV- 4.1: Wasserhaushalt von Deckschichten (Brechtel 1984)

Die optimale Deponiedeckschicht wäre dann gegeben, wenn kein Abfluß ( $A_O + A_{On} + A_S$ ) vorliegt. In der Theorie scheint dies durch eine ausgesuchte Vegetationsdecke mit hoher Interzeptionsverdunstung ( $E_t$ ) möglich. Danach darf nur soviel Niederschlag ( $N$ ) in den Boden gelangen, daß ein durch Bodenverdunstung (= Evaporation) und Transpiration erreichtes Bodenfeuchte-Defizit gegenüber der (nutzbaren) Feldkapazität bestehen bleibt. Theoretisch könnte hierbei im Laufe der Zeit der gesamte Niederschlag durch die Evapotranspiration (= Evaporation+Transpiration+Interzeptionsverdunstung) abgeführt werden (BRECHTEL 1984).

Der Wasserhaushalt ist in unserem gemäßigt humiden Klima jedoch dadurch geprägt, daß durch die Niederschläge mehr Wasser geliefert wird, als verdunsten kann. Die Überschüsse ergänzen entweder die Oberflächengewässer oder sickern in den Boden und tragen nach dessen Durchsickerung zur Grundwasserbildung bei.

Wasserzuflüsse und Wasserverluste sind als standortbestimmende Faktoren für die Pflanzen einerseits und als Bestimmungsgröße für die Menge an Wasser, die durch Perkolation in den Müllkörper gelangt andererseits, von großer Bedeutung.

Wichtigste Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang:

<i>Klima,</i>	das Niederschlagsmenge und -verteilung sowie Temperaturverlauf bestimmt
<i>Relief,</i>	wodurch Oberflächenabfluß ermöglicht wird
<i>Vegetation,</i>	die Transpiration und Interception regelt
<i>Bodenarten,</i>	deren Speicherkapazitäten die Pflanzenversorgung regeln und die Wasserleitfähigkeit bestimmen

Aufgrund der jahreszeitlich stark schwankenden Stoffwechselintensität der Pflanzen ist für deren Wasserversorgung das Speichervermögen der Böden von großer Bedeutung. In Monaten geringen Wasserbedarfs der Pflanzen sinkt deren Verdunstungsrate, so daß mehr Wasser der Grundwassererneuerung zur Verfügung steht. Bezogen auf Deponien bedeutet dies einen höheren Sickerwasseranfall. In der Regel liegt das Maximum der Tiefenversickerung in den vegetationslosen Monaten Dezember bis April, während in der Vegetationsperiode zwischen Juli und September, unter den höchsten Transpirationsleistungen, am wenigsten zur Grundwassererneuerung beigetragen wird (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989).

Eine entsprechende Deckschicht mit angepaßter und leistungsfähiger Vegetationsdecke kann demnach die Tiefenversickerung in den Deponiekörper zwar nicht verhindern, aber stark herabsetzen. Daher stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit des Einbaus einer wasserundurchlässigen Schicht, gemäß TA Siedlungsabfall, um die Tiefenversickerung vollständig auszuschließen.

## 4.2 Standortbedingte und klimatische Einflüsse auf die Sickerwassermenge

Als allgemeine Standortfaktoren gelten die geologisch-geographischen Verhältnisse (Topographie, Orographie, Geomorphologie) sowie klimatische Einflüsse. Niederschlagsereignisse sind in ihrer Ausprägung (Intensität, Dauer u.a.) in erster Linie vom Makroklima abhängig, können regional aber von anderen Geofaktoren (z.B. Regenschatten von Gebirgen) überlagert werden.

Meteorologische Einflußfaktoren wie Energiehaushalt, Wasserdampftransport und Sättigungsdefizit der Luft steuern die Verdunstung am jeweiligen Standort. Sie stehen dabei in Wechselbeziehung mit dem jeweiligen Mikroklima, geomorphologischen Besonderheiten, der Vegetation sowie letztendlich auch anthropogenen Einflüssen.

Unter den klimatischen Einflüssen spielt die Exposition eine wichtige Rolle. Hierbei kann die potentielle Sonneneinstrahlung, je nach Hanglage und Exposition stark variieren. Bei einer Neigung von 17° (~ 30%) erfährt ein nach Norden exponierter Hang ca. 71%, ein nach Süden exponierter Hang ca. 124% der potentiellen Einstrahlung der Ebene (BRECHTEL 1984).

Ein weiterer vom Klima gesteuerter Faktor ist die potentielle Verdunstung, die neben dem Energiehaushalt von noch zwei weiteren Vorgängen bestimmt wird. Dies ist zum einen der (Wasserdampf-) Sättigungsgrad der Luft sowie zum anderen der durch den Wind beeinflusste atmosphärische Wasserdampftransport. Aus den o.g. Gründen weisen warme, trockene, windexponierte Standorte höhere Verdunstungsraten auf, als kühle, feuchte und windgeschützte Stellen (BRECHTEL 1984).

Standorte mit gutem Bewuchs (Bäume, Sträucher) bieten bessere Voraussetzungen für die meteorologischen Bedingungen der Verdunstung. Die absorbierte Strahlung, d.h. die Energie zur Verdunstung, liegt bei Wäldern auf das Jahr gerechnet um ca. 1/3 höher als bei Wiesen (JÄGER u. WIEMER 1979).

Daneben spielen Faktoren, wie eine höhere Oberflächenrauigkeit, eine kleinere Albedo sowie ein besserer Wasserdampftransport (Sättigungsdefizit der Luft) eine Rolle. Unter optimalen Bedingungen und bei unbegrenztem Wassernachschub können an Südhängen höhere Evapotranspirationsraten als an offenen Wasserflächen auftreten (nach BRECHTEL 1984).

### 4.3 Bodenkundliche Einflüsse

Die Niederschläge werden, sofern sie nicht als Oberflächenabfluß abgeleitet werden, z.T. in den Böden gehalten oder als Sickerwasser in tiefere Bodenzonen verlagert.

Das im Boden befindliche Wasser wird als Haftwasser oder Bodenfeuchte bezeichnet. Von den festen Bodenbestandteilen, der Bodenmatrix, wirken Adsorptions- und Kapillarkräfte auf das im Boden befindliche Wasser ein, das dadurch gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden kann. Das Maß für den Einfluß der Bodenmatrix wird als Matrixpotential oder, mit umgekehrten Vorzeichen, als Wasserspannung bezeichnet. Diese ist am niedrigsten bei hohen Wassergehalten und am höchsten bei niedrigen Wassergehalten (SCHEFFER u. SCHACHT-SCHABEL 1989). Die Wasserspannung wird durch den logarithmischen pF-Wert angegeben und besagt, daß z.B.

1 bar Wasserspannung =  $10^3$  cm Wassersäule = pF 3

entspricht. Die Wasser- oder Feldkapazität (FK) ist die maximale Wassermenge, die ein Boden aufgrund von Adsorptions- und Kapillarkräften bei freiem Wasserabzug entgegen der Schwerkraft zu halten vermag.

Bestimmend für die Feldkapazität sind zum einen die Bodenarten, die je feinkörniger sie sind, desto mehr Wasser an ihrer Oberfläche adsorbieren können. Zum anderen wird die Feldkapazität vom Porenvolumen sowie der Porengrößenverteilung beeinflusst, da die Anzahl an Feinporen die Menge an Kapillarwasser bestimmt. Porengrößenverteilung und Porenvolumen ergeben sich zum einen durch die Primärporen, die durch Körnung bzw. Bodenarten bedingt sind, zum anderen durch die, infolge Gefügebildung entstehenden, Sekundärporen und dem Gehalt an organischer Substanz (SCHRÖDER 1984).

Unterschiede in der Körnung wirken sich dahingehend aus, daß bei Tonböden aufgrund der größeren adsorbierenden Oberfläche bei gleichem Wassergehalt wie bei Sandböden wesentlich höhere Wasserspannungen auftreten. Das bedeutet, daß ein Sandboden mit einem Wassergehalt von 20 % naß ein Tonboden dagegen trocken wirkt. Allerdings kann das Gefüge bei Tonböden durch Quellung und Schrumpfung einen starken Einfluß auf die Porengrößenverteilung und das Porenvolumen ausüben, wodurch sich die Wasserspannungskurve erheblich verändern kann. Bei Quellung nehmen die groben Sekundärporen ab, die Feinporen und auch die Mittelporen dagegen stark zu (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989).

Aufgrund von Niederschlag und Evaporation findet im Boden fast immer eine Wasserbewegung statt, deren Ausmaß abhängig ist von der Schwerkraft, dem Gravitationspotential und dem oben erwähnten Matrixpotential.

Wird dem Boden durch Niederschläge Wasser zugeführt (Infiltration), füllt sich zunächst die oberste Bodenschicht bis zur Feldkapazität auf. Anhaltende Niederschläge können zur Überschreitung der Feldkapazität dieser oberen Bodenschicht führen, weshalb die Befeuchtungsfront in tiefere Bodenschichten vordringt. Diese Wasserbewegung erfolgt zum einen in den Kapillaren (*Durchmesser*  $< 10 \mu\text{m}$ ) und in dünnen Wasserfilmen, da die noch nicht befeuchteten Bodenteilchen hohe Saugspannungen aufbringen. Zum anderen durch langsames Versickern in Poren (*Durchmesser*  $10\text{-}50 \mu\text{m}$ ) oder schnelles Versinken in Grobporen  $> 50 \mu\text{m}$  Durchmesser.

Wurzelbahnen, Schrumpfrisse und Tiergänge im Boden führen zu Beginn des Niederschlags zu einer schnellen Versinkung noch bevor die Feldkapazität aufgefüllt ist (SCHRÖDER 1984).

Das Ausmaß der Wasserbewegung wird bestimmt von dem antreibenden Potentialgefälle und der Wasserleitfähigkeit oder Wasserdurchlässigkeit (Permeabilität), die durch den Leitfähigkeitskoeffizienten  $K_f$  (Leitfähigkeit bei wassergesättigtem Boden) bzw.  $K_{\theta}$  (Leitfähigkeit im nicht wassergesättigten Boden) gekennzeichnet ist. Grundlage der Berechnung dieses Koeffizienten ist die DARCY-Gleichung, die sowohl auf gesättigte als auch auf nicht gesättigte Böden anwendbar ist. Die Angaben über die Leitfähigkeit beziehen sich in der Regel auf den gesättigten Zustand.

Für die Wasserleitfähigkeit ist neben dem Porendurchmesser vor allem der Wassergehalt entscheidend. Bei der Entwässerung werden die Grobporen, die bei Wassersättigung am meisten zum Wassertransport beitragen, zuerst entleert. Dadurch nimmt die Wasserleitfähigkeit ab, denn die Wasserbewegung wird auf immer kleinere Poren bis hin zu den Adsorptionswasserfilmen beschränkt.

Bei *völliger* Wassersättigung zeigen demzufolge Böden mit hohem Anteil an groben Primärporen sowie Böden mit ausgeprägtem Sekundärgefüge die höchste Wasserleitfähigkeit und leisten damit einen höheren Beitrag zur Grundwasserneubildung (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989).

Sande:  $K_f$ -Wert 5 cm/h

Tone:  $K_f$ -Wert < 0,5 cm/h (SCHRÖDER 1984)

Das bedeutet, daß bei Böden mit hohem Grobporenanteil, wie Sandböden, die Wasserleitfähigkeit bei, bzw. nach der Entwässerung sehr schnell absinkt. Bei Schluffböden mit höherem Anteil an Mittelporen nimmt die Wasserleitfähigkeit erst bei höherer Wasserspannung ab, während Tonböden auch bei stärkerer Austrocknung bzw. höherer Wasserspannung aufgrund ihres im Vergleich zu anderen Böden hohen Wassergehalts noch größere Wasserleitfähigkeit zeigen (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989).

Einen weiteren Beitrag zur Wasserbewegung liefert der kapillare Aufstieg. Darunter wird der Wasseraufstieg vom Grund- oder Stauwasserspiegel entgegen der Schwerkraft verstanden. Zum kapillaren Aufstieg kommt es infolge Wasserentzugs durch Pflanzen oder durch Evaporation der Bodenoberfläche (SCHRÖDER 1984)

Die Evaporation oder Verdunstung an der Bodenoberfläche führt dazu, daß aus tieferen Schichten zum Ausgleich Wasser nachgeliefert wird. Dabei kann es infolge starker Austrocknung insbesondere bei Böden mit hohem Grobporenanteil zu einer erheblichen Verminderung der Wasserleitfähigkeit kommen, so daß die auch die Verdunstung erheblich eingeschränkt bzw. eingestellt wird.

Bei ton- und schluffreichen Böden, ist aufgrund des höheren Feinporenanteils der kapillare Aufstieg und damit der Wassernachschub aus tieferen Schichten während eines längeren Zeitraums möglich. Aus diesem Grund ist auch die verdunstete Wassermenge bei diesen Böden höher, wie beispielsweise bei Sandböden, so daß hier auch die Grundwasserneubildung geringer ausfällt (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989)

Die Wasserversorgung der Pflanzen erfolgt über die Wurzeln, weshalb der effektive Wurzelraum der Pflanzen von großer Bedeutung ist. Die den Pflanzen innerhalb des effektiven Wurzelraums zur Verfügung stehende Wassermenge liegt im Bereich zwischen Feldkapazität und dem Permanenten Welkepunkt. Sie wird als *nutzbare Feldkapazität (nFK)* bezeichnet. Unter dem *Permanenten Welkepunkt (PWP)* versteht man den Wassergehalt des Bodens, bei dem die meisten Pflanzen auch bei wassergesättigter Luft ihre Turgeszenz nicht wiedergewinnen (SCHRÖDER 1984). Dies tritt dann ein, wenn das Bodenwasser unter einer Wasserspannung von  $pF \approx 4,2$  steht und damit die Saugkraft der Wurzeln übersteigt.

Die nutzbare Feldkapazität steht den Pflanzen jedoch nur dann zur Verfügung, wenn zu Beginn der Vegetationsperiode die Feldkapazität erreicht ist. Die Möglichkeit der Wurzeln zur Wasseraufnahme, sinkt mit abnehmender Wassernachlieferung und damit steigender Wasserspannung. Dies wirkt sich insbesondere bei Sandböden sehr ungünstig auf die Pflanzen aus. Da wie bereits angesprochen die Wasserleitfähigkeit bei schluffigen und tonigen Böden unter abnehmendem Wassergehalt weniger schnell sinkt als bei Sandböden, ergibt sich daraus eine

bessere Wasserversorgung. Je geringer die ungesättigte Wasserleitfähigkeit ist, desto geringer ist für die Pflanzen die Möglichkeit zur Ausnutzung des verfügbaren Wassers (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989)

Bodenart	mittlerer effektiver Wurzelraum bei Getreide	pflanzenverfügbare Bodenwassermenge
Grobsand	5 dm	30 mm
Mittelsand	6 dm	55 mm
Feinsand	7 dm	80 mm
lehmiger Sand	7 dm	115 mm
schluffiger Sand	8 dm	140 mm
lehmiger Schluff	11 dm	220 mm
sandiger Lehm	9 dm	155 mm
schluffiger Lehm	10 dm	190 mm
toniger Lehm	10 dm	165 mm
lehmiger/schluffiger Ton	10 dm	140 mm

**Tab. IV-4.1: Übersicht über die pflanzenverfügbare Wassermenge in Abhängigkeit von der Bodenart (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989)**

BRECHTEL (1984) kommt zum Schluß, daß für die Verwendung zur biologisch-technischen Rekultivierung stark sandige Lehme sowie schluffig-sandige Lehme die besten Voraussetzungen bieten. Sie verfügen mit 18-20 l/ m<sup>2</sup> pro dm über die höchste nFK, gelten als gut durchwurzelbar und bieten in der Regel ein ordentliches Nährstoffangebot. Ungünstiger sind in diesem Zusammenhang Bodenarten wie Sande, tonige Lehme, sowie Tone zu bezeichnen. Während die Sande über eine niedrige nFK sowie geringe Nährstoffreserven verfügen, sind Lehme und Tone i.d.R. nährstoffreich, schwer durchwurzelbar und verfügen durch einen hohen Totwasseranteil über keine zu hohe nutzbare Feldkapazität.

Aufgrund ihrer verzögerten Infiltration treten bei Tonböden verstärkt Staumerkmale auf, die zu einem verstärkten Oberflächenabfluß führen können. Bei letzterem ist die Gefahr von Erosionsschädigungen nicht mehr auszuschließen.

## 4.4 Einflüsse der Vegetation

Eine Vegetationsdecke ist in der Lage, Teile des Niederschlags aufzufangen und zwischenspeichern. Dieser Vorgang, auch Interzeption genannt, führt zu einer Vergleichmäßigung des Niederschlags am Boden, da hohe rain-drop-impacts (Prallwirkung der Regentropfen) abgepuffert werden. Über die Abführung des Niederschlags in Form des Stammabflusses wird einer Verschlammung und Verdichtung, aber auch Erosion des Oberbodens vorgebeugt. Bei Beregnungsexperimenten wurde festgestellt, daß pro Einzelregen bei Bäumen mit folgenden maximalen Interzeptionskapazitäten gerechnet werden kann: Buche 5-6 mm (Winter < 5 mm); Fichte 10-12 mm (ganzjährig). Im Vergleich hierzu liegen die Werte von Gräsern bei 1-1,5 mm (Brechtel 1984).

Der während der Interzeption ablaufenden Evaporation, der Interzeptionsverdunstung, wird große Bedeutung beigemessen, da sich durch ihren Abzug vom Gesamtniederschlag der Nettoniederschlag der Deckschicht errechnet. Eine hohe Interzeptionsverdunstung ist v.a. im

Winterhalbjahr günstig (Nadelbäume, andere immergrüne Arten), da zu diesem Zeitpunkt kaum Bodenverdunstung oder Transpiration stattfindet. Dadurch kann die Infiltration in den Boden, mit der Gefahr einer Überschreitung der Feldkapazität und einem Abfluß in den Deponiekörper, eingeschränkt oder verhindert werden.

Mit entsprechenden Baumarten können, aufgrund der Interzeptionsverdunstung, Anteile des Niederschlags von der Deckschicht abgehalten werden. Bei Nadelbaumarten liegen die "abschöpfbaren Mengen" bei 30-40 % des Niederschlags, sommergrüne Laubbäumen erreichen ca. 20-35 % während und ca. 10-30 % außerhalb der Vegetationsperiode (BRECHTEL 1984). Diese Werte liegen etwas höher als diejenigen von ELLENBERG (1987), der mittlere Interzeptionsraten von 18,9 % für die Buche und 28,3 % für die Fichte, jeweils bezogen auf den Niederschlag, angibt.

Weitere Faktoren des Wasserhaushaltes sind die Bodenverdunstung (Evaporation) und die Transpiration. Die Bodenverdunstung wirkt bei vegetationslosen Flächen je nach Bodenart unterschiedlich tief (ca. 20-30cm). Verdunstungsverluste, die sich an der Oberfläche ergeben, können bei Böden mit höherem Feinanteil, aufgrund der besseren Wasserleitfähigkeit (vergl. Kap. 4.3), aus tieferen Schichten ausgeglichen werden.

Effektiver als die Bodenverdunstung ist die, bis in tiefe Profilschichten Wirkung zeigende, Transpiration der Pflanzen. Für Deponiedeckschichten sind hierbei Pflanzen mit hohem Wasserverbrauch und sogenannter "Pumpwirkung" von Interesse. Pflanzen mit starker Pumpwirkung, die auch auf Deponien gedeihen, sind Schwarzerle, Birke, Weiden, Pappeln, Spitz-/Berg-Ahorn, Esche, Holunder, sowie unter den krautigen Pflanzen Schilf, Engelwurz-Arten, Huflattich und (Stein-) Klee-Arten. Bei diesen Arten besteht in der Regel eine Beziehung zwischen Wasserverbrauch und raschem Wachstum (= Massenproduktion) (JÄGER u. WIEMER 1979).

Wichtig ist in diesem Zusammenhang sowohl die Mächtigkeit als auch die Homogenität der Deckschicht. Unter Homogenität wird an dieser Stelle eine gleichmäßige Nährstoffversorgung verstanden, da bei einem Nebeneinander oder Übereinander von nährstoffarmen und -reicheren Substraten die Durchwurzelung meist nur in den nährstoffreicheren stattfindet. Die Folgen wären vegetationsfreie Stellen oder z.B. Windwurfgefährdung bei flachwurzelnenden Pflanzen in einem geringmächtigen Oberboden. Weiterhin kann der Fall eintreten, daß Pflanzen an einem tiefgründigen Standort nur in einem geringmächtigen aber nährstoffreichen Oberboden wurzeln, weil sie keine physiologische Veranlassung haben in einen nährstoffärmeren Unterboden zu wurzeln. Dieser, insbesondere bei der Aufbringung mächtiger Deckschichten nicht zu unterschätzende, Aspekt steigert ebenfalls die Windwurfgefährdung (JÄGER u. WIEMER 1979).

Die Mächtigkeit der Abdeckung hängt in erster Linie von der beabsichtigten Rekultivierung ab. Dabei treten als maßgebliche Faktoren die Wurzeltiefe, Wasseransprüche sowie die Standfestigkeit in den Vordergrund. Nach JÄGER u. WIEMER (1979) können von Gehölzpflanzen, bei einem mittleren Bestandsalter (je nach Baumart von 30-50 bis 40-80 Jahre), durchschnittliche Schöpftiefen von 2,0-2,5 m (Eichen bis 3,5 m) erreicht werden.

Die Gesamtverdunstung hängt im wesentlichen von den o.g. Parametern ab. In Tab. IV- 4.2 und Abb. IV- 4.2 sind Rahmenwerte der jährlichen Gesamtverdunstung für verschiedene Landoberflächen und Vegetationsdecken dargestellt.

Landoberfläche Vegetationsdecke	Gesamtverdun- stung mm	Gesamtverdun- stung % v. N	Abflußhöhe mm	Abflußhöhe % v.N
Nackter Boden	265	40	398	60
Spärliche Vegetation	345	52	318	48
Ackerland	431	65	232	35
Grasland	497	75	166	25
Strauchvegetation	564	85	99	15
Laubwald <sup>(1)</sup>	579	87	84	13
Kiefernwald <sup>(1)</sup>	622	94	41	6
Eiche III, Gras <sup>(2)</sup>	657	99	6	1
Kiefer III, Gras <sup>(2)</sup>	690	104 <sup>(3)</sup>	0 <sup>(3)</sup>	0 <sup>(3)</sup>
Freie Wasserfläche <sup>(4)</sup>	713	108 <sup>(3)</sup>	0 <sup>(3)</sup>	0 <sup>(3)</sup>

(1) Mittel aller Altersklassen

(2) vergraste Altbestände

(3) Verdunstung höher als Niederschlag

(4) Berechnet als potentielle Verdunstung bei Albedo = 0,05 für Wasser

**Tab. IV- 4.2: Mittlere jährliche Gesamtverdunstung auf tiefgründiger Deckschicht aus Sand bis schwach sandigen Lehm, bei N= 663 mm /a (BRECHTEL 1984)**

Abb. IV- 4.2 gibt mit Maximum-, Mittel- und Minimumwerten die Klimaverhältnisse der alten Bundesländer an, wobei durch das Maximum eher aridere Gebiete, durch das Minimum eher humidere Gebiete und durch den Mittelwert die durchschnittlichen Verhältnisse charakterisiert werden. Weiterhin sind Einzelwerte neuerer Durchschnittsergebnisse aus langjährigen Lysimeterversuchen in Abhängigkeit des Niederschlags und der Bodenart dargestellt. Die durchgezogene Linie in der Abbildung ist der Versuch einer Abschätzung der mittleren Jahresgesamtverdunstung im Raum Frankfurt/M. und entspricht den Werten in Tab. IV- 4.2.

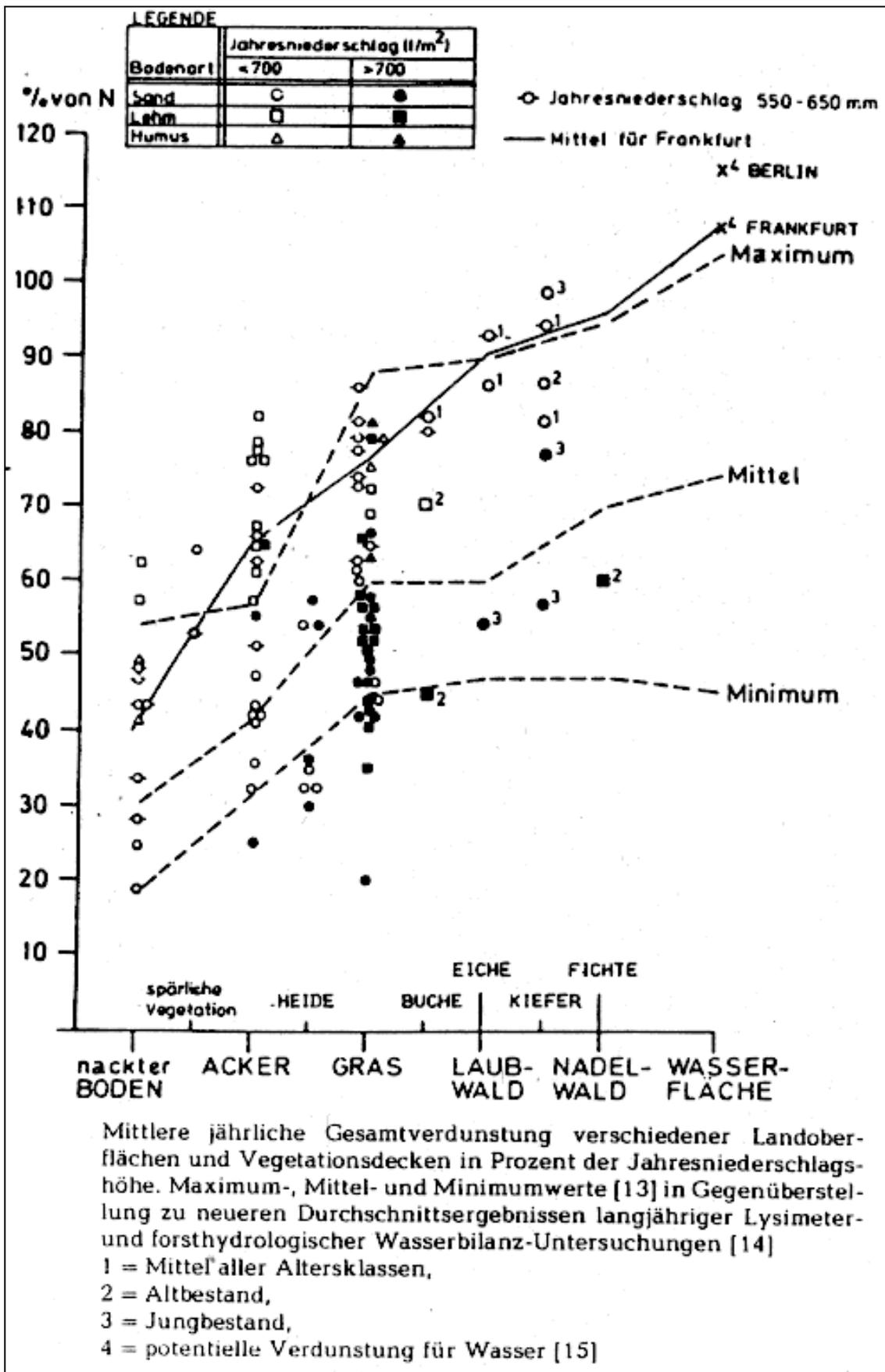


Abb. IV- 4.2: Mittlere jährliche Gesamtverdunstung auf tiefgründiger Deckschicht aus Sand bis schwach sandigen Lehm, bei N= 663 mm /a (BRECHTEL 1984)

Aus Abb. IV- 4.2 können nachstehende Folgerungen abgeleitet werden. Die ungünstigste Art der Deponieabdeckung ist der nackte Boden ohne Bewuchs, da je nach Klima und Bodenart nur 20-50% des Jahresniederschlages über die Bodenverdunstung ( $E_B$ ) zurückgehalten werden, wobei der Abfluß bei rund 400mm liegt. Verbessert werden die Werte schon durch eine spärliche Vegetationsdecke, da hierbei die Interzeptionsverdunstung ( $E_I$ ) und die Transpiration ( $T$ ) einsetzen. Höhere Verdunstungswerte werden durch dichte Dauervegetationsgesellschaften aus Gräsern, Sträuchern und Bäumen erreicht (40-90% von  $N$ ). Die entscheidenden Faktoren sind hierbei die hohe ganzjährige Interzeptionsverdunstung sowie die während der Vegetationsperiode äußerst effektive Transpiration. Die Transpirationsleistungen liegen wesentlich höher und reichen im Profil tiefer als es durch Kapillaraufstieg und Bodenverdunstung möglich wäre. Auf tiefgründigen Abdeckungen ist es daher möglich den Jahresabfluß auf 100 mm zu reduzieren. Falls es die klimatischen und edaphischen Voraussetzungen erlauben, kann unter einer Abdeckung mit kombiniertem Bewuchs aus einer Baumbestockung der Lichtbaumarten Traubeneiche (Tiefwurzler) und der wintergrünen Kiefer sowie der sich im Unterwuchs einstellenden Strauch- und Krautschicht der Abfluß noch weiter gesenkt oder im günstigsten Fall sogar ausgeschlossen werden (BRECHTEL 1984).

Auf die Frage, inwieweit eine derartige Pflanzendecke auf einer Deponien realisierbar ist, sei es in bezug auf Standortansprüche der einzelnen Pflanzen (Licht, Nährstoffe, Feuchte etc) oder der Morphologie von Deponien (steile Neigungen, Sickerwasseraustritte etc), wird in den Kapiteln 6.2.3 und 7.2.3 näher eingegangen werden.

## 5. Methodik zur Durchführung der Datenerhebung im Gelände

### 5.1 Geomorphologie

In der **Geomorphologie** "... steht die feinere Gestaltung der Erdoberflächenformen im Vordergrund der Betrachtung" (LESER et al 1987). Im Rahmen dieser Arbeit wird hierbei das Relief der Altablagerung selbst sowie der Bezug zur Umgebung untersucht. Entsprechend des geomorphologisch-geoökologischen Ansatzes wird vom "... Georelief als landschaftshaushaltlichen System ausgegangen ... wobei beim Ablauf geoökologischer Prozesse mit Stoffumsätzen auch die Weiterentwicklung der Formen erfolgt" (LESER et al 1987).

Unter diesen Aspekten wird versucht den derzeitigen Natur- und Stoffhaushalt darzustellen, sowie die Situation nach Aufbringung einer Oberflächenabdichtung abzuschätzen.

Die Aufnahme erfolgt nach der Geomorphologischen Kartieranleitung und verwendet die entsprechenden Bezeichnungen und Signaturen.

Bei der Kartierung im Gelände mußte auf exakte Einmessungen verzichtet werden. Dies liegt zum einen an der Kleinheit der Formen und zum anderen an der dichten Vegetation, die Peilungen teilweise nicht ermöglichte. Besonderen Wert wurde bei der Kartierung auf die Erfassung der Neigungsverhältnisse, von Vernässungszonen sowie vorhandener Erosionsformen gelegt.

### 5.2 Untersuchung der Deckschichten

Die Vorgehensweise zur Untersuchung der Deckschicht entspricht den Feldmethoden gemäß "*Bodenkundlicher Kartieranleitung*" (1982) sowie der "*Praktikumsanleitung zur Beschreibung, Deutung und ökologischen Bewertung von Böden*" (1990) des Instituts für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim

Die Aufnahmen der Deckschicht erfolgten unter Verwendung eines Pürckhauer-Bohrstocks mit Verlängerung für Bohrungen bis 2 m Tiefe, eines Hellige Feld-pH-Meters, 10 %-iger Salzsäure zur Carbonatbestimmung, der Munsell "Standard Soil Color Chart's" zur Bestimmung der Bodenfarbe sowie der o.g. Praktikumsanleitung der Universität Hohenheim.

Die Bestimmungen wurden anhand des Bohrstockinhaltes durchgeführt.

Die für die Fragestellung erforderlichen Kriterien Schichtmächtigkeit, Bodenart, Acidität, Carbonatgehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, können durch die angewendete Methode mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Für die Bestimmung der **Schichtmächtigkeiten** werden Unterschiede des Bohrstockinhaltes bezüglich Bodenart, Acidität, Carbonatgehalt und Bodenfarbe herangezogen.

Bezüglich der **Bodenfarbe**, die gemäß der Munsell "Standard Soil Color Chart's" vorgenommen wurde, können bei Böden Aussagen zu Bodeneigenschaften, Bodenentwicklung und Humusgehalt getroffen werden. Für die Deckschichten der zu untersuchenden Altablagerungen ist diesbezüglich der Aussagewert der Bodenfarbe jedoch als gering zu bewerten, da die Deckschicht erst Anfänge einer Bodenbildung zeigt und damit noch kaum Humusgehalte aufweist.

Die **Acidität** von Böden beeinflusst die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen und die Lebensbedingungen für Bodenlebewesen. In humiden Klimaten tritt infolge von Carbonatauswaschung und saurem Niederschlagswasser, dessen pH-Wert im Mittel bei 4,1 teilweise sogar unter 3 liegt, allmählich eine Bodenversauerung ein. Durch zu starke Versauerung verschlechtern sich die Lebensbedingungen der Organismen und die Nährstoffversorgung der Pflanzen, so daß dem Versauerungswiderstand bzw. der Pufferung eine wichtige Bedeutung zukommt. Die pH-Werte wurden mittels eines Hellige-pH-Meter im Gelände ermittelt.

Der **Carbonatgehalt** spielt bezüglich der Abpufferung ebenfalls eine wichtige Rolle, da hierdurch die sauren  $H^+$ -Ionen der Niederschläge unter Bildung von Hydrogencarbonat abgepuffert werden. Dies ist auch für die Pufferwirkung gegen den sauren Regen von Relevanz. Der Carbonatgehalt (Magnesium- und Calciumcarbonat) wurde mittels 10 %-iger Salzsäure und dem Bestimmungsschlüssel der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1982) ermittelt.

Die **Bodenart** oder Körnung gibt die Korngrößenzusammensetzung eines Bodens an. Hauptkorngrößenfraktionen sind der Grobboden mit Korndurchmessern  $> 2\text{mm}$  und der Feinboden mit Korngrößen  $< 2\text{mm}$ . Der Feinboden wird weiter in Sand, Schluff und Ton unterteilt, deren Gemische als Bodenarten bezeichnet werden. Die Bodenart ist für die Eigenschaften der Böden wie Durchwurzelungstiefe, Wasser-, Wärme- und Nährstoffhaushalt bestimmend und beeinflusst auch die Gefügebildung bzw. die Gefügestruktur, die wiederum auf die Bodeneigenschaften rückwirkt. Die Bestimmung der Bodenarten erfolgte anhand des Bestimmungsschlüssels PRAKTIKUMSANLEITUNG des INSTITUTS für BODENKUNDE und STANDORTSLEHRE der UNIVERSITÄT HOHENHEIM (1990).

Das **Gefüge** blieb bei der Untersuchung unberücksichtigt, da anhand des Bohrstockinhalts generell nur schwer ein Gefüge erkennbar ist. Profilgrabungen ergaben, daß das Material der Deckschicht durch Ausbaggerung, Transport und Einbau sein Aggregatgefüge verloren hat und damit eine ungegliederte Masse bildet, so daß das Gefüge als kohärent angesehen werden kann.

Die **Lagerungsdichte** kann über den Bohrstockinhalt nur schwer bestimmt werden, jedoch haben einzelne Aufgrabungen ergeben, daß für den Wurzelraum eine mittlere bis hohe, darunter eine eher hohe Lagerungsdichte angenommen werden kann. Für die Berechnungen von Feldkapazität und nutzbarer Feldkapazität wurden zwischen mittlerer und hoher Lagerungsdichte gemittelte Werte angenommen.

Die **Feldkapazität** wird über Bodenarten, Grobbodenanteile und Lagerungsdichte anhand der Tabelle der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1982) berechnet. Bei Böden wird die Feldkapazität auf einen Meter Tiefe errechnet, da dies für die Böden der Mittelbreiten in der Regel im Mittel die obere Grenze der durchschnittlichen Entwicklungstiefe darstellt.

Unter dem Aspekt des Wasserspeichervermögens der Deckschichten bezüglich zu erwartender Sickerwassermenge, wurde die Feldkapazität der Deckschicht auf ihre jeweilige Mächtigkeit bezogen, im Mittel also auf 2 m. Die nach der Berechnung vorgenommene Einstufung wurde anhand des Bestimmungsschlüssels PRAKTIKUMSANLEITUNG des INSTITUTS für BODENKUNDE und STANDORTSLEHRE der UNIVERSITÄT HOHENHEIM (1990) vorgenommen.

Die *nutzbare Feldkapazität* als Maß für die pflanzenverfügbare Wassermenge wurde durchgehend für eine Schichtmächtigkeit von 9 dm errechnet, die sich aus den Tabellen der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1982) unter Berücksichtigung der Bodenart und Lagerungsdichte ergibt. Die Bewertung erfolgte nach der PRAKTIKUMSANLEITUNG des INSTITUTS für BODENKUNDE und STANDORTSLEHRE der UNIVERSITÄT HOHENHEIM (1990).

Die Angaben zur *Wasserleitfähigkeit* sind in der Regel auf den wassergesättigten Boden bezogen. Für die Wasserleitfähigkeit sind Lagerungsdichte und auch Sekundärporenanteil entscheidend. Da die Berechnung der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1982) nur die Lagerungsdichte berücksichtigt, wurde diese aufgrund des sehr geringen Sekundärporenanteils als hoch eingestuft. Dieser Zustand der gesättigten Wasserleitfähigkeit stellt in unseren Klimabedingungen jedoch eher die Ausnahme dar, da in terrestrischen Böden eine teilweise Wassersättigung weitaus häufiger ist als eine vollständige (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989).

Die Bodenarten und der Humusgehalt geben Aufschluß über die Nährstoffversorgung, die sich bezüglich der Pflanzennährstoffe  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  in der *Kationenaustauschkapazität* ausdrückt. Damit ist gleichzeitig die Möglichkeit der Pufferung saurer Niederschläge verbunden, weshalb auch die Austauschkapazitäten in zweifacher Hinsicht von Interesse sind. Da über die Bestimmung der Bodenarten im Gelände keine Aussage zum Schichtaufbau der Tonminerale, die wesentlich am Kationenaustausch beteiligt sind, gemacht werden kann, sind die Angaben zur Austauschkapazität pauschalisiert.

Die außerhalb der Deponie für die Umgebung gemachten Aufnahmen beziehen für die Bestimmung von Feldkapazität und nutzbarer Feldkapazität auch die Humusgehalte, die durch die Bodenfarbe ermittelt werden, mit ein.

### 5.3 Vegetationskundliche Untersuchungen an der Deponie

Im Rahmen der standorts- und **vegetationskundlichen Untersuchungen** behandelt dieses Kapitel den vegetationspezifischen Teil.

Das Ziel der Arbeit ist neben den statistischen Werten, wie Artenzahl, seltene Arten, Gründe für Pflanzenschädigungen, v.a. Aussagen über das ökologische Verhalten der Pflanzen im Vergleich der einzelnen Deponieflächen untereinander sowie im Vergleich zur Umgebung und den Vegetationsaufnahmen von KONOLD u. ZELTNER (1981) zu machen.

An dieser Stelle ist anzumerken, daß die vorliegende Arbeit keine spezielle vegetationskundliche Untersuchung ist. Es findet v.a. aus zeitlichen Gründen nur eine begrenzte Anzahl an Untersuchungsmethoden Anwendung, wodurch sich allerdings durchaus generelle Aussagen

ableiten lassen. Unter diesen Vorbedingungen wird z.B. auf eine möglichst vollständige Erfassung von Pflanzenarten auf den einzelnen Teilflächen sowie der Umgebung Wert gelegt, dem Deckungsgrad der einzelnen Art dagegen kaum Beachtung geschenkt. Da aufgrund dieser Vorgehensweise der Deckungsgrad der einzelnen Arten nicht in die Berechnung der ökologischen Faktoren eingeht, muß aufgrund fehlender Wichtung eine gewisse Unschärfe der Ergebnisse in Kauf genommen werden.

Die floristischen Aufnahmen wurden für die Kraut- und Baumschicht gemeinsam durchgeführt, doch geht nur die Krautschicht in die Berechnungen ein. Der Grund für diese Vorgehensweise liegt in der Tatsache, daß Bäume und der Unterwuchs in unterschiedlichen "Umwelten" leben, wobei die Krautschicht für das ökologische Verhalten aussagekräftiger ist.

Für die Berechnungen wird weiterhin die Umgebung als Gesamtheit betrachtet und als Mittelwert dargestellt. Die jeweilige Unterteilung in einzelne Teilgesellschaften hätte den gesetzten Aufwand und Rahmen dieser Arbeit bei weitem überschritten. Unter Beachtung der sich ergebenden Verzerrungen stellt die Einbeziehung des gemittelten Umgebungswertes, der an entsprechender Stelle noch zu verbalisieren ist, dennoch einen akzeptablen Bezugswert dar.

Die sich durch die allgemeine Vorgehensweise ergebenden Unschärfen sind, aufgrund der eher allgemeinen Fragestellung nach der Eingliederung der Deponie in den bestehenden Landschaftshaushalt, von untergeordneter Bedeutung und können daher als vertretbar angesehen werden.

### ***Ökologisches Verhalten von Pflanzenarten***

Ein ökologisches Verhalten von Pflanzen läßt sich dadurch ableiten, daß an bestimmten Standorten auch immer spezifische Pflanzen auftreten. Anders formuliert heißt dies, daß einzelne Pflanzenarten meist an Standorten mit annähernd gleichen Faktorenkombinationen vorkommen, weil sie dort über einen Konkurrenzvorteil gegenüber anderen Arten verfügen (nach ELLENBERG 1950). Die Einteilung der unterschiedlichen Standortbedingungen sowie die daraus resultierende Zuordnung von Zeigerwerten wurde von ELLENBERG (1950) erstmalig durchgeführt. Der Grundgedanke dieser Arbeitsweise liegt im Konkurrenzverhalten der Pflanzen, wodurch sich für die einzelne Art ein *ökologisches Optimum* ergibt, bei dem sie das größte Durchsetzungsvermögen aufweist. In Monokulturen oder im Experiment werden von den einzelnen Pflanzenarten, aufgrund des *physiologischen Optimums*, teilweise völlig andere Standortbedingungen bevorzugt.

Mit Hilfe der Zeigerwerte nach ELLENBERG werden im Rahmen der Untersuchung Aussagen über die relative Beleuchtungsstärke (L), die Bodenfeuchtigkeit (F), die Bodenreaktion (R), sowie die Versorgung mit Mineralstickstoff (N) getätigt. Zusätzlich sind in den Artenlisten Informationen über die Lebensform (Leb.) sowie die Salzverträglichkeit vorhanden. Die Einteilung erfolgt für L, R und N in einer 9-stufigen, für F in einer 12-stufigen Skala. Die Lebensform und Salzzahl werden durch Symbole dargestellt.

Allgemein gilt:

x bedeutet indifferentes Verhalten, d.h. weite Amplitude oder ungleiches Verhalten in verschiedenen Gegenden

? bezeichnet ungeklärtes Verhalten über das selbst Mutmaßungen nicht möglich sind

Sämtliche Angaben beziehen sich auf das westliche Mitteleuropa.

*L = Lichtzahl*

1. Tiefschattenpflanze
2. zwischen 1 u. 3 stehend
3. Schattenpflanze
4. zwischen 3 u. 5 stehend
5. Halbschattenpflanze, nur selten im vollen Licht
6. zwischen 5 u. 7 stehend
7. Halblichtpflanze, meist bei vollem Licht, aber auch Schatten
8. Lichtpflanze
9. Volllichtpflanze, nur an voll bestrahlten Plätzen

*F = Feuchtezahl*

1. Starktrockniszeiger, an oftmals austrocknenden Stellen lebensfähig und auf trockene Standorte beschränkt
2. zwischen 1 u. 3 stehend
3. Trockniszeiger, auf trockenen Böden häufiger vorkommend als auf frischen; auf feuchten Böden fehlend
4. zwischen 3 u. 5 stehend
5. Frischezeiger, Schwergewicht auf mittelfeuchten Böden, auf nassen sowie auf öfters austrocknenden Böden fehlend
6. zwischen 5 u. 7 stehend
7. Feuchtezeiger, Schwergewicht auf gut durchfeuchteten, aber nicht nassen Böden
8. zwischen 7 u. 9 stehend
9. Nässezeiger, Schwergewicht auf oft durchnäßten (luftarmen) Böden
10. Wechsellnässezeiger, Wasserpflanze die längere Zeit ohne Wasserbedeckung erträgt
11. Wasserpflanze
12. Unterwasserpflanze

*R = Reaktionszahl*

1. Starksäurezeiger, niemals auf schwachsauren bis alkalischen Böden vorkommend
2. zwischen 1 u. 3 stehend
3. Säurezeiger, Schwergewicht auf sauren Böden, aber bis in den neutralen Bereich
4. zwischen 3 u. 5 stehend
5. Mäßigsäurezeiger, auf stark sauren wie auf neutralen bis alkalischen Böden selten
6. zwischen 5 u. 7 stehend
7. Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger, niemals auf stark sauren Böden
8. zwischen 7 u. 9 stehend, d.h. meist auf Kalkweisend
9. Basen- u. Kalkzeiger, stets auf kalkreichen Böden

*N = Stickstoffzahl*

1. Stickstoffärmste Standorte anzeigend
2. zwischen 1 u. 3 stehend
3. auf stickstoffarmen Standorten häufiger als auf mittelmäßigen bis reichen
4. zwischen 3 u. 5 stehend
5. mäßig stickstoffreiche Standorte anzeigend, an armen und reichen seltener
6. zwischen 5 u. 7 stehend
7. an stickstoffreichen Standorten häufiger als an armen bis mittelmäßigen
8. ausgesprochener Stickstoffzeiger
- 1 an übermäßig stickstoffreichen Standorten konzentriert (Viehlägerpflanze, Verschmutzungszeiger)

*Salzzahl*

I salzertragend, aber an salzarmen Standorten häufiger als an salzreichen

II meist salzzeigend

III stets salzzeigend

*Leb. = Lebensform*

- P Phanerophyt  
 N Nanophanerophyt, Strauch oder Kleinbaum, meist 0,5-5m hoch  
 Z holziger Chamaephyt, Zwergstrauch, nur selten über 0,5 m hoch werdend  
 C krautiger Chamaephyt, Knospen wie bei Z meist über der Erde und im Schneeschutz überwintert  
 H Hemikryptophyt, Überwinterungsknospen nahe der Erdoberfläche  
 G Geophyt, Überwinterungsknospen unter der Erdoberfläche, meist mit Speicherorganen  
 T Therophyt, kurzlebig und ungünstige Zeiten als Samen überdauernd  
 ep Epiphyt, auf der Oberfläche lebender Pflanzen wachsend (i.d.R. nicht parasitierend)  
 li Liane, sich auf andere Pflanzen stützend, aber im Boden wurzelnd

**Tab. IV- 5.1: Ökologisches Verhalten - Zeichenerklärung (ELLENBERG 1969; geändert und gekürzt)**

## 5.4 Begehung mit Gasspürgerät FID

Der **Flammen-Ionisations-Detektor (FID)** wurde ursprünglich zur Erkundung von Leckagen an städtischen Gasnetzen verwendet. Die Messungen konnten dadurch kostengünstig, ohne Sondierungen, direkt an der Geländeoberfläche durchgeführt werden.

Das tragbare Gerät saugt mittels einer Pumpe Gasproben an und analysiert sie auf Kohlenwasserstoffe. Das *Meßprinzip* basiert dabei auf dem Nachweis von Ionen, die bei der Verbrennung organischer Moleküle durch thermische Ionisation entstehen. Im Gerät wird eine "Wasserstoff-Flamme" mit einem Brenngemisch aus 40% H<sub>2</sub> und 60% N sowie dem in der Gasprobe enthaltenen Sauerstoff erzeugt. Diese "Wasserstoff-Flamme" weist eine geringe elektrische Leitfähigkeit auf, die unter dem Zutritt von kohlenwasserstoffhaltigem Gas stark ansteigt. Dabei ändert sich der Ionenstrom annähernd proportional zur Zahl der C-Atome im Molekül pro Zeiteinheit. Mit dem FID sind Gaskonzentrationen > 1ppm KW nachweisbar.

Bei Untersuchungen über Gasemissionen an Deponien und Altablagerungen bestehen in der Regel Probleme bei deren Erfassung und Quantifizierung. Bereits die Suche nach einem re-

präsentativen Probeort gestaltet sich als äußerst schwierig. Innerhalb kleinster Bereiche können stark unterschiedliche Meßergebnisse auftreten, was zum einen an Bodenmerkmalen der Deckschicht, wie dem Porenvolumen und der Bodenfeuchte, zum anderen an allgemeinen klimatischen Faktoren, wie dem Luftdruck, der Temperatur und den Windverhältnissen, liegt. Aufgrund dieser Inhomogenitäten ist es nötig, zuerst eine möglichst umfassende Aufnahme der Oberfläche durchzuführen, die darauf aufbauend an einigen Stellen durch Schlagen von Mes-sonden gezielt vertieft werden kann.

Durch eine Begehung mit dem Gasspürgerät FID können innerhalb eines Rasters Aussagen über Emissionsstellen mit ungefähren Konzentrationen gemacht werden. Angaben über Frachten sind dagegen nicht möglich. Hierfür sind dann die entsprechenden Stellen, z.B. Risse, Deponieböschungen, Sickerwasserkanäle und Schächte, mit weitergehenden Gasmessungen, und Gasanalysen zu beproben. Eine Möglichkeit hierfür ist die sogenannte Gasbox (Lemberger Box) (LFU 1992).

Die Gasmessungen mit dem Gasspürgerät sind nur bei trockenem Untergrund sinnvoll, da nach Niederschlagsereignissen die Gasdiffusion erheblich beeinträchtigt bzw. unmöglich ist.

Die Einteilung der gemessenen Konzentrationen, die unter Einbeziehung mehrerer Literaturangaben (LFU 1992 ; WEBER 1990) erfolgte, wurde wie folgt vorgenommen:

*30-50 ppm*

*geringe Emissionen*

*50-100 ppm*

*mittlere Emissionen*

*100-1000 ppm*

*hohe Emissionen*

*1000-3000 ppm*

*außergewöhnlich hohe Emissionen*

## 5.5 Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem "HELP"- Computermodell

Mit dem von der USEPA entwickelten "HELP"- Modell (**Hydrologic Evaluation of Land-fill Performance**) kann der Wasserhaushalt der Deckschichten und damit der Anteil der Niederschläge, der als Perkulationswasser in den Deponiekörper gelangt, berechnet werden.

Die Computersimulation wird anhand der für die Altablagerungen "Federlesmahd" und "Hintere Halde" erhobenen geomorphologischen und bodenkundlichen Daten durchgeführt. Eine detaillierte Einführung in die Grundlagen des "HELP"- Programms wird in Teilbericht II gegeben.

Die Simulation an den beiden Standorten wurde mit der Version HELP 1.0 durchgeführt, wobei für die Simulation die mittleren täglichen Niederschläge sowie die durchschnittlichen monatlichen Temperaturen und Einstrahlungswerte der Jahre 1990-1992 der Wetterstation von Stuttgart-Hohenheim verwendet wurden. Die täglichen Temperatur- und Einstrahlungswerte standen erst unmittelbar vor der Fertigstellung der Studie zur Verfügung, so daß die Berechnungen nicht mit der Version HELP 2.0 durchgeführt werden konnten.

Das Programm bearbeitet pro Deponie jeweils nur einen Datensatz. Dies ist bei den in ihrem morphologischen Aufbau relativ homogenen Deponien der USA ausreichend, macht es aber für die beiden in sich sehr unterschiedlich reliefierten, zur Untersuchung herangezogenen

Altablagerungen notwendig, die Deponie in Teilflächen zu untergliedern. Das Programm behandelt jede dieser Teilflächen als eigenständige Deponie, weshalb auch die Ergebnisse sich nur auf die jeweilige Teilflächen beziehen und damit kein Gesamtergebnis für die Altablagerung berechnet werden kann.

Für die einzugebenden Bodenarten wurde für die einzelnen Teilflächen ein statistisch repräsentatives Bodenprofil, bestehend aus fünf Schichten, ermittelt. Die Schichten sind durchweg als nicht verdichtet angenommen, da die hierfür mit den Bodenarten korrelierenden, programmintern bei Verdichtung verwendeten,  $K_f$ -Werte extrem niedrig liegen, was auf den Einsatz von schwerem Gerät schließen läßt. Bei den beiden hier untersuchten Altablagerungen ist jedoch nicht von einem dermaßen hohen Grad an Verdichtung auszugehen. Die im Gelände ermittelten Bodenarten wurden in die US Soil Taxonomy, die auch innerhalb des Programms verwendet wird, übertragen.

Die oberste Schicht des Profils wird programmintern ausgegliedert und aufgrund ihrer stärkeren Durchwurzelung mit einem im Vergleich zu den tieferliegenden Schichten relativ hohen  $K_f$ -Wert belegt.

Bei den beiden Altablagerungen wurde die oberste Schicht mit 10cm, die zweite Schicht mit 40 cm und die drei folgenden mit je 50 cm Mächtigkeit angenommen.

Die Evaporation und die Transpiration werden über die vorhandene Vegetationsdecke berechnet, wobei das Programm mehrere Varianten unterschiedlicher Qualitäten der Grasbedeckung zur Auswahl vorgibt, jedoch Baumbewuchs nicht berücksichtigt. Für die auf beiden Altablagerungen bestehenden Baumpflanzungen wurde deshalb ersatzweise die beste Grasbedeckung (excellent grass) gewählt.

Für den die Evapotranspiration maßgeblich beeinflussenden Blattflächenindex LAI (**L**ea**f** **A**rea **I**ndex) wurden ebenfalls die im Programm vorgegebenen Werte für die jeweilige Grasbedeckung übernommen.

Aufgrund der in den USA meist vorherrschenden flachen Deponien, geht die Hangexposition nicht in die Berechnungen mit ein. Die "HELP"1.0-Version macht es jedoch über die Eingabe der Einstrahlung möglich, durch eine Einstrahlungsminderung für Nordhänge und eine Einstrahlungserhöhung für Südhänge die Exposition für Hangneigungen bis 30 % miteinzubeziehen. Damit ist eine differenziertere Berechnung der Evaporation und der Transpiration möglich.

Das "HELP"-Modell bietet neben der Berechnung der aus der Deckschicht perkolierenden Wassermenge auch die Möglichkeit der Simulation des Wasserrückhaltes durch eine Oberflächenabdichtung. Für die Simulation an den beiden Altablagerungen wurde eine mineralische Oberflächenabdichtung gemäß TA Siedlungsabfall der Deponieklasse I gewählt. Zwar wird für die Abdeckung ehemaliger Hausmülldeponien eine Oberflächenabdichtung der Deponieklasse II gefordert, jedoch können die in der TA-Siedlungsabfall unter 11.2.1 h beschriebenen Ausnahmekriterien auch auf die beiden Altablagerungen angewendet werden. Da bei Deponien mit geringerem Gefahrenpotential aufgrund finanzieller Überlegungen vermutlich auch mineralische Oberflächenabdichtungen zur Diskussion stehen, erscheint es sinnvoll, die Simulation anhand einer mineralischen Abdichtung vorzunehmen. Bei der Simulation mit einer

Kombinationsdichtung gemäß Deponieklasse II der TA Siedlungsabfall kann generell von einer nur sehr geringen Perkolation ausgegangen werden. In der Realität muß allerdings auch bei dieser Art der Abdichtung mit bis zu 5-10 % Perkolation gerechnet werden

In der Version HELP 1.0 wird die Höhe der Perkolation als derjenige Teil des Niederschlags angenommen, der weder evaporiert noch transpiert wird. Dabei bleiben die Speicherkapazitäten der Deckschicht, die die Perkolation von Niederschlagswasser in den Deponiekörper verringern, nur ungenügend berücksichtigt.

In Version 1.0 liegen für die Interzeptionsverdunstung keine Formeln zur Berechnung vor, so daß zu vermuten ist, daß, da es sich bei der im Programm vorgegebenen Vegetation ausschließlich um Grasbedeckung handelt, die Interzeption nicht in die Berechnungen mit eingeht.

## **6. Altablagerung "Federlesmahd"**

### **6.1 Allgemeine Charakterisierung des Untersuchungsgebietes**

#### **6.1.1 Lage und naturräumliche Einordnung**

Die für die Studie zur Untersuchung herangezogene Altablagerung "Federlesmahd" befindet sich im Landkreis Esslingen (Baden-Württemberg), südwestlich der Stadt Leinfelden-Echterdingen.

Landschaftlich ist das Gebiet den nördlichen Ausläufern der Höhenzüge des Schönbuchs, die nach Osten hin zur Filderhochfläche abbrechen, zuzuordnen. Westlich setzt sich das Waldgebiet des Schönbuchs, unterbrochen von Siedlungen und Rodungen, fort.

Ca. 400 m westlich der "Federlesmahd" hat sich der in die Aich entwässernde Reichenbach in die Keuperschichten des Schönbuchs eingeschnitten und das landschaftlich reizvolle Siebenmühlental ausgebildet.

Die Deponie wurde im Waldgebiet der Stadt Echterdingen, am Nordwesthang des Gewanns Federlesmahd, direkt an den Hang gelehnt angelegt. Morphologisch ist sie durch ihre Haldenform als anthropogene Aufschüttung erkennbar. Insbesondere der von der Straße aus sichtbare, mit Gräsern bewachsene, Erddeponieteil fällt im umgebenden Wald als Fremdkörper auf. Der mit Hausmüll verfüllte Teil der Federlesmahd ist in weiten Bereichen mit Bäumen bepflanzt, was insbesondere während der Vegetationsperiode zu einer optischen Eingliederung in das Waldgebiet beiträgt.

Den höchsten Punkt des Gebietes um die Deponie, bildet die östlich der Ablagerung gelegene Riesenschanze (Keltische Viereckschanze) mit 494,6 mNN. Der tiefste Punkt liegt im Tal des Reichenbachs bei 390 mNN. Die Deponie liegt zwischen 460 und 480 mNN hoch.

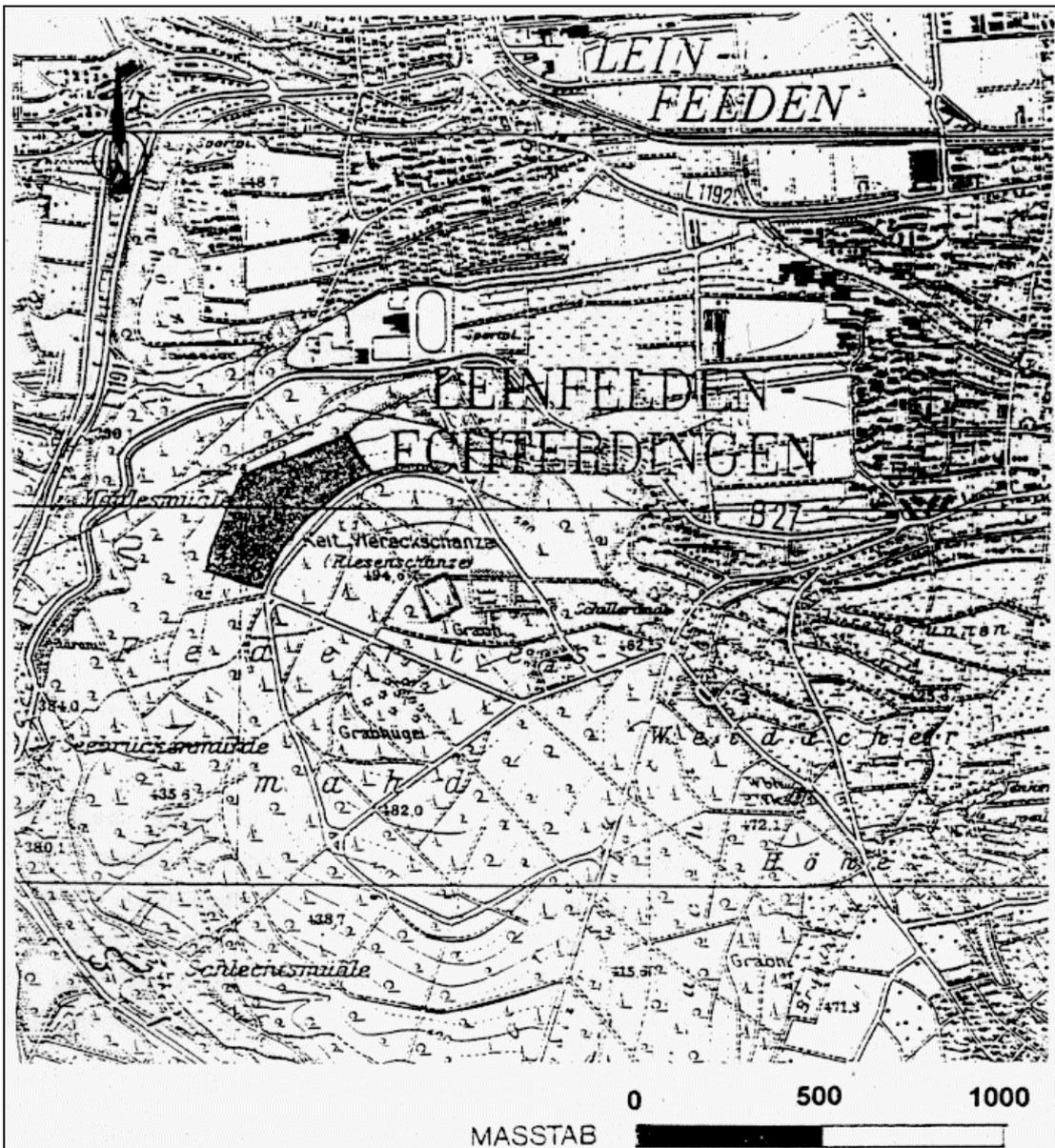


Abb. IV- 6.1: Lage der Altablagung "Federlesmahd"

### 6.1.2 Lage zu Ortschaften und Verkehrsanbindung

Der ehemaligen Deponie mit ca. 250 m Abstand am nächsten gelegen, ist das südliche Wohngebiet von Leinfelden. An dieses schließt nach Süden ein Sportzentrum mit Tennisplätzen und Spielmöglichkeiten für Kinder an, das durch die alte B 27 begrenzt wird. Auf der gegenüberliegenden Seite dieser Straße (alte B 27) befindet sich die Zufahrt zur Altablagung Federlesmahd.

Die Altablagung ist über die alte B27 gut an das Verkehrsnetz angeschlossen. Die alte B 27 war bis zum Bau der neuen B 27 Hauptverbindungsstraße in Richtung Tübingen. Heute stellt die gut ausgebaute alte B 27 vor allem eine Ortsverbindungsstraße von Leinfelden-Echterdingen über Waldenbuch und Steinenbronn nach Tübingen mit allenfalls regionaler Bedeutung, die kaum vom überregionalen Schwerlastverkehr benutzt wird, dar.

Das Deponiegelände ist von teilweise asphaltierten oder geschotterten Forst- und Wanderwegen umgeben und wird selbst von einem nur auf kurzer Strecke asphaltierten Weg, der in eine als Feldweg angelegte Berme übergeht, durchzogen. Die ehemalige Zufahrt zur Deponie ist durch das Anlegen von Parkplätzen für Ausflügler verschmälert worden.

### 6.1.3 Nutzung der ehemaligen Deponie und Umgebung

Das Gebiet des Schönbuschs um das ehemalige Deponiegelände stellt insbesondere für die Bevölkerung von Leinfelden-Echterdingen und Musberg ein wichtiges Naherholungsgebiet dar. Der östlich der Deponiebegrenzung hangaufwärts verlaufende und von Spaziergängern und Radfahrern vielbenutzte Weg, führt zur Keltischen Viereckschanze, sowie zu einer Blockhütte mit angeschlossenen großem Grillplatz.

Trotz teilweiser Einzäunung des Deponieareals wird dieses von Rehen und Wildschweinen als ein Teil des umgebenden Waldes genutzt. Damit in Zusammenhang stehen die auf der ehemaligen Deponie und der unmittelbaren Umgebung angelegten Hochsitze, die das Gebiet als Jagdrevier ausweisen.

### 6.1.4 Geologie

Der Untergrund dieser an einen Hang angelehnten Altablagerung wird im nordwestlichen, tiefer gelegenen Teil bis in die oberen südöstlichen Hangbereiche von den Knollenmergeln (*Mittlerer Keuper, km 5*) gebildet. Im obersten Hangabschnitt der Deponie streichen in einem schmalen Bereich die Schichten des Oberen Keupers, des Räts, aus, die im Randbereich der Deponie von den Schichten des Schwarzen Jura *alpha 1 (Hettangium, he 1)* überlagert werden. Unter den Knollenmergeln liegen die Schichten des Stubensandsteins (*Mittlerer Keuper, km 4*) dessen oberste Schicht von der Tonsteinserie der 4. Hangendletten gebildet wird.

Die Knollenmergel, bestehend aus Tonsteinen und Tonmergelsteinen, können aufgrund unterschiedlicher Färbung in drei Gesteinsserien unterteilt werden, wobei die mittlere Serie zahlreiche Kalkknollenlagen aufweist. Die Mächtigkeit der Knollenmergel wird für das Blattgebiet mit 30-35 m angegeben. Geomorphologisch bilden sie hauptsächlich flachere, konkave Hangböschungen .

Das hohe Quell- und Schrumpfvermögen der Tone der Knollenmergel bedingt ihre starke Rutschungsneigung. Ein zur Prüfung der Eignung des Geländes erstelltes *Gutachten* (AKTEN-EINSICHT AMT FÜR WASSER, BODEN, LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993) weist ausdrücklich auf diese Schwierigkeiten hin. Um zu vermeiden, daß bei einer zu hohen Auflast durch den Müll die Scherfestigkeit des Gesteins überschritten wird, sollte laut Gutachter die Auffüllhöhe auf 3-4 m beschränkt werden, wobei auch diese geringe Auffüllhöhe bereits kleinere Rutschungen auslösen könnte.

Im Rahmen des Gutachtens wurden zur Ermittlung der Mächtigkeit der Knollenmergel am Deponiefuß Schürfgruben angelegt, die ergaben, daß der Übergang Knollenmergel zu Stubensandstein bei mehr als 3,8 m Tiefe liegt. Hier konnten neben den Verwitterungslehmen der Knollenmergel auch Lehme mit Anteilen von Sandsteinen aus dem Hangschutt festgestellt werden. Des weiteren wurden Wasseraustritte aus den Knollenmergeln beobachtet (AKTEN-

EINSICHT AMT FÜR WASSER, BODEN, LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993), die vermutlich auf die Kalksteinlagen in den Knollenmergeln zurückzuführen sind.

Aufgrund der Schichtmächtigkeit und den Eigenschaften der Knollenmergel wurden im Gutachten keine Bedenken bezüglich einer möglichen Verunreinigung des Grundwassers erhoben.

Ein zweites geologisches Gutachten (AKTENEINSICHT AMT FÜR WASSER, BODEN, LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993), das sich auf eine mögliche Auffüllhöhe einer im Auffüllbereich gelegenen Geländemulde bezieht, gibt für den Muldenbereich eine maximale Schütthöhe von 10-11 m an.

Die Stubensandsteinschichten mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 55-60 m im Blattgebiet bilden Wechselfolgen von feinkörnigen bis kiesigen Sandsteinlagen mit zwischengeschalteten z.T. feinsandigen Tonsteinen.

Die im südöstlichen Deponiebereich anstehenden Gesteine des Oberen Keupers, deren Mächtigkeit zwischen 2,5-5 m liegt, setzen sich in der Regel aus feinkörnigen Quarzsandsteinen sowie darüberlagernden Tonsteinen zusammen. Stellenweise treten Tonsteine mit Sandsteinplättchen in den Vordergrund.

Die darüber abgelagerten Schichten des Schwarzen Jura *alpha* 1 weisen Wechsellagerungen von glimmerhaltigen Tonsteinen und Kalkstein- bzw. Kalksandsteinbänken auf.

Die oberen außerhalb der Deponie gelegenen Hangbereiche sowie das Plateau werden vom Schwarzen Jura *alpha* 2 gebildet, dessen z.T. feinsandige Tonsteine sich mit Kalkstein- und Kalksandsteinbänken abwechseln. Die im Windschatten gelegenen südlich und südöstlich an das Plateau anschließenden Hangbereiche sind von Lößlehm überlagert (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7320 BÖBLINGEN 1984 u. ERLÄUTERUNGEN 1985).

## 6.1.5 Hydrogeologie

Die mehrfachen Gesteinswechsel führen zu einer Vertikalschichtung in grundwasserleitende und gering- bzw. -nichtleitende Gesteine. Zu den letztgenannten sind die Knollenmergel zu zählen, die als sog. Aquicluden zwar viel Wasser aufnehmen aber nur schwer weiterleiten. Dennoch tritt, wie aus den Schürfgruben am Deponiefuß erkennbar (vergl. Kap .6.1.4) aus den weniger tonreichen, vermutlich kalkreicheren Lagen Schichtwasser aus. Inwieweit die Kalksteinlagen der Knollenmergel zu Wasserzutritten in den Deponiekörper führen, ist nicht geklärt.

Das höchstgelegene Aquifersystem bilden die Kalkstein- und Kalksandsteinbänke des Schwarzen Jura *alpha* 1 und 2, wobei die Wasserwegsamkeit sich auf das Kluftsystem beschränkt. Bei eher sandiger Ausprägung des Oberen Keupers bildet dieser einen Kluftgrundwasserleiter, dessen Sohlschicht die Knollenmergel darstellen.

Die damit verbundenen verschiedenen Quellniveaus weisen viele kleinere Quellaustritte mit jedoch nur geringen Schüttungen auf, die aufgrund der hohen Durchlässigkeit und geringen

Speicherkapazitäten der Grundwasserleiter starken Schwankungen unterworfen sind (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7320 BÖBLINGEN 1984 u. ERLÄUTERUNGEN 1985).

Ob dadurch im südöstlichen Deponiebereich Wasserzutritt stattfindet, kann nicht mehr festgestellt werden, da das im Vorfeld der Deponieplanung erstellte geologische Gutachten dazu keine Angaben macht.

Der die Knollenmergel unterlagernde Stubensandstein ist jedoch ein wichtiger Grundwasserleiter, der infolge seiner Wechsellagerungen von grob- bis mittelkörnigen Sandsteinen und Tonsteinen mehrere Grundwasserstockwerke ausbildet. Auch hier beschränkt sich die Wasserwegsamkeit vorwiegend auf das Kluftsystem, während Porengrundwasser nur bei grobkörnigen Sandsteinpartien auftritt. Die Problematik des Kluftgrundwassers besteht darin, daß das versickernde bzw. versinkende Wasser keinerlei Filterwirkung erfährt, wodurch die Gefahr der Grundwasserverunreinigung erhöht wird.

Eine von RAUSCH (1980) aufgestellte langjährige mittlere Wasserbilanz für das Einzugsgebiet der Aich zeigt für 747 mm Niederschlag einen Abfluß von 194 mm und eine Verdunstung von 552 mm. Eine von WUNDT (1957) errechnete mittlere jährliche Grundwasserneubildung beträgt 82 mm, entsprechend 2,6 l/s\*km<sup>2</sup>. Untersuchungen von AGSTER zeigen, unabhängig von den geologischen Schichten, für die Keuper-Lias-Flächen des Schönbuchs Grundwasserabflüsse von 85-120 mm bzw. 2,7 bis 3,8 l/s km<sup>2</sup>. Die Grundwassererneuerung erfolgt zu ca. 70% im Winterhalbjahr (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7320 BÖBLINGEN 1984 u. ERLÄUTERUNGEN 1985).

## 6.1.6 Tektonik

Das Kartenblatt Böblingen weist mehrere Verwerfungszonen auf. Ca. 250 m östlich des ehemaligen Deponiebereichs liegt die Vaihinger Verwerfung mit einer parallel dazu verlaufenden Störung. Diese bilden die SW-Begrenzung des Fildergrabens.

Ebenfalls dem Fildergraben-Bruchsystem gehören die NW-SE streichende Hildrizhausener Verwerfung und die Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone an. Das Erdbeben vom 20. Februar 1961, dessen Epizentrum zwischen Steinenbronn und Waldenbuch lag, zeigt, daß die Störungen auch heute noch Aktivität aufweisen (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7320 BÖBLINGEN 1984 u. ERLÄUTERUNGEN 1985).

## 6.1.7 Böden

Die Böden der Umgebung der Altablagerung spiegeln die vielfältigen Unterschiede in der Zusammensetzung der Gesteine und der Schichten wider.

Die sich aus den Sandsteinen des Keupers entwickelnden **Braunerden** und **podsolierten Braunerden** zeichnen sich durch geringe Nährstoffgehalte, gute Durchlüftung, jedoch eine eher ungünstige Wasserversorgung aus. Die Podsolierung ist mit einer Versauerung des Bodens verbunden, weshalb diese Böden Standorte für Pflanzen mit geringen Nährstoffansprüchen bilden. Dies zeigt sich auch daran, daß durch die flächenmäßige Verbreitung der Stubensandsteinschichten das Waldgebiet erhalten blieb und nicht für die landwirtschaftliche Nutzung gerodet wurde.

Sind die oberen Stubensandsteinlagen, wie für Teile des Kartengebietes angegeben, als tonreiche Lehme ausgebildet, ähneln die Bodentypen denen der Knollenmergel.

Die Knollenmergel, in welche die Ablagerung eingebettet wurde, sind sehr tonreich, weshalb es zur Ausbildung von **Pelosolen** und **Braunerde-Pelosolen** kommt. Infolge Sekundärgefügebildung durch Quellung bei Wasserzutritt, die einen Luftmangel für die Pflanzen bedeutet und Schrumpfung mit Reißbildung bei Austrocknung, die Wurzelschäden verursacht, stellen die Pelosole trotz hohen Nährstoffgehaltes einen für Pflanzen schwierigen Standort dar. Daher werden Pelosole in der Regel kaum ackerbaulich genutzt und sind auch hier im Knollenmergelgebiet mit Wald bestanden.

Die südlich und südöstlich an den Standort anschließenden, im Hangbereich vorkommenden Böden, sind durch eiszeitliche Solifluktionsprozesse geprägt. Dabei wurden die meist sandigen Schichten der obersten Hangbereiche über den oft tonigeren Schichten der unteren Hangpartien abgelagert. Vor allem in Schatthanglagen blieben diese Deckschichten erhalten und bilden meist **Braunerden** aus Fließerden. Die südöstlich der Deponie gelegene Verebnung wird von den sandigen Angulatschichten gebildet, die zu feinsandigen z.T sehr **sauren Braunerden** verwittern, deren Waldbestand in der Krautschicht auch entsprechende Säurezeiger aufweisen (ERLÄUTERUNGEN ZUR GEOLOGISCHEN KARTE BLATT 7320 1985), (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1988).

## 6.1.8 Klima

In Baden-Württemberg wechseln die Jahresmittel der Temperaturen sowie Niederschlagshöhe und -verteilung häufig innerhalb kurzer Distanzen

Die mittlere jährliche Niederschlagssumme wird mit 650-750 mm angegeben. In die Vegetationszeit von April bis Oktober entfallen mit 400-450 mm (LANDESARCHIVDIREKTION BADEN-WÜRTTEMBERG 1977) ca. 60% der Niederschläge; 40% entfallen auf das Winterhalbjahr.

Für das Einzugsgebiet der Aich liegt die von RAUSCH (1980) durch Klimadaten (1954-1980) ermittelte Niederschlagsmenge bei 747 mm (ERLÄUTERUNGEN ZUR GEOLOGISCHEN KARTE BLATT 7320 1985).

Angaben der Meßstation Hohenheim zufolge beträgt die mittlere monatliche Temperatur, gemessen von 1931-1960, 8,5°C (LANDESARCHIVDIREKTION BADEN-WÜRTTEMBERG 1977).

Das Gebiet weist an 160 Tagen im Jahr ein Tagesmittel der Temperatur von >10°C auf und wird als sommerwarm mit mittleren Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode charakterisiert.

Die Windgeschwindigkeiten, der bevorzugt aus westlicher Richtung kommenden Winde, liegen mit ca. 2-3 m/s relativ niedrig. Die lebhaftesten Winde treten von Oktober bis April auf und werden in den anderen Monaten nur bei Durchzug von Gewitterfronten übertroffen (LAND BADEN-WÜRTTEMBERG 1977).

## 6.1.9 Vegetation

Die natürliche Vegetation Mitteleuropas ist von den sogenannten Edellaubwäldern (Fagetalia) geprägt. In diesen Wäldern herrschen die Baumarten Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Spitzahorn (*Acer platanoides*) Hainbuche (*Carpinus betulus*), Buche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*), Traubeneiche (*Quercus petraea*) Esche (*Fraxinus excelsior*), Winterlinde (*Tilia cordata*) und Ulme (*Ulmus minor*) vor. Für das Untersuchungsgebiet sind von zahlreichen Gesellschaften die Buchen- und Buchenmischwälder (Fagion) sowie die hainbuchenreichen Laubmischwälder (Carpinion) von Bedeutung. Standortkundlich meiden erstere Trockenheit und Bodennässe, während letztere sich an diesen Orten, aufgrund physiologischer Schwächen der ansonsten konkurrenzstärksten Buche, durchsetzen können (ELLENBERG 1987).

Die Umgebung der Ablagerung läßt sich vegetationskundlich in mehrere Einheiten gliedern. Diese entsprechen in etwa den geologisch/geomorphologischen Gegebenheiten, wie der Hochfläche im Hettangium, den Hangbereichen im Knollenmergel und dem Stubensandstein.

Die überwiegend vorherrschende Waldgesellschaft, v.a. im Bereich der Hettangium-Hochfläche ist ein "**Hainsimsen-Buchenwald**" in seiner ärmeren Ausprägung (*Luzulo fagetum*). Dieser Waldtyp, aus der Gruppe der Moderbuchenwälder, tritt vorwiegend auf armen Braunerden, Parabraunerden auf und ist durch eine relative Artenarmut gekennzeichnet. Begünstigend für das Auftreten dieses Waldtyps sind trockene kleinklimatische Verhältnisse an Süd- und Westhängen, sowie ein durch lange Niederwaldwirtschaft degradiertes Baumbestand (OBERDORFER 1974). Die straucharmen Hallenwälder der Moderbuchenwälder gelten, bedingt durch die Lichtökologie der Buchen, als die wichtigste klimabedingte Waldgesellschaft in unserer Region. Hierbei sind für das Gedeihen der Buche die Tiefgründigkeit und Textur, weniger die chemischen Eigenschaften, der Böden von Bedeutung (ELLENBERG 1987). Die Charakterarten der Krautschicht sind *Luzula luzuloides* (Hainsimse) und *Calamagrostis arundinacea* (Wald-Reitgras), andere auftretende Arten sind *Veronica officinalis* (Wald-Ehrenpreis), *Avellana flexuosa* (Drahtschmiele), *Oxalis acetosella* (Sauerklee) sowie *Vaccinium myrtillus* (Heidelbeere). Alle genannten Arten gelten als anspruchslos, wobei *Vaccinium myrtillus* als Säurezeiger gilt.

Im Bereich der flach ansteigenden Hänge des Knollenmergels ändert sich die Waldgesellschaft. Auf den schweren Lehm- und Tonböden, die durch zeitweise Vernässung und Austrocknung einen unausgeglichenen Luft- und Wasserhaushalt aufweisen, wird die Konkurrenzkraft der Buche gehemmt. Die Buche tritt zwar regelmäßig auf, ist aber an diesem edaphisch bedingten Sonderstandort den Eichen und Hainbuchen unterlegen (ELLENBERG 1987). Der hier vorkommende "**Waldlabkraut-Traubeneichen-Hainbuchenwald**" weist eine vielfältige Baumschicht (Traubeneiche, Hainbuche, Buche, Vogelkirsche, Feldahorn, Winterlinde) eine Strauchschicht (Hasel, Pfaffenhütchen, Elsbeere) und eine Krautschicht mit nicht zu trockenen Arten auf. Als Kennarten gelten *Potentilla sterilis* (Erdbeerfingerkraut), *Convallaria majalis* (Maiglöckchen), *Carex montana* (Berg-Segge), *Ranunculus auricomus* (Gold-Hahnenfuß), *Galium sylvaticum* (Waldlabkraut), sowie *Dactylus glomerata* (Wald-Knäulgras) OBERDORFER 1974).

Lokal kann in feuchteren, mehr oder weniger basenarmen Tälchen auch der **"Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwald"** auftreten. Kennzeichnend für diesen Waldtyp sind die mehr Feuchtigkeit ertragende Stieleiche (als Traubeneiche) und die Große Sternmiere (*Stellaria holostea*), sowie die Differentialarten *Hedera helix* (Efeu) und *Poa nemoralis* (Hain-Rispengras) (OBERNDORFER 1974)

Örtlich kann im weiteren Bereich der Altablagerung, bedingt durch die rasch wechselnden Gesteins- und Bodentypen, auf anspruchsvolleren, gut mit Nährstoffen versorgten Böden (Braunerden, Pararendzinen) auch ein **"Braunmull-Buchenwald"** (*Galium fagetum* = Waldmeister-Buchenwald) auftreten. Floristisch ist er durch eine nur noch geringe Anzahl an Kalkzeigern, sowie dem verstärkten Auftreten säure- und trockenheitsertragender Arten gekennzeichnet. In der Baumschicht fehlen Eichen, dagegen sind Esche, Berg- und Spitzahorn öfter vorhanden. In der Krautschicht überwiegen Arten mit mittleren Ansprüchen, wie *Milium effusum* (Flattergras), *Dryopteris filix-mas* (Wurmfarn). Als Arten mit höheren Ansprüchen treten *Galium odoratum* (Waldmeister), und *Melica nutans* (Nickendes Perlgras) hinzu.

Die Vegetation im Bereich der Altablagerung ist durch die Waldwirtschaft anthropogen überprägt. Hierbei gilt allerdings, daß die Kulturlandschaft nicht allzu sehr von den natürlichen Waldgesellschaften abweicht. Nadelgehölz-Monokulturen sind im direkten Umfeld der Deponie eher die Seltenheit, treten aber immer wieder auf. Weite Bereiche der Hettangium-Hochfläche und besonders die Hangbereiche im Knollenmergel sind dagegen mit standörtlich angepaßten, naturnahen Waldgesellschaften bestockt, wobei das Artenspektrum der Fagetalia mit Buchen, Eichen, Hainbuchen, Ahorn, Eschen und Linden erhalten ist.

## 6.2 Beschreibung der Altablagerung

Die Deponie wurde 1969 auf der Gemarkung Echterdingen im Gemeindewald Gewann Federlesmahd (R = 35 10.000, H = 53 94.000) von den Gemeinden Echterdingen und Leinfelden in Betrieb genommen. Die Flächengröße betrug ca. 8,7 ha. Auf Antrag der Gemeinden wurde 1974 die Erweiterung der Deponie um ca. 4 ha genehmigt, so daß die Hausmülldeponie insgesamt eine Fläche von ca. 12,7 ha umfaßte. Im Zuge der Gemeindereform erfolgte eine Übernahme-Vereinbarung zwischen dem Landkreis Esslingen und der Gemeinde Echterdingen, so daß die Deponie bis zur Verfüllung 1979 als Kreismülldeponie betrieben wurde. Infolge der regen Bautätigkeit Ende der 70er Jahre wurden Kapazitäten zur Ablagerung von Bauschutt und Erdaushub erforderlich, weshalb eine nochmalige Erweiterung der Deponie um ca. 2,5 ha erfolgte. Diese Erddeponie wurde infolge Rückübertragung wiederum von der Stadt Leinfelden-Echterdingen betrieben.

Bezüglich der Müllmenge und -zusammensetzung können keine detaillierten Aussagen gemacht werden, da in den 70er Jahren üblicherweise weder Wiegevorrichtungen vorhanden waren noch genauere Erhebungen der Müllzusammensetzung erfolgten. Insgesamt kamen jedoch nachstehende Abfallarten zur Ablagerung:

- Hausmüll
- Gewerbeabfälle
- Sperrmüll
- Straßenkehrschutt

- Klärschlamm (Wassergehalt < 65%)
- Industrieschlämme
- Galvanikschlämme (Wassergehalt < 65%) nur bis zur Errichtung einer Zentraldeponie
- Erdaushub
- Bauschutt
- Altreifen
- Schrott

Die Abfälle wurden von Südwesten her in Teilabschnitten, die durch abschnittsweise Rodung des Waldes freigelegt wurden, abgelagert. Der Einbau in Kassettenbauweise erfolgte schichtweise von unten nach oben. Die Müllfahrzeuge wurden auf der Abkipfläche entladen, der Müll anschließend durch das Raupenfahrzeug zerkleinert und verdichtet, über die Kippkante geschoben und von der Raupe durch mehrmaliges Befahren zusätzlich verdichtet einplaniert. Die anfangs praktizierte Überkopfschüttung wurde zugunsten dieser hohlraumärmeren geordneten Ablagerung aufgegeben (freundl. mündl. Mittlg. BOXLER 1993).

Für die Genehmigung zur ersten Erweiterung 1974 erteilte das Landratsamt Esslingen unter anderen die Auflage, daß beim schichtweisen Einbau die maximale Schichtmächtigkeit nach Verdichtung 2 m betragen darf und die Schichten zur Vermeidung von Oberflächenbränden, Staub- und Papierverwehungen arbeitstäglich mit nichtbindigem Material wie z.B. Bauschutt abzudecken sind, wodurch eine Verdunstung aus dem Deponiekörper erhalten bleiben soll (AKTENEINSICHT AMT FÜR WASSER BODEN LUFT KIRCHHEIM u. Teck 1993). Im Deponiebetrieb wurde jedoch aus Gründen der Deponievolumenersparnis auf eine arbeitstägliche Abdeckung verzichtet (freundl. mündl. Mittlg. BOXLER 1993). Durch die Anschaffung eines Stampffußverdichters bzw. Kompaktors im Jahre 1975 kann davon ausgegangen werden, daß die Deponieerweiterung eine stärkere Verdichtung des Mülls aufweist.

Weitere Vorgaben durch das Landratsamt waren die Abgrenzung des talseitigen Deponierandes mit einem ca. 3m hohen Fußdamm und die Schaffung eines 20m breiten, von Bewuchs freizuhaltenden, Feuerschutzstreifens zum Wald hin. Der Fußdamm ist heute nur noch auf wenigen Metern im südwestlichen Teil der Altablagerung erkennbar.

Als Maßnahmen zur Entwässerung der Deponie wurden, noch vor Verfüllungsbeginn, die Zuläufe zu einer im Hangbereich gelegenen Geländemulde mit einer schotterumhüllten Drainleitung versehen. Der aus dieser Mulde kommende Graben wurde auf einer Länge von ca. 15 m mit Betonrohren verdohlt und führt ca. 100 m weit in offenem Gerinne durch das Waldgebiet zur alten B 27. Von dort werden die Sickerwässer über die öffentliche Dole zur Sammelkläranlage Reichenbachtal geführt. An der Dole werden auch die halbjährlichen Proben zur Untersuchung des Sickerwassers entnommen.

Die Sickerwässer aus dem Deponiekörper wurden bis April 1973 nicht gefaßt, sondern versickerten im Boden. Nachdem Sickerwasserproben vom Oktober 1971 eine starke organische Belastung ergaben, wurde am Deponiefuß eine Drainageleitung mit Kiesumhüllung gelegt. Die Sickerwässer wurden hier zusammengefaßt und laufen in den aus der Mulde kommenden Graben. Die Drainleitung ist heute nicht mehr funktionstüchtig, da Rutschungen im Hangbereich das Kiesbett fast auf der gesamten Länge des Deponiefusses zugeschüttet haben. Die letzte *Sickerwasseranalyse* vom Juli 1992, durchgeführt im Auftrag des Wasserwirtschafts-

amtes Kirchheim/Teck, besagen, daß die Werte des Sickerwassers *"noch die Anforderungen der Rahmenabwasser VwV Anhang 51 erfüllen. Es ist daher weiterhin die Einleitung des Sickerwassers in die öffentliche Kanalisation und von dort zusammen mit dem im Kanalnetz anfallenden Abwasser zwecks Reinigung in der Sammelkläranlage möglich und wird von hier aus als erforderlich angesehen"* ( AKTENEINSICHT AMT FÜR WASSER, BODEN, LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993). Bezüglich der Analysen ist jedoch darauf hinzuweisen, daß nicht die Sickerwasseraustritte auf der Deponie beprobt werden, sondern die in der Dole an der alten B 27 gefaßten. Bis zum Entnahmepunkt des Sickerwassers für die Analysen, werden diese auf ca. 100 m in einem Graben geführt, der auch durch den Stubensandstein des Keupers führt. Inwieweit sich hierdurch ein Durchsickern des Sickerwassers zum Grundwasser ergibt, ist an dieser Stelle nicht zu klären. Eine Beprobung der Sickerwasseraustrittsstellen auf der Deponie war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, ist jedoch generell zu empfehlen.

Ein für die Erweiterung zur Erddeponie erstelltes Gutachten vom Oktober 1979, berechnet das verfüllte Volumen auf ca. 2.190.000 m<sup>3</sup> (AKTENEINSICHT AMT FÜR WASSER, BODEN, LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993). Rechnet man diese Kubikmeter auf die gesamte Fläche der Hausmülldeponie um, liegt die durchschnittliche Auffüllhöhe bei 17 m pro m<sup>2</sup>. Damit wird die im geologischen Gutachten empfohlene Auffüllhöhe von 3-4 m (vergl. Kap. 6.1.4), die eine Standsicherheit der Deponie gerade noch gewährleistet, bei weitem überschritten.

Die Rekultivierung der Deponie wurde vor allem durch Gehölzpflanzungen mit *Acer platanoides*, *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Prunus avium*, *Robinia pseudoacacia*, *Tilia cordata* und *Tilia platyphyllos* durchgeführt. Dabei entwickelte sich insbesondere *Alnus glutinosa* als Rohbodenbesiedler sehr gut. Daneben waren auch die Wachstumsfortschritte von *Acer platanoides* und *Tilia cordata* zufriedenstellend. Auf Ansaaten wurde größtenteils und auf Anspritzungen vollständig verzichtet, um die spontane Vegetationsentwicklung zu fördern. Nur bei den stark erosionsgefährdeten Flächen wurde *Melilotus alba* angesät. Nach drei bis vier Jahren war die Vegetationsdecke auch ohne Ansaaten fast vollständig geschlossen ( freundl. mündl. Mittlg. ZELTNER 1993).

Die Rekultivierung des Erddeponieteils wurde vor allem mit verschiedenen Kleearten durchgeführt. Des weiteren wurden kleine Hügel aus Bauschutt aufgehäuft, um durch diese speziellen Standorte eine größere Pflanzenvielfalt zu schaffen (freundl. mündl. Mitteilg. PFEILSTICKER 1993).

## 6.3 Untersuchungen auf der Altablagerung

### 6.3.1 Geomorphologie

Die geomorphologischen und bodenkundlichen Untersuchungen wurden nur für den Teil der ehemaligen Hausmülldeponie durchgeführt. In die vegetationskundliche Untersuchung ist dagegen auch die Bauschuttdeponie mit einbezogen worden.

Aufgrund des Reliefs der ehemaligen Deponie wurde diese in vier Abschnitte unterteilt.

**I.** Der Hangbereich unterhalb der als Feldweg die Deponie durchziehenden breiten Berme mit Hangneigungen zwischen 28° und 10°

**II.** Der oberhalb dieser Berme zur Verebnung führende Hangbereich mit ca. 17° Neigung

**III.** Die Bermen, sowohl die breite Berme als auch die im Hangbereich I liegenden Bermen, die keine Neigung aufweisen

**IV.** Die Verebnungsfläche oberhalb des Hangbereichs II mit ca. 2° Neigung

Der Hangbereich I ist generell in zwei Abschnitte zu untergliedern. Im südlichen jüngeren Teil der Altablagerung, wurden aus deponietechnischen Gründen Bermen angelegt. Die Hangabschnitte zwischen den Bermen sind sehr steil, mit Neigungen von 28° und mehr. Diese hohe Reliefenergie im Zusammenhang mit den vorwiegend tonigen Bodenarten der Deckschicht hat zu Rutschungen geführt, wodurch sowohl die Hangbereiche als auch die Bermen abgerutscht sind. Letztere wurden auch teilweise von dem in Bewegung geratenen Material überlagert. Die Bermen sind oft nicht mehr zu erkennen und kaum von den Rutschungsloben zu unterscheiden. Der stark säbelartige Wuchs der Bäume dokumentiert ebenfalls den Materialversatz am Hang. Im älteren Teil des Hangbereichs I wurden keine Bermen angelegt. Die Hangneigungen dieses Hanges werden nach Norden hin in Richtung des älteren Deponieteils allmählich geringer.

Des Weiteren sind in diesem Deponieabschnitt mehrere Sickerwasseraustritte zu beobachten. Auf einer der Bermen im Hangbereich hat dies zur Anlage eines ca. 100 m<sup>2</sup> großen Sumpfes geführt. Von hier aus bewegt sich das Sickerwasser hangabwärts und bildet am Hangfuß eine langgestreckte Staunässefläche. Die anderen Sickerwasseraustritte stellen eher Vernässungszonen ohne Sickerwasserschüttung dar. Da sie auf verschiedenen Hangniveaus austreten, kann nicht von einer durchgehenden Stauschicht im Müllkörper ausgegangen werden.

Die Bermen im Hangbereich I sind zwischen 0,5 und 8 m breit und in weiten Teilen feucht bis naß. Die große als Weg angelegte Berme, die auf ihrer gesamten Länge zwischen 2 und 25 m breit ist, weist ebenfalls eine sumpftartige Vernässungszone von ca. 130 m<sup>2</sup> auf, die oberhalb der bereits angesprochenen liegt. Diese Vernässungszone ist auf eine Sickerwasserschüttung zurückzuführen, die starke Eisenoxidbildung zur Folge hat. Die beiden Sickerwassersümpfe zeichnen sich weniger durch Vegetationsausfall als vielmehr durch starkes Binsenwachstum aus.

Die Neigungsverhältnisse des Hangbereichs II sind mit durchschnittlich 17° mäßig steil. Hier fallen mehrere steinige und vegetationsarme Flächen mit starkem Gasgeruch auf. Zwei dieser Flächen sind ca. 250 m<sup>2</sup> groß. In diesem schmaleren Hangbereich, der zur Verebnungsfläche führt, sind keine Bermen angelegt worden. Auch hier sind Rutschungen zu beobachten, jedoch in kleinerem Ausmaß wie bei Hangbereich I.

Die Verebnung nimmt flächenmäßig einen recht großen Raum ein und wirkt aufgrund des Reliefs sehr homogen. Im südöstlichen randlichen Bereich treten durch die Zuleitung von Oberflächenwasser des darüberliegenden Hanges und des Wanderweges auf die Altablagerung, immer wieder Vernässungen auf.

## 6.3.2 Deckschicht

### 6.3.2.1 Allgemeines

Die Bodenbildung stellt einen dynamischen Prozeß dar, an dem verschiedene Faktoren beteiligt sind. Neben dem unterschiedlichen Mineralbestand des Ausgangsgesteins spielen Klima und damit auch verbunden Art und Intensität der Verwitterung eine wichtige Rolle. Daraus ergeben sich für die Pflanzen spezifische Wachstumsbedingungen, wobei die Pflanzen durch Lieferung von Streu und deren Zersetzung durch Tiere und Mikroorganismen wiederum auf die Bodenbildung rückwirken.

Bei den zur Abdeckung des Müllkörpers auf die Deponie aufgebrachten Deckschichten handelt es sich in der Regel um Erdaushub, einem Material, dessen bodenphysikalische Eigenschaften wie Luft- und Wasserkapazität, Aggregatstabilität und Porung durch Ausbaggerung, Transport, Wiederaufbringung und Verdichtung gestört bzw. zerstört wurden. Diese Deckschichten besitzen demnach positive Eigenschaften bezüglich der Speicherkapazität und damit der Sickerwasserverringerung, sind jedoch als Pflanzenstandort oft weniger gut geeignet.

Der Zeitraum seit Aufbringung des Materials, war für eine Bodenbildung zu kurz, so daß sich nur in den maximal oberen 5-10 cm ein gering humoser Horizont ausbilden konnte. Für eine vergleichende Betrachtung bezüglich der Deckschichten auf dem Deponiegelände und den Böden der Umgebung hinsichtlich ihrer Standortbedingung für Pflanzen, stellen folglich insbesondere die Bodenarten eine gemeinsame Basis dar, durch die zum großen Teil die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen, die Wasserleitfähigkeit sowie die Pufferkapazitäten bestimmt werden. Bezüglich der Sickerwasserminimierung sind insbesondere die Feldkapazität und der  $K_f$ -Wert, die ebenfalls weitgehend durch die Bodenarten bestimmt werden, von Bedeutung.

Die Catenen für die Bodenuntersuchungen wurden so angelegt, daß ein Teil der Catenen über alle vier Abschnitte der Deponie verläuft, während zusätzliche Catenen nur den Hangbereich I sowie die Bermen berücksichtigten.

Grund dafür sind die Rutschungen im Hangbereich I, die vermuten lassen, daß die Schichtmächtigkeit insbesondere in den steilen Hängen nur noch gering ist. Deshalb wurden die Bohrpunkte hier enger gesetzt als in den anderen Deponieabschnitten. Auch bei den Bermen war, aufgrund starken Müllgeruchs aus den Bohrlöchern, eine geringere Mächtigkeit der Deckschicht zu vermuten. Aus diesem Grund wurden die Bermen in die zusätzlichen Catenen des Hangbereichs I miteinbezogen.

Im Hangbereich II, der sich über 35-40 m erstreckt, wurde ein Bohrpunkt pro Catena für ausreichend betrachtet.

Bei der Verebnungsfläche, als wenig reliefierter Deponieabschnitt, schien es vertretbar die Bohrpunkte in größeren Abständen zu setzen.

Da die Bohrungen über eine Tiefe von zwei Metern durchgeführt wurden, war es innerhalb des zeitlichen Rahmens dieser Arbeit nicht möglich ein engeres Netz an Catenen anzulegen.

### 6.3.2.2 Beschreibung der Deckschichten

Die Beschreibung und Bewertung der Deckschichten wird aus Gründen der Übersichtlichkeit jeweils für die einzelnen Deponieabschnitte durchgeführt, um danach zu einer Gesamtbeurteilung der Altablagerung bezüglich der Deckschichten zu gelangen. Grundlage der Bewertung stellen die Profilaufnahmen dar.

Im **Hangbereich I** beträgt die Schichtmächtigkeit, entgegen der oben geäußerten Vermutung einer geringeren Deckschichtauflage in steileren Hanglagen, bei allen Bohrpunkten mindestens zwei Meter (ein Profil konnte aufgrund von Steinen nur bis 90 cm Tiefe gebohrt werden).

Die ermittelten *Bodenarten* bis ca. 70 cm variieren zwischen tonigem Lehm, sandigem Ton und schluffigem Lehm, der am häufigsten auftritt. Ab 90 cm überwiegt toniger Lehm. Sande und Schluffe treten hier in der Abdeckschicht nicht auf.

Bei fast der Hälfte der Bohrprofile treten Schichten mit Grobbodenanteilen von bis zu 30 % auf. Im unteren Hangbereich sind vereinzelt Vernässungen vor allem der tieferen Schichten zu bemerken, die jedoch nicht auf eine bestimmte Bodenart zurückzuführen sind.

Der *pH-Wert* variiert im Bereich von pH 6,5 bis pH 8,0, wobei sich jedoch keine spezifischen Flächen niedrigeren oder höheren Wertes herauskristallisieren. Der für die gesamte Fläche dieses Hangbereichs ermittelte durchschnittliche pH-Wert liegt bei 7,0.

Die für die einzelnen Schichten bestimmten und für das jeweils gesamte Bohrprofil errechneten *Carbonatgehalte* weisen eine Spannbreite von 0 % für carbonatfrei bis 25-50 % für sehr carbonatreich auf. Das Carbonat liegt in einzelnen Schichten zum Teil in Form kleiner Zementkonkretionen vor, die den pH-Wert der sie umgebenden Matrix vermutlich nur geringfügig beeinflussen. Auf die gesamte Fläche des Hangbereichs bezogen liegen die Carbonatgehalte zwischen 2 und 10 %.

Für den Hangbereich I ergeben sich für die Bohrpunkte mit 2 m Profiltiefe *Feldkapazitäten* von 632 l/ 2m<sup>3</sup> bis 845 l/ 2m<sup>3</sup>. Die auf den gesamten Hangbereich bezogene Feldkapazität liegt bei durchschnittlich 733 l/ 2m<sup>3</sup>. Ein Bohrprofil, das aufgrund einer unterlagernden Steinplatte nur bis 86 cm Tiefe gebohrt wurde, ging nicht in die Berechnung mit ein.

Für den Hangbereich I liegt die *nutzbare Feldkapazität* durchschnittlich bei 148 l/m<sup>3</sup> und kann damit, gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung, als hoch eingestuft werden, woraus eine für die Pflanzen gute Wasserversorgung resultiert.

Die *mittlere Wasserleitfähigkeit* bei wassergesättigtem Boden kann für die ermittelten Bodenarten aufgrund der Lagerungsdichte und der geringen Ausprägung von Sekundärporen als gering eingestuft werden. Die hierfür angegebenen *K<sub>f</sub>*-Werte liegen zwischen  $1,16 \cdot 10^{-7}$  und  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Auch für den **Hangbereich II** liegen die Schichtmächtigkeiten bei allen Bohrpunkten bei mindestens zwei Meter.

Über die *Bodenarten* können keine durchschnittlichen Angaben gemacht werden, da zum einen für eine statistische Auswertung zu wenige Bohrpunkte vorliegen und zum anderen die verschiedenen Bodenarten auf unterschiedliche Schichten verteilt sind. Neben schluffigen und tonigen Lehmen sowie sandigen Tonen treten immer wieder auch sandigere Schichten aus schluffigem Sand und stark sandigem Lehm in Erscheinung.

Bei den Bohrpunkten der Catenen 8 bis 13 fallen in diesem Hangbereich Schichten mit hohem Steingehalt auf. Vernässungen und Verdichtungen waren bei jeweils einem Bohrpunkt zu bemerken.

Die *pH-Werte* der Bohrpunkte der Catenen 8-13, die sich im etwas älteren Deponieteil befinden, liegen mit 6,4 bis 7,0 etwas niedriger als diejenigen der im jüngeren Deponiebereich gelegenen Catenen 1 bis 6 mit pH-Werten zwischen 7,3 und 7,5. Ob die Unterschiede in Zusammenhang mit einer einsetzenden Bodenbildung stehen oder ob das Ausgangsmaterial die Ursache bildet, ist hier nicht zu klären.

Die *Carbonatgehalte* reichen von 0,5-2 %, die als carbonatarm bezeichnet werden, bis zu carbonatreichen 10-25 %. Dabei zeigen auch Schichten mit niedrigerem pH-Wert Reaktionen auf die zur Bestimmung verwendete Salzsäure, weshalb auch hier, wie im Hangbereich I von Konkretionen auszugehen ist, die nur geringen oder keinen Einfluß auf das sie umgebende Bodenmaterial ausüben.

Der mittlere *Carbonatgehalt* der Hangfläche II liegt bei Werten von durchschnittlich 2-10 % und wird als carbonathaltig eingestuft.

Aufgrund der teilweise sandigeren Schichten, liegt die *Feldkapazität* mit 670 l/ 2m<sup>3</sup>, im Vergleich zu den lehmigeren Schichten des Hangbereich I, niedriger. Dabei sind erhebliche Schwankungen zwischen den einzelnen Bohrpunkten festzustellen. Die niedrigste Feldkapazität entspricht hier einem Wert von 560 l/ 2m<sup>3</sup>, der höchste einem Wert von 776,1 l/ 2m<sup>3</sup>.

Die *nutzbare Feldkapazität* liegt hier mit ca. 147 l/m<sup>3</sup> ähnlich hoch wie im Hangbereich I und stellt eine potentiell gute Wasserversorgung für die Pflanzen dar, wobei der niedrigste Wert 105 der höchste 172 l/ m<sup>3</sup> beträgt

Die *Wasserleitfähigkeit* im gesättigten Zustand ist für die meisten Schichten mit  $1,16 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s als gering zu beurteilen. Für die Schichten mit höherem Sandanteil liegen die Werte bei  $1,16 \cdot 10^{-6}$  bis  $4,63 \cdot 10^{-6}$  m/s und damit im Bereich mittlerer Leitfähigkeit.

Im ***Deponieabschnitt III***, den Bermen, ist die Schichtmächtigkeit von zwei Metern nicht durchgehend vorhanden. Bei zwei Bohrprofilen treten nach 120 cm bzw. nach 80 cm Müllfragmente - dem Geruch nach zu urteilen - auch Klärschlamm, in Erscheinung.

Bei den Bodenarten überwiegen bis ca. 80 cm deutlich die schluffigen Lehme, während in tieferen Schichten die tonigen Lehme vorherrschen. Sandige Lagen treten nur sehr vereinzelt auf und bleiben auf wenige Zentimeter beschränkt. An vier Bohrprofilen liegen ab ca.140 cm Tiefe Vernässungen vor, die im Bohrloch zu stehendem Wasser führten. Ca. 20 % der Bohrprofile zeigen höhere Steingehalte.

Die *pH-Werte* der Bohrpunkte liegen im Mittel bei 7,0, wobei sich die einzelnen Werte von pH 6,7 bis pH 7,3 erstrecken. Die unterschiedlichen pH-Werte sind nicht auf bestimmte Flächen bezogen, sondern treten verteilt auf und gehen vermutlich auf Unterschiede im Ausgangsmaterial zurück.

Die *Carbonatgehalte* reichen von < 0,5 % bis 10-25 % und weisen damit eine große Bandbreite auf. Wie bereits bei den anderen Deponieabschnitten korrelieren auch hier niedrige pH-Werte und niedrige Carbonatgehalte nicht, das bedeutet, daß bei pH-Werten von 6,7 dennoch Carbonat als kleine Splitter in die Matrix eingebettet sein können.

Bezüglich der *Feldkapazität* liegen für diesen Deponieabschnitt mit durchschnittlich 670 l/2m<sup>3</sup> ähnliche Werte wie für Deponieabschnitt II vor. Hier treten keine sandigen Schichten auf, sondern die Werte sind auf die beiden den Müllkörper erreichenden Bohrpunkte zurückzuführen. Insgesamt ist die Feldkapazität dieses Deponieabschnittes als sehr hoch einzustufen.

Mit 154 l/m<sup>3</sup> liegt die *nutzbare Feldkapazität* geringfügig höher wie diejenige der Deponieabschnitte I und II und weist eine entsprechend gute Wasserversorgung der Pflanzen auf.

Die *Wasserleitfähigkeit* für den gesättigten Boden liegt für den größten Bereich dieses Deponieabschnittes bei  $1,16 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s, was einer geringen Leitfähigkeit entspricht.

Für den **Deponieabschnitt IV**, die Verebnungsfläche, beträgt die Schichtmächtigkeit bei den Bohrpunkten, die bis zu 2 m Tiefe durchgeführt werden konnten, mindestens 2 m. Bei vier Bohrpunkten kann bezüglich der Schichtmächtigkeit keine Aussage gemacht werden, da hier aufgrund unterlagernder Steine kein vollständiger Bohrstockeinschlag möglich war.

Auffallend ist der starke Wechsel von trockenen und sehr feuchten Bohrprofilen. Die trockeneren können zum Teil auf höhere Sandgehalte der Deckschicht zurückgeführt werden, während die meist am südlichen Deponierand auftretenden feuchteren Profile vom Wasserzufluß auf die Deponie stammen (vergl. 6.3.1).

Die *Bodenarten* sind, ähnlich wie in Hangbereich II, sehr inhomogen und wechseln von schluffigen und tonigen Lehmen zu sandigen Tonen. Ab 140 cm überwiegen sandige Tone und schluffige Lehme. Stellenweise ergaben die Bohrpunkte durchgehende Profile mit sandigen Lehmen und dazwischenliegenden lehmigen Sanden.

Der *pH-Wert* liegt mit durchschnittlich 7,2 relativ hoch. Bis auf einen Wert von 6,9 liegen alle Werte zwischen pH 7 und pH 7,6.

Die *Carbonatgehalte* dagegen schwanken zwischen 0 und 10-25 %. Als Mittelwert dieses Deponieabschnittes können 4-7 % angegeben werden.

Für die *Feldkapazität* dieses Teils der ehemaligen Deponie ergeben sich Werte von 371,4 l/2m<sup>3</sup> bis 786 l/2m<sup>3</sup>. Diese sehr deutlichen Unterschiede gehen auf die Profile zurück, die aufgrund unterlagernder Steine nicht auf 2 m gebohrt werden konnten. Da nicht bekannt ist, ob die Steine nur eine kleine Störung im Profil bedeuten oder ob Bauschutt die tieferen Schichten aufbaut, ist eine Angabe über die durchschnittliche Feldkapazität nicht sinnvoll. Bezieht man die geringmächtigen Bohrpunkte nicht in die Berechnungen mit ein, dann liegt die Feldkapazität bei 706 l/2m<sup>3</sup>

Die *nutzbare Feldkapazität* entspricht mit  $146 \text{ l/m}^3$  den Werten der Deponieabschnitte I und II womit sich auch eine gleichfalls gute Wasserversorgung für die Pflanzen ergibt.

Bezüglich der *Wasserleitfähigkeit* können nur Aussagen hinsichtlich der auf 2 m durchgeführten Bohrpunkte gemacht werden, die sich jedoch mit  $K_f$  -Werten von  $1,16 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  von den anderen Deponieflächen nicht unterscheiden.

### 6.3.2.3 Zusammenfassende Beurteilung der Deckschicht

Die Deckschicht dieser Altablagerung zeigt sich mit Ausnahme weniger Bohrpunkte als mindestens 2 m mächtig und läßt vermuten, daß die Schichtmächtigkeit in weiten Teilen der Altablagerung mehr als 2 m beträgt. Für den Deponieabschnitt IV ist aufgrund des stellenweise hohen Steingehaltes, der keine 2 m Bohrung zuließ, keine Aussage über die tieferliegenden Bodenarten zu machen. Sollte unterlagernder Bauschutt hier die Abdeckung ersetzen, wäre dies eine Erklärung für die erhöhten Sickerwasseraustritte im Deponiegelände.

Bezüglich der *Bodenarten* selbst unterscheiden sich Altablagerung und Umgebung nur unwesentlich. Vorherrschend sind schluffige und tonige Lehme, vereinzelt auch sandige Tone. Sandige Tone und tonige Lehme sind in ihrer ökologischen Bewertung sehr ähnlich. Lediglich im südlich an die ehemalige Deponie angrenzenden Bereich treten sandigere Braunerden auf.

Die *bodenphysikalischen* und *chemischen Eigenschaften* der Bodenarten der Altablagerung und ihrer Umgebung unterscheiden sich zum Teil erheblich. Die eher hohe Lagerungsdichte, die fehlende Ausprägung eines Aggregatgefüges und der geringere Humusgehalt prägen die Deckschicht der ehemaligen Deponie. Damit verbunden ist ein teilweise beeinträchtigter Lufthaushalt, vor allem bei den tonigen Lehmen, da diese aufgrund ihres Tongehaltes zu Staunässebildung neigen. Der niedrigere Humusgehalt gegenüber den Böden der Umgebung, kann beispielsweise zu Stickstoffmangel und geringerer Phosphatversorgung der Pflanzen führen. Die Böden der Umgebung weisen für diese Pflanzennährstoffe aufgrund ihres Humusgehaltes im Oberboden in der Regel eine bessere Versorgung auf. Allerdings sind hier bei stärkerer Bodenversauerung durch Kationenaustausch Nährstoffkationen in den Untergrund verlagert worden, die den Pflanzen somit nicht mehr zur Verfügung stehen.

Die *nutzbare Feldkapazität* der Deckschicht der Altablagerung liegt insgesamt mittel bis hoch, was vor allem durch die schluffigen Lehme in den oberen Schichten verursacht wird, deren Mittelporen eine gute Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanzen darstellen. Die Böden der Umgebung weisen durchgehend eine geringe, in wenigen Fällen auch mittlere, nutzbare Feldkapazität auf. Eine hohe nutzbare Feldkapazität trägt bei einer Vegetationsdecke mit hohem Wasserverbrauch und damit hoher Transpirationsleistung zu einer Verminderung der versickernden Wassermenge bei (RENGER et al 1989).

Die Berechnungen der *Feldkapazitäten* über die Bodenarten haben durchgehend sehr hohe Werte ergeben. Insbesondere die tonigen Lehme, die fast auf der gesamten Deponiefläche die unteren Bereiche der Deckschichten bilden sowie die sandigen Tone sind dafür verantwortlich. Diese hohe Feldkapazität bedeutet, daß für die Niederschläge aufgrund des geringen Anteils an Grobporen eine hohe Speicherkapazität durch die Feinporen zur Verfügung steht. Kommt es infolge länger anhaltender Niederschläge zu einer Überschreitung der Feldkapazität, trägt die geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit der tonigen und schluffigen Lehme zu einer

verzögerten und niedrigeren Versickerung in den Deponiekörper bei, als dies beispielsweise bei einem sandigen Deckschichtsubstrat der Fall wäre.

Bezüglich der *Evaporation* sind die tonigen und schluffigen Lehme beim kapillaren Aufstieg gegenüber grobporigen Sanden begünstigt, da aufgrund des auch bei längerer Trockenheit noch relativ hohen Wassergehaltes die Wasserleitfähigkeit nicht so rasch sinkt wie bei sandigeren Böden und damit durch den kapillaren Aufstieg Wasser zur Verdunstung nachgeliefert wird. Für die Altablagerung bedeutet dies einen guten kapillaren Aufstieg, wobei durch die nordwestliche Exposition die *Evaporation* im Vergleich zu ebener Lage vermindert ist.

Die *pH-Werte* der Deckschicht bewegen sich weitgehend im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Im Gegensatz dazu liegen die Werte der Umgebung mit pH 6,0-4,0 wesentlich niedriger. Diese niedrigen pH-Werte sind auf die mit der Bodenentwicklung einhergehende allmähliche Bodenversauerung zurückzuführen, die insbesondere im südöstlich an die Deponie angrenzenden Gebiet durch das sandige Ausgangsmaterial noch gefördert wurde. Für die Böden der Umgebung bedeutet dies je nach Bodenacidität einen Verlust an basisch wirkenden, für die Nährstoffversorgung der Pflanzen wichtigen, austauschbaren Kationen. Der Verlust ist umso größer je höher die Niederschläge sind und je höher die Permeabilität der Böden ist. Für die sauren Braunerden, die sich aus sandigerem Ausgangsmaterial entwickelt haben, hat dies zur Folge, daß hier der Verlust an basischen Kationen besonders hoch ist. Da aufgrund der Bodenbildungsprozesse, das im Ausgangsmaterial vorhandene Carbonat bereits ausgewaschen ist, steht dieses auch nicht zur Abpufferung der sauren Wirkung der  $H^+$ -Ionen zur Verfügung. Diese werden dem Boden verstärkt durch industrielle Emissionen vor allem über die Niederschläge zugeführt. Für die waldbestandenen Böden der Umgebung bedeutet dies, einen immer stärkeren Verlust an Metallkationen. Dadurch nimmt auch die Möglichkeit der Neutralisation von Säuren weiter ab, so daß die natürliche Waldbodenversauerung ständig fortschreitet. Eine in den letzten Jahren angewendete Methode, die durch Emissionen verstärkte Versauerung auf-zuhalten und dem Waldsterben entgegenzuwirken, ist die Kalkung der Böden.

Mit der fortschreitenden Versauerung sind auch ungünstigere Lebensbedingungen für die streuabbauenden Lebewesen und Mikroorganismen verbunden, so daß die Nachlieferung der Metallkationen über die Streu nicht mehr für die Versorgung der Pflanzen ausreicht, worauf die Vegetation durch Änderung der Artenzusammensetzung reagiert.

Die pH-Werte der Deckschicht liegen fast durchgehend im neutralen bis basischen Bereich, mit Ausnahme weniger Bohrpunkte die schwach saure Reaktionen zeigen.

Die *Carbonatgehalte* variieren dagegen stärker. Einzelne Bohrpunkte zeigten kein Carbonat, andere dagegen sehr hohe Carbonatgehalte. Allerdings ist dies nicht flächenbezogen, so daß keine carbonathaltigen oder carbonatfreien Flächen ausgegrenzt werden können. Insgesamt betrachtet ist die Deckschicht als carbonathaltig einzustufen.

Durch den Carbonatgehalt und die hohe *Kationenaustauschkapazität* ist eine ausreichende Säureneutralisationskapazität vorhanden, um beispielsweise die  $H^+$ -Ionen des Niederschlags abzupuffern. Dadurch wird verhindert, daß saure Niederschläge, die bis zum Deponiekörper perkolieren, dort zu einer Lösung der gebundenen Schwermetalle führen.

Da die Kationenaustauschkapazität bei hohen pH-Werten und in Anwesenheit von  $\text{CaCO}_3$  am höchsten ist, sind die Voraussetzungen für eine gute Nährstoffversorgung der Pflanzen gegeben.

Zu einer Beeinträchtigung kann der zum Teil relativ hohe Carbonatgehalt der Deckschicht durch eine Phosphatadsorption führen, wodurch dieses den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht. Damit kann eine Unterversorgung der Pflanzen mit Phosphat verbunden sein.

Die nördlich an die ehemalige Deponie angrenzenden Pelosol-Braunerden, zeigen pH-Werte zwischen 5,0 und 6,0. Damit ist im Vergleich zu den südlich an die ehemalige Deponie anschließenden sauren sandigen Braunerden, eine bessere Nährstoffversorgung und reicheres Bodenleben vorhanden. Die starke Vernässung am nordwestlichen Rand der Altablagerung, die mit hohen Ausfällen an Eichen verbunden ist, ist weniger auf Inhaltsstoffe des Sickerwassers, als auf die zusätzliche Wassermenge zu der bereits vorhandenen zurückzuführen.

Die eher tonigen Bodenarten und der mäßig saure pH-Wert lassen bezüglich der Standortbedingungen eine Angleichung des Pflanzenbestandes der Deponie an denjenigen des Waldes zu.

### 6.3.3 Vegetationskundliche Untersuchungen an der Deponie

#### 6.3.3.1 Ökologisches Verhalten der Deponieflächen

	L	F	R	N
Fläche I	6,3	5,9	6,8	6,1
Freifläche	6,9	5,6	6,7	5,8
Flächen II+IV	6,2	5,9	6,4	6,2
Fläche III	7,0	5,8	7,0	5,5
Bauschuttdeponie	7,0	5,3	6,9	5,4
Umgebung	5,9	5,5	5,9	5,4
1981*	6,8	5,7	6,4	5,9

(\*nach KONOLD u. ZELTNER 1981)

**Tab. IV- 6.1: Durchschnittliche Zeigerwerte der Deponieflächen und der Umgebung**

Die bei der Charakterisierung der Flächen auftretenden ökologischen Zeigerwerte in eckiger Klammer werden in Tab. IV- 5.1 auf Seite 22f ausführlich erläutert.

**Fläche I**, der untere Hangbereich der Deponie, ist größtenteils mit einem geschlossenen Baumbestand aus Erlen, Linden und Spitzahorn bestockt. An Sickerwasseraustritten oder Rutschungsflächen lichtet der geschlossene Bestand teilweise stark auf.

Die durchschnittlichen Zeigerwerte charakterisieren die Vegetation von Fläche I als zwischen Halbschatten- und Halblichtpflanzen stehend, zwischen Frische- und Feuchtezeiger auf mittel bis gut durchfeuchteten Böden vorkommend, Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger, sowie zwischen mäßig stickstoffreich und an stickstoffreichen Standorten häufiger auftretend. Die Zeigerwerte der auftretenden Pflanzenarten liegen zwar meist im Bereich der Durchschnittswerte, doch treten auch absolute Extremwerte auf.

Die **Lichtzahl** ( $\bar{O}$  6,3) zeigt ein Spektrum von Schattenpflanze [3] *Asarum europaeum* (Haselwurz) bis Lichtpflanze [8] *Festuca pratensis* (Wiesen-Schwengel) oder gar die Volllichtpflanze [9] *Glyceria maxima* (Wasser-Schwaden).

Die **Feuchtezahl** ( $\bar{O}$  5,9) liegt mit der Masse zwischen [4] und [8], wobei die Extreme der Trockniszeiger [3] *Euphorbia cyparissias* (Zypressen-Wolfsmilch) sowie der Wechselwasserzeiger [10] *Glyceria maxima* sind.

Der **Reaktionsbereich** ( $\bar{O}$  6,8) liegt zwischen dem Säurezeiger [3] *Equisetum sylvaticum* (Wald-Schachtelhalm) und dem Basen- u. Kalkzeiger [9] *Lathyrus linifolius* (Bergplatterbse).

Die **Stickstoffzahl** ( $\bar{O}$  6,1) reicht von "stickstoffarm" [2] *Molina coerulea* (Pfeifengras) bis "übermäßig stickstoffreich" [9] *Alliaria petiolata* (Knoblauchsrauke).

Aus Fläche I wird ein baumfreier Bereich als **Freifläche** ausgegliedert. Diese ist durch die das Zentrum der Fläche beherrschende Weide, einem Schilfgürtel sowie einer im östlichen Bereich flächendeckenden Verbreitung der Brennessel gekennzeichnet. Die Freifläche weist bezüglich der Feuchte-, Reaktions- und Stickstoffzahl ähnliche Durchschnittswerte auf wie Fläche I.

Die durchschnittliche **Lichtzahl** liegt mit 6,9 dagegen erwartungsgemäß eine Stufe höher, wobei die Extreme von der zwischen Schatten- u. Halbschattenpflanze stehenden [4] *Ribes nigrum* (Schwarze Johannisbeere) bis zur Volllichtpflanze [9] *Dipsacus fullonum* (Wilde Karde) reichen. Der Phanerogam *Abies alba* (Weißtanne) gilt als Schattenpflanze [3].

Die **Feuchtezahl** ( $\bar{O}$  5,6) reicht, wie auch bei Fläche I, vom Trockniszeiger [3] *Euphorbia cyparissias* bis zum Wechselwasserzeiger [10] *Phragmites australis* (Schilf).

Die **Reaktionszahl** liegt im Durchschnitt (6,7) zwar geringfügig niedriger als bei Fläche I, weist aber eine homogenere Verteilung auf. Die Masse der Werte liegt zwischen Mäßigsäurezeiger [5] und "meist auf Kalk hinweisend" [8]. Als Ausreißer muß der Säurezeiger [3] *Vicia tetrasperma* (Viersamige Wicke) gewertet werden.

Der **Stickstoffbereich** ( $\bar{O}$  5,8) liegt zwischen "stickstoffärmer" [2] *Cotoneaster integerrima* (Zwergmispel) und "übermäßig stickstoffreich" [9] *Calystegia sepium* (Ufer-Zaunwinde)

Die **Flächen II+IV** bilden eine vegetationskundliche Einheit, da diese fast durchweg mit 10-20-jährigen Erlen und Linden bestockt sind. Der geschlossene Baumbestand ist nur durch bis

zu 300m<sup>2</sup> große lichtere, baumfreie Flächen, die vermutlich mit Deponiegasaustritten korrelieren (vergl. Kap.6.5.3 FID-Messungen), unterbrochen. In diesem Bereich der Deponie wurden während der Vegetationsaufnahmen mehrmals Rehe, die eine große Anzahl an Lägerstellen angelegt haben, angetroffen.

Die durchschnittlichen Zeigerwerte für Licht-, Feuchte- und Stickstoffzahl entsprechen denen von Fläche I. Die **Reaktionszahl** (Ø 6,4) liegt dagegen eine Stufe tiefer und ist somit als zwischen Mäßigsäurezeiger [5] und Schwachsäure bis Schwachbasenzeiger [7] liegend charakterisiert. Als Extremwerte treten der Säurezeiger [3] *Equisetum sylvaticum* (Wald-Schachtelhalm) und der "meist auf Kalk weisende" [8] *Juncus inflexus* (Blaugrüne Binse) auf.

Die **Lichtzahl** (Ø 6,2) reicht von "zwischen Tiefschattenpflanze und Schattenpflanze stehend" [2] *Carex sylvatica* (Wald-Segge) bis zur Volllichtpflanze [9] *Dipsacus fullonum*.

Die **Feuchtezahl** (Ø 5,9) erstreckt sich von "zwischen Trocken- u. Feuchtezeiger stehend" [4] *Hypericum Perforatum* (Tüpfel-Hartheu) bis Wechselwasserzeiger [10] *Phragmites australis*.

Die **Stickstoffzahl** (Ø 6,4) liegt zwischen [3] *Cirsium palustre* (Acker-Kratzdistel) und [9] *Lamium album* (Weiße Taubnessel).

**Fläche III** umfaßt die mittlere Verebnungsfläche, sowie kleinere Bermen und ist allgemein als relativ baumfrei zu bezeichnen. Dominant treten Kratz-Disteln, Brennessel und v.a. hohe Wiesengräser auf, woraus die gegenüber Waldflächen erhöhte **Lichtzahl** (Ø 7,0) resultiert. Die Masse der Arten liegt im Bereich zwischen [6] und [8], wobei die Extreme von *Cardamine pratense* [4] und *Arctium lappa* [9] eingenommen werden (*Abies alba* [3]).

Die **Feuchtezahl** (Ø 5,8) liegt etwas niedriger als das Auftreten der Wechselwasserzeiger [10] *Phragmites australis*, *Glyceria maxima* und *Veronica beccabunga* (Bach Ehrenpreis) vermuten ließe. Das untere Extrem zeigt Trockeniszeiger [3] *Melilotus alba* (Weißer Steinklee) an

Die **Reaktionszahl** liegt mit dem Durchschnitt von 7,0 am höchsten, wobei die Masse der Arten im Bereich von [6] bis [8] liegt. Allein der Säurezeiger [3] *Juncus effusus* (Flutter-Binse) fällt aus dem homogenen Gesamtbild.

Die **Stickstoffzahl** liegt bei 5,5 und stellt damit den niedrigsten Wert auf der Deponie dar, wobei die Werte sich äußerst inhomogen zwischen "stickstoffärmer" [2] *Molina coerulea* und "übermäßig stickstoffreich" [9] *Arctium lappa* (Große Klette) bewegen.

### **Synoptische Betrachtung**

Aus den durchgeführten Untersuchungen geht hervor, daß die Zeigerwerte der einzelnen Flächen durchaus Abweichungen aufweisen.

Ohne Probleme sind die **Lichtzahlen** zu interpretieren. Die höheren Zeigerwerte der Freifläche sowie der Berme resultieren aus dem dürftigen Baumbestand, während auf den Flächen I, II+IV die relativ geschlossene Baumschicht auch Schattenpflanzen im Unterwuchs zuläßt.

Am einheitlichsten zeigen sich auf der gesamten Deponie, im Gegensatz zu den Einzelarten oder auch dem Anblick im Gelände, die durchschnittlichen **Feuchtwerte**. Treffen diese für

die Flächen I, II+IV sowie der Freifläche in dieser Form zu, so läßt sich Fläche III in verhältnismäßig feuchtere und trockenere Bereiche gliedern. Über extreme Feuchtezahlen verfügen jene Arten, die an Sickerwasseraustritten oder Stauwasserstellen auftreten. Das Stauwasser ist bei der Geländebegehung deutlich zu erkennen, zeigt aber auf die Bodenbildung noch keinen Einfluß. Trockeniszeiger treten v.a. an oder in der Nähe der Böschungskante, sofern kein Stauwassereinfluß vorhanden, oder an sonstigen gut drainierten Stellen auf.

Die durchschnittlichen **Reaktionszahlen** liegen für die Flächen I, III sowie der Freifläche relativ eng beieinander. Die um fast einen Punkt niedrigere Reaktionszahl der Flächen II+IV läßt sich vegetationskundlich allein nicht erklären. Die beiden Flächen verfügen über eine geringere Anzahl der "auf Kalk oder Basen hinweisenden" Arten, wobei der Schwerpunkt bei den "Mäßig- bis Schwachsäurezeigern" liegt. Da aufgrund der pH-Werte der Böden durchaus eine höhere Reaktionszahl zu erwarten wäre, kann eine Zuwanderung von Säurezeigern aus den benachbarten Waldgebieten vermutet werden. Diese These läßt sich zwar durch einige gemeinsame Säurezeiger stützen, ein endgültiger Beweis ist aber aufgrund der geringen Artenzahl nicht möglich.

Die Fläche III und die Freifläche weisen niedrigere **Stickstoffzahlen** auf, was aufgrund zahlreicher Sickerwasseraustritte auf Anrieb nicht zu erwarten wäre. Mit zunehmendem Alter einer Deponie nehmen allerdings sowohl die Belastungen als auch die Nährstoffe im Sickerwasser ab. Nach KONOLD u. ZELTNER (1981) können daher im Sickerwasser älterer Deponien auch weniger nitrophytische Arten auftreten.

Ein weiterer Grund für den geringeren Mineralstickstoffgehalt können die fehlenden Stickstoffsammler unter den Pflanzen sein. Auf den beiden genannten Flächen fehlt im Vergleich zur restlichen Deponie das dominante Auftreten der Erle, eine Pflanze, die, wie die Leguminosen z.B. Platterbsen, mittels Wurzelknöllchen elementaren Stickstoff aus der Luft assimilieren und im Boden anreichern kann. Dieser Vorgang der Stickstoffanreicherung findet bei der sogenannten Gründüngung seine praktische Anwendung.

Die Flächen I, II+IV weisen geringfügig höhere Stickstoffzahlen auf, was eventuell auf die besser zu Humus abbaubare Laubstreu, dem vermehrten Auftreten von Bodenwühlern (Mäuse, Regenwürmer), die die organische Substanz in den Boden einarbeiten, sowie die o.g. Erle anpflanzungen zurückzuführen ist. Ein Vergleich mit den Waldgesellschaften aus Buchen, Eichen und Hainbuchen in der Umgebung, die ebenfalls niedrigere Stickstoffzahlen aufweisen, scheint die Vermutung zu bestätigen.

### 6.3.3.2 Ökologisches Verhalten im Vergleich zur Umgebung (incl. Bauschuttdeponie)

Wie im vorangegangenen Kapitel teilweise angesprochen, unterscheiden sich die Flächen der Deponie in ihrem ökologischen Verhalten teilweise erheblich von der Umgebung.

Die an der Deponie angrenzende Bauschuttdeponie weist aufgrund des geringen Alters bislang auf weiten Flächen keine nennenswerten Baumbestände auf. Die **Lichtzahl** ist daher mit denjenigen der Freifläche und Fläche III vergleichbar. Die Waldgesellschaften der Umgebung weisen dagegen zu den aufgeföresteten Deponieflächen vergleichbare Werte auf.

Die **Feuchtezahlen**, sowohl der Bauschuttdeponie als auch der Umgebung, liegen ca. einen Punkt unter denen der Deponieflächen. Die Bauschuttdeponie, die aus einer Verebnung heraus in einen Hang übergeht, kann aufgrund des Substrats, des Reliefs und des Bewuchses als frischer Standort angesprochen werden. Der Standort trocknet somit nach der Definition weder öfter aus, noch ist er ständig naß. Während der Vegetationsaufnahmen hatte man allerdings den Eindruck, als herrsche an mehreren Stellen des Hangbereichs, im Gegensatz zur feuchten Verebnungsfläche, Wassermangel. Für die "gemittelte" Umgebung ergibt sich ein ähnlicher Wert, wobei festzuhalten bleibt, daß auf den anstehenden Gesteinen unterschiedliche Böden auftreten, die jeweils über einen spezifischen Wasserhaushalt verfügen. Hieraus resultierend können die Feuchtwerte lokal stark vom gemittelten Umgebungswert abweichen. So sind im Bereich der Hettangium-Hochfläche sowie den flachen Knollenmergelhängen ebenfalls Zonen mit Stauwasser zu beobachten. Im Bereich des Stubensandsteins sind die Böden als frisch anzusprechen, wobei aufgrund der besseren Drainage der Böden kein Stauwasser auftritt.

Die **Reaktionszahl** erreicht auf der Bauschuttdeponie einen ähnlichen Wert (6,9) wie auf den Deponieflächen. Die Ursache dafür ist im vergleichbaren Ausgangssubstrat zu sehen. Die Reaktionszahl der Umgebung liegt einen Punkt niedriger (5,9), was eine fortgeschrittene Versauerung der Böden anzeigt. Auch hier bleibt zu bemerken, daß bei unterschiedlichen Bodentypen, z.B. Pelosolen, Braunerden, differierende Werte erzielt werden, die aber alle mehr oder weniger im sauren Bereich liegen.

Die **Stickstoffzahl** charakterisiert sowohl die Umgebung als auch die Bauschuttdeponie als "mäßig stickstoffreich". Ursächlich sind hierfür die mäßigen Humusformen (modriger Mull, Moder) der Waldgesellschaften sowie die fehlenden Stickstoffsammler. Auf der Bauschuttdeponie hat man diesen Mangel erkannt und versucht über die Aussaat von Lupinen und Leguminosenarten (Platterbsen) eine Gründüngung durchzuführen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Deponie eine artenreiche Vegetationsdecke aufweist, die von der Artenzahl über derjenigen der Umgebung liegt. Dies ist v.a. auf die unterschiedlichen Standorte innerhalb der Deponieflächen, die von frisch bis naß reichen, zurückzuführen. So ist es möglich innerhalb geringer Distanzen sowohl Trockniszeiger als auch Wechselwasserzeiger anzutreffen. Diese Artenvielfalt der Flächen, zu der jeweils eine eigene Fauna gehört, macht die "Federlesmahd" aus *vegetationskundlicher Sicht* zu einem interessanten und wertvollen Lebensraum und Landschaftsbestandteil.

### 6.3.3.3 Ökologisches Verhalten im Vergleich zu 1981

In den vorangegangenen Kapiteln wird die derzeitige Situation auf den Deponieflächen und deren Umgebung behandelt. Um einen Überblick über die Veränderungen im Laufe der Zeit zu erhalten, werden in diesem Kapitel die Vegetationsaufnahmen von 1993 mit denjenigen von KONOLD u. ZELTNER (1981) verglichen.

1981 wurden auf der Deponie 87 Arten gezählt, 1993 dagegen 217. Diese erhebliche Zunahme an neuen Arten 1993 ist auf regelmäßige Aufnahmen während der Vegetationsperiode zurückzuführen, wobei eine größere Anzahl an Arten erfaßt wurde. 1981 wurde lediglich eine einzelne Aufnahme für die gesamte Deponie durchgeführt (freundl. mündl. Mitteilung ZELTNER 1993).

Eine Artenzunahme ist aber dennoch, aufgrund der Ausdifferenzierung der Deponieflächen wahrscheinlich. 1981 trug die Deponie eine noch sehr junge Vegetationsdecke, in der häufig Allerweltsarten sowie lichtbedürftige Freiflächen- u. Ruderalpflanzen auftraten.

Bei den Vegetationsaufnahmen 1993 wurden, insbesondere in den Erlen-/Lindenbeständen, auch Schattenpflanzen der höheren Waldgesellschaften aufgenommen. Dieser Punkt wird durch die gesunkenen Lichtzahlen der besagten Flächen (I, II+IV) bestätigt.

Weiterhin stellt sich die Frage nach einer Sukzessionsreihe sowie der Schlußgesellschaft am Standort. Diesbezüglich sind die Erlenbestände der Deponie als Vorwaldstadium zu bezeichnen, in dessen Unterwuchs sich die am Standort natürlich auftretenden Gehölze entwickeln sollen. Da aber weder Buchen noch Eichen u. Hainbuchen in nennenswerter Anzahl gefunden wurden läßt dies auf eine gehemmte Sukzession schließen. Gründe dafür können in teilweise ungünstigen Standortbedingungen, wie Stauwasser, hohe Lagerungsdichte, Sterilität des Substrats etc., für die o.g. Baumarten liegen. Weiterhin kann die forstwirtschaftliche Zielsetzung auch von annähernd natürlichen Waldgesellschaften abweichen. Insgesamt ist aber aufgrund der Pflanzenarten in der Krautschicht durchaus der Anfang einer Entwicklung in Richtung Waldstandort zu erkennen, was v.a. an den häufiger auftretenden Arten der Wald- und Saumgesellschaften zu erkennen ist.

#### 6.3.3.4 Seltene Arten

Seltene Pflanzenarten treten auf der Federlesmahd nicht auf. Aufgrund der Entwicklung großer Flächen zu "Waldstandorten" werden Formationen mit seltenen Arten, wie z.B. die der Kurzlebigen Ruderal- und Unkrautgesellschaften, zurückgedrängt. Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt wurde, ist der ökologische Wert der Deponie nicht in einer Zahl seltener Arten, sondern in einer großen Artenvielfalt mit stark unterschiedlichen Standortansprüchen, auf relativ kleiner Fläche zu sehen.

Im Gegensatz zu seltenen Arten kommen auf der Deponie des weiteren eine nennenswerte Anzahl an Neophyten auf. Diese, in historischer Zeit, aus fremden Florengebieten (häufig Steppengebiete) eingewanderten Arten behaupten sich bevorzugt an lichtexponierten Flächen. Vertreter sind z.B. *Veronica persica* (Persischer Ehrenpreis), *Pastinaca sativa* (Pastinak) und *Lathyrus tuberosus* (Knollige Platterbse).

Als Kulturpflanzen treten auf der Deponie Gartenflüchtlinge wie *Narcissus pseudo-narcissus* (Gelbe Narzisse) oder *Chaenomeles japonica* (Japanische Scheinquitte) auf. Als Nutzpflanze wurde v.a. *Melilotus alba* (Weißer Steinklee), im Bereich der Bauschuttdeponie auch *Lupinus platyphyllos* als Gründünger, eingesät.

#### 6.3.3.5 Pflanzenschäden

Die erheblichsten Schäden an der Vegetationsdecke sind die, vermutlich durch Deponiegasaustritte (vergl. Kap. 6.5.3) entstandenen, pflanzenarmen oder gar vegetationsfreien Flächen. Als Hauptursache ist hierbei die Verdrängung des Sauerstoffs durch das Deponiegas aus der Bodenluft und weniger eine direkte toxische Wirkung des Gases zu sehen.

Im Bereich der Flächen I, II+IV treten häufig vertrocknete und abgestorbene Erlen im Verbund mit vitalen Linden auf. Der Grund für die Schädigungen kann, nach Auskunft des Forstamtes, im verstärkten Vorkommen des Erlenspanners liegen. Diese Aussage konnte zwar im Gelände bestätigt werden, doch ist als weitere Ursache das äußerst trockene Jahr 1992 zu nennen. In diesem Jahr fehlten die für die stark wasserbedürftigen Erlen (Nässezeiger!) notwendigen Niederschläge zur Aufrechterhaltung der Bodenfeuchte. Eine Kombination beider Gründe kann als die wahrscheinlichste Ursache angenommen werden, da ein derart heftiger Parasitenbefall für durch Dürre geschwächte Bäume, letale Folgen nach sich zieht.

Während der Vegetationsaufnahmen wurden des öfteren Schadbilder wie Wipfeldürre, vergilbte Blätter oder auch Mißbildungen festgestellt. Die Blatt- und Zellschäden können nach KONOLD u. ZELTNER (1981) eventuell auf direkte Gaseinwirkungen zurückgeführt werden.

### 6.3.4 Beobachtungen zur Fauna

Bei der Untersuchung der Altablagerung konnte festgestellt werden, daß die bei ihrer Aufbringung sterilen Deckschichten bereits ein reges Bodenleben aufweisen. Viele Ameisen, Schnecken, Käfer, Asseln und Mäuse waren zu beobachten. Sie bereiten durch Zerkleinerung von abgestorbenen Pflanzen und Tierleichen die Zersetzung durch Mikroorganismen vor und tragen zur Humusbildung, Durchmischung und Durchlüftung des Bodens und damit zur Verbesserung seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften bei. Insbesondere die Regenwürmer als sog. Erdfräser können zwischen 0,5 und 12 kg/ m<sup>2</sup>\*a an Bodenmaterial umlagern. Ameisen, die in großer Anzahl auftreten, sind in der Lage bis zu 5 kg/ m<sup>2</sup>\*a je Ameise an Boden zu bewegen. Das Wühlen der Tiere im Boden trägt durch Lockerung und Einarbeitung der Streu auch zu einer Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität bei und die Produktion von Schleimstoffen fördert die Aggregatstabilität und wirkt der Erosion entgegen.

Durch alle diese Vorgänge findet allmählich ein Übergang von einer künstlichen Aufschüttung mit eingeschränkten Möglichkeiten für Pflanzenwachstum zu einem natürlicheren Pflanzenstandort statt.

Neben den Klein- und Kleinstlebewesen im Boden, bietet die Federlesmahd auch anderen Tieren Lebens- bzw. Nahrungsraum. Letzteren insbesondere im Winterhalbjahr, wo größere Ansammlungen von Vögeln als Nahrungsgäste auftreten. Neben Rohrammern, Wiesenpiepern, Singdrosseln, Stieglitzen, Buchfinken, Singdrosseln und Heckenbraunellen sind durch die Erlenpflanzungen ca. 300 Erlenzeisigpaare zu beobachten. Die vielen Ameisen ziehen vor allem Grau- und Grünspechte an. Auch Goldammern, Weidenlaubsänger, Kohl- und Blaumeisen, Amseln, Mönchsgrasmücken, Spatzen und Rotkehlchen finden hier Nahrung. Die Erlenzeisige wiederum bilden einen Anziehungspunkt für den Sperber, der als gefährdete Art auf der Roten Liste steht.

Die Vielfalt an Vögeln ist zum einen auf die gute Nahrungsversorgung durch Insekten, Würmer und Schnecken zurückzuführen, zum anderen erfüllt die Vegetation durch dichtes Unterholz, Hecken und Wiese, Schilf und Wald unterschiedlichste Ansprüche. Auch dient die ehemalige Deponie aufgrund des großen Mäusevorkommens als Jagdrevier für zwei Mäusebusardspaare, Wanderfalken, Turmfalken, Waldohreulen und Waldkäuze.

Auch die Insekten weisen eine große Artenvielfalt auf, da aufgrund der vielseitigen Vegetation auch die entsprechenden Fraßpflanzen vorhanden sind. Neben unterschiedlichen Arten an Laub- und Feldheuschrecken sowie Grillen sind auch viele schützenswerte Wildbienenarten sowie Wespen und Hummeln auf der Deponie zu beobachten. Deren Lebensraum sind insbesondere die Wiesenflächen der Berme und des Freihanges sowie des Erddeponieteils mit ihren Blütenpflanzen (freundl. mündl. Mittlg. PFEILSTICKER)

## 6.3.5 Gasmessungen

### 6.3.5.1 Vorgehensweise

Zur Ermittlung der Gasaustrittsschwerpunkte wurden einzelne Deponieabschnitte in einem vorher festgelegten Raster abgegangen.

Für die Deponieabschnitte I (Unterhang) und III (Bermen) erschien es aufgrund des Reliefs und des zeitweilig auftretenden Gasgeruchs sinnvoll, die Messungen im Abstand von 10 m durchzuführen. An innerhalb dieser 10 m auftretenden Rissen in der Deckschicht wurden ebenfalls Gasmessungen vorgenommen. Damit stellen die in den Tabellen dargestellten Werte, die jeweils höchsten innerhalb 100 m<sup>2</sup> dar.

Für die Deponieabschnitte II und IV, die einen großen Teil der Deponiefläche bilden, wurde aufgrund des engen zeitlichen Rahmens und der ungünstigen, sehr regenreichen, Witterungsverhältnisse das Raster auf 20×20 m festgelegt. Innerhalb dieses Rasters wurde der Saugtrichter des FID über den Boden geführt, so daß bei einsetzendem Signalton des Gerätes die jeweilige Stelle gemessen werden konnte. Auch bei auffälligen Methankonzentrationen und Rissen in der Deckschicht erfolgten zusätzliche Messungen. Für die Bewertung und tabellarische Darstellung wird der jeweils höchste innerhalb eines Rasters gemessene Wert herangezogen.

Der westliche Böschungsbereich wurde gesondert, wiederum in einem 10 m Raster aufgenommen, da Böschungen in der Fachliteratur als Schwerpunkte von Gasemissionen beschrieben werden.

Die Meßwerte sind für jeden Deponieabschnitt in Tabellenform dargestellt, wobei die Werte größer als 30 ppm in Fettdruck geschrieben sind, da Werte bis 30 ppm infolge gerätebedingter Meßbereichsschwankungen nur bedingt aussagefähig sind. Die Zahlen in Klammern entsprechen den Koordinatenpunkten der Tabellen. Die Bewertungseinteilung der Meßwerte ist in Kapitel 5.4 aufgestellt.

### 6.3.5.2 Ergebnisse der Gasmessungen

Die Messungen der Deponieabschnitte I und III ergeben, wie aus Tab. IV- 6.2 ersichtlich, auf einer Deponielänge bis 170 m deutliche Gasaustrittsschwerpunkte im Bereich der Bermenkanten. Dies ist vermutlich auf die relativ hohen Zugspannungen, die in diesem Übergangsbereich auftreten und dadurch zu Rißbildungen führen, zurückzuführen. Die höchsten Methanwerte mit ≈1000 ppm liegen am Übergang von der großen, als Weg die Deponie durchziehen-

de Berme zum Hangbereich I. Ab ca. 170 m sind innerhalb des Hangabschnitts I keine kleineren Bermen angelegt, so daß sich die Gasemissionen auf den Übergang vom Hangbereich zur großen Berme konzentrieren.

Gasmessung mit dem Flammenionisationsdetektor (FID)  
Deponieabschnitt I (Hangbereich) und Deponieabschnitt III Berme

E	80	70	60	50	40	30	20	10	9	10	1000	40	70	650	40	500	30	80	25	5	0	0	500	60	20	20	17	200	3	1000	2	300
	70	10	10	10	20	50	2	12	650	0	20	15	7	2	1	10	6	3	10	9	10	50	8	8	20	70	1100	18	100	1000	100	
	60	20	700	250	6	12	5	250	0	20	15	7	2	1	10	6	3	10	9	10	50	8	8	20	70	1100	18	100	1000	100	47	
	50	20	70	0	5	14	5	23	60	450	12	150	100	2	-	10	10	6	9	8	7	6	7	6	7	30	15	100	12	10	10	
	40	400	20	1	4	10	7	0	4	30	120	5	5	1	6	7	5	5	7	7	7	7	6	5	18	20	35	15	15	15		
	30	9	2	1	0	3	7	2	1	12	4	12	1	1	3	2	3	10	4	3	3	4	4	10	7	20	17	10	10	10	10	
	20	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	225	240	250	260	270	280	290	300	310	310	310	310	310	
	10	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	225	240	250	260	270	280	290	300	310	310	310	310	310	
W	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N

E	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
	8	40	110	15	19	20	23	8	250	3	7	4	19	12	450	100	20	12	250	90	17	5	30	15	1200	800	10	3	3	1	
	40	50	700	100	7	450	5	5	3	22	14	1100	400	25	25	17	180	15	12	4	11	50	120	12	1	2	1	2	1	1	
	30	15	19	12	10	100	5	5	3	3	4	19	30	2900	50	25	15	38	350	70	18	8	10	20	1200	18	2	3	3	1	
	50	20	23	8	250	3	7	4	19	30	2900	50	25	15	38	350	70	18	8	10	20	1200	18	2	3	1	1	1	1	1	
	60	20	18	18	10	170	5	3	4	19	30	2900	50	25	15	38	350	70	18	8	10	20	1200	18	2	3	1	1	1	1	
	70	10	5	12	14	10	100	12	10	5	600	120	730	40	28	500	20	250	58	250	7	8	12	10	7	3	1	1	1	1	
	80	10	5	10	10	10	20	12	7	3	10	13	12	35	33	11	85	150	28	12	7	7	11	9	4	1	2	2	2	2	
	90	7	5	9	5	8	10	15	10	3	2	5	0	35	40	8	13	20	15	10	7	8	9	9	4	2	1	1	1	1	
	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620
W	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N

Tab. IV- 6.2: Deponiegasmessungen Fläche I





licheren Pflanzenwuchs. Vielmehr wurde hier im Zuge der Rekultivierung teilweise auf Baumpflanzungen verzichtet, um die Jagd vom gegenüberliegenden Hochsitz aus zu erleichtern (freundl. mündl. Mitteilg. LANG ).

Der südliche Randgraben weist nur noch geringe Gasaustrittswerte auf, so daß auch in der Umgebung keine Beeinträchtigungen wie Pflanzenschäden auftreten. Die im östlichen Böschungsbereich beim Übergang in das umgebende Waldgebiet auftretenden Methanwerte reichen nur wenige Meter in das Waldgebiet hinein und sinken dann auf Werte unter 5 ppm ab.

Insbesondere die vegetationsarmen bis -freien Stellen zeigen deutlich den Zusammenhang von Deponiegasaustritten und gestörter Vegetationsentwicklung. Das in die oberen Bodenschichten diffundierende Methan verdrängt dort den für die Wurzelatmung benötigten Sauerstoff. Damit verringert sich der effektive Wurzelraum der Pflanzen erheblich. Dieser geringere effektive Wurzelraum besitzt eine niedrigere nutzbare Feldkapazität, weshalb das für die Wurzeln verfügbare Wasser für die Versorgung der Pflanzen oft nicht mehr ausreicht. Die dadurch bedingten Vegetationsausfälle führen zu einer verstärkten Bodenevaporation und damit zu einer Austrocknung der Deckschicht. Einsetzender Starkregen kann dann zu erhöhter Erosion des Deckschichtmaterials führen, womit sich die Mächtigkeit der Deckschicht an diesen Flächen vermindert. Ein ständiger Abtrag der obersten Bereiche der Deckschicht führt wiederum dazu, daß sich hier auch kein Substrat entwickeln kann, das die Ansiedlung von flachwurzelnenden Pionierpflanzen ermöglichen würde. Die Wildschweine bevorzugen diese Flächen wiederum zum Suhlen und verhindern ebenfalls die Ansiedlung von Pflanzen.

An anderen Stellen der Deponie, die Pflanzenschäden zeigen, konnte eine Korrelation mit Deponiegasaustritten nicht nachgewiesen werden. Die auftretenden Schäden zeigen sich insbesondere an Erlen, und sind vermutlich auf die Kombination der Faktoren Schädlingsbefall, zu engem Pflanzabstand, sowie Trockenheit des letzten Winters zurückzuführen (freundl. mündl. Mitteilg. PFEILSTICKER).

Außerhalb der Altablagerung sind nur im südöstlichen Deponierand Gasemissionen aufgetreten, die jedoch nur wenige Meter in den umgebenden Wald hineinreichen und nicht zu sichtbaren Vegetationsschäden geführt haben.

## **6.4 Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem "HELP" - Modell**

Die Simulation des Wasserhaushalts wird anhand der vier Deponieabschnitte, die auch für die vorangegangenen Untersuchungen zur morphologischen Abgrenzung herangezogen wurden, durchgeführt.

in [%]	Niederschlag	Oberflächenabfluß	Evapotranspiration	Perkolation
Fläche I	100	0,85	61,80	36,74
Fläche II	100	1,20	67,46	30,70
Fläche III	100	0,00	74,47	24,97
Fläche IV	100	0,00	70,38	29,21

**Tab. IV- 6.5: Wasserhaushalt der Ist-Situation**

Aus Tab. IV-6.5 ist ersichtlich, daß sich für die einzelnen Deponieabschnitte relativ unterschiedliche Perkulations- und Evapotranspirationswerte ergeben.

Bei den in ihren Neigungsverhältnissen und Bewuchs sehr ähnlichen Flächen I und II, gehen die Abweichungen vor allem auf die tonigere Bodenart der 1. und 2. Schicht der Fläche II zurück, deren geringere Wasserleitfähigkeit hier stark zum Tragen kommt.

Die Flächen III und IV weisen beide nur geringe Neigungen auf, differieren jedoch bezüglich Perkolation und Evapotranspiration deutlich. Dies ist in diesem Fall auf die etwas ungünstigere Grasbedeckung der Fläche III zurückzuführen, wodurch eine erhöhte Evaporationstiefe und damit auch insgesamt eine höhere Evaporation erreicht wird. Die aufgrund der qualitativ schlechteren Vegetation verringerte Transpiration geht in geringerem Umfang in die Berechnung ein.

Der Oberflächenabfluß der Hangflächen I und II liegt in dem von RENGER für Deponien ermittelten Bereich von bis zu 3 % des Niederschlags bei einer Hangneigung von 30 % (RENGER et al 1989).

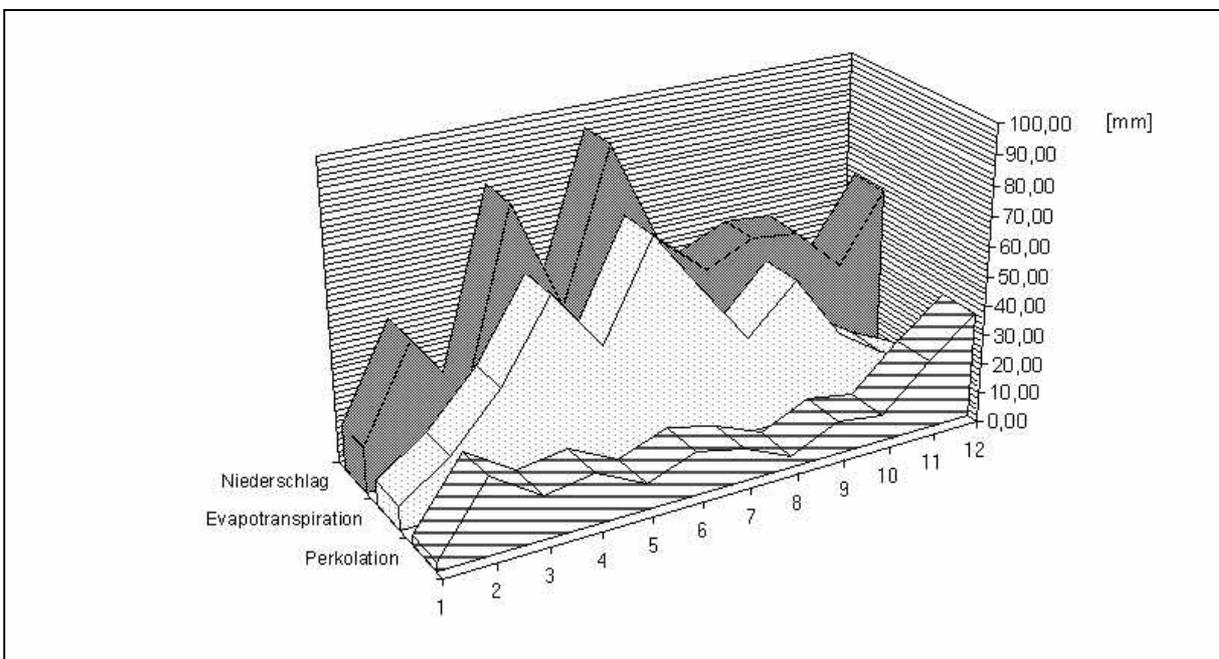
in [%]	Niederschlag	Oberflächenabfluß	Evapotranspiration	Perkolation
Jan	15,24	-	8,31	3,00
Feb	46,74	-	19,81	25,64
März	23,88	-	37,39	14,70
April	82,80	-	63,55	17,36
Mai	45,72	-	42,88	9,08
Juni	94,49	-	74,78	14,88
Juli	59,69	-	53,57	11,06
Aug	46,23	-	32,99	4,19
Sept	53,34	-	48,92	11,45
Okt	51,56	-	26,34	9,08
Nov	36,58	-	16,15	23,46
Dez	59,44	-	8,51	35,87

**Tab. IV- 6.6: Durchschnittliche Monatsmengen auf Fläche IV - Ist-Situation**

Aus Tab. IV- 6.6 sind die durchschnittlichen monatlichen Niederschläge mit dem sich daraus ergebenden Zusammenhang von Verdunstung und Versickerung für die größte der Deponieeilflächen, dem Deponieabschnitt IV zu entnehmen.

Hier zeigt sich, daß die Niederschlagsmaxima, die in die Monate April und Juni fallen, keine hohe Perkolation nach sich ziehen, da im April die Evaporation und im Juni durch die auf dem Höhepunkt der Vegetationsperiode sehr intensive Transpiration, die Evapotranspiration am höchsten liegt.

Ebenfalls sehr niedrige Perkulationswerte zeigen sich im Januar, die jedoch auf die geringen Niederschläge dieses Monats zurückzuführen sind. Die höchsten Perkolation tritt im Dezember auf, wo vergleichsweise hohe Niederschläge bei geringer Pflanzenbedeckung und kühlen Witterungsbedingungen mit niedriger Evapotranspiration einhergehen.



**Abb. IV- 6.2: Perkulationsrate in Abhängigkeit von Niederschlag und Evapotranspiration des Deponieabschnitts IV**

In Abb. IV- 6.2 verdeutlicht der Verlauf der Kurven den Zusammenhang von hohen Niederschlägen und gleichzeitig hohen Wasserverlusten durch Evapotranspiration sowie die in den Wintermonaten trotz geringerer Niederschläge erhöhte Perkolation.

Die Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem "HELP"- Modell zeigt für die Teilfläche I mit ~ 37 % Perkolation eine nicht zu vernachlässigende Größe für die Sickerwasserbildung. Auch bei den restlichen Deponieabschnitten kann bei Perkulationsraten von ~ 25-30 % mit Sickerwasserbildung gerechnet werden. Die insgesamt relativ hohen Perkulationswerte sind zum großen Teil auf die durch die nördliche Hangexposition bedingte verminderte Einstrahlung und damit geringere Evapotranspiration zurückzuführen.

Diese als Perkolation errechneten Werte sind jedoch zu relativieren. Eine Einflußgröße, die das auf amerikanische Verhältnisse abgestimmte Programm nicht berücksichtigt, ist die Vegetation. Die auf der "Federlesmahd" gepflanzten Erlen (Flächen I, II, IV) weisen eine weit

höhere Transpiration auf wie die programmintern zur Berechnung verwendete Grasbedeckung. Damit findet der in der Literatur angegebene Wert für die Transpiration von ca. 350 l/Erle (2,5m hoch) keinen Eingang in die Berechnungen (LARCHER 1984). Durch den bei Laubbäumen erhöhten Blattflächenindex verringert sich zwar die Evaporation, aber die Interzeption (vergl. Kapitel 4.4 ) steigt erheblich an. Damit verringert sich die für die Perkolation zur Verfügung stehende Wassermenge, so daß die im Programm als Perkolation berechneten Wassermengen als zu hoch angesehen werden können.

Wie in Kapitel 5.5 bereits angesprochen, zeigt diese Version des "HELP"-Programms Mängel bei der Berücksichtigung der Speicherkapazität der Deckschichten, da hier der Teil des Niederschlags, der nicht evaporiert oder transpiriert wird, als Perkulationswasser in den Deponiekörper eindringt. Dies wird in der Version 2.0 korrigiert, indem die Speicherfähigkeit der Deckschicht berücksichtigt wird. Die in Kapitel 6.3.2 beschriebenen sehr hohen Feldkapazitäten der Deckschichten weisen ebenfalls auf die Speicherfunktion der Deckschicht hin.

Die für die Grasvegetation der Fläche III berechneten Perkulationswerte von  $\approx 25\%$  sind auf die durch die geringen Neigungsverhältnisse bedingte höhere Einstrahlung zurückzuführen, wodurch die Evapotranspiration deutlich zunimmt. Auch für diese Fläche kann davon ausgegangen werden, daß sich für die Perkolation in den Deponiekörper unter Einbeziehung der Speicherkapazität der Deckschicht niedrigere Werte, als die mit dem Programm berechneten, ergeben.

## 6.5 Zusammenfassende Darstellung der Ist-Situation

Diese zusammenfassende Beschreibung der Altablagerung in ihrer Auswirkung auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft einerseits und bezüglich ihrer Wirkung auf die Umgebung andererseits, vereinfacht einen Vergleich zwischen der hier dargestellten Ist-Situation und dem im folgenden Kapitel erstellten Szenario der Altablagerung bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung.

Die ehemalige Deponie "Federlesmahd" ist auf drei Seiten von einem Waldgebiet umschlossen, dessen Rad- und Wanderwege von der Bevölkerung der Orte Leinfeld-Echterdingen und Musberg intensiv zur Naherholung genutzt werden. Die ehemalige Deponie ist als Aufschüttung eines schwach konkaven Hanges angelegt und insbesondere durch den Teil der Bauschuttdeponie als anthropogene Vollform in der Landschaft erkennbar. Die überwiegend mit Hausmüll verfüllte Fläche ist von den Wanderwegen, die südlich direkt oberhalb der Deponie vorbeiführen nur durch den jungen, in Reihen gepflanzten Baumbestand als nicht zum übrigen Wald gehörend erkennbar, während von unten (Nordwesten) und an den Seiten durch die konvexe Hangform Unterschiede zur Umgebung bemerkbar werden. Durch die Erlenpflanzungen und den Waldbestand um die Deponie ist insbesondere während der Vegetationsperiode eine optische Einpassung in den umgebenden Wald gegeben.

Bezüglich der Bodenarten mit vorherrschend schluffigen und tonigen Lehmen unterscheiden sich die Böden der Umgebung und die Deckschicht der Altablagerung nur geringfügig. Allerdings unterliegen die Böden der Umgebung bereits seit langem Bodenbildungsprozessen, die die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Böden bestimmen. Bezüglich Wasser- und Luftversorgung sind diese Böden günstiger zu beurteilen wie die Deckschicht, da der Humusanteil der oberen Bodenhorizonte zu einer günstigen Porenverteilung und guten Nähr-

stoffversorgung beiträgt. Die nutzbare Feldkapazität dagegen liegt bei der Deckschicht der Altablagerung wesentlich höher. Diese ist somit für die Wasserversorgung der Pflanzen vorteilhafter wie diejenige der Böden der Umgebung. Die chemischen Eigenschaften sind bei der Deckschicht durch den Carbonatgehalt und den im neutralen bis schwach basischen Bereich liegenden pH-Wert als günstiger zu betrachten. Auch die Nährstoffgehalte liegen bei der Deckschicht höher, da hier im Initialstadium der Bodenbildung im Gegensatz zu den Waldböden noch keine Auswaschung der im Ausgangsgestein enthaltenen Carbonate und daraufhin einsetzende Versauerung stattgefunden hat.

Durch die Tätigkeit der Bodentiere und Mikroorganismen findet bei der Deckschicht der Altablagerung allmählich eine Entwicklung vom sterilen Deckschichtensubstrat hin zu einem natürlicheren Pflanzenstandort statt, wobei die ähnlichen Bodenarten von Deckschicht und Umgebung auf längere Sicht auch entsprechende Voraussetzungen als Pflanzenstandort bieten.

Damit ist auch eine langsame Entwicklung in der Pflanzenbedeckung der ehemaligen Deponie von bislang überwiegend Rohbodenbesiedlern, wie z.B. Erlen, zu anspruchsvolleren Pflanzen der umgebenden Waldgesellschaft zu erwarten.

Bislang zeichnet sich die Altablagerung durch eine wesentlich größere Artenvielfalt wie die Umgebung aus, was insbesondere auf die sehr unterschiedlichen Licht- und Feuchtigkeitsverhältnisse zurückzuführen ist. Dabei treten die Lichtzeiger vor allem im Bereich der großen Berme und der fast baumfreien Fläche im Hangbereich I hervor. Die Nässezeiger konzentrieren sich auf die durch Sickerwasseraustritte entstandenen "Sümpfe" und den hangseitigen Bermenrand.

Die Vegetationsdecke ist insgesamt zu fast 100 % geschlossen, dennoch zeigen sich stellenweise Schäden an den Pflanzen oder es kommt insbesondere am Rand der Bermen kleinflächig zu völligem Vegetationsausfall. Im Bereich der Bermenkanten zeigen sich durch Zugbeanspruchung immer wieder hohe bis sehr hohe Gaskonzentrationen, ebenso an mehreren vegetationarmen Stellen im Hangbereich II. Dennoch treten die Gasemissionen nicht flächhaft, sondern konzentriert vor allem an Rißbildungen des Decksubstrates auf. Damit bleiben die Gasemissionen auf einen kleinen Raum beschränkt und führen nicht zu großflächigen Pflanzenschäden. Ein Teil der Vegetationsschäden ist nicht auf Gas, sondern vielmehr auf zu geringe Pflanzabstände, Trockenheit sowie Schädlingsbefall zurückzuführen.

Die hohen Neigungsverhältnisse, vor allem im Hangbereich I, haben bereits Rutschungen ausgelöst. Die Rutschungen werden durch das bei Wasserzutritt hohe Quellvermögen der tonigen Schichten, die über geringer wassergesättigten Schichten abgleiten, begünstigt. Hieran und an den Staunässestellen der Bermen zeigt sich, daß das Wasser nicht ungehindert in den Deponekörper eindringen kann.

Neben dem landschafts-, vegetations- sowie bodenkundlichen Aspekt der Eingliederung der Altablagerung in die Umgebung ist auch die Frage nach den Auswirkungen der Deponie auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft zu stellen.

Die geologischen Voraussetzungen des Untergrundes der Altablagerung, können als günstig beurteilt werden. Die Knollenmergel, deren Mächtigkeit mindestens 3,8 m, in weiten Bereichen der Altablagerung sogar weit mehr beträgt, weisen eine sehr geringe Wasserleitfähigkeit

auf, so daß an der Deponiebasis austretendes Sickerwasser weitgehend in dieser nicht- bzw. nur gering wasserleitenden Schicht zurückgehalten wird. Trotz dieser bezüglich des Grundwasserschutzes sehr günstigen Eigenschaften der Knollenmergel ergibt sich durch die Hanglage und die große Verfüllungshöhe der Altablagerung ein Problem, da die Knollenmergel aufgrund ihres Wassergehaltes durch Quellung der oberen Schichten eine Gleitfläche bilden können, auf der die darüber lagernde Altablagerung abrutschen kann. Da die Deponie weit über die in einem geologischen Gutachten empfohlene Höhe hinaus verfüllt wurde, ist von einer Gefährdung der Standsicherheit der Altablagerung auszugehen.

Des weiteren besteht die Möglichkeit von Schichtwasserzutritt bei den, die obersten Hangbereiche der Altablagerung bildenden, Rät- und Hettangiumschichten. Auch bei den Kalksteinbänken der mittleren Knollenmergel ist diese Möglichkeit von Wasserzutritt gegeben. Inwieweit hierdurch die Sickerwasseraustritte auf der Altablagerung bedingt sind, ist nicht geklärt.

Auch die Niederschläge leisten ihren Beitrag zur Sickerwasserbildung. In welcher Höhe dieser ausfällt, ist von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel Feldkapazität der Deckschicht sowie der aktiven und passiven Verdunstung abhängig. Die Feldkapazitäten liegen für die gesamte Fläche der Altablagerung mit mindestens 670 l/ 2m<sup>2</sup> sehr hoch, weshalb von einer Speicherung eines größeren Teils der Niederschläge ausgegangen werden kann. Die Höhe der Speicherung ist stark abhängig von der Niederschlagshöhe aufeinander folgender Jahre. Bei einer hohen gespeicherten Niederschlagsmenge des einen Jahres und einem darauffolgenden gleichfalls regen-reichen Jahr können die Feldkapazitäten überschritten werden und sich damit die Perkulationsrate in den Deponiekörper vergrößern. In der Regel kann jedoch der Wasser-rückhalt durch die Deckschicht als eine für die Sickerwasserverringerung relevante Größe bewertet werden.

Bei der Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem "HELP"- Modell ergeben sich für die einzelnen Teilflächen Perkulationswerte in den Deponiekörper zwischen ca. 25 und 37 %. Dies ist insbesondere auf die durch die Schatthanglage bedingte verringerte Evapotranspiration zurückzuführen. Bei diesen Werten ist jedoch weder die Interzeption der Erlenbestände noch das hohe Speichervermögen der Deckschichten genügend berücksichtigt. Auch die Transpirationen der Erlenbestände (350 l/ Erle), fließen aufgrund programminterner Vorgaben nicht in die Berechnungen ein. Demzufolge ist davon auszugehen, daß die Perkulationswerte des Programms zu hoch liegen.

## **7. Altablagerung "Hintere Halde"**

### **7.1 Lage und naturräumliche Einordnung des Untersuchungsgebietes**

#### **7.1.1 Lage**

Gegenstand der zweiten Untersuchungen dieser Studie ist die ehemalige Hausmülldeponie "Hintere Halde" im Landkreis Esslingen. Diese Altablagerung befindet sich zwischen den beiden Städten Nürtingen im Südwesten und Kirchheim unter Teck im Osten sowie den Ortschaften Lindorf im Nordosten, Oberboihingen im Westen und Reudern im Südwesten.

Naturräumlich liegt die Umgebung des Untersuchungsgebietes an der Nahtstelle zweier Flächenlandschaften, der Filderhochfläche und der Verebnungsfläche des Albvorlandes, in welche sich das Neckartal eingeschnitten hat.

Das Untersuchungsgebiet selbst befindet sich im Verlauf des Talbachs (Donzdorfer Tal) zwischen der Bundesstraße 297 und der Ortschaft Oberboihingen. Der höchste Punkt der Umgebung liegt mit ca. 370 mNN nördlich im "Rübholz", den tiefsten Punkt bildet der Talbach mit ca. 295 mNN.

Der Bereich der jetzigen Altablagerung war ursprünglich eine sich von Nordosten nach Südwesten zum Talbach öffnende breite Talmulde. Heute befindet sich anstelle der Talmulde eine kuppenartige Aufschüttung mit in südwestlicher Richtung geneigten Hängen, welche sich bis auf ca. 10 m an den Talbach heranziehen.

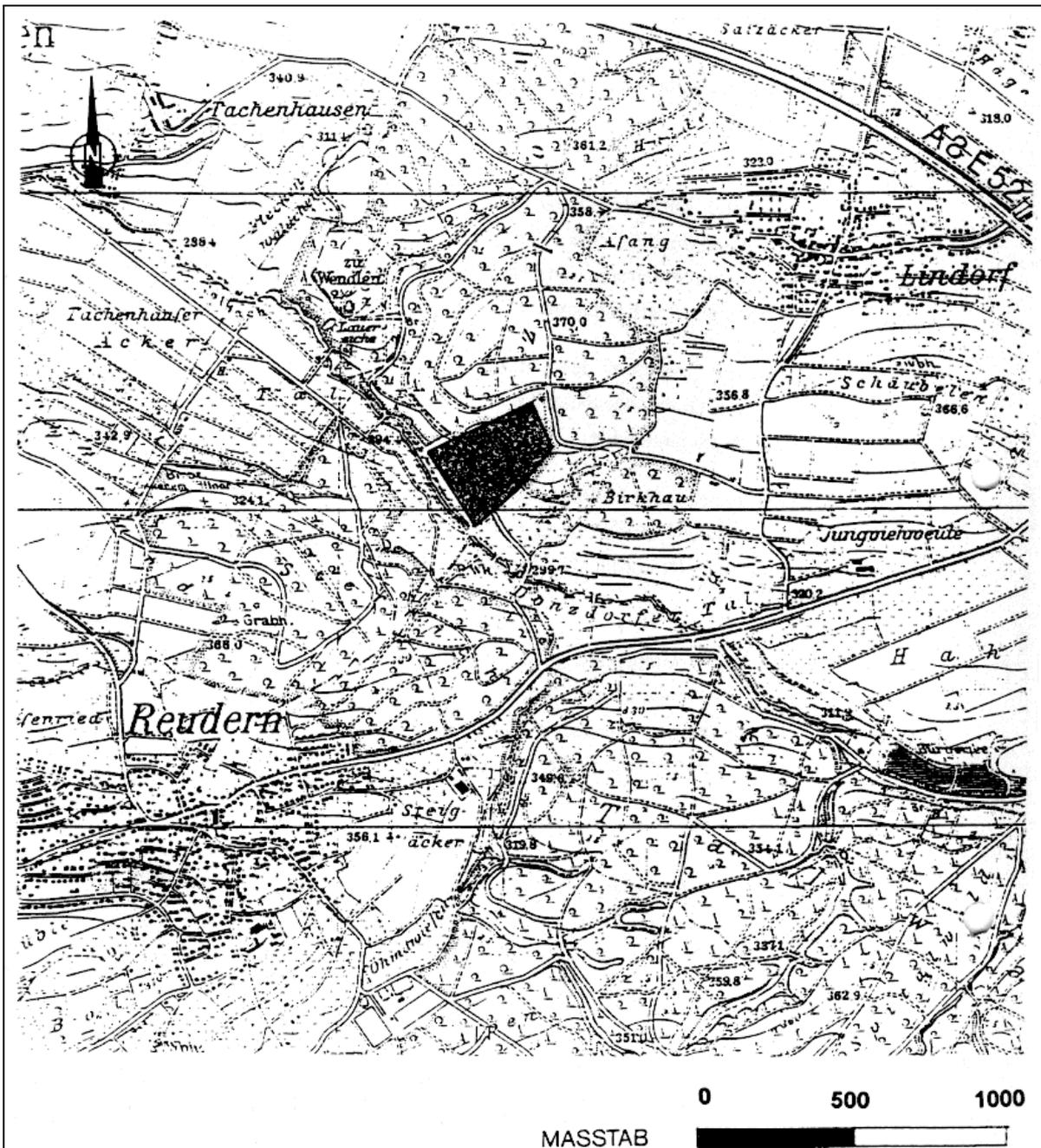


Abb. IV- 7.1: Lageplan Altablagung "Hintere Halde"

## 7.1.2 Infrastruktur

Die ehemalige Kreismülldeponie ist mit einem schwerlastverkehrstauglichen Fahrweg (ehemalige Deponiezufahrt) entlang des Talbachs über die B 297 an das überregionale Verkehrsnetz angebunden. Die B 297 verbindet, von Göppingen kommend nach Tübingen führend, die beiden Kreisstädte Kirchheim unter Teck und Nürtingen miteinander. Ca. 2,5 km westlich von der Deponie besteht von der B 297 eine Auffahrtmöglichkeit zur A 8.

Die nähere Deponieumgebung ist von einer Anzahl sowohl geschotterter als auch unbefestigter Wege durchzogen, wobei auf der Ablagerung selbst nur ein unbefestigter Weg verläuft.

### 7.1.3 Klima

Baden-Württemberg liegt in einem klimatischen Übergangsbereich zwischen maritimen und kontinentalen Einflüssen, wobei durch die vorherrschende Westwinddrift ein ozeanisch geprägtes Witterungsgeschehen vorherrscht.

Die Temperaturverhältnisse im Untersuchungsgebiet können durch die Wetterstation Hohenheim (400 mNN) und Göppingen (320 mNN; Werte in [ ]) annähernd charakterisiert werden. Hierbei liegt die Januar-Temperatur bei  $-0,8^{\circ}\text{C}$  [ $-0,4^{\circ}\text{C}$ ], der Juli-Wert bei  $17,6^{\circ}\text{C}$  [ $18,1^{\circ}\text{C}$ ], das Jahresmittel bei  $8,5^{\circ}\text{C}$  [ $9,0^{\circ}\text{C}$ ] und die Jahresschwankung bei  $18,4^{\circ}$  [ $18,5^{\circ}$ ]. Mit dem Vegetationsbeginn, der Apfelblüte, ist im letzten Aprildrittel zu rechnen. In den Bereichen südlich von Stuttgart werden ca. 30 bis 40 Sommertage (Tage an denen die Temperatur  $25,5^{\circ}\text{C}$  erreicht), um die 80 Frosttage (Temperatur sinkt unter den Gefrierpunkt) und etwa 20 Eistage (Tage mit dem Höchstwert unter dem Gefrierpunkt) gezählt.

Die Vegetationsperiode wird über die mittlere Dauer eines Tagesmittels von  $10^{\circ}\text{C}$  definiert und liegt im Bereich des Untersuchungsgebietes zwischen 160 und 170 Tagen. Diese Werte lassen auf einen relativen Gunstraum, was mit der Lage im Neckarland zusammenhängt, schließen.

Niederschlagsereignisse sind im süddeutschen Raum allgemein vom Durchzug zyklonaler Frontensysteme entlang der Westwinddrift abhängig. Eine bestimmende Rolle spielt dabei die Verteilung der (Mittel-) Gebirgszüge, an denen die Luftmassen zum Aufsteigen und somit zum Abregnen gezwungen werden. Das Untersuchungsgebiet liegt zwar nicht im Bereich der Stauwirkung der Schwäbischen Alb, erfährt aber dennoch bereits erste Auswirkungen, wodurch die Niederschläge zwischen 750-900 mm liegen (Stuttgart 650-750 mm). Die Niederschläge während der Vegetationsperiode (April-Oktober) liegen zwischen 550-600 mm (Stuttgart 400-500 mm), womit ca. 70 % des Niederschlags während der bodenbedeckten Zeit und nur ca. 30 % während der unbedeckten Zeit fallen.

Das Untersuchungsgebiet kann als sommerwarm, mit reichlichen Niederschlägen während der Vegetationsperiode, charakterisiert werden. Als Nutzungsform spielen in solchen Gebieten der Hackfruchtanbau und insbesondere der Obstbau eine Rolle.

### 7.1.4 Geologie und Geomorphologie

Das Albvorland ist in der Umgebung des Standortes als Rest einer Hochflächenlandschaft mit starker Zertalung ausgeprägt. Die die Ablagerung umgebenden nördlichen, westlichen und östlichen Hochflächenbereiche sind von Lößlehm bedeckt.

Der Untergrund des Talbaches besteht aus einer Serie dunkler Tonsteine aus dem Schwarzen Jura  $\beta$ , am ansteigenden Hangbereich stehen Ton- und Mergelsteine mit Kalk- und Sandsteinbänken des Schwarzen Jura  $\gamma$  bis  $\epsilon$  an.

Südlich der Ortschaft Reudern endet die Lößlehmbedeckung der Hochfläche mit dem Anstehen des Opalinuston und der Ludwigienschichten des Braunen Jura ( $\alpha$  und  $\beta$ ). Zwei kleinere Basaltuffvorkommen im Opalinuston, ca. 500 m südlich der Ortschaft Reudern vervollständigen die geologischen Formen.

Anhand der Geologischen Karte 1:25.000, Bl. 7322 ist zu erkennen, daß die Schichten allgemein nach S-SE zum Talbach hin einfallen.

Die **Turneritone** (Schwarzer Jura  $\beta$ ) bilden westlich und östlich des Standortes den Talboden und finden ihre Fortsetzung in den flach ansteigenden, meist als Wiese genutzten Unterhängen des Tales. Die Schicht besteht aus dunklen, schiefrig abgesonderten Schlufftonsteinen, in die einige feste Mergelkalkbänke eingelagert sind (CARLE 1969). Die Schichtmächtigkeit wird mit 30-35 m angegeben (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7322 KIRCHHEIM u. TECK 1982 u. ERLÄUTERUNGEN 1988).

Mit den **Numismalimergeln** (Schwarzer Jura  $\gamma$ ) setzt sowohl eine Veränderung der Gesteinsfarbe von dunkelgrau nach hellgrau, als auch der Geomorphologie ein. Dies ist im Übergang von den Turneritonen zu den Numismalimergel, aufgrund der größeren morphologischen Härte, mit einer Versteilung der Hänge verbunden, was östlich der Ablagerung an den als Schafweide genutzten Hängen gut zu erkennen ist.

Im unteren Teil des Schichtpakets stehen blaugraue, mergelige, schluffige Tonsteine an, im Oberteil sind es eher gelblich-braun gefärbte, etwas festere Mergelsteine. Die oberste Schicht bildet eine dünne, ca. 1,7-1,8 m starke Kalksteinbank (mit *Deroceras davoei*), die einen potentiellen Wasserleiter darstellt (CARLE 1969).

Die Mächtigkeit der Numismalimergel wird im Untersuchungsgebiet mit 10-11 m angegeben (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7322 KIRCHHEIM u. TECK 1982 u. ERLÄUTERUNGEN 1988).

Die höchstgelegene direkt von der Altablagerung betroffene Schicht des Schwarzen Jura wird von den **Amaltheen-Tone** (Schwarzer Jura  $\delta$ ) gebildet. Allgemein wird dieses Schichtpaket aus mergeligen, schluffigen Tonsteinen, in die auch festere Mergelkalk- und dünne Kalksteinbänke eingeschaltet sind, aufgebaut (AKTENEINSICHT AMT FÜR WASSER; BODEN; LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993).

Das Schichtpaket weist in seinem unteren Teil ähnliche Merkmale wie die Numismalimergel auf, geht aber im mittleren Bereich in dunkle, schiefrige Tonsteine über. Ersteres bildet östlich des Standortes mit den Numismalimergel den als Schafweide genutzten ansteigenden Hangbereich. Letztere neigen, ähnlich den Turneritonen, im Gelände zu leicht erkennbaren, flach geböschten Hangformen. Im Bereich östlich der Ablagerung setzt mit dem Ausstreichen der oberen Amaltheen-Tone die Waldnutzung ein.

Die Mächtigkeit der Amaltheen-Tone wird im Standortbereich mit 16-20 m angegeben (GEOLOGISCHE KARTE BLATT 7322 KIRCHHEIM u. TECK 1982 u. ERLÄUTERUNGEN 1988).

An diese von der Altablagerung berührten Schichten schließt der Posidonienschiefer (Schwarzer Jura  $\epsilon$ ) an, der wieder morphologisch härter ist. Im Untersuchungsgebiet streicht der Posidonienschiefer nur als schmales Band aus (ca 7-8 m mächtig) und bildet zusammen mit den ca. 5 m mächtigen Jurensismergel (Schwarzer Jura  $\zeta$ ) die, mit Lößlehm überdeckte, Hochfläche.

Die anstehenden Schichten des Schwarzen Jura  $\beta$ - $\epsilon$  wurden zur Anlage einer Abfalldeponie vom Geologischen Landesamt 1969 wie folgt bewertet:

*"All diese insgesamt etwa 50 m mächtigen Gesteine verwittern an der Oberfläche zu zähen, schluffigen Tonen, die nunmehr die härteren, etwas geklüfteten Lagen einhüllen und somit nicht mehr wasserdurchlässig sind. Abgespülten Tonen an den Steiflanken des Tales können auch noch Anteile der die Hochfläche verhüllenden Löße beigemischt sein. Es erscheint ausgeschlossen, daß durch Berührung mit Müll verunreinigte Wässer in den Untergrund versickern können. Grundwasser kann also nicht verunreinigt werden."* (AKTENEINSICHT AMT FÜR WASSER; BODEN; LUFT KIRCHHEIM u. TECK 1993). Neuere Bewertungen durch das Geologische Landesamt lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht vor.

### 7.1.5 Hydrogeologie

Der Wechsel von wasserdurchlässigen und wasserundurchlässigen Schichten innerhalb einer Schichtstufenlandschaft bedingt eine größere Zahl an Schichtquellen. Diese sind zwar im Albvorland zahlreich vorhanden, verfügen aber aufgrund der starken Schollenzerstückelung und Schichtverbiegung meist nur über kleine Einzugsgebiete, woraus nur geringe Schüttmengen resultieren. Im Untersuchungsgebiet treten Schichtquellen in größerer Zahl an der Grenze Turneritone-Numismalimergel auf. Ebenfalls über Quellhorizonte verfügt der Posidonien-schiefer, wobei hier das Niederschlagswasser der Hochfläche gesammelt austritt.

In der Standortumgebung sind mehrere schwache Quellaustritte am Hang zu beobachten. Im westlichen Nachbartal "Allmer" tritt an der Grenze Turneritone-Numismalimergel eine Schichtquelle aus. Am Standort selbst trat im südöstlichen Hangbereich des Talbaches ebenfalls eine Schichtquelle, die ehemalige gefaßte "Quelle am Berg", mit einer Schüttung von 0,7-1,2 l/s aus. Ursächlich hierfür dürfte nach CARLE (1969) die geringmächtige Kalksteinbank mit *Deroceras davoei* an o.g. Grenze, sowie sich in der Verwitterungsschicht ansammelndes Wasser sein. Da die Kalksteinbank ebenfalls im Bereich der Deponie verläuft, kann angenommen werden, daß, wie auch im Bereich der Schichtquellen des Posidonien-schiefers, ein Zufluß in den Deponiekörper möglich ist. Dieser Punkt ist für die Fragestellung von großer Bedeutung, da die Altablagerung über keine Basisabdichtung, die diesen Zufluß verhindern könnte, verfügt.

### 7.1.6 Bodengesellschaften

Die Böden einer Schichtstufenlandschaft sind vielfältig und je nach Ausgangsmaterial, Lage im Relief etc. unterschiedlich ausgeprägt. Im Untersuchungsgebiet treten als Ausgangsmaterialien Tonsteine, Mergelsteine, Übergangsformen beider sowie Lößlehm auf.

Böden aus Tonsteinen, wie den Turneri- und den oberen Amaltheen-Tonen, sind primär stark tonhaltig, haben Reaktionsbereiche von neutral bis stark sauer, weisen aufgrund von Bodenarten wie lehmiger Ton und toniger Lehm Sekundärgefüge (Polyeder, Prismen) auf und können bis über 1 m mächtig werden. Diese **Pelosole** ( $A_H$ -P-C-Horizontabfolge) mit ihren Varietäten eignen sich in der Regel nicht besonders gut für eine ackerbauliche Nutzung und werden, wie im Bereich des Standortes, als Grünland oder Wald genutzt.

Die Böden der Numismalmergel, sowie der unteren Amaltheen-Tone sind geringmächtigere (< 20 cm) carbonathaltige-carbonatfreie **Pararendzinen** (A<sub>h</sub>-C<sub>v</sub>-C-Horizontabfolge). Die Bodenarten liegen hier im schluffigen Bereich, wie etwa lehmiger Schluff, Schluff und schluffiger Lehm. Übergänge zu anderen Bodentypen, wie etwa der Braunerde-Pararendzina mit einem verbraunten B<sub>v</sub>C<sub>v</sub>- und/oder B<sub>v</sub>A<sub>h</sub>-Horizont dürfen nicht ausgeschlossen werden. Im Standortbereich sind diese Böden als Grünland (Schafweide) und Obstwiesen in Nutzung.

Im Bereich der Hochfläche mit Lößlehmbedeckung treten, je nach Reliefsituation, sowohl **Parabraunerden** (A<sub>h</sub>-A<sub>1</sub>-B<sub>t</sub>-C-Horizontabfolge) als auch **Pseudogleye** (A<sub>h</sub>-S<sub>w</sub>-S<sub>d</sub>-C-Horizontabfolge) auf. Diese durchaus wertvollen Böden mit lehmiger bis lehmig-toniger Textur und ordentlichen Nährstoffgehalten sind in der näheren Standortumgebung in Waldnutzung, stellen aber in der Regel Ackerstandorte dar (z.B. Filder).

### 7.1.7 Vegetation

Die natürliche Vegetation Mitteleuropas ist von den sogenannten Edellaubwäldern (Fagetalia) geprägt. In diesen Wäldern herrschen die Baumarten Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Spitzahorn (*Acer platanoides*) Hainbuche (*Carpinus betulus*), Buche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*), Traubeneiche (*Quercus petraea*), Esche (*Fraxinus excelsior*), Winterlinde (*Tilia cordata*) und Ulme (*Ulmus minor*) vor. Für das Untersuchungsgebiet sind von zahlreichen Gesellschaften die Buchen- und Buchenmischwälder (Fagion) sowie die hainbuchenreichen Laubmischwälder (Carpinion) von Bedeutung. Standortkundlich meiden erstere Trockenheit und Bodennässe, während letztere sich an diesen Orten, aufgrund physiologischer Schwächen der ansonsten konkurrenzstärksten Buche, durchsetzen können (vergl. Kap. 6.1.8).

Die Vegetation läßt sich im Standortbereich in drei größere Gruppen gliedern. Gemäß den geomorphologischen Einheiten sind dies der Talboden mit der Aue, die Hangbereiche sowie die Hochfläche.

Die ursprüngliche Waldgesellschaft der Hochfläche war ein "**Reicher Braunmull-Buchenwald**" (Galium-Fagetum = Waldmeister-Buchenwald). Wie der Name "Braunmull", eine Kombination der Humusart Mull und des Bodenbildungsprozesses der Verbraunung, impliziert, stockt diese Waldgesellschaft auf Braunerden und Pararendzinen mittlerer bis guter Basenversorgung der montanen Stufe. Floristisch ist sie durch eine nur noch geringe Anzahl an Kalkzeigern, sowie dem verstärkten Auftreten säure- und trockenheitsertragender Arten gekennzeichnet.

Bedingt durch die Lichtökologie der Buchen (große, dichte Krone) bilden sie strauch- und moosarme Hallenwälder, in denen kaum Eichen, dagegen aber öfter Esche, Berg- und Spitzahorn auftreten. In der Krautschicht überwiegen Arten mit mittleren Ansprüchen, wie *Milium effusum* (Flattergras), *Dryopteris filix-mas* (Wurmfarn) und *Polygonatum multiflorum* (Viellütige Weißwurz). Als Arten mit höheren Ansprüchen treten *Galium odoratum* (Waldmeister), *Lamium galeobdolon* (Goldnessel) und *Melica nutans* (Nickendes Perlgras) hinzu.

Im Wechsel mit der oben genannte Waldgesellschaft tritt auf ärmeren Braunerden und Parabraunerden aus der Gruppe der Moderbuchenwälder der "**Hainsimsen-Buchenwald**" in seiner artenreicheren Form (*Luzulo fagetum milietosum*) auf. Auf diesen ärmeren Böden sind für

das Gedeihen der Buche die Tiefgründigkeit und Textur, weniger die chemischen Eigenschaften, der Böden von Bedeutung. Die Waldgesellschaft ist im allgemeinen artenärmer und durch das Auftreten von *Luzula luzuloides* (Hainsimse) geprägt. Treten mittlere Arten wie *Milium effusum*, *Carex sylvatica* (Wald-Segge) auf, leitet die Waldgesellschaft als Übergangsform zu den "Braunmull-Buchenwälder" über.

Im Bereich der ansteigenden Hänge mit anstehenden Pelosolen ändert sich die Waldgesellschaft. Auf den schweren Lehm- und Tonböden, die durch zeitweise Vernässung und Austrocknung einen unausgeglichenen Luft- und Wasserhaushalt aufweisen, wird die Konkurrenz der Buche gehemmt. Die Buche tritt zwar regelmäßig auf, ist aber an diesem edaphisch bedingten Sonderstandort den Eichen und Hainbuchen unterlegen. Der hier vorkommende "**Waldlabkraut-Traubeneichen-Hainbuchenwald**" weist eine vielfältige Baumschicht (Traubeneiche, Hainbuche, Buche, Vogelkirsche, Feldahorn, Winterlinde), eine Strauchschicht (Hasel, Pfaffenhütchen, Elsbeere) und eine Krautschicht mit nicht zu trockenen Arten auf. Als Kennarten gelten *Potentilla sterilis* (Erdbeerfingerkraut), *Convallaria majalis* (Maiglöckchen), *Carex montana* (Berg-Segge), *Ranunculus auricomus* (Gold-Hahnenfuß), *Galium sylvaticum* (Waldlabkraut), sowie *Dactylus glomerata* (Wald-Knäulgras) (vergl. Kap. 6.1.8).

Lokal kann in feuchteren, mehr oder weniger basenarmen Tälchen auch der "**Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwald**" auftreten. Kennzeichnend für diesen Waldtyp sind die mehr Feuchtigkeit ertragende Stieleiche (als Traubeneiche) und die Große Sternmiere (*Stellaria holostea*), sowie die Differentialarten *Hedera helix* (Efeu) und *Poa nemoralis* (Hain-Rispengras)

Am Talbach stehen die Reste eines "**Erlen-Eschen-Auwaldes**", der wie in den meisten Fällen in Grünland (Mähwiesen) umgewandelt wurde. Die dominanten Arten dieser Waldgesellschaft sind *Alnus glutinosa* (Schwarzerle) und *Fraxinus excelsior*. An basenreichen, nicht allzu nassen Standorten herrscht *Fraxinus* vor, wobei in der Baumschicht noch regelmäßig *Prunus padus* (Traubenkirsche), *Ulmus laevis* (Flatterulme), und *Quercus robur* hinzutreten. Vertreter der vielfältigen Strauchschicht sind *Corylus avellana* (Hasel), *Sambucus nigra* (Schwarzer Holunder), *Euonymus europaea* (Pfaffenhütchen), *Viburnum opulus* (Gemeiner Schneeball), *Humulus lupulus* (Hopfen) und andere. In der Krautschicht stehen bevorzugt feuchtigkeitsliebende Stauden wie *Petasites hybridus* (Gemeine Pestwurz), aber auch *Arum maculatum* (Aronstab) oder *Urtica dioica* (Brennnessel).

Die gesamte Vegetation ist, mit Ausnahme der unmittelbaren Auenvegetation des Talbaches, anthropogen überprägt, also Kulturlandschaft.

Die Waldgesellschaften wurden für die Grünlandnutzung teilweise entfernt. Dies geschah insbesondere an den als Schafweide dienenden Hängen östlich der Ablagerung sowie der Aue. Im Bereich westlich der Ablagerung sind die Waldgebiete, wenn auch stellenweise forstwirtschaftlich als Nadelwaldstandort genutzt, erhalten. Die generelle Waldnutzung orientiert sich aber in der Umgebung der Altablagerung an den ursprünglichen Waldtypen, was vermutlich an den schwierigen Bodenverhältnissen (Pelosole etc.) und den dadurch ausgebliebenen Fichten-Monokulturen liegt. So ist im Bereich der Ablagerung eine Waldzusammensetzung aus Eichen, Hainbuchen und v.a. Buchen erhalten.

## 7.1.8 Nutzungsformen

Der Bereich der Ablagerung unterliegt unterschiedlichen Nutzungsformen durch die Bevölkerung und Gemeinden.

Bereiche der Talsohle werden an Stellen, die es flächenmäßig zulassen, als Grün- und Ackerland genutzt. Die ansteigenden Hangbereiche unterliegen entweder der Waldnutzung oder dienen als Schafweide und Wiesen. Die Hochfläche ist in forstwirtschaftlicher Nutzung und stellt einen größeren Bereich des Staatswaldes, mit beachtlichen Eichen- und Buchenbeständen, dar.

In ca. 300 m Entfernung zur Altablagerung befindet sich das Gelände einer großen Baufirma, die hier sowohl eine Aufbereitungsanlage für Straßenaufbruch betreibt als auch ihren Fuhrpark unterstellt. Ca. 20 m südlich dieses Geländes schließt sich ein Verkehrsübungsplatz mit angeschlossener Gaststätte an.

Die Umgebung, aber auch die Altablagerung selbst, wird von der Bevölkerung intensiv als Naherholungsgebiet genutzt. Deutlich wird dies an der großen Anzahl Spaziergänger, Radfahrer und Jogger. Der Weg auf der Ablagerung ist darüber hinaus als Reitweg gekennzeichnet und nach Auskunft vom Forstamt dient das gesamte Gelände der Jagd.

## 7.2. Beschreibung der Altablagerung

Im Jahre 1970 schlossen sich die sieben Städte und Gemeinden Kirchheim u. Teck, Nürtingen, Wendlingen, Oberboihingen, Reudern, Unterensingen und Zizishausen zusammen um gemeinsam, für rund 88.0000 angeschlossene Einwohner, eine der ersten "**geordnete Abfalldeponien**" zu betreiben.

Als Standort wurde die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Talmulde mit zwei Parzellen im Gewann "Hintere Halde" der Gemeinde Oberboihingen und einer Parzelle im Gewann "Rübholz" der Markung Lindorf gewählt. Der Rechtswert des Standortes beträgt 3529.500, der Hochwert 5389.200.

Als **Zufahrt** zum Standort mußte von der B 297, 30 m westlich des Talbaches abzweigend ein neuer Betonfeldweg gebaut werden. Aufgrund des hohen Schwerlastverkehrsaufkommens zur Deponie, mit bis zu 70 Fahrzeugen am Tag (Müllsammelfahrzeuge, Muldenkipper, Selbstanlieferer), wurde die Betonfahrbahn auf 5,50 m Breite mit beidseitigem 50 cm breiten Randstreifen ausgeführt.

Die **Gesamtfläche** der Deponie betrug ca. 9,2 ha. Aus dieser Fläche ermittelten die Planer ein Auffüllvolumen von ca. 780.000 m<sup>3</sup>, wobei für das Erdmaterial der Dämme, des Sichtschutzes und der Abdeckung ca. 170.000 m<sup>3</sup> abzuziehen waren, woraus letztlich ca. 610.000 m<sup>3</sup> reines Müllvolumen resultierten. Zur damaligen Zeit wurde für den eingebauten Müll ein Raumgewicht von 0,7 Mg/m<sup>3</sup> angenommen, was bei einem Müllanfall von 35.000 m<sup>3</sup> für das Jahr 1970 und geschätzten 50.000 m<sup>3</sup> für 1980 und 57.000 m<sup>3</sup> für 1984 eine Deponielaufzeit von 15 Jahren ergeben hätte. Die Deponie wurde infolge reger Bautätigkeit in der Umgebung 1978 als Bauschuttdeponie erweitert.

Über **Müllmengen** und die **Müllzusammensetzung** liegen keine exakten Informationen vor. Der Grund hierfür liegt in den mangelnden Dokumentationen aus dieser Zeit, da weder Wiegeeinrichtungen noch Abfallanalysen damals Stand der Technik waren.

Zur Ablagerung auf der Deponie kamen u.a. folgende Abfallarten: Hausmüll, Gewerbeabfälle, Sperrmüll, Straßenkehricht, Klärschlamm, Industrieschlämme (nach Begutachtung; Wassergehalt 35-40%), Galvanikschlämme, Schrott, Altreifen, Bauschutt und Erdaushub. Weiterhin wurden entwässerte Hydroxidschlämme, Magnesiumkrätze, Salzschlacke aus Ofenausbrüchen von Metallschmelzwerken (NaCl, KCl, metallische Oxide, Spuren von Kryolith), sowie vom Januar 1979 bis Dezember 1981 ca. 18.000 Mg/a Schlacke aus der Müllverbrennungsanlage in Göppingen abgelagert (freundl. mündl. Mittlg BOXLER 1993).

Der **Betrieb** der Deponie sah eine terrassenförmige Auffüllung mit anschließender Angleichung an die in der Umgebung vorhandenen Neigungsverhältnisse vor.

Die erste Terrasse wurde in einer Höhe von 310 mNN geschüttet. Für deren Befestigung wurde allerdings zuerst ein Abschlußdamm aus Erdmaterial mit flacher Böschung und sofortiger Bepflanzung angelegt. Der Auffüllbetrieb sah vor, darauf jeweils Terrassen von 5 m Höhe aufzuschütten, die talseitig ebenfalls zuerst mit einem Abschlußdamm (auch Sichtschutz) befestigt wurden. Der Damm konnte sowohl aus Erdmaterial als auch aus besonders gut verdichtetem Müll mit Erdaushub errichtet werden. Anschließend wurde er, der im Gelände vorherrschenden Neigung gemäß, planiert, mit "Mutterboden" abgedeckt und begrünt oder aufgeforstet.

An den jeweiligen Terrassen wurden hangseitig geböschte Begrenzungsdämme errichtet. Diese sollten Oberflächenwasser von der Versickerung in die Mülleinbaufläche abhalten und in seitliche Deponierandgräben ableiten.

Der Müll wurde auf den Terrassen in fünf Schichten mit einer **Raupe** (14 Mg) zu maximal einem Meter eingebaut und verdichtet. Ab März 1973 stand für letztere Tätigkeit ein **Kompaktor** (Müllverdichter) mit 16,5 Mg Gewicht zu Verfügung. Es war geplant die einzelnen Schichten mit körnigem Material (z.B. Erdaushub, Bauschutt) ca. 10-20 cm hoch abzudecken; eine Maßnahme die nur zur Anfangszeit durchgeführt wurde und später ausblieb.

Bei der Anlieferung der Müllfahrzeuge wurde nicht die damals übliche Überkopfschüttung praktiziert. Vielmehr wurde darauf geachtet, daß die Ladungen auf der bereits bestehenden Müllfläche abgekippt wurden, von wo aus das Material durch die Raupe aufgenommen und zerkleinert in die Einbaufläche geschoben wurde, um dort vom Kompaktor verdichtet und eingebaut zu werden. Durch diese Verfahrensweise konnte das Deponiepersonal die Zerkleinerung, Vermischung und Verdichtung jederzeit kontrollieren und falls nötig ändern.

Zur **Entwässerung** war unterhalb des Abschlußdamms ein sternförmiges Drainagesystem in Richtung Talbach, wo es in einen Sammelschacht mündet, vorgesehen. Die Kunststoffrohre der Drainage mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Kiesummantelung sind heute allerdings zerstört. Mehrere Sickerwasseraustrittsstellen auf dem Deponiekörper wurden ebenfalls gefaßt und dem Sickerwassersammelschacht zugeführt. Vom Sammelschacht aus erfolgt die Ableitung des Sickerwassers durch einen PE-Schlauch im Bachbett des Talbaches zur Kläranlage in Oberboihingen. In jüngerer Zeit wurde an der östliche Deponieflanke im Be-

reich der Fläche IV eine Randsickerung verlegt die ebenfalls an den Sammelschacht angeschlossen ist.

Die letzte *Sickerwasseranalyse* vom Juli 1992, durchgeführt im Auftrag des Wasserwirtschaftsamtes Kirchheim/Teck besagt, daß die Werte des Sickerwassers "*noch die Anforderungen der Rahmenabwasser VwV Anhang 51 erfüllen. Es ist daher weiterhin die Einleitung des Sickerwassers in die öffentliche Kanalisation und von dort zusammen mit dem im Kanalnetz anfallenden Abwasser zwecks Reinigung in der Sammelkläranlage möglich und wird von hier aus als erforderlich angesehen*".

Im Jahre 1971 traten an der in Kap.2 erwähnten "Bergquelle" Verunreinigungen durch Sickerwässer auf, die eine Sanierung ausschlossen und die Quelle von der Trinkwassernutzung ausschied.

Die Deponie wurde nach der Verfüllung mit einer **Abdeckung** versehen. Diese besteht je nach Materialanfall in der Umgebung aus Erdaushub, Bauschutt oder lehmigen Komponenten. Das weitgehend sterile Material wurde teilweise verdichtet aufgebracht, um eine möglichst hohe Wasserundurchlässigkeit zu erreichen. Als Pflanzenstandort dagegen bietet dieses Substrat aufgrund seiner Verdichtung, dem Mangel an organischer Substanz, dem fehlenden Gefüge sowie allgemein schlechten bodenphysikalischen Eigenschaften ungünstigere Voraussetzungen.

## 7.3 Untersuchungen auf der Altablagerung

### 7.3.1 Geomorphologie

Entsprechend der geomorphologischen "Großeinheiten" erfolgt eine Unterteilung des gesamten Deponiebereichs in vier einzelne Teilflächen. Diese Unterteilung ist aufgrund unterschiedlicher Standortbedingungen der einzelnen Flächen für eine ökologische Bewertung, aber auch für die anschließende Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem Rechnerprogramm "HELP" nötig.

Die ehemalige Talmulde wurde durch die Errichtung der Deponie in eine Vollform umgewandelt. Dies wird deutlich, wenn man sich der Deponie von Nordosten, von der Hochfläche kommend, nähert. Zwischen der Hochfläche und der Deponie erstreckt sich ein flach abfallender Hang (Neigung ca. 5°), der mit Beginn der Deponiefläche wieder ansteigt und eine Kuppe mit leichter Gipfelverebnung ausbildet. Diese Deponieteilfläche soll im folgenden als Fläche I bezeichnet werden.

Von der Kuppe aus erstreckt sich ein mit ca. 12° gleichmäßig geneigter Hangbereich nach Südwesten, weiterhin als Fläche II bezeichnet.

Südlich des "Deponieweges" setzt sich der Hangbereich v.a. nach Südosten weiter fort, um in eine weitere Verebnung (Fläche III) überzugehen. Fläche III ist aufgrund der fehlenden Neigung stark von Vernässungsbereichen betroffen.

Von Fläche III fällt mit 17° ein relativ steiler Hang, Fläche IV, in Richtung Talbach ein, bis zu dessen Lauf noch ca. 10 m ebene Fläche des Talbodens erhalten geblieben sind.

Die seitlichen Begrenzungen der Deponie fügen sich mehr oder weniger in das ehemalige Relief ein. Steigt das Gelände von der Umgebung zu Fläche I sowohl im Westen als auch im Osten an, so sind Unterschiede zu Fläche II, aufgrund ähnlicher Hangneigungen wie in der Umgebung schwieriger zu erkennen. Vor allem der westliche Übergang von Fläche II zum angrenzenden Waldgebiet ist kaum wahrnehmbar. Der östliche Übergang von Fläche II zur Umgebung ist durch die Anlage eines Weges und eines Deponierandgrabens, dessen Böschung im tieferliegenden südlichen Teil recht steil wird, gekennzeichnet.

Waren die Flächen I und II noch relativ gut in das bestehende Relief integriert, so fallen die nachträglich angesetzten Flächen III und IV optisch bemerkbar aus dem Rahmen. In der Umgebung gibt es im Bereich der geologischen Schichten des Schwarzen Jura  $\delta$  bis  $\delta$  aufgrund der Geomorphogenese weder eine Verebnungsfläche, noch eine mit Fläche IV vergleichbare gleichförmig steile Hangsituation.

Aufgrund der Reliefsituation auf der Altablagerung kommt es sowohl zu Staunässezonen, als auch zu Oberflächenabfluß. Staunässe tritt verstärkt auf den Verebnungsflächen, wie Fläche III, aber auch einer kleineren Verebnung auf der Kuppe, auf. Ob es in der kurzen Zeit von 10 Jahren schon zu Stauwassermerkmalen in der Deckschicht kommen kann, ist im weiteren zu klären. Ersichtlich ist allerdings an den entsprechenden Stellen ein verstärktes Auftreten von Nässezeigern in der Krautschicht.

Weitere Vernässungszonen stellen Sickerwasseraustrittstellen dar. Betroffen ist hiervon insbesondere der Bereich des "Deponieweges", aber auch das Gebiet der westlichen Deponiegrenze, wo es wegen eines fehlenden Randgrabens mit freier Ableitung immer wieder zu Sickerwasseraustritten an der Oberfläche kommt. An den Austrittstellen erfolgt in den meisten Fällen, aufgrund von ausgefallten Eisenoxidverbindungen (Eisenocker), eine charakteristische rote Färbung der Bodenoberfläche.

Am "Deponieweg" tritt, bedingt durch die lokale hohe Verdichtung, bevorzugt Sicker- und Hangzugswasser aus. Da das Problem schon in der Vergangenheit bestand, wurden einige Sickerwasseraustrittstellen gefaßt und in das bestehende Drainagesystem, den Sickerwasserschacht am Fuß der Deponie, abgeleitet. Inwieweit diese Maßnahmen heute noch wirksam sind, ist unbekannt, allerdings kann eine Zerstörung der Leitungen vermutet werden. Entlang des Weges führt im westlichen Teil ein Entwässerungsgraben der anfallendes Wasser, v.a. Oberflächen- aber auch ausgetretenes Hangzugs- und Sickerwasser, in das westlich anschließende Waldgebiet ableitet.

An Erosionsformen sind an der Deponieoberfläche Rinnen in den steileren Hangbereichen zu erkennen, wofür die Ursache hauptsächlich in der Bepflanzung senkrecht zum Hang zu sehen ist. Ebenfalls auffallend sind in den Hangbereichen Schäden durch Trittschäden von Spaziergänger. In Bereichen mit Deponiegasaustritten, die eine zerstörte Vegetationsdecke nach sich ziehen, treten flächenhafte Erosionsschäden auf. Aufgrund des hohen Besatzes mit Schalenwild und Wildschweinen kommt es lokal zu einer erheblichen Zerstörung sowohl der Vegetationsdecke, als auch des Bodengefüges. An den in großer Zahl vorhandenen "Schweinesohlen" sind v.a. auf geneigteren Flächen erhebliche Schäden zu erkennen.

Über die Einfügung der Deponie in das vorhandene Relief ist festzuhalten, daß der ältere Teil mit überwiegendem Hausmüllanteil zwar zu einer erkennbaren Umkehr des Reliefs führte,

sich aber dennoch relativ verträglich in die bestehenden Geländeverhältnisse einfügt. Ohne jegliche Beziehung zu den vorhandenen Landschaftsformen wurde die Deponieerweiterung angelegt. Im Gegensatz zum älteren Teil wird die jüngere Fläche auch weiterhin als Fremdkörper in die Tallandschaft hineinragen.

Bezüglich der Staunässe liegen die Problemzonen in Fläche III, dem "Deponieweg" sowie der Verebnung auf der Kuppe. Abhilfe könnten hier Drainagen schaffen, doch ist der Erfolg solcher Maßnahmen, die auf Dauer gesehen werden müssen, als relativ bescheiden anzusehen.

Die Eindämmung von Erosionsereignissen, wie beispielsweise Rinnen, kann nur über eine gezielte Anpflanzungen geschehen. Bei der hier vorgenommenen Rekultivierung wurde bereits durch die Anpflanzung parallel zur Hangneigung grundsätzlich eine falsche Vorgabe geschaffen. Nur durch Bepflanzung mit mehrjährigen Arten, die den Boden stabilisieren und den Abfluß im Winterhalbjahr hemmen, kann eine Schadensbegrenzung erreicht werden.

Weiterhin wäre es aus Erosionsschutzgründen zu begrüßen, wenn möglichst schnell ein optimales Gefüge im Oberboden aufgebaut werden würde. Maßnahmen hierzu wären die Aufbringung von Humus (Kompost, Mulchung usw.) sowie eine weitergehende Belebung der Deckschicht durch die Bodenfauna.

Aufgrund der Unwegsamkeit der überwiegend bewaldeten Kuppe, stellt dieser Teil der Altablagerung ein geeignetes Rückzugsgebiet für Tiere dar. Hierbei muß allerdings gewährleistet sein, daß eine Zerstörung der Vegetation sowie der Deckschicht durch einen zu hohen Schalenwildbestand ausgeschlossen ist.

Bei Berücksichtigung der angeführten Punkte erscheint es möglich, sowohl eine akzeptable Eingliederung des Deponiekörpers in die Landschaft, als auch die Sicherung der Deckschicht mit der bestehenden Vegetationsdecke und dadurch einen verminderten Abfluß in der Deponiekörper, zu erreichen.

## 7.3.2 Deckschicht der Altablagerung

### 7.3.2.1. Untersuchung der einzelnen Deponieabschnitte

Der *Deponieabschnitt I*, die Kuppe, weist durchgehend Mindestschichtmächtigkeiten von 2 m auf. Für ein Bohrprofil ist die Mächtigkeit aufgrund unterlagernder Steine nicht vollständig erfaßt.

Bei den *Bodenarten* überwiegen bis ca. 50 cm Tiefe schluffige Lehme, wobei auch Schichten mit sandigen Tonen auftreten. Ab ca. 50 cm werden die sandigen Tone von tonigen Lehmen abgelöst und ab einer Tiefe von 170 cm sind schluffige, tonige und sandige Lehme zu etwa gleichen Anteilen vertreten.

Vereinzelt treten verdichtete oder steinige Schichten auf, wogegen keine Anzeichen von Staunässe zu verzeichnen sind.

Für den *pH-Wert* der Kuppe bewegen sich die Werte zwischen 6,3 und 7,0. Der für die Fläche gemittelte pH-Wert liegt bei 6,8. Niedrigere und höhere pH-Werte sind nicht bestimmten Flächen zuzuordnen, sondern verteilen sich über die gesamte Fläche.

Die *Carbonatgehalte* reichen von 0,5-2 %, die als carbonatarm bezeichnet werden, bis zu 10-25 %, die als carbonatreich eingestuft werden. Carbonatfreie Bohrprofile fehlen dagegen. Im Durchschnitt liegt der Carbonatgehalt dieses Deponieabschnitts jedoch zwischen 2 und 7 %.

In das Deckschichtmaterial eingelagerte kleine Carbonatteilchen führen dazu, daß pH-Werte von unter 7 mit erhöhten Carbonatgehalten auftreten.

Die *Feldkapazitäten* der einzelnen Bohrpunkte spiegeln den Einfluß sandigerer Schichten wider. Diese weisen mit 575 l/ 2m<sup>3</sup> die niedrigsten Werte auf, während die höchste Feldkapazität mit 790 l/ 2m<sup>3</sup> auf tonreichere Schichten zurückzuführen ist. Die Berechnungen für den Mittelwert dieses Deponieabschnitts, ergeben eine Feldkapazität von 703 l/ 2m<sup>3</sup>, die als sehr hoch zu bewerten ist.

Auch die Werte für die *nutzbare Feldkapazität* liegen mit 149 l/ m<sup>3</sup> in einem für die Pflanzenversorgung sehr guten Bereich. Allerdings zeigen die Bohrprofile mit einem höheren Tonanteil schlechtere Werte bezüglich der Wasserversorgung, da das Wasser in größerem Maß als Totwasser und damit für die Pflanzen nicht verfügbar gespeichert ist.

Die *Wasserleitfähigkeit* im gesättigten Boden ist im Mittel mit  $1,16 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s als gering zu bewerten, kann sich örtlich durch die sandigeren Lagen jedoch auf  $1,16 \cdot 10^{-6}$  bis  $4,63 \cdot 10^{-6}$  m/s erhöhen.

Die Schichtmächtigkeiten des **Deponieabschnitts II** liegen, soweit sie ermittelt werden konnten bei mindestens 2 m. Aufgrund von starker Verdichtung oder Steinen, ist für drei Bohrpunkte keine Aussage zur Mächtigkeit der Deckschicht möglich.

Bei den *Bodenarten* dominieren lehmige Schluffe, schluffige Lehme und lehmige Tone, ohne daß eine Bodenart für bestimmte Schichttiefen charakteristisch ist. Nur für die Schichten ab 170 cm sind tonige Lehme bestimmend. Für einen Bohrpunkt liegen durchgehend sandige Lehme vor. Die Schichten weisen nur geringfügig Grobbodenanteile auf und, vergleichbar mit Deponieabschnitt I, sind auch keine Vernässungen zu verzeichnen.

Die *pH-Werte* bewegen sich in einem relativ weiten Bereich zwischen 6,1 und 7,7. Der Mittelwert liegt bei 7,0, besitzt aufgrund der erheblichen Schwankungen jedoch nur geringen Aussagewert. Analog zu Deponieabschnitt I ist auch hier keine Einteilung in Flächen höherer oder niedrigerer pH-Werte möglich. Bei den Bohrpunkten mit den niedrigsten pH-Werten sind erhebliche Geruchsemissionen, verursacht durch Deponiegas oder Klärschlamm, aufgetreten.

Erhebliche Spannbreiten treten auch bei den *Carbonatgehalten* auf, die von 0 % bis 25-50 % reichen und auch innerhalb des Bohrprofils schwanken, so daß eine Durchschnittsangabe als nicht sinnvoll erscheint.

Bezüglich der *Feldkapazität* liegen die Durchschnittswerte bei 718 l/ 2m<sup>3</sup>. Berechnungsgrundlage hierfür sind die auf 2 m gebohrten Profile. Unter Einbeziehung der geringmächtigeren Bohrprofile ergibt sich eine mittlere Feldkapazität von 677 l/ 2m<sup>3</sup>. Beide Ergebnisse kön-

nen als sehr hoch eingestuft werden. Die Werte schwanken je nach überwiegenden Bodenarten der Bohrpunkte zwischen 606 und 790 l/ 2m<sup>3</sup>.

Die *nutzbare Feldkapazität* liegt mit einem Durchschnittswert von 157 l/ m<sup>3</sup> hoch und bietet den Pflanzen eine gute Wasserversorgung. Die unterschiedlichen Bodenarten der Bohrpunkte ergeben nutzbare Feldkapazitäten zwischen 118 und 202 l/ m<sup>3</sup>, je nach Höhe des Tongehaltes.

Die *gesättigte Wasserleitfähigkeit* ist bei allen Bohrpunkten mit einem Wert von  $1,16 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s als gering einzustufen.

In **Deponieabschnitt III** betragen die Schichtmächtigkeiten bei den Bohrpunkten, die auf 2 m Tiefe gebohrt werden konnten, mindestens 2 m.

Hinsichtlich der *Bodenarten* überwiegen bis ca. 70 cm schluffige Lehme, die bis ca. 140 cm zusammen mit tonigen Lehmen die Hauptbodenarten bilden. In den unteren Schichten liegen überwiegend tonige Lehme vor. Zu berücksichtigen ist jedoch, daß zwei der neun Bohrpunkte dieser Fläche nur bis ca. 50 cm Tiefe reichen, so daß sich dadurch eine sehr starke Gewichtung der unteren Schichten der übrigen Bohrpunkte ergibt.

Der Deponieabschnitt ist gekennzeichnet durch einen Wechsel zwischen sehr feuchten und sehr trockenen Flächen. Höhere Grobbodenanteile und Verdichtungen sind nur für jeweils einen Bohrpunkt zu verzeichnen.

Die *pH-Werte* liegen zwischen 7,0 und 7,5, wobei der Mittelwert pH 7,1 beträgt.

Hinsichtlich der *Carbonatgehalte* reichen die Werte von 0,5-2 % bis 10-25 %. Der niedrigste und der höchste Carbonatgehalt treten jedoch nur jeweils bei einem Bohrpunkt auf, so daß der Durchschnittswert von ca. 4-7 % als charakteristisch für diesen Deponieabschnitt gelten kann.

Für die Berechnung der *Feldkapazität* ergibt sich, wie auch im vorhergehenden Deponieabschnitt II durch die beiden geringmächtigen Bohrpunkte ein Problem. Die Unterschiede mit und ohne Einbeziehung dieser Bohrpunkte sind mit 705 l/ 2m<sup>3</sup> und 579 l/ 2m<sup>3</sup> sehr deutlich.

Der Mittelwert der *nutzbare Feldkapazität* für diesen Deponieabschnitt liegt mit bzw. ohne Berücksichtigung der beiden geringmächtigen Bohrpunkte bei 132 l/ m<sup>3</sup> und 149 l/ m<sup>3</sup>. Aufgrund der Bodenarten ergeben sich Einzelwerte zwischen 129 und 176 l/ m<sup>3</sup>. Die nutzbaren Feldkapazitäten der beiden o.g. Bohrpunkte liegen dagegen nur bei 65 bzw. 76 l/ m<sup>3</sup>.

Aussagen bezüglich der *Wasserleitfähigkeit* im gesättigten Zustand sind problematisch, da zu vermuten ist, daß aufgrund der unterlagernden Steine bei zwei Bohrpunkten und mehreren versuchsweisen Bohrstockeinschlägen zumindest kleinere Flächen innerhalb der Deckschicht hohe Stein- bzw. Bauschuttanteile aufweisen. Für den Teil der Fläche, dessen Bodenarten auf 2 m ermittelt werden konnten, liegt die Leitfähigkeit bei  $1,16 \cdot 10^{-7}$  und  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s und wird damit als gering eingestuft. Für den Bereich der Fläche mit unterlagerndem Bauschutt kann die Wasserleitfähigkeit höher liegen.

Für den **Deponieabschnitt IV** beträgt die Schichtmächtigkeit, mit Ausnahme eines Bohrpunktes, der nach 170 cm endet, mindestens 2 m.

Bei den *Bodenarten* treten in den oberen 40 cm überwiegend schluffige Lehme, aber auch tonige Lehme und lehmige Schluffe auf. Die Schichten bis ca. 140 cm werden von tonigen Lehmen dominiert. Ab ca. 140 cm sind tonige Lehme und schluffige Lehme in annähernd gleichen Anteilen vertreten.

Erhöhte Steingehalte sind nur für einen Bohrpunkt zu verzeichnen, Vernässungen, Verdichtungen und trockene Bereiche fehlen.

Die *pH-Werte* für diesen Deponieabschnitt liegen, ähnlich wie Deponieabschnitt III, alle zwischen 7,0 und 7,6. Der Mittelwert beträgt 7,2.

Aufgrund sehr unterschiedlicher *Carbonatgehalte*, sind Aussagen über Mittelwerte nicht sinnvoll. Zwischen carbonatarm mit 0,5-2 % und carbonatreich mit 10-25 % sind fast alle Carbonatgehalte vertreten.

Die *Feldkapazitäten* der Bohrpunkte reichen von 700 l/ 2m<sup>3</sup> bis 781,8 l/ 2m<sup>3</sup>. Eine Ausnahme mit 614 l/ 2m<sup>3</sup> stellt der Bohrpunkt mit geringerer Mächtigkeit dar. Der Mittelwert aller Bohrpunkte liegt mit 726 l/ 2m<sup>3</sup> sehr hoch.

Die Wasserversorgung liegt mit einer *nutzbaren Feldkapazität* von 149 l/ m<sup>3</sup> ähnlich günstig wie bei den anderen Deponieabschnitten. Für die tonreicheren Bohrpunkte sind die nutzbaren Feldkapazitäten mit 135-137 l/ m<sup>3</sup> ungünstiger, liegen aber dennoch im oberen mittleren Bereich der Einstufung.

Aufgrund der Bodenarten, die keine sandigen oder locker gelagerten Schichten aufweisen, entspricht die mittlere *Wasserleitfähigkeit* im gesättigten Boden einem Wert von  $1,16 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,16 \cdot 10^{-6}$  m/s und kann als gering bewertet werden.

### 7.3.2.2 Zusammenfassende Beurteilung der Deckschicht

Die Mächtigkeit der Deckschicht erreicht für die Bohrpunkte, die auf 2 m gebohrt werden konnten überall diese Mindestmächtigkeit. In den Deponieabschnitten II und III konnten aufgrund starker Verdichtung oder unterlagernder Steine die Bohrprofile in einigen Fällen nur geringmächtiger ausgeführt werden.

Damit sind insbesondere für die Deponiefläche III nur begrenzt Aussagen über die Bodenarten und ihr Verhalten möglich, da für diese Fläche insgesamt nur wenige Bohrpunkte vorliegen.

Die Bodenarten wechseln zwischen sandigen Lehmen, lehmigen Schluffen, schluffigen Lehmen sowie tonigen Lehmen relativ stark. Einzelne Schichten fallen durch ihren erhöhten Sandgehalt auf. Der Wechsel der Bodenarten in der Deckschicht ist auch bei den Böden der Umgebung zu beobachten, und ist dort durch den sehr engen Gesteinswechsel im Untergrund bedingt. Damit verbunden ist die Ausprägung verschiedener Bodentypen wie Pararendzinen, Pelosole, Parabraunerden und Pseudogleye.

Die Pelosole der Umgebung mit ihren lehmigen Tönen und tonigen Lehmen weisen ähnliche chemische und teilweise bodenphysikalische Eigenschaften auf wie die Deponieabschnitte I und III. Bei den Pelosolen treten aufgrund des Schrumpfungsprozesses bei Trockenheit grobe Sekundärporen auf, während bei Wasserzutritt durch Quellung die Feinporen überwiegen und

durch den meist hohen Wassergehalt Luftmangel verursachen. Die tonigen Schichten der Deckschicht zeigen noch keine Ausprägung eines Sekundärgefüges. Dies kann in Verbindung mit einer relativ hohen Lagerungsdichte ebenfalls zu Stauwasser und damit zeitweiligen Luftmangel führen. Dieses Problem stellt sich insbesondere in den wenig geneigten Flächen I und III der Altablagerung, während bei den Flächen höherer Reliefenergie neben Oberflächenwasser auch Hangzugswasser eine Rolle spielt. Die Fläche III ist dadurch gekennzeichnet, daß sehr trockene Zonen mit vernäbten wechseln. Die trockenen Bereiche sind vermutlich auf die unterlagernden Steine, eventuell auch Bauschutt zurückzuführen.

Die pH-Werte der Altablagerung liegen für die Flächen III und IV immer über 7,0. Bei den Flächen I und II treten dagegen über die Flächen verteilt auch niedrigere pH-Werte auf, so daß für Fläche I insgesamt der pH-Wert mit 6,8 im schwach sauren Bereich liegt. Inwieweit die niedrigeren pH-Werte auf bereits stattfindende Bodenbildung zurückzuführen sind, ist im Rahmen der Feldmethoden nicht festzustellen.

Die pH-Werte der Böden der Umgebung zeigen mit Ausnahme etwas stärker versauerter Braunerde-Pelosole alle schwach sauren bis schwach basischen Charakter, was auf den relativ hohen Carbonatgehalt der Ausgangsgesteine zurückzuführen ist.

Bezüglich der Kalkgehalte kann die Altablagerung mit Ausnahme einiger Bohrpunkte weitgehend als carbonathaltig bezeichnet werden. Dies bedeutet, daß die Säureneutralisationskapazität zur Abpufferung der  $H^+$ -Ionen der Niederschläge ausreicht, um zu verhindern, daß das perkolierende Niederschlagswasser im Deponiekörper zu Lösungen von gebundenen Schwermetallen führt.

Auch die Pararendzinen und ein Teil der Pelosole der Umgebung zeigen ein carbonathaltiges Substrat, wodurch vergleichbare Voraussetzungen bezüglich der Kationenaustauschkapazität der Altablagerung und Teilen der Umgebung angenommen werden können.

Die Kationenaustauschkapazität, die bei einem pH-Wert größer 7,0 und in Anwesenheit von Kalk im allgemeinen für die jeweilige Bodenart sehr hoch liegt, wird durch das tonhaltige Material noch begünstigt. Damit ist die Nährstoffversorgung für die Pflanzen bezüglich der  $Ca^{++}$ -,  $Mg^{++}$ -,  $Na^+$ -,  $K^+$ -Kationen als sehr gut zu bezeichnen. Für die Umgebung besteht darüber hinaus noch der Vorteil einer Humusanreicherung im Boden, die zum einen den Kationenaustausch erheblich begünstigt und zum anderen die Stickstoffversorgung der Pflanzen gewährleistet. Die Altablagerung dagegen weist nur äußerst niedrige Humusgehalte auf, die nur stellenweise geringfügig höher liegen. Daher kann die Stickstoffversorgung der Pflanzen, die fast ihren gesamten Stickstoffbedarf durch organischen Stickstoff decken, eingeschränkt sein. In Bereichen erhöhter Kalkkonzentrationen ist durch Bindung von Phosphat an Calcium die Pflanzen-verfügbarkeit des Phosphats eher gering und kann zu Mangelserscheinungen führen.

Für die Braunerde-Pelosole der Umgebung, die infolge geringeren Carbonatgehalts im Ausgangsmaterial sowie aufgrund der Bodenentwicklung geringere pH-Werte aufweisen, liegt die Kationenaustauschkapazität vergleichsweise niedriger.

Die Feldkapazitäten liegen im Mittel für die gesamte Deponie sehr hoch. Dennoch sollte nicht vernachlässigt werden, daß die stellenweise sandigeren Bohrprofile aufgrund ihrer im Ver-

gleich zu den tonigen Schichten geringeren Feldkapazität eine höhere Perkulationsrate aufweisen können. Dies gilt auch für diejenigen Bohrprofile, bei denen durch unterlagernde Steine die Feldkapazität nicht ermittelt werden kann. Damit sind für diese Bohrpunkte Aussagen über die gesättigte Wasserleitfähigkeit spekulativ, da diese bei einer mächtigeren Schicht unterlagernder Steine sehr hoch sein kann und auch im ungesättigten Zustand hohe Versinkungsraten zu erwarten sind.

Die nutzbare Feldkapazität liegt hoch. Allerdings muß für die mit durchschnittlich 18° Neigung nach Süden exponierten Hangbereiche mit hohen Evaporationsraten gerechnet werden. Die den Hangbereich durchziehenden Erosionsrinnen weisen auf Oberflächenabfluß hin, so daß mit einer geringeren verfügbaren Wassermenge als der nutzbaren Feldkapazität zu rechnen ist.

Damit gleichen diese Deponieabschnitte den geringmächtigen Pararendzinen des Südosthanges der Umgebung. Diese lassen aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit nur eine geringe nutzbare Feldkapazität zu, so daß durch die Standortbedingungen eher Trockenheit ertragende Pflanzen bevorzugt werden. Da auch die Carbonatgehalte im gleichen höheren Bereich liegen, ist aufgrund dieser ökologischen Standortbedingungen für die Deponiesüdhänge und die Südhänge der Umgebung eine ähnliche Artenzusammensetzung möglich.

Hinsichtlich der Lebensbedingungen für Kleinlebewesen und Mikroorganismen sind die pH-Werte und Carbonatgehalte sehr günstig. Allerdings können sich im Bereich der Südhänge bei den Pararendzinen der Umgebung und dem Südhang der ehemaligen Deponie durch Trockenheit Störungen des Streuabbaus ergeben, da die Mikroorganismen für ihre Tätigkeit auf ausreichende Wasserversorgung angewiesen sind.

### 7.3.3 Vegetationskundliche Untersuchungen an der Deponie

#### 7.3.3.1 Ökologisches Verhalten der Deponieflächen

	L	F	R	N
Fläche I	6,3	5,5	6,8	6,3
Fläche II	6,8	5,6	6,9	5,8
Fläche III	7,1	5,7	6,8	5,7
Fläche IV	7,0	4,8	7,2	5,0
Umgebung	5,6	5,3	6,6	5,8
1981*	6,7	5,1	6,9	5,8

(\*nach KONOLD u. ZELTNER 1981)

**Tab. IV- 7.1: Durchschnittliche Zeigerwerte der Deponieflächen und der Umgebung**

Die bei der Charakterisierung der Flächen auftretenden ökologischen Zeigerwerte in eckiger Klammer werden in Tab. IV- 5.1 auf Seite 22f ausführlich erläutert.

**Fläche I** ist die zum Großteil mit Erlen und Linden bestandene Kuppe, in die sowohl Wiesenflächen als auch kleinere nahezu vegetationsfreie Flächen eingeschaltet sind. Im Bereich der Verebnung auf der Kuppe wurde bei den Vegetationsaufnahmen regelmäßig Stauwasser, das

allerdings noch keine Einflüsse auf den Bodenbildungsprozeß wie etwa Pseudovergleyung zeigt, wahrgenommen.

Auffallend ist eine große Anzahl an Lägerstellen des Schalenwildes sowie zahlreichen "Wildschweinsuhlen". Rehe und Kleinsäuger wie Hasen wurden bei der Geländearbeit des öfteren gesichtet.

Die durchschnittlichen Zeigerwerte charakterisieren die Vegetation von **Fläche I** als, zwischen Schatten- und Halbschattenpflanze stehend, auf mittel bis gut durchfeuchteten Böden vorkommend, Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger sowie zwischen mäßig stickstoffreich und an stickstoffreichen Standorten häufiger auftretend.

Die **Lichtzahl** ( $\bar{X}$  6,3) umfaßt ein Spektrum von "zwischen Schattenpflanzen und Tiefschattenpflanze stehend" [2] *Cephalanthera damasonium* (Bleiches Waldvögelein) bis zu Lichtpflanzen [8] *Barbarea vulgaris* (Echtes Barbarakraut) oder der, allerdings auf jeder Fläche vorkommenden, Vollichtpflanze [9] *Dipsacus fullonum* (Wilde Karde).

Die **Feuchtezahl** ( $\bar{X}$  5,5) liegt zwischen Trockniszeiger [3] *Orchis militaris* (Helmknabenkraut) und zwischen Feuchte- u. Nässezeigern stehende Arten [8] wie *Solanum dulcamara* (Bittersüßer Nachtschatten) und *Symphytum officinale* (Gemeiner Beinwell). Der Phanerogam *Alnus glutinosa* (Schwarzerle) tritt als Nässezeiger hinzu.

Die **Reaktionszahl** ( $\bar{X}$  6,8) reicht vom Säurezeiger [3] *Equisetum sylvaticum* (Waldschachtelhalm) bis zu "auf Kalk weisende Arten" [8] wie *Sanicula europaea* (Waldsanikel).

Die **Stickstoffzahl** liegt im Durchschnitt mit 6,3 an der Spitze der Flächen, weist aber ein sehr uneinheitliches Verteilungsmuster auf, wobei beinahe das gesamte Spektrum von "stickstoffärmer" [2] *Hippocrepis comosa* (Schopf-Hufeisenklee) bis "übermäßig stickstoffreich" [9] *Lamium album* (Weiße Taubnessel) vertreten ist.

**Fläche II** ist ein nach Süden einfallender Hangbereich mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 12°. Den oberen Hangbereich nimmt ein mit Erlen, Linden aber auch Robinien, Eschen, Berg- u. Spitzahorn bestockter lichter Waldstreifen ein. Im östlichen Bereich der Fläche ziehen sich Erlenzeilen den Hang hinab, während der mittlere und westliche Hangbereich durch eine "wilde" Schlag-, Lichtungs- und Wiesenvegetation gekennzeichnet ist, die im Bereich des "Deponieweges" und der westlichen Grenze Feuchtgebietscharakter annimmt.

Die **Lichtzahl** ( $\bar{X}$  6,8) liegt mit der Masse der Arten zwischen Halbschatten-/Halblichtpflanze [6] und Lichtpflanze [9]. Extreme Arten sind zum einen einige Seggen-Arten, wie z.B. die Schattenpflanze [3] *Carex remota* (Winkel-Segge) oder die noch lichtscheuere [2] *Carex sylvatica* (Wald-Segge), zum anderen die Vollichtpflanzen [9] *Oenothera biennis* (Gemeine Nachtkerze) und *Lactuca serriola* (Stachel-Lattich).

Die **Feuchtezahl** ( $\bar{X}$  5,6) umfaßt einen weiten Bereich von Trockniszeiger [3] *Linaria vulgaris* (Gewöhnliches Leinkraut) bis zu Wechselwasserpflanzen [10] wie *Iris pseudacorus* (Wasser-Schwertlilie) und *Phragmites australis* (Schilf). Die Verteilung der Arten deckt dabei gleichmäßig das gesamte Zeigerwertspektrum ab.

Bei der **Reaktionszahl** ( $\bar{O}$  6,9) weisen die meisten Arten relativ hohe Zeigerwerte auf, wobei Arten wie *Vicia tetrasperma* (Viersamige Wicke) oder *Juncus effusus* (Flatterbinse) als Ausreißer in den Säurezeiger-Bereich [3] zu werten sind. Arten wie *Arctium tomentosum* (Filz-Klette) und *Lathyrus linifolius* (Berg-Platterbse) sind dagegen Basen- u. Kalkzeiger, die stets auf kalkreichem Boden auftreten [9].

Die **Stickstoffzahl** ( $\bar{O}$  5,8) reicht von "stickstoffärmer" [2] *Cotoneaster integerrima* (Zwergmispel) bis zu "übermäßig stickstoffreich" [9] mit Arten wie *Alliaria petiolata* (Knoblauchsrauke) oder *Sambucus nigra* (Schwarzer Holunder).

**Fläche III** wird durch eine ca. 1 ha große Verebnung gebildet, die teilweise mit Erlenzeilen bestanden ist. Da sich die Erlen aber auf weiten Flächen nicht behaupten konnten, sind ausge dehnte Bereiche nur von Gräsern bewachsen. An der westlichen Flächengrenze wird ein kleinerer Bereich von Schilf eingenommen.

Die **Lichtzahl** ( $\bar{O}$  7,1) legt bei den meisten Arten im höheren Bereich, wobei als Vollichtpflanze [9] *Melilotus alba* (Weißer Steinklee) zu nennen ist. Die einzige ausgesprochene Schattenpflanze [3] ist *Carex remota* (Winkel-Segge).

Die durchschnittliche **Feuchtezahl** liegt bei 5,7, wobei ein ähnlich großes Zeigerwert-Spektrum wie bei Fläche II abgedeckt wird. Trockniszeiger [3] sind die *Melilotus* Arten (Steinklee-Arten) sowie *Bromus erectus* (Aufrechte Trespe). Vertreter des feuchten Extremis ist der Nässezeiger [9] *Poa palustris* (Sumpf-Rispengras) sowie der Wechselwasserzeiger [10] *Phragmites australis*.

Die **Reaktionszahl** liegt mit einem Durchschnitt von 6,8 ähnlich wie die Flächen I und II, wobei die Verteilung der Zeigerwerte homogener ist und die Extreme fehlen. Außer dem Säurezeiger [3] *Juncus effusus* liegen die meisten Arten im Bereich Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger [7] *Papaver rhoeas* (Klatsch Mohn) und "auf Kalk weisende" Arten [8] wie *Leucanthemum vulgare* (Margerite).

Die **Stickstoffzahl** liegt mit 5,7 nur geringfügig unter derjenigen von Fläche II (5,8) und umfaßt ebenfalls das Spektrum von "stickstoffärmeren" Standorten [2] *Equisetum pratense* (Wiesen-Schachtelhalm) bis "übermäßig stickstoffreich" [9] *Armoracia rusticana* (Meer-rettich).

**Fläche IV** ist der mit ca. 18° Neigung einfallende Südhang der nachträglichen Deponieerweiterung für Bauschutt und Erdaushub. Auf der Fläche ist die Vegetationsdecke nicht immer vollständig ausgebildet, wobei dominant Gräser und v.a. *Dipsacus fullonum* vorkommen. Mehrere vegetationsärmere Stellen zeigen darüberhinaus bereits Erosionsschäden in Form von Rinnen.

Fläche IV weist mit dem Durchschnitt von 7,0 die höchste **Lichtzahl** auf, wobei die Masse der Arten dem Bereich Halblichtpflanzen [7] und Lichtpflanzen [8] angehören. *Euphorbia dulcis* (Süße Wolfsmilch) und *Geum urbanum* (Gewöhnliche Nelkenwurz) bilden als zwischen Schatten und Halbschatten stehende Arten [4] das untere Ende des Spektrums, die Vollichtpflanzen [9] *Cichorium intybus* (Gemeine Wegwarte), *Echium vulgare* (Blauer Natternkopf), *Oenothera biennis* sowie der massenhaft auftretende *Dipsacus fullonum* stellen das obere Extrem dar.

Die **Feuchtezahl** ( $\bar{O}$  4,8) liegt im Vergleich zu den anderen Flächen um eine Stufe niedriger und ist somit nur noch als frisch zu bezeichnen. Neben zahlreichen Trockniszeigern [3] wie *Avenochla pratensis* (Flaumiger Wiesenhafer), *Melampyrum arvense* (Acker-Wachtelweizen) den *Oenothera*-Arten (Nachtkerzen-Arten), tritt auch die an noch trockeneren Standorten [2] auftretende Art *Veronica spicata* (Ähriger Ehrenpreis) auf. Die meisten Arten liegen allerdings im Bereich der Frischezeiger, doch treten, wenn auch auf Sonderstandorte am Rande der Fläche, die zwischen Feuchte- und Nässezeiger stehende Arten [8] *Mentha longifolia* (Roßminze) sowie der Nässezeiger [9] *Scirpus sylvaticus* (Gemeine Simse) auf.

Mit einer durchschnittlichen **Reaktionszahl** von 7,2 steht Fläche IV an der Spitze der Deponie. Als Ausreißer ist der Säurezeiger [3] *Vicia tetrasperma* (Viersamige Wicke) zu bezeichnen. Die meisten Arten liegen zwischen den Zeigerwerten [7] und [8], wobei der Basen u. Kalkzeiger [9] *Lathyrus linifolius* (Berg-Platterbse) die Skala nach oben abschließt.

Die **Stickstoffzahl** ( $\bar{O}$  5,0) liegt im Gegensatz zur Reaktionszahl auf Fläche IV am niedrigsten, wobei sämtliche Werte zwischen "stickstoffärmer" [2] *Sanguisorba minor* (Kleiner Wiesenknoyf), *Potentilla erecta* (Aufrechtes Fingerkraut) und "übermäßig stickstoffreich" [9] *Lamium album* (Weiße Taubnessel), *Calystegia sepium* (Ufer-Zaunwinde) auftreten.

### **Synoptische Betrachtung**

Die Zeigerwerte der Deponieflächen zeigen zwar, mit Ausnahme von Fläche IV, ein relativ einheitliches Bild, doch müssen noch einige Anmerkungen zum Verhalten der Zeigerwerte auf den einzelnen Flächen gemacht werden.

Auf den Flächen II, III und IV liegen die **Lichtwerte** um eine Stufe höher als auf Fläche I, die bis auf kleinere Freiflächen, mit einem geschlossenen Baumbestand bedeckt ist, der auch Schattenpflanzen im Unterwuchs zuläßt. Das weite Spektrum der Lichtzahlen auf Fläche II ist auf die Verteilung in einen mit dichtem Baumbestand bestockten östlichen Teil, wo Schattenpflanzen auftreten sowie den beinahe gänzlich baumfreien Freiflächen im mittleren und westlichen Hangbereich zurückzuführen. Weiterhin bietet der unbefestigte aber völlig baumfreie Bereich des "Deponieweges" gute Standortbedingungen für lichtbedürftige Pflanzen.

Die **Feuchtezahlen** zeigen für die Flächen I, II und III ähnliche Werte, während Fläche IV eine Stufe darunter liegt. Fläche IV, der relativ steile Südhang der Bauschuttdeponie-Erweiterung verfügt vermutlich aufgrund seiner Exposition, der guten Drainage sowie verstärktem Oberflächenabfluß (Erosionsrinnen) über weniger Bodenfeuchte als die anderen Flächen. Ähnliche Auswirkungen zeigt die nicht völlig geschlossene Vegetationsdecke, die eine Evaporation ermöglicht und dadurch teilweise zur Austrocknung der Bodenoberfläche führt. Am Böschungsfuß des Unterhangs verläuft ein Sickergraben, der als Sonderstandort betrachtet werden muß, da hier die genannten Nässezeiger auftreten.

Die Flächen II und III liegen im Durchschnitt der Feuchtwerte ähnlich wie Fläche I, sind aber durch weit auseinanderliegende Extremwerte gekennzeichnet. Fläche III weist zwar im feuchteren westlichen Teil Schilfflächen auf, zeigt aber v.a. im Bereich der Böschungskante sowie im östlichen Bereich durch ein verstärktes Auftreten von Trockniszeigern Wasserarmut an.

Auch Fläche II ist von einer stark unterschiedlichen Verteilung der Feuchtezahlen geprägt. Die trockeneren Bereiche befinden sich v.a. im Bereich des Mittelhangs, während am Unterhang sowie im Bereich des "Deponieweges" aufgrund verstärkter Sickerwasser- und Hangzugwasseraustritte besonders feuchte Zonen auftreten. Zur Ableitung früherer Sickerwasseraustritte wurde ein Graben entlang des Weges angelegt, der heute Nässe- und Wechselwasserzeigern als Standort dient. Der gesamte westliche Unterhangbereich von Fläche II zeigt, insbesondere durch das massenhafte Auftreten von *Angelica sylvestris* (Wald-Engelwurz), *Cirsium palustre* (Sumpf-Kratzdistel), *Phalaris arundinacea* (Rohrglanzgras) sowie der *Mentha*-Arten, einen starken Feuchtgebietscharakter.

Fläche I weist keine derart gravierenden Unterschiede auf, ist aber ebenfalls von trockeneren, vegetationsarmen Stellen im Bereich der Kuppenabhänge durchzogen.

Die **Reaktionszahlen** liegen auf der Deponie allgemein sehr hoch, wobei die Masse der Arten in den Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger-Bereich fällt. Die Ursache dieser Übereinstimmung ist wohl in der Homogenität des Deckschichtsubstrats zu sehen, da die pH-Werte der Bohrstockprofile fast durchweg im neutralen bis schwach basischen Bereich liegen. Da die Umgebung der Deponie eine ähnliche durchschnittliche Reaktionszahl aufweist, sind zahlreiche Arten sowohl auf als auch um die Deponie vertreten.

Die **Stickstoffzahlen** zeigen für die Deponie unterschiedliche Werte an. Fläche IV liegt im Vergleich zu den anderen Flächen um eine Stufe zurück, während Fläche I auch gegenüber den Flächen II und III einen leicht erhöhten Wert aufweist. Gründe für den nur mäßigen Stickstoffreichtum von Fläche IV dürften in der Sterilität des Ausgangssubstrats, insbesondere dem mangelnden Gehalt an organischer Substanz, zu sehen sein. Innerhalb einer nur kurzen Vegetationsbedeckung konnte noch keine anspruchsvolle Humusform, die den Stickstoffkreislauf in Gang hält, aufgebaut werden. Auf den Flächen II und III fand schon eine geringfügige Stickstoffanreicherung statt, worauf ein höherer Gehalt an organischer Substanz sowie eine stellenweise initiierte Humusform hinweisen. Weiterhin spielt die Stickstoffanreicherung der Erlen, die mittels Wurzelknöllchen elementaren Stickstoff aus der Atmosphäre assimilieren und im Boden speichern, eine Rolle. Auf Fläche I, die über dichte Erlenbestände verfügt, kommt es eventuell durch die in den Läger des Schalenwildes angereicherten Tierexkremete zu einem weiteren Stickstoffeintrag.

### 7.3.3.2 Ökologisches Verhalten im Vergleich zur Umgebung

Das Ziel dieses Kapitels ist die Erörterung, ob im Verhalten von Zeigerpflanzen auf der Deponie und der Umgebung gravierende Unterschiede bestehen.

Die **Lichtzahl** der Umgebung liegt auf derselben Stufe wie jene von Fläche I. Da in der Umgebung der Deponie Waldgesellschaften überwiegen, treten bevorzugt Pflanzen aus dem Spektrum "zwischen Halblicht- und Halbschattenpflanze stehend" [6] auf. Einen vergleichbar niedrigen Wert weist auf der Deponie allein, die mit Erlen bestockte, Fläche I auf. Die mit wenig, oder ohne Bäume bestockten Flächen II, III und IV sind von den Lichtverhältnissen mit den östlich an die Deponie angrenzenden Schafweiden und Streuobstwiesen vergleichbar.

Die **Feuchtezahl** der Umgebung liegt im Schnitt bei "frisch" [5] und erreicht damit einen ähnlich niedrigen Wert wie Fläche IV. Die Flächen I, II und III sind als geringfügig feuchter

einzustufen, wobei allerdings alle drei Flächen Stauwasserbereiche aufweisen. Die unterschiedliche Verteilung feuchter und trockenerer Bereiche auf den Deponieflächen wurde im vorangegangenen Kapitel eingehend dargestellt, wobei ein kleingekammertes Standortgefüge erkennbar wurde. Für die "gemittelten Umgebungswerte" muß festgehalten werden, daß sich auf den anstehenden Gesteinen lokal unterschiedliche Böden mit einem jeweils spezifischen Wasserhaushalt entwickeln. Im Bereich der Hochfläche kommt es, vermutlich durch Stauwasser hervorgerufen, zu feuchtere Stellen, wohingegen im Bereich des Talbodens kein Stauwasser auftritt. Die Böden der ansteigenden Hänge im Bereich der Mergelgesteine (Pararendzinen) sind als weniger frisch bis trocken zu bezeichnen, womit sie etwa Fläche IV entsprechen.

Die **Reaktionszahlen** der Deponie und der Umgebung liegen mit dem Durchschnittswert [7], Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger, auf derselben Stufe. Die Umgebung erreicht diese Stufe nur mit dem Dezimalwert 6,6, was sich durch die auftretenden Böden erklären läßt. Im Gegensatz zu den Deponieflächen, die Werte von 6,8 - 7,2 aufweisen, zeigen manche Böden, wie z.B. die Pelosole und Parabraunerden, schon eindeutige Versauerungsmerkmale. Die pH-Werte der Pararendzinen liegen dagegen ähnlich hoch wie auf Fläche IV.

Die **Stickstoffzahl** der Umgebung erreicht mit 5,8 denselben Wert wie Fläche II. Weisen Fläche I und III ähnliche Werte auf, fällt Fläche IV mit dem Wert von 5,0 ab. Die Waldgesellschaften der Umgebung konnten, bedingt durch die gut verwertbare Streu der Bäume sowie der guten Humusform der Bodentypen, einen funktionierenden Stickstoffkreislauf aufbauen. Dieser kann auch für anspruchsvolle Waldpflanzen, wie z.B. *Asarum europaeum* (Braune Haselwurz), *Allium ursinum* (Bären-Lauch) und *Atropa belladonna* (Schwarze Tollkirsche), genügend Nährstoffe zur Verfügung stellen. Die ebenfalls von Bäumen, insbesondere der stickstoffanreichernden Erle, bedeckten Deponieflächen I, II und III weisen ebenfalls gute Voraussetzungen für einen funktionierenden Stickstoffkreislauf auf. Auf Fläche IV findet dagegen, aufgrund der schwer abbaubaren Streu (v.a. Disteln und Wilden Karden) sowie der fehlenden Erlen, eine Stickstoffanreicherung praktisch nur durch die zu den Leguminosen zählenden Platterbsenarten statt. Um dem Mangel auf der Fläche beizukommen versucht man durch die Aussaat von Lupinen, ebenfalls Stickstoffsammler, Abhilfe zu schaffen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß die Deponie durch eine große Artenfülle, die weit über derjenigen der Umgebung liegt, gekennzeichnet ist. Die Ursache hierfür liegt im unterschiedlichen Standortspektrum auf der Deponie, das von trocken bis naß reicht. Innerhalb relativ kleiner Flächen können extreme Standortbedingungen, die jeweils ihre eigene Vegetationszusammensetzung, aber auch eine spezifische Fauna nach sich ziehen, vorherrschen. Diese Artenvielfalt, auf relativ kleinem Raum, macht die "Hintere Halde" aus **vegetationskundlicher Sicht** zu einem interessanten und wertvollen Landschaftsbestandteil.

### 7.3.3.3 Ökologisches Verhalten im Vergleich zu 1981

Um einen Überblick über Veränderungen der Vegetationszusammensetzung zu bekommen, werden in diesem Kapitel die vorausgegangen diskutierten Vegetationsaufnahmen von 1993 mit denjenigen von KONOLD u. ZELTNER (1981) verglichen.

**1981** belief sich die Anzahl der Arten auf 158, womit die "Hintere Halde" die artenreichste der damals untersuchten Deponien war. **1993** wurden 228 Arten auf der Deponiefläche gefunden, wobei das größere Artenaufkommen vermutlich auf eine weitergehende Ausdifferenzie-

zung der Flächen zurückzuführen ist. Wurden 1981 v.a. Allerweltsarten, sowie Arten der kurzlebigen Ruderal- und Freiflächengesellschaften gefunden, so wurden 1993 in den aufgeförsteten Erlenbeständen auch schattenbedürftige Waldpflanzen angetroffen. Fläche I zeigt daher bei der **Lichtzahl** einen Trend zur Annäherung an diejenige der Umgebung.

Die **Feuchtezahl** der Deponie hat sich, im Vergleich zu 1981 geringfügig verändert. Über die Verteilung von feuchteren und trockeneren Bereichen können an dieser Stelle keine Angaben mehr gemacht werden. Es ist aber davon auszugehen, daß die Deponiefläche in ihrer Gesamtheit, vergleichbar zu Fläche IV, geringfügig trockener war. Die höheren Feuchtezahlen der Vegetation 1993 ergeben sich eventuell durch die Besiedlung des sich in der Folge abzeichnenden Stauwassers, sowie der verstärkt auftretenden Sickerwasser- und Hangzugswasseraustrittstellen (oberflächennaher Abfluß).

Die **Reaktionszahl** zeigt während der 12 Jahre keine auffallende Veränderung, wodurch noch keine größeren Einflüsse durch saure Niederschläge, oder einer weitergehenden Bodenbildung ersichtlich sind.

Die **Stickstoffzahl** liegt 1993 ähnlich hoch wie 1981. Auffallend ist, daß Fläche IV auch gegenüber damals um fast eine Stufe niedriger liegt. Eine Erklärungsmöglichkeit könnten höhere Stickstoffgehalte im damaligen, noch jungen Sickerwasser sein, oder aber, als wahrscheinlicher anzusehen, eine absolute Sterilität des auf die Bauschutterweiterung aufgebrachten Deckschichtsubstrats.

Weiterhin stellt sich die Frage nach einer **Sukzessionsreihe** sowie der Schlußgesellschaft am Standort. Diesbezüglich sind die Erlenbestände der Deponie als Vorwaldstadium zu bezeichnen, in dessen Unterwuchs sich die am Standort natürlich auftretenden Gehölze entwickeln sollen. Da aber weder Buchen, noch Eichen u. Hainbuchen in nennenswerter Anzahl gefunden wurden läßt dies auf eine langsam einsetzende Sukzession schließen. Gründe dafür können in den noch teilweise ungünstigen Standortbedingungen, wie Stauwasser, hohe Lagerungsdichte, Sterilität des Substrats (Mangel an organischer Substanz) etc., für die o.g. Baumarten liegen. Weiterhin kann die forstwirtschaftliche Zielsetzung auch von annähernd natürlichen Waldgesellschaften abweichen. Insgesamt ist aber aufgrund der Pflanzenarten durchaus eine Entwicklung in Richtung Waldstandort zu erwarten, was v.a. an den häufiger auftretenden Arten der Wald- und Saumgesellschaften in der Krautschicht zu erkennen ist.

#### 7.3.3.4 Seltene Arten

Obwohl schutzwürdige Arten wie *Orchis militaris* (Helm-Knabenkraut), *Iris pseudacorus* (Wasser-Schwertlilie) und *Muscari botryoides* (Kleines Träubel) auf der Deponie vorkommen, kann nicht von einem Vorkommen seltener Arten, welche die Deponie als floristisch absolut schützenswert klassifizieren würde, gesprochen werden. Die 1981 aufgenommenen seltenen Arten der kurzlebigen Ruderal- und Unkrautgesellschaften werden aufgrund der geänderten Standortbedingungen, wie z.B. größerer Bedeckungsgrad, neue Lichtbedingungen, höherer Feuchtegehalt, von anderen Arten verdrängt.

Auf der Deponie treten, bevorzugt an lichtexponierten Stellen, zahlreiche Neophyten, d.h. in historischer Zeit aus fremden Florengebieten eingewanderte Arten, auf. Diese zum Teil äußerst konkurrenzstarken, oftmals auch sehr dekorativen Arten haben sich allerdings im Laufe

der Zeit in den heimischen Vegetationsgesellschaften als Plage erwiesen. Einige, auf der Deponie vorkommenden Arten sind *Pastinaca sativa* (Gemeiner Pastinak), *Lactuca serriola* (Stachel-Lattich), *Oenothera biennis* (Gemeine Nachtkerze), *Solidago canadensis* (Kanadische Goldrute) sowie *Verbascum densiflorum* (Großblütige Nachtkerze).

Als Kulturpflanzen treten auf der Deponie Gartenflüchtlinge wie *Narcissus pseudo-narcissus* (Gelbe Narzisse) oder *Chaenomeles japonica* (Japanische Scheinquitte) auf. Als Nutzpflanzen wurde v.a. *Melilotus alba* (Weißer Steinklee), auf Fläche IV auch *Lupinus platyphyllos* als Gründünger, eingesät.

### 7.3.3.5 Pflanzenschäden

Die erheblichsten Schäden an der Vegetationsdecke sind die, vermutlich auf Deponiegasaustritte zurückzuführenden (vergl. Kap 7.4.2), pflanzenarmen oder gar vegetationsfreien Flächen. Als Hauptursache ist hierbei die Verdrängung des Sauerstoffs durch das Deponiegas aus der Bodenluft und weniger eine direkte toxische Wirkung des Gases zu sehen.

Im Bereich der Flächen II und III treten häufig vertrocknete und abgestorbene Erlen auf. Der Grund für die Schädigungen kann im verstärkten Vorkommen des Erlenspanners liegen, was sich auch im Gelände bestätigte. Die ausschlaggebende Ursache dürfte aber im äußerst trockenen Jahr 1992 zu sehen sein, da in diesem Jahr die für die stark wasserbedürftigen Erlen (Nässezeiger!) notwendigen Niederschläge zur Aufrechterhaltung der Bodenfeuchte fehlten. Eine Kombination beider Gründe kann als die wahrscheinlichste Ursache angenommen werden, da ein heftiger Parasitenbefall, für durch Dürre geschwächte Bäume, letale Folgen nach sich zieht.

Während der Vegetationsaufnahmen wurden des öfteren Schadbilder wie Wipfeldürre, vergilbte Blätter oder auch Mißbildungen festgestellt. Letztere können nach KONOLD u. ZELTNER (1981) eventuell auf direkte Gaseinwirkungen zurückgeführt werden.

## 7.4 Gasmessung auf der "Hinteren Halde"

### 7.4.1 Vorgehensweise

Auf den Teil der Deponie mit überwiegendem Hausmüllanteil (Flächen I u. II) wurde im Abstand von 10 m ein Raster gelegt. Zum Messen wurde der Saugtrichter des FID über die Oberfläche geführt und aufgesetzt, wobei der höchste Wert in ca. 100 m<sup>2</sup> um den Rasterpunkt notiert wurde. Diese Vorgehensweise war nötig, da, bedingt durch Risse u.ä., nicht immer direkt am Rasterpunkt die höchsten Konzentrationen auftraten. Dieses Raster wurde anschließend in eine Tabelle umgesetzt.

In Tab. IV- 7.2 sind die Meßpunkte der "Hinteren Halde" aus den Messungen im Juni/Juli 1993 aufgetragen. Die Darstellung entspricht dem 10 m-Raster in einem Koordinatenfeld mit dem 0-Punkt am "Mittleren Hochsitz" und dem "Deponieweg" als x-Achse (= südl. Grenze; vergl. Übersichtskarte). Da die westliche Abgrenzung der Deponie nicht mehr exakt feststellbar ist, wurde die y-Achse frei gewählt. Die Werte der letzten Spalte stellen die östliche De-

poniegrenze dar, wobei die hohen Werte im unteren Bereich der Böschung des Deponierandgrabens entsprechen.

In der Tabelle sind sogenannte relevante Werte durch Fettdruck hervorgehoben. Durch eine gerätebedingte Schwankungsbreite sind Werte < 30 ppm nicht aussagekräftig (freundl. mündl. Mittlg. WOLF 1993) und werden als nicht relevant ausgeschieden. Unterstrichen sind Werte im Übergangsbereich zwischen Deponie und Umgebung dargestellt. Kursive Werte sind Messungen in den an die Flächen I u. II anschließenden Waldgebieten. Sie geben Aufschluß über eine eventuelle Gasmigration in die Böden der Umgebung.

## 7.4.2 Ergebnisse der Deponiegasmessung

Aus den Begehungen geht hervor, daß auf der Altablagerung zum Teil erhebliche Deponiegasemissionen auftreten. Diese lassen sich in eine größere Anzahl kleiner lokaler Austritte sowie mehreren flächenhaften Austritten gliedern.

Lokale Austritte sind über den gesamten Hang- und Kuppenbereich vorhanden, wobei v.a. an Trockenrissen und Spalten erhöhte Konzentrationen auftreten. Diese liegen meist im gering-mittleren Bereich, wobei die Werte eine Spanne von 30-500 ppm einnehmen.

An den o.g. kleineren Austrittsstellen sind in der Regel kaum Vegetationsschäden oder -ausfälle zu beobachten. Vermutlich sind die Emissionen zeitlich begrenzt, da bei wechselnden Bodenverhältnissen nicht immer die Voraussetzungen zur Gasdiffusion gegeben sind (vergl. Kap. 5.4). Es besteht die Möglichkeit, daß sich nach einer Wetteränderung die Spalten und Risse an einer anderen Stelle öffnen, wodurch die Dauerbelastung der einzelnen Stelle sinkt und die Schäden der Vegetation sich in Grenzen halten.

Die flächenhaften Austrittsbereiche sind in Tab. IV- 7.2 als zusammenhängende Flächen dargestellt und mit Großbuchstaben tituliert.

**"Hintere Halde" - Deponiegasmessungen mit Flammenionisationsdetektor (Portafid = FID) in ppm**

Höhe (S - N)	Länge (WSW - NNE)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	
280																															
270																															
260																															
250																															
240																															
230																															
220																															
210																															
200																															
190																															
180																															
170																															
160																															
150																															
140																															
130																															
120																															
110																															
100																															
90																															
80																															
70																															
60																															
50																															
40																															
30																															
20																															
10																															
0																															

**Legende:**  
**B**: 40 110 1100 1100 25 16 300 12 200 10 70 20 56 12 10 20 17  
**B**: 42 12 20 8 20 15 70 16 600 40 36 3 10 20  
**B**: 8 60 5 22 8 43 20 730 15 400 800 30 0 8 20 2  
**B**: 8 120 100 21 10 15 12 120 80 800 20 34 4 10 22 3  
**B**: 9 1100 1100 25 16 300 12 200 10 70 20 56 12 10 20 17  
**B**: 17 10 30 60 10 380 26 60 20 60 20 32 5 10 2 10  
**B**: 3 60 48 12 20 10 40 8 36 20 36 1 0 2 5  
**B**: 6 15 10 6 15 70 25 80 15 360 7 400 20 30 6 0 2 5  
**B**: 11 4 10 87 13 6 6 42 5 23 20 30 10 0 3 2 60 70 2  
**B**: 36 24 11 4 10 87 13 6 6 42 5 23 20 30 10 0 3 2 60 70 2  
**B**: 8 300 10 8 30 100 300 10 6 66 4 20 28 30 3 0 0 1 400 1000 2  
**B**: 10 20 30 40 80 10 30 10 20 10 6 1100 20 40 5 10 18 300 25 22 180 25 30 4 1 100 8 15  
**B**: 15 1000 110 400 10 3 46 6 22 200 12 300 30 12 26 6 10 13 20 20 22 23 23 34 0 6 10 6 42  
**B**: 20 50 80 15 3 1200 80 20 280 40 6 40 20 600 5 10 15 26 30 20 25 25 30 3 1 8 6 18  
**B**: 45 150 800 10 6 300 670 10 40 15 10 60 16 33 3 8 18 22 25 20 25 22 30 0 3 8 8 20  
**B**: 15 1000 110 400 10 3 46 6 22 200 12 300 30 12 26 6 10 13 20 20 22 23 23 34 0 6 10 6 42  
**B**: 100 300 300 10 5 8 3 25 4 280 9 12 3 60 16 18 5 10 15 20 20 22 25 23 34 0 10 15 12 60  
**B**: 36 1 40 0 5 10 7 14 4 6 8 28 10 600 15 42 6 10 15 26 26 22 23 30 30 1 10 18 10 60  
**B**: 20 7 25 0 4 8 1 5 5 7 6 15 200 30 13 16 4 8 20 33 20 22 22 35 36 0 1 40 18 360  
**B**: 15 5 10 40 4 8 1 7 5 6 10 12 0 10 12 15 2 10 130 20 20 22 23 300 40 2 1 60 18 400 F  
**B**: 15 16 400 60 4 8 1 6 6 6 6 10 0 8 10 15 2 480 12 20 20 23 22 300 26 8 60 100 25 320  
**B**: 7 15 70 12 100 4 8 1 6 4 6 8 12 0 8 11 16 2 22 12 18 180 23 100 25 10 300 300 30 220  
**B**: 5 20 113 15 200 5 10 1 10 4 6 7 12 0 6 10 16 2 15 12 18 18 22 23 66 25 21 350 400 30 260  
**B**: 17 23 220 600 400 20 10 1 8 7 6 7 12 0 5 9 240 2 13 12 17 17 22 23 60 25 40 400 600 60 1000  
**B**: 4 40 1000 300 800 30 10 5 6 6 6 7 11 0 5 8 18 2 12 12 16 18 22 23 40 25 23 1800 3000 36 800  
**B**: 2 30 30 25 2000 450 1000 40 5 8 6 6 12 0 5 7 16 2 12 12 16 18 22 22 36 25 17 2 5 15 2000

Die Meßpunkte stellen den Höchstwert aus 100 Quadratmeter dar, d.h. 5 m um den Meßpunkt wurde der höchste Wert ermittelt.  
 Fettdruck: nur Werte >= 30 ppm relevant (gerätebedingte Schwankungsbreite)  
 Kursiv: Werte von der Übergangsstelle Deponie-Wald sowie die anschließenden Umgebungswerte im Waldboden (Gasmigration)

Tab. IV- 7.2: Deponiegasmessungen im Bereich der Flächen I und II

**A** umfaßt einen Bereich am südwestlichen Unterhang von Fläche II in der Nähe des "Mittleren Hochsitzes", wobei die Werte bis zu 2000 ppm betragen. Die hohen Emissionen werden an dieser Stelle durch eine relativ geringmächtige Deckschicht sowie gasdurchlässigeren sandigeren Bodenarten mit erhöhtem Steinanteil verursacht. Beim Graben an dieser Stelle wurde, unter starker Geruchsentwicklung, bereits nach ca. 40 cm teilweise zersetzter Abfall erreicht. Die Vegetation setzt sich aus Gräsern und Disteln zusammen, wobei stellenweise aber auch vegetationsfreie Flächen auftreten. Bäume sind an dieser Stelle keine vorhanden.

**B** setzt sich aus vier Bereichen zusammen, die an Übergangsstellen zwischen Deponie und Umgebung liegen. Auch an diesen Stellen sind vermutlich die verstärkten Emissionen (~1100 ppm) auf eine geringmächtigere Deckschicht zurückzuführen, was allerdings durch Bohrstockeinschläge, aufgrund der mangelnden Haftung von Abfall im Bohrstock, nicht nachgewiesen werden konnte.

Von Bedeutung sind weiterhin die in diesen Bereichen auftretenden Gasmigrationen in die Böden der Umgebung. Auf der westlichsten Fläche von B betragen diese, bei einer Entfernung von 10 m von der Deponie in den Wald, noch 150 ppm. Als Grund für die Gasmigration in die Böden der Umgebung kann ein leichteres seitliches Entweichen des Deponiegases, eventuell aufgrund einer höheren Gasdurchlässigkeit des Substrates, gegenüber der 2 m mächtigen Deckschicht gesehen werden. Vegetationsschäden sind an den betreffenden Stellen, die allerdings meist nur mit Gras bedeckt sind, nicht zu erkennen. An den Bäumen der Umgebung sind ebenfalls keine Schädigungen sichtbar.

**C** umfaßt Bereiche der "Hangkante" im Übergangsbereich der Flächen I und II und ist quasi als Band ausgeprägt. Ursächlich für die Emissionen an diesen Stellen können auf Zugspannungen beruhende Zerrstellen innerhalb der Deckschicht, aufgrund des Übergangs in einen steileren Neigungswinkel, sein. Trotz hoher Konzentrationen (~1200 ppm) sind Vegetationsschäden an diesen, bereits baumfreien Stellen nicht wahrnehmbar.

**D** stellt den Bereich der westlichen und nördlichen Kuppenhänge sowie Teile der Kuppenverebnung dar. Die Werte liegen hier zwar nicht im extremen Bereich, erreichen aber mittlere bis hohe Konzentrationen (~900 ppm) in einer relativ geschlossenen, größeren Fläche. Problematisch sind die hier auftretenden sandigeren Bodenarten mit erhöhtem Steinanteil, die zum einen gut gasdurchlässig zum anderen auch leicht erodierbar sind. An größeren Austrittsstellen ist die Zerstörung der Vegetationsdecke bereits weiter fortgeschritten, so daß es aufgrund der Hanglage zu flächenhaften Erosionserscheinungen kommt.

**E** beschreibt eine kleinere, flache Böschung im Bereich des Deponieweges. Hier kommt es an einer Böschungskante des Weges zu den mit 3000 ppm höchsten Werten auf der Deponie. Die Vegetationsdecke ist zwar stellenweise zerstört, der Boden ist aber zum größten Teil noch mit einer ausdauernden Grasvegetation bedeckt. Im weiteren Umkreis der beschriebenen Stelle treten keine Bäume mehr auf.

**F** ist die Böschung des an der östlichen Deponiegrenze verlaufenden Randgrabens. Aufgrund der Böschungssituation kommt es hier zonal zu verstärkten Deponiegasaustritten, die teilweise Migrationen in das benachbarte Waldgebiet, wo bis zu 200 ppm gemessen wurden, verursachen. Die Vegetation im direkten Böschungsbereich erscheint nicht oder nur geringfügig geschädigt, die Bäume im benachbarten Waldgebiet zeigen keine Schädigungen.

Auf der Hinteren Halde kommt es in weiten Bereichen zu höheren, teilweise zu hohen, Deponiegas-Emissionen, was dokumentiert, daß immer noch anaerobe Abbauprozesse stattfinden (vergl. Teil III). Diese Emissionen verursachen aufgrund ihrer Beimengungen an Spurenstoffen eine erhebliche Geruchsbelastung am Standort. Weitaus schwerwiegender als letzteres sind allerdings die Vegetationsschädigungen sowie die im Bereich der Kuppenhänge erfolgte Zerstörung der Vegetationsdecke mit einsetzender flächenhafter Erosion.

Aufgrund der Begehung mit dem Gasspürgerät mit FID lassen sich an der Altablagerung durchaus Verbindungen zwischen Deponiegasaustritten, Bodenarten und Pflanzenschädigungen nachweisen. Dies konnte an einer größeren Anzahl an Stellen beschrieben und nachgewiesen werden. Inwieweit der Ausfall von Bäumen (Erlen, Linden) auf einen alleinigen Deponiegaseinfluß zurückzuführen ist, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Festzuhalten ist aber, daß hohe Gasemissionen zu Zeiten von verstärkter Bodentrockenheit erreicht werden, was bei sandigeren Bodenarten, die auf beide Einflüsse negativ reagieren, gravierendere Schäden nach sich ziehen kann. Für das Absterben der Bäume kann demnach eine Kombination dieser Faktoren, sowie der in anderen Kapiteln bereits behandelte Mangel an organischer Substanz im Ausgangssubstrat, angenommen werden.

## 7.5 Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem "HELP"-Modell

in [%]	Niederschlag	Oberflächenabfluß	Evapotranspiration	Perkolation
Fläche I	100	0,00	82,35	17,13
Fläche II	100	0,64	79,75	19,73
Fläche III	100	0,00	81,64	18,77
Fläche IV	100	0,62	81,25	18,35

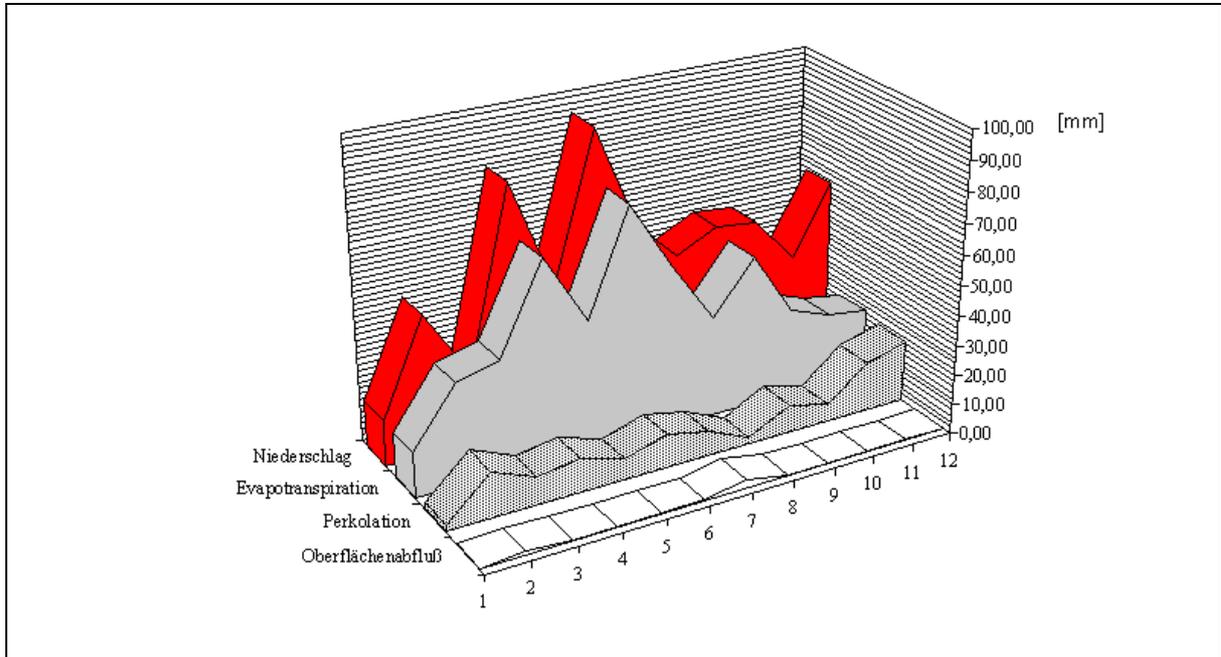
**Tab. IV- 7.3: Wasserhaushalt der Ist-Situation**

Aus Tab. IV- 7.3 geht hervor, daß ca. 80 % des Niederschlags der Evapotranspiration zugeführt werden. Die restlichen 20 % werden vom Programm als Abfluß aus der Deckschicht in den Deponiekörper angegeben. Wie in den Kapitel 5. und 6. bereits angesprochen, ist die im Programm nur ungenügend berücksichtigte Speicherkapazität der Deckschicht auch hier bei der Beurteilung der Perkulationswerte in Betracht zu ziehen.

Die Evapotranspirationswerte liegen mit ca. 80 % im höheren Bereich (vergl.Kap.4.4) (BRECHTEL 1984) und sind insbesondere durch die südexponierte Hanglage sowie die Vegetationsdecke bedingt. Das bessere Abschneiden von Fläche I ist auf die günstigere Vegetation zurückzuführen, da Fläche I im Gegensatz zu den anderen Teilflächen weitgehend mit Bäumen bestockt ist. Durch die Wahl von "excellent grass" werden trotz der ebenen Lage höhere Transpirationswerte als auf den mit "good grass" bewachsenen Hangflächen erreicht.

Der Oberflächenabfluß der Hangflächen liegt bei unter 1 % und damit innerhalb eines für Deponien festgestellten Bereiches von 3 % bei bis zu 30 % Hangneigung (RENGER et al, 1989).

Eine weitere Charakterisierung des Wasserhaushalts wird durch die Darstellung der durchschnittlichen Monatsmengen auf Fläche II in Abb. IV-7.2 vorgenommen.



**Abb. IV- 7.2: Durchschnittliche Monatsmengen auf Deponiefläche II - Ist-Situation**

Der Jahresgang des Niederschlags weist das Maximum im Juni sowie ein Sekundärmaximum im April auf. Das Minimum liegt im Januar und ein sekundäres im März.

Die Evapotranspiration zeigt mit Beginn der Vegetationsperiode aufgrund der verstärkt einsetzenden Transpiration bei den Peaks einen ähnlichen Verlauf und fällt während der Zeit geringer Vegetationsbedeckung auf einen niedrigeren Level ab.

Die Perkolation erreicht entsprechend der eingeschränkten Evapotranspiration ihre höchsten Werte ebenfalls in der Zeit verminderter Pflanzenbedeckung, wobei im November 46 % und im Dezember 35 % des monatlichen Niederschlags abfließen. Im Januar tritt aufgrund mangelnden Niederschlags sowie des Rückhalts von Schnee und Eis ein Minimum auf.

Ein weiteres Minimum wird im August nach einer vorangegangenen Phase erhöhten Niederschlags und hoher Transpiration aufgrund der geringen Regenmengen erreicht.

Über das Jahr gesehen erreicht der Oberflächenabfluß vernachlässigbare Werte, um im Juli auf ca. 4 % des monatlichen Niederschlags anzusteigen. Ein weiteres Maximum mit 1,7 % des Niederschlags liegt während der vegetationsarmen Zeit im Februar vor.

Aus der Simulation des Wasserhaushaltes der Deckschicht mit Hilfe des "HELP"-Programms können, trotz der angesprochenen Einschränkungen (vergl. Kap.5.5) einige grundsätzliche Punkte festgehalten werden:

- Die Evaporation liegt mit 80 % im höheren Bereich.
- Die Perkolation verläuft reziprok zur Evapotranspiration und ist unter Beachtung der ungenügend berücksichtigten Bodenspeicherung als relativ gering zu bezeichnen.
- Die Höchstwerte der Perkolation werden im November mit 46 % und im Dezember mit 35 % des monatlichen Niederschlags erreicht.
- Ein nennenswerter Oberflächenabfluß findet im Juli mit 4 % und im Februar mit 1,7 % des monatlichen Niederschlags statt.

Die Ergebnisse der Rechnersimulation entsprechen somit im wesentlichen den Beobachtungen im Gelände sowie der ökologischen Bewertung nach Feldmethoden.

## 7.6 Ist-Situation der Altablagerung "Hintere Halde"

Die Darstellung der Ist-Situation der Altablagerung basiert auf der vorausgegangenen Beschreibung der Umgebung, der eingeschränkten historischen Erkundung, den Aufnahmen im Gelände sowie der "HELP"-Simulation.

Die Altablagerung liegt in dem gemeinsamen Naherholungsbereich der Städte Nürtingen und Kichheim u. Teck. In der teilweise stark ausgeräumten, überwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächenlandschaft bildet der geschlossene Waldbestand um den Standort einen bescheidenen Restbestand. Die starke Akzeptanz der Rad- und Wanderwege in der Umgebung der Deponie durch die ansässige Bevölkerung bestärkt die Bedeutung als Naherholungsgebiet. Zwischen diesem Waldgebiet und der Auenlandschaft des Talbaches wurde durch die Verfüllung eines ehemaligen Seitentals und der Ausbildung einer Kuppe die Deponie angelegt.

Die Einpassung der Altablagerung in den bestehenden Landschaftshaushalt wird als erstes über die vorhandene Oberflächenausbildung untersucht. Die Deponie fügt sich in die umgebende Reliefsituation beschränkt ein, da insbesondere die steilen Hänge, aber auch die Verbnungsflächen keine natürlichen Entsprechungen in den anstehenden Gesteinen des Schwarzen Jura  $\delta$ - $\delta$  finden. Lassen sich die Bereiche der Kuppe sowie diejenigen des oberen Hangbereichs durch eine standortgerechte Waldbestockung eventuell noch anpassen, so wird die fast bis an den Talbach heranreichende Bauschutt-Erweiterung aufgrund der unnatürlichen, geraden Formen auf längere Sicht als Fremdkörper in der Landschaft zu erkennen sein.

Die Bodenarten der Deckschicht liegen mehrheitlich im Bereich schluffiger Lehm und toniger Lehm. Als Standortfaktoren weisen sie eine mittlere bis dichte Lagerung, einen Wurzelraum bis ca. 90 cm, aufgrund des Tongehaltes gute mineralische Nährstoffreserven, in der Regel neutrale pH-Werte und erhöhte Carbonatgehalte, jedoch nur geringe Gehalte organischer Substanz auf. Trotz des auf den ebenen Flächen auftretenden Stauwassers können keine diesbezüglichen Bodenmerkmale im Profil nachgewiesen werden. Prozesse einer weitergehenden Bodenbildung sind, ausgenommen der  $A_h$ -Initialstadien, kaum wahrnehmbar. Gründe hierfür sind in der kurzen Entwicklungsdauer sowie den erhöhten Carbonatgehalten, die noch die meisten Bodenbildungsprozesse ausschließen, zu sehen.

Grundsätzlich unterscheiden sich zwar die Bodenverhältnisse der Umgebung von denen auf der Altablagerung, doch ist im Laufe der Zeit, nach Einregelung des Wasserhaushaltes sowie der Stabilisierung einer Humusform, eine Angleichung zu erwarten. Da in der Umgebung Bo-

dentypen sowohl aus Tongesteinen als auch aus Mergelgesteinen auftreten, bietet die überwiegend lehmige Deckschicht ähnliche Voraussetzungen zur Bodenbildung wie die anstehenden Gesteine.

Die Vegetation der Altablagerung paßt sich der zur Umgebung unterschiedlichen Situation an, was durch die Untersuchung der ökologischen Zeigerwerte bestätigt wird. Treten auf der "waldnahen" Fläche I noch Arten der Waldgesellschaften auf, so dominieren auf den baumfreien Hangflächen Lichtpflanzen (häufig Neophyten), an Sickerwasser- und Hangzugwasseraustrittstellen treten verstärkt Nässezeiger oder gar Wechselwasserpflanzen auf. Weiterhin finden sowohl der erhöhte Feuchtegrad als auch die höheren pH-Werte in den Zeigerwerten der Vegetationsdecke ihre Bestätigung.

Die Vegetationsdecke der Deponie befindet sich derzeit in einem Pionierstadium, das durch die Anpflanzung und Aussat von kurzlebigeren Rohbodenbesiedlern wie Erlen und Platterbensenarten angezeigt wird. Es ist anzunehmen, daß nach Abklingen der Belastungen durch Sickerwasseraustritte sowie dem Aufbau eines organomineralischen Oberbodens vermehrt Pflanzen der höheren Waldgesellschaften, wie Eichen oder die bezüglich der Standortfaktoren anspruchsvollere Buche, auf der Deponie auftreten und im Laufe der Zeit die Oberhand gewinnen.

Die Anzahl der Arten sowie das stark unterschiedliche Artenspektrum der Deponie übertrifft jene der Umgebung bei weitem. Der vegetationskundliche Wert ist demnach durch diese Artenvielfalt auf kleinem Raum und weniger durch seltene Arten gegeben.

Die Zerstörung der Vegetationsdecke in Verbindung mit der bereits einsetzenden Bodenerosion, erfolgt oftmals an Stellen mit verstärktem Deponiegasaustritt. Diese Zonen liegen bevorzugt im Übergangsbereich Deponie-Umgebung, im Bereich der Kuppenhänge sowie den Böschungsbereichen des "Deponieweges" und des östlichen Deponierandgrabens. Die Konzentrationen erreichen dabei bis zu 3000 ppm und sind als Geruchsemissionen insbesondere durch die Spurenstoffe im Deponiegas sowohl auf, als auch in der Umgebung der Deponie deutlich wahrnehmbar.

Nach der vorangegangenen ökologischen Bewertung der Deckschicht als Standortfaktor, steht im folgenden die Barrierewirkung gegenüber eindringendes Niederschlagswasser im Vordergrund.

Die Deckschicht der Deponie ist durchschnittlich 2 m mächtig mit einem überwiegenden Anteil der o.g. Bodenarten schluffiger Lehm und toniger Lehm. Diese Bodenarten führen zu sehr hohen durchschnittlichen Feldkapazitäten wobei die für die Vegetationsdecke nutzbare Feldkapazität als hoch zu bezeichnen ist. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist bei den auftretenden geringen Korngrößen als niedrig einzustufen, was eine langsame Perkolation und einen geringen Abfluß aus der Deckschicht erwarten läßt. Ein sichtbares Zeichen der geringen Durchlässigkeit ist das an mehreren Stellen auftretende Stauwasser, Wasser das an der Bodenoberfläche verbleibt und somit der direkten Verdunstung ausgesetzt ist.

Der Bedeckungsgrad der Deponie beträgt nahezu 100 %. Durch die aus der Südexposition resultierende Einstrahlungsenergie sind die Pflanzen zu hohen Transpirationsleistungen fähig.

Die Erlenbestände, die nicht bevorzugt südexponiert auftreten, weisen dennoch eine hohe aktive Verdunstung auf. Nach LARCHER (1984) beträgt die transpierte Wassermenge einer 2,5 m hohen Schwarzerle bereits 350 l/a, ein Wert der sich bei den ca. 5-6 m hohen Erlen noch erhöht.

Die hohe Transpirationsleistung wird durch die "HELP"-Simulation mit einem Evapotranspirationwert von 80 % vom Niederschlag bestätigt. Dieser Wert liegt im oberen Bereich der von BRECHTEL (1987) durchgeführten Versuche zur Verdunstung von unterschiedlichen Vegetationsbedeckungen und Bodenarten. Aus der "HELP"-Simulation ergeben sich gemittelte Abflußwerte von ca. 20 % vom Niederschlag, die aber aufgrund von Programmängel zu relativieren sind, da zwei entscheidende Faktoren des Wasserhaushalts, die Interzeptionsverdunstung und die Bodenspeicherung, nur unzureichend berücksichtigt werden. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt der höhere Wasserverbrauch einer ausgebildeten Baumschicht, da das Programm nur Grasbedeckungen vorgibt. Aufgrund der genannten Gründe kann ein geringerer Abfluß als der im Programm ermittelte angenommen werden.

Die Altablagerung "Hintere Halde" unterscheidet sich zwar derzeit in ihren Standortfaktoren teilweise noch erheblich von der Umgebung, doch findet vor allem in Teilbereichen der ehemaligen Hausmülldeponie eine Einfügung in den Landschaftshaushalt der Umgebung statt. Bezüglich der Barrierewirkung zeigt die Altablagerung aufgrund ihrer Südexposition hohe Transpirationsleistungen durch die Vegetationsdecke sowie hohe Speicherkapazitäten und geringe gesättigte Wasserleitfähigkeiten durch die mächtige, lehmig-tonige Deckschicht.

## 8. Oberflächenabdichtung

### 8.1 Allgemeines

Die von Altablagerungen ausgehenden Emissionen lassen sich in einen Sickerwasser- und einen Gaspfad gliedern, wobei nach BACCINI (1992) die ersten Jahre einer Deponie durch hohe Elementfrachten mit überwiegender Gasentwicklung geprägt sind. Nach 10-20 Jahren tritt das Sickerwasser in den Vordergrund und dauert noch über einen längeren Zeitraum an.

In Sicherungskonzepten von Altlasten werden in jüngerer Zeit daher häufiger Oberflächenabdichtungen als Sicherungsmaßnahme vorgeschlagen, da eine Oberflächenabdichtung, als technische Maßnahme, eine Barriere gegen eindringendes Niederschlagswasser darstellt. Es wäre somit eine Möglichkeit zur Beeinflussung des Stoffhaushaltes des Abfallkörpers gegeben, wodurch über die Minimierung des Sickerwasseranfalls die Gefahr von Grundwasserkontaminationen sinkt. Zumindest an Standorten ohne Basisabdichtung, was bei Altablagerungen den Regelfall darstellt, könnte dadurch das Gefährdungspotential vermindert werden.

Der Gesetzgeber äußert sich in den ergänzenden Empfehlungen zur TA Siedlungsabfall vom 29.5.1993 dahingehend, daß unter Abschnitt 10.2.1.h zur Sicherung von Altablagerungen eine Kombinationsdichtung gemäß Deponieklasse II gefordert wird. Da Altablagerungen durch ihr hohes Kohlenstoffpotential die in Anhang B geforderten Anforderungen nicht erfüllen können, dürfen bis zum Abklingen der durch Abbauvorgänge verursachten Hauptsetzungen Sickerwasser minimierende und Deponiegasmigration verhindernde Abdeckungen aufgebracht werden.

Weiterhin wird angeführt: "Für Deponieabschnitte, die zum Zeitpunkt des Inkrafttretens dieser Technischen Anleitung bereits rekultiviert sind, sind Ausnahmen zulässig, wenn nachgewiesen wird, daß das anfallende Sickerwasser hinsichtlich Menge und Qualität zu keiner Gewässerbeeinträchtigung führt."

Durch diesen Passus verbleibt ein breiter Interpretationsspielraum, der sich von der Bewertung der ausgehenden Belastungen bis zur resultierenden Maßnahme erstreckt. Es stellt sich die Frage nach der Lokalität der Sickerwassernahmestelle, die von direkten Messungen auf der Ablagerung bis zu Messungen an weiter entfernten Stellen variiert. Damit verbunden ist die Frage nach der Gewässerbelastung als alleinigen Maßstab, oder ob insbesondere die Belastung des Schutzgutes Boden aber auch der Luft und von Organismen hinzugezogen werden sollte. Daneben sollte die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Rekultivierungsmaßnahme untersucht werden, um eine Abschätzung über den In- und Output der Ablagerung zu erhalten. Festzuhalten bleibt aber auch, daß Emissionen, auch wenn sie unter dem festgesetzten Grenzwert liegen, zu einem Input in andere Ökosysteme, deren Reaktion nicht beachtet oder noch unbekannt ist, führen.

Die resultierende Maßnahme (Kombinationsdichtung gemäß Deponieklasse II) unterliegt ebenfalls einer Ausnahmeregelung, wobei die Frage sich nach der Hinfälligkeit einer Kombinationsdichtung oder der Verwendung anderer Oberflächenabdichtungssysteme wendet. Die Frage nach alternativen Abdeckungssystemen resultiert aus den anfallenden Kosten, die für

eine Kombinationsdichtung ca. 250-300 DM/m<sup>2</sup> ohne Ausgleichsschicht und Vegetationsdecke zuzüglich Baustelleneinrichtung und Kontrolle der HDPE-Schweißnähte betragen (SCHER-ZER, 1992). Die Kosten für eine Kapillarsperre liegen dagegen mit ca. 180 DM/m<sup>2</sup> (JELINEK, 1993) noch unter denen einer mineralischen Dichtung, deren Kosten sich auf ca. 220-270 DM/ m<sup>2</sup> (freundl. mündl. Mittlg. INGENIEURGESELLSCHAFT ABFALL 1993) belaufen. Alle Kostenangaben sind als Orientierungswerte aufzufassen. Ein wirklicher Kostenvergleich der unterschiedlichen Systeme ließe sich im Prinzip nur durch eine Ausschreibung mit definierten zu erbringenden Leistungen erreichen.

Aus der Literaturrecherche geht hervor, daß über das Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen nur wenige Informationen vorhanden sind. Verbindliche Aussagen über das Verhalten von seit Jahren eingekapselten Altablagerungen bei Wiederbefeuchtung aufgrund eines Versagens der Oberflächenabdichtung können nicht gemacht werden, da diesbezügliche Versuche entweder noch nicht durchgeführt oder unveröffentlicht sind.

Als Versagensform von Oberflächenabdichtungen können Austrocknungserscheinungen, Reaktionen auf Belastungen wie Setzungen, Sackungen, Abgleiten sowie Fehler beim Einbau auftreten.

Im nachstehenden Kapitel werden die Folgen einer nachträglich aufgetragenen Oberflächenabdichtung auf eine Altablagerung mit überwiegendem Hausmüllanteil behandelt, wobei am Ende der Versuch einer Abwägung zwischen der technischen Maßnahme und der vorhandenen Rekultivierung bestehen soll.

Die Vorteile einer Oberflächenabdichtung sind in der Barrierewirkung gegen eindringendes Niederschlagswasser, verbunden mit einer Sickerwasserminimierung und kontrollierten Gasemissionen, zu sehen.

Ungeklärt ist dabei jedoch noch der Wasserhaushalt nach der Abdeckung, die mechanisch-statischen Eigenschaften der Abdichtung, die Auswirkung von Versagensfällen auf den Wasserhaushalt mit eventueller Remobilisierung der biologischen Vorgänge, sowie die ökologischen Standortseigenschaften der neuen Rekultivierungsschicht für eine Vegetationsdecke.

Ziel der Entscheidung soll letztendlich die an jeder Altablagerung individuell zu ermittelnde Verbesserung der Umweltsituation sein.

## 8.2 Altablagerung "Federlesmahd"

### 8.2.1 Ergebnisse der "HELP"-Simulation

in [%]	Nieder- schlag	Oberflächen- abfluß	Evapotranspi- ration	Drainage- wasser	Perkolation
Fläche I	100,00	0,75	62,05	36,17	0,38
Fläche II	100,00	0,74	62,04	36,20	0,37
Fläche III	100,00	0,00	74,31	24,67	0,46
Fläche IV	100,00	0,00	62,15	36,27	0,59

**Tab. IV- 8.1: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I**

Bei der Simulation einer Oberflächenabdichtung nach TA Siedlungsabfall der Deponieklasse I für die Altablagerung "Federlesmahd" ist aus Tab 8.1 ersichtlich, daß die Perkolation von Niederschlagswasser in den Deponiekörper Werte zwischen  $\approx 0,4$  und  $\approx 0,6$  % des Niederschlags beträgt. Diese ausgesprochen niedrigen Werte zeigen deutlich die Effektivität dieser Oberflächenabdichtung. Mit diesen geringen Werten kann der zu erwartende Sickerwasseranfall mit einer nur unbedeutenden Menge in Prozent der Niederschläge angenommen werden. Allerdings tritt ein Ausbleiben der Sickerwässer zeitverzögert nach Aufbringung der Oberflächenabdichtung auf, da auch der Müllkörper hohe Wassergehalte aufweist.

Die Evapotranspirationswerte liegen bei der Simulation mit Oberflächenabdichtung für die Flächen I und IV niedriger als bei der Simulation der Ist-Situation. Dies ist auf Unterschiede zwischen der Bodenart der für die Abdichtung angenommenen Rekultivierungsschicht und derjenigen der bestehenden Deckschicht zurückzuführen. Für den Wasserhaushalt des Deponeumfeldes kann der, bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung anfallende, relativ hohe Drainageabfluß, eine Störung des Wasserhaushaltssystems dieses Landschaftsausschnitts bedeuten, da durch die schnelle Ableitung des Wassers in den Vorfluter, das Wasser dem Ökosystem entzogen wird.

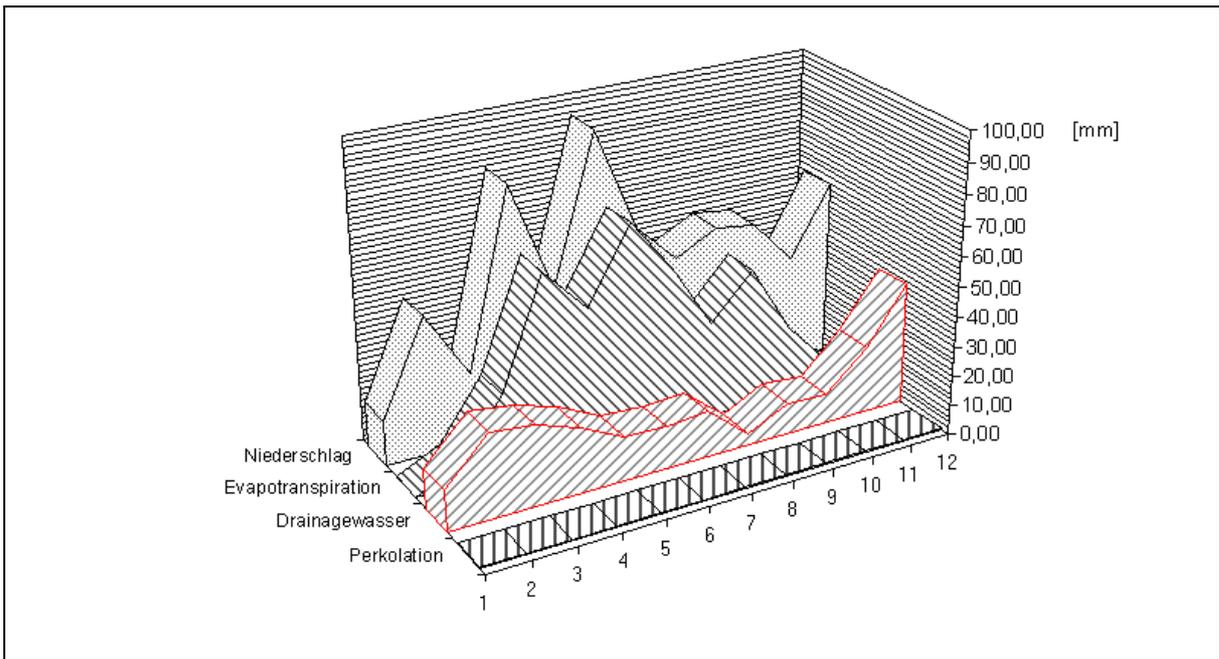


Abb. IV- 8.1: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponiekategorie I

## 8.2.2 Auswirkungen auf die Umgebung

Die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung ist mit umfangreichen baulichen Maßnahmen verbunden. Die erste besteht in der Entfernung des Baumbestandes, der sich über eine Fläche von ca. 12 ha erstreckt. Die Phytomasse von Baumbeständen kühl feuchter Gebiete liegt bei 100-500 Mg/ ha (LARCHER 1984), wobei für die noch jungen Baumbestände der Deponie, der niedrigere Wert realistisch ist. Damit ergibt sich für die Deponie eine Pflanzenmasse von ca. 1200 Mg TS/ ha, die einer Kompostierung zugeführt werden muß.

Eine weitere Maßnahme, die der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung vorangeht, ist die Entfernung der bestehenden Deckschicht. Deren Mächtigkeit beträgt für die gesamte Fläche der ehemaligen Hausmülldeponie ( $\approx 12,7$  ha) mindestens 2 m. Dies bedeutet ca. 254.000 m<sup>3</sup> Erdmaterial, das transportiert, auf eine Erddeponie verbracht, oder auf einer Bodenbörse angeliefert werden muß. Inwieweit dieses Material, das durch die Ausbaggerung, den Transport sowie Zwischenlagerung seine für das Pflanzenwachstum positiven physikalischen Bodeneigenschaften wieder verliert, geeignet ist für die Rekultivierungsschicht, ist fraglich. Bei Wiederverwendung zur Rekultivierung würde die Rekultivierungsschicht nach TA Siedlungsabfall mindestens einen Meter betragen, so daß ca. 127.000 m<sup>3</sup> der Deckschicht wieder genutzt werden könnten.

Die für die Ausgleichsschicht, die Drainschicht und die mineralische Dichtungsschicht benötigten Materialien betragen ohne Rekultivierungsschicht für die Deponiefläche ca 190.500 m<sup>3</sup>.

Dieser Materialan- und -abtransport führt in der Zeit der Baumaßnahmen zu einem stark erhöhten Verkehrsaufkommen, wobei die Ortsdurchfahrten durch Leinfelden-Echterdingen zu erheblichen Belastungen bei der Bevölkerung führen können. Allerdings ist die ehemalige Deponie über die ausgebaute alte B 27 und den nahen Anschlüssen zum überregionalen Verkehrsnetz gut an das Verkehrsnetz angebunden.

Für die Naherholung sind durch die Baumaßnahmen erhebliche Einbußen zu erwarten, da die vorhandenen Wanderwege zum Teil direkt an der Deponie vorbeiführen.

Aus deponietechnischer Sicht ist die Aufbringung einer mineralischen Abdichtung durchaus möglich, da die Neigungen das Verhältnis 1:3 nur stellenweise im Hangbereich I überschreiten. Bei einer Kombinationsdichtung könnten bei den z.T. 70 m langen Hangbereichen Gleitflächen auftreten, die die Standfestigkeit der Abdichtung beeinträchtigen.

Für Altablagerungen, die größere Hangflächen aufweisen, ist auch mit dem Problem von Erosionserscheinungen zu rechnen. Um eine Beschädigung der Drain- und Dichtungsschicht zu vermeiden, können für die Rekultivierung nur flach wurzelnde Pflanzen eingesät werden, deren sehr oberflächennahes Wurzelgeflecht der Erosion nur in begrenztem Umfang entgegenwirkt. Insbesondere im Winterhalbjahr, bei nicht geschlossener Vegetationsdecke sind Erosionsschäden zu befürchten. Der Materialabtrag bei Erosion kann zu verstärkter Austrocknung bis in tiefere Bereiche führen, und damit durch Ribbildung die Funktionstüchtigkeit der Dichtungsschicht beeinträchtigen.

Die für eine Rekultivierung in Frage kommenden flach wurzelnden Arten, lassen keine Baum- und Strauchvegetation zu. Da neben den gepflanzten Arten in der Regel sehr schnell Unkäufer einwandern und diese in der Regel tief wurzeln, ist zu deren Beseitigung fast immer der Einsatz von Herbiziden erforderlich. Auch Bodentiere wie Wühler und Erdfräser, können Schäden an der Drain- oder Dichtungsschicht verursachen. Um die Tiere dem Decks substrat fernzuhalten, ist der regelmäßige Einsatz von Pestiziden wohl unvermeidlich. Das Fehlen einer Bodenfauna führt jedoch zu einer geringen Einarbeitung der Streu, so daß sich einerseits kaum eine Humusschicht ausbilden kann und andererseits eine dadurch bedingte mangelnde Gefügegenentwicklung die Erosionsprozesse begünstigt.

Durch die Vorgabe, die Rekultivierung mit flach wurzelnden Pflanzen durchzuführen, wird die sich entwickelnde Pflanzendecke erhebliche Unterschiede zur Artenvielfalt des heutigen Pflanzenbestand der Altablagerung aufweisen. Die geringere Anzahl an Arten wird auch auf die Fauna des Standortes zurückwirken, da nur noch wenige spezifische Fraßpflanzen für Insekten, die die Nahrungsgrundlage für viele Vögel (siehe Kapitel 6.3.4) darstellen, vorhanden sind. Mit der Verarmung von Flora und Fauna geht eine starke Herabsetzung des ökologischen Wertes dieser Fläche einher. Geringe Artenvielfalt der Pflanzen, ein naturferner Lebensraum sowie der Einsatz von Giften, bietet weder den Kleinlebewesen, noch dem Wild den ihren Bedürfnissen entsprechenden Lebensraum.

Die sich im Zuge dieser Rekultivierungsmaßnahme entwickelnde Pflanzendecke ist nur schwer in den umgebenden Waldbestand zu integrieren, so daß sich daraus auch ein Eingriff in das Landschaftsbild ergibt.

## 8.3 Altablagerung "Hintere Halde"

### 8.3.1 Ergebnisse der "HELP"- Simulation

in [%]	Nieder- schlag	Oberflächen- abfluß	Evapotranspi- ration	Drainage- wasser	Perkolation
Fläche I	100,00	0,00	83,30	15,89	0,52
Fläche II	100,00	0,59	79,88	19,25	0,39
Fläche III	100,00	0,00	81,52	17,96	0,59
Fläche IV	100,00	0,55	81,54	17,97	0,34

Tab. IV- 8.2: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I

Die Berechnungen der Perkulationsrate von Niederschlagswasser in den Deponiekörper zeigen bei der Simulation einer Oberflächenabdichtung nach Deponieklasse I für die Altablagerung "Hintere Halde" Werte zwischen  $\approx 0,6$  und  $\approx 0,4$  % des Niederschlags, die damit den Simulationswerten der "Federlesmahd" entsprechen. Für die Sickerwasserrate bedeutet dies ebenfalls ein Absinken auf eine nur unbedeutende Menge des Niederschlags.

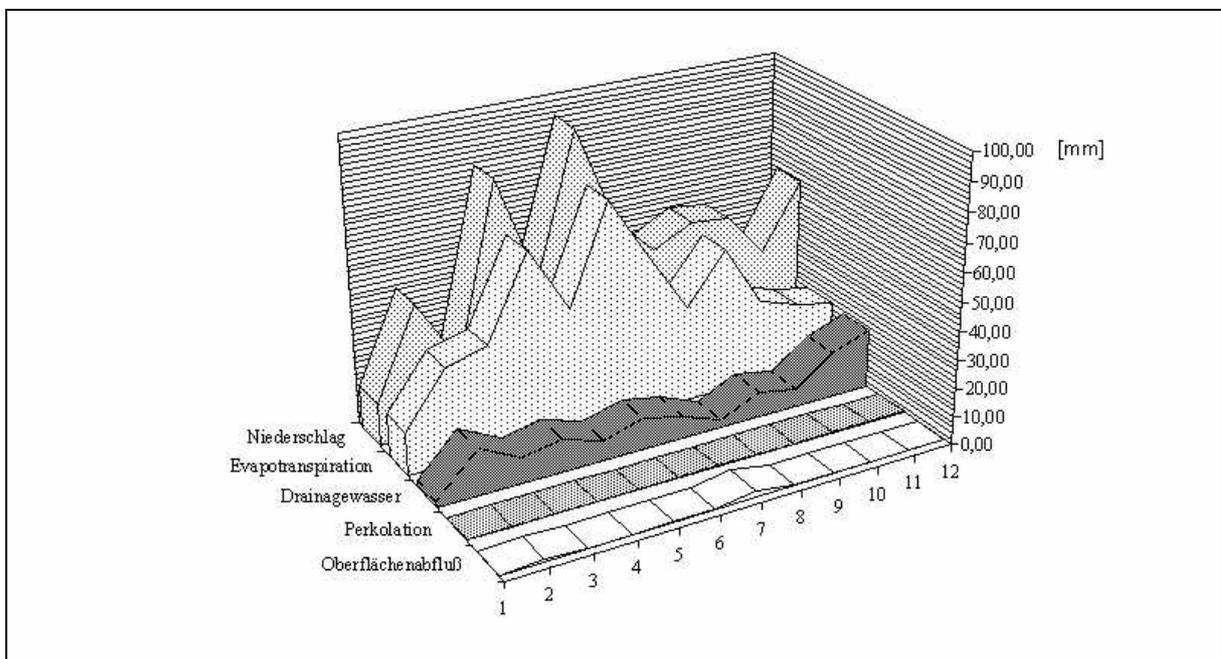


Abb. IV- 8.2: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I

Nach den Ergebnissen der Simulation kann die Oberflächenabdichtung demnach als wirkungsvolle Maßnahme zum Schutz der Böden und Gewässer betrachtet werden. Die

Evapotranspirationsrate der Simulation mit Oberflächenabdichtung entspricht weitgehend derjenigen der Ist-Situation, da jeweils der gleiche Bewuchs in die Berechnung einging und die angenommene Bodenart der Rekultivierungsschicht derjenigen der Deckschicht weitgehend gleicht. Die Drainagewerte der Simulation mit Oberflächenabdichtung entsprechen folglich den Perkolationswerten der Ist-Simulation. Ein Nachteil der Drainage kann darin gesehen werden, daß das anfallende Drainagewasser dem nächsten Vorfluter zugeführt wird und damit dem Wasserhaushalt dieses kleinen Landschaftsausschnitts nicht mehr zur Verfügung steht.

### 8.3.2 Auswirkungen auf die Umgebung

Für das Szenario wird, wie auch bei der "HELP"-Simulation, die gesamte Altablagerung behandelt. Die Flächen III und IV bilden zwar die Bauschutterweiterung, doch muß bei strenger Auslegung der TA Siedlungsabfall auch hier gemäß Deponieklasse I eine Oberflächenabdichtung aufgebracht werden.

Aufgrund der anfallenden Baumaßnahmen kommt es zu erheblichen Mengen an Vegetationsabfällen und Erdaushub.

Um die Voraussetzungen für Bautätigkeiten und Zwischenlager zu schaffen, muß die vollständige Vegetationsdecke der Altablagerung, sowie für Teilbereiche der Umgebung entfernt werden. Der Bestandsvorrat an Pflanzenmasse in einem Waldgebiet unserer Breiten schwankt zwischen 100-500 Mg TS/ha (LARCHER, 1984). Nimmt man für die Deponiefläche den niedrigsten Wert an, so sind von 10 ha ca. 1000 Mg Trockensubstanz zu entfernen und zumindest teilweise einer abfalltechnischen Behandlung wie etwa der Kompostierung zuzuführen.

Da Oberflächenabdichtungen direkt auf den Müllkörper aufgebracht werden, stehen an der "Hinteren Halde" enorme Erdbewegungen an. Inwieweit diese unter den gegebenen geologischen Verhältnissen durchführbar sind, ist im Vorfeld zu prüfen. Bei einer durchschnittlichen Mächtigkeit der Deckschicht von 2 m, müssen ca. 184.000 m<sup>3</sup> Material bewegt, zwischengelagert und andersweitig entsorgt werden. Da für die Dichtungs-, Drain- und Ausgleichsschicht (Summe ca. 92.000 m<sup>3</sup>) ein spezifisches Material mit definierter Korngröße benötigt wird, kann das ausgeräumte Material der Deckschicht eventuell nur für die 1 m mächtige Rekultivierungsschicht (92.000 m<sup>3</sup>) sowie für Erdbauarbeiten verwendet werden. Im ungünstigsten Fall sind ca. 92.000 m<sup>3</sup> einer Bodenbörse oder Erdaushubdeponie zuzuführen.

Falls das Relief der Altablagerung aufgrund der Neigungsverhältnisse, um ein Abrutschen der Dichtungsschicht zu verhindern, verändert werden muß, können die vorhandenen Erdmassen in diese Arbeiten eingehen.

Durch die Baumaßnahmen kommt es zu einem hohen Schwerlastverkehrsaufkommen, dessen Menge sich an dieser Stelle nicht beziffern läßt, sowohl am Standort als auch in den von Durchfahrten betroffenen Ortschaften. Weiterhin wird die Naherholungsfunktion durch die Bauarbeiten und den Verkehr empfindlich gestört. Letzterer würde über die ehemalige Deponiezufahrt entlang des Talbachs führen und dadurch den Freizeit- und Erholungswert mindern.

Die Rekultivierungsschicht einer Oberflächenabdichtung beträgt ca. 100 cm. Um ein Wurzelwachstum in die Drainage- und Dichtungsschicht zu verhindern, muß eine spezielle Grasve-

getation aus flach wurzelnden Arten aufgebracht werden. In andauernden Nachsorgemaßnahmen müssen Bäume, Sträucher sowie tief wurzelnde krautige Arten regelmäßig, meist unter Herbizideinsatz beseitigt werden. Erdbewohner, Erdwöhler- und Erdfräser, sind gleichsam aus der Deckschicht fernzuhalten, was sich, wie an einem der untersuchten Standorte festgestellt wurde, ebenfalls unter Gifteinsatz vollzieht. Da ohne funktionierende Bodenfauna nur schwerlich eine Einmischung der organischen Substanz in den mineralischen Oberboden stattfindet, wird sich nur eine gehemmte Bodenbildung einstellen. Diese bietet für eine zur Evapotranspiration und als Erosionsschutz nötigen anspruchsvollen Vegetationsdecke eher ungünstige Voraussetzungen,

Die oben genannte Vegetationsdecke hat keinerlei Ähnlichkeit mit der derzeitigen von der natürlichen Sukzession bestimmten, äußerst artenreichen Vegetationsgesellschaft am Standort. Wie in Kapitel 7.3.3 dargelegt, liegt deren vegetationskundlicher und ökologischer Wert in der beschriebenen Artenvielfalt auf kleinem Raum. Durch die aufzubringende Grasvegetation ist eine starke Verarmung zu erwarten, die den ökologischen Wert dieser Fläche als wenig bedeutsam einstuft.

Durch die geänderte Vegetationszusammensetzung, verliert auch eine größere Anzahl an Tierarten den Habitat. Neben dem scheuen Schalenwild und den Wildschweinen sind davon insbesondere Kleinsäuger wie Hasen und Maulwürfe, Insektenarten wie Schmetterlinge, Grillen, Wespen und Hummeln sowie Eidechsenarten betroffen. Eine ebenfalls große Anzahl an Vogelarten, wie zum Beispiel Mäusebussard, Erlenzeisig, Kuckuck, aber auch der an Dornhecken gebundene Neuntöter, würden ihren Lebensraum verlieren.

## 9. Abwägung zwischen der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung und der Ist-Situation bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit

### 9.1 "Federlesmahd"

Die Ist-Situation auf der Altablagerung und ihrer Umgebung, wird in Kapitel 6 ausführlich beschrieben. Dabei zeigt sich, daß eine Bewertung der Deponie ausgesprochen schwierig ist, da drei Aspekte gegeneinander aufgewogen werden müssen.

1. die landschaftsökologische Situation
2. die Fähigkeiten der Sickerwasserverringerng durch Evapotranspiration und Speicherung
3. die Ergebnisse der Simulation der Oberflächenabdichtung

Eine kurze Übersicht soll die Ist-Situation und die Situation nach Aufbringung einer Oberflächenabdeckung aufzeigen.

Die "Federlesmahd" bildet eine an einen Hang angelehnte optisch relativ gut in das Landschaftsbild eingepaßte Aufwölbung und ist an drei Seiten von Wald umgeben, der sich aus standörtlich angepaßten, naturnahen Waldgesellschaften zusammensetzt.

Die Deckschicht der Altablagerung, gleicht mit ihren schluffigen und tonigen Bodenarten den meisten Böden der Umgebung, wobei letztere aufgrund geringerer Lagerungsdichte und Gefügebildung, einen günstigeren Lufthaushalt aufweisen und weniger stark zu Vernässungen neigen. Bezüglich der chemischen Eigenschaften, sind die Deckschichten günstiger, da hier eine sehr gute Nährstoffversorgung, hohe pH-Werte und hohe Carbonatgehalte des Materials vorliegen. Die Deckschicht zeigt im Vergleich zur Umgebung allerdings sehr niedrige Humusgehalte, wobei die vorhandene rege Bodenfauna und die Bodenorganismen allmählich eine Einarbeitung der Streu und damit eine Humusanreicherung bewirkt.

Des weiteren liegen die Feldkapazitäten sehr hoch, so daß ein größerer Teil des Niederschlagswassers gespeichert werden kann, der dadurch nicht in den Deponiekörper gelangt. Die geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit der Bodenarten, insbesondere der unteren Schichten, und der gute kapillare Aufstieg des Niederschlagswassers tragen ebenfalls zu einer Minderung des Sickerwasseranfalls bei. Die hohe nutzbare Feldkapazität ermöglicht den Pflanzen eine hohe Transpirationsleistung, wodurch gleichfalls eine Sickerwasserminderung bewirkt wird.

Die Vegetation der Altablagerung zeigt im Vergleich zur Umgebung eine wesentlich größere Artenvielfalt, deren breites Spektrum sich in den ökologischen Zeigerwerten dokumentiert. Für die Vegetation ist bereits eine Entwicklung in Richtung Waldstandort erkennbar was sich an der Zusammensetzung der Krautschicht, die bereits Arten der höheren Waldgesellschaft aufweist, zeigt. Die Artenvielfalt bietet unterschiedlichen Tieren Lebensraum und durch die teilweise Einzäunung des Gebietes entsteht für diese Fläche von ca. 16 ha (einschließlich Bau-

schuttdeponie) auch ein Rückzugsrefugium für die Fauna. Die große Insekten- und Fraßpflanzenvielfalt und ist für die hohe Anzahl an Vögeln als Nahrungsgästen verantwortlich.

Die Probleme bei dieser Altablagerung zeigen sich insbesondere durch das Sickerwasser und die Gasaustritte. Letztere treten, z.T in sehr hohen Konzentrationen, bevorzugt an Spalten auf und führen auf der Deponie kleinflächig zu Pflanzenschäden. In der Umgebung konnten keine Schädigungen durch Deponiegas beobachtet werden. Das größere Problem liegt im Sickerwasser, das unkontrolliert aus der Altablagerung austritt. Nur ein kleiner Teil wird gefaßt und in eine Kläranlage geleitet.

Die Simulation der Ist-Situation mit dem "HELP"-Programm berechnet einen Sickerwasseranfall von  $\approx 25\%$  -  $\approx 37\%$  des Niederschlags. Diese Berechnungen beinhalten Mängel im Programm (vergl. Kap.6.6), so daß dieser Wert als zu hoch anzusehen ist.

Mit der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung nach TA Siedlungsabfall für die Deponieklasse I liegt, nach Berechnungen mit dem "HELP"- Programm, die Perkolation von Niederschlagswasser in den Deponiekörper bei nur noch ca. 0,6 %. Damit ist die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung unter dem Gesichtspunkt des Schutzes von Grundwasser und Boden zu empfehlen.

Allerdings kann auch die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung mit negativen Auswirkungen für die Umgebung verbunden sein (vergl. Kap. 8.2.2). Neben der Entfernung der Deckschicht einschließlich Pflanzenbestand, was einen erheblichen Eingriff in das bestehende Ökosystem darstellt, gehen damit auch umfangreiche Materialtransporte einher, die durch den hiermit notwendigen Schwerlastverkehr zur Belastung der Anwohner führen. Damit verbunden ist auch eine starke Beeinträchtigung der Naherholung um das Gebiet der ehemaligen Deponie.

Für die "Federlesmahd" stellt eine Bepflanzung mit flachwurzelnden Arten, die einer Beschädigung der Dichtungsschicht entgegenwirkt, einen deutlichen Eingriff in das Landschaftsbild und die Artenzusammensetzung dar. Eine Verminderung der Artenvielfalt entzieht vielen Tieren die Nahrungsgrundlage und den Lebensraum, so daß das entstehende Ökosystem eine deutliche Verarmung gegenüber der Ist-Situation aufweist. Einer Beschädigung der Dichtungsschicht durch Pflanzenwurzeln und Tieren ist voraussichtlich nur mit dem Einsatz entsprechender Gifte zu begegnen.

Die Abwägung über eine höhere Umweltverträglichkeit mit einer Oberflächenabdichtung oder unter Beibehaltung des Ist-Zustandes kann nur für jede Deponie individuell getroffen werden. Für die "Federlesmahd" stellen die geoökologischen Aufnahmen und die "Help"- Simulation die Diskussionsgrundlage dar. Des weiteren ist das Langzeitverhalten von Deponieoberflächenabdichtungen, auf das im Teil I der Studie näher eingegangen wird, in die Abwägung miteinzubeziehen. Da bezüglich des Langzeitverhaltens noch keine praktischen Erfahrungen vorliegen, kann nur auf Feld- und Laborversuche, Modellrechnungen oder kurzzeitige Erfahrungen zurückgegriffen werden.

So ist beispielsweise noch ungeklärt, inwieweit es bei Austrocknung des Müllkörpers zur Kohäsion kommt, die Auswirkungen auf eine Oberflächenabdichtung aufweisen.

Auch die Austrocknung der Rekultivierungs- und Dichtschicht sowie Frosteinwirkung stellt eine Gefährdung der Dichtwirkung dar und dies umso mehr, als bei Grasbewuchs die Evaporation wesentlich höher liegt als bei Baumbeständen. Die flachwurzelnde Grasbedeckung kann im Gegensatz zu Baumbestand bei entsprechender Hangneigung nur wenig zur Erosionsvermeidung beitragen, so daß mit einem allmählichen Abtrag der Rekultivierungsschicht gerechnet werden muß.

Bei einer Abdeckung mit einer Kombinationsdichtung können Witterungseinflüsse zu einem thermooxidativen Abbau und damit zu einer Alterung der Kunststoffdichtung führen. Für die "Federlesmahd", ist die Aufbringung einer Kombinationsdichtung aufgrund der Reliefsituation jedoch ungünstig, da die Länge und Neigung der Hänge die Gefahr eines Abgleitens der Dichtungsschicht beinhalten.

Generell ist eine Aussage zur Oberflächenabdichtung für die "Federlesmahd" erst dann zu treffen, wenn geklärt ist, ob die vorhandenen Sickerwasseraustritte auf die Niederschläge zurückzuführen sind, oder ob nicht in den Deponiekörper eintretendes Schichtwasser für die permanente Schüttung der Sickerwasserquelle verantwortlich ist. Des weiteren sind für die Beurteilung der Sickerwasserinhaltsstoffe Analysen der Sickerwasseraustrittsstellen direkt auf der Altablagerung sinnvoll, um zu vermeiden, daß auf dem Weg zur Entnahmestelle bereits ein Teil der Sickerwässer in den Untergrund versickert.

Wenn Untersuchungen zeigen, daß die Niederschläge Ursache der Sickerwasseraustritte sind, ist dennoch zu klären, ob eine mineralischen Dichtung, langfristig eine wesentlich höhere Barrierewirkung aufweist als die bereits vorhandene Deckschicht mit ihrem Pflanzenbewuchs. Bei den mit Feldmethoden durchgeführten Untersuchungen konnte auch für die Deckschicht eine durchaus bestehende Barrierewirkung festgestellt werden. Um die genaue Mächtigkeit und Wasserdurchlässigkeit der Deckschicht zu ermitteln, bedarf es jedoch technischer aufwendigerer Feld- und Laborversuchen als die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten. Des weiteren sollte in Feldversuchen die Transpirations- und Interzeptionsleistung der bestehenden Pflanzendecke, die in der Computersimulation mit dem "Help"-Modell keinen Eingang findet, aber zu einem erheblichen Teil zur Minderung der in den Deponiekörper gelangenden Niederschläge beitragen kann, genauer ermittelt werden.

Bei der hier untersuchten Altablagerung, die bereits Ansätze einer ökologischen Eingliederung in die Umgebung zeigt und eine reiche Flora und Fauna aufweist, sollte vor der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung nach Alternativen zur Sickerwasserminimierung gesucht werden. Eine Alternative besteht in der Fassung der Sickerwasseraustritte durch Schaffung einer Sickerdole und dem Anlegen einer Drainageleitung am Deponiefuß.

Die Gasaustritte, die nur punktuell und konzentriert auftreten, zeigen nur geringe Schadwirkungen am Pflanzenbestand der Deponie und keine für die Umgebung, so daß hier kein dringender Handlungsbedarf gesehen wird.

Einen sehr wichtigen Punkt nimmt die Vegetation ein, da durch Intensivierung der Vegetationsdecke sowie Pflanzung entsprechender Arten eine deutliche Verringerung des Eintrags von Niederschlägen in den Deponiekörper bewirkt wird.

Diese Maßnahmen können eine Oberflächenabdichtung nicht ersetzen, jedoch dazu beitragen, daß unter Beibehaltung des Ökosystems der "Federlesmahd" ein geringerer Eintrag in andere

Ökosysteme stattfindet, so daß dadurch insgesamt die unter mehreren Aspekten am ehesten umweltverträgliche Lösung erreicht wird.

## 9.2 "Hintere Halde"

Die in Kapitel 7.6 beschriebene Ist-Situation, bildet die argumentative Grundlage bezüglich der landschaftsökologischen Faktoren.

Die Altablagerung wurde in einem ehemaligen Seitental des Talbachs, umgeben von einem größeren geschlossenen Waldbestand angelegt. Im Laufe der Zeit fügten sich größere Bereiche der Deponie durch die aufkommende Vegetation allmählich in die Landschaft ein, was für die Bedeutung der Umgebung als Naherholungsgebiet positive Auswirkungen hat.

Die standortkundlichen Merkmale der Deckschicht zeigen ausreichende Verhältnisse als Pflanzenstandort an. Negativ sind dabei die mittlere bis hohe Lagerungsdichte, die Armut an organischer Substanz sowie die Neigung zu Stauwasser anzusprechen. Als positiv sind die aufgrund des Tongehalts ausreichenden mineralischen Nährstoffreserven, die neutralen pH-Werte sowie die erhöhten Carbonatgehalte anzusehen. Als Ausgangsmaterial für die Bodenbildung bietet die überwiegend lehmige Deckschicht ähnliche Voraussetzungen zur Bodenbildung, wie die in der Umgebung anstehenden Ton- und Mergelgesteine.

Problemstellen auf der Altablagerung sind sowohl kleinflächige, als auch größerflächige Deponiegasaustrittsstellen, die teilweise außergewöhnlich hohe Emissionen ( $\approx 3000$  ppm) erreichen und geruchlich derzeit noch gut wahrnehmbar sind. Sickerwasseraustrittsstellen sowie das nur unzureichend gefaßte und in einem PE-Schlauch im Bachbett des Talbaches zur Kläranlage abgeleitete Sickerwasser weisen noch problematische Werte auf.

Die vorherrschende Pflanzendecke ist als gut ausgeprägte Pioniervegetation zu sehen, die mit abnehmenden deponiespezifischen Belastungen, unter Einsetzen einer Bodenbildung der natürlichen Sukzession unterliegt. Auch wenn 1993 die einzelnen Flächen noch eine hohe Spannbreite bezüglich der ökologischen Zeigerwerte aufweisen, sind insbesondere auf der Kuppe (Fläche I) einige Arten der anspruchsvollen Waldpflanzen zu verzeichnen, die eine Entwicklung hin zu einem Waldstandort vermuten lassen. Der vegetationskundliche Wert der Pflanzendecke ist durch eine große Artenvielfalt auf kleinem Raum und weniger aufgrund seltener Arten gegeben.

Aufgrund der teilweise sehr dichten und abweisenden Vegetation bildet die Deponie ein Rückzugsgebiet für Rehe, Wildschweine und kleine Säuger. Offene Bereiche bieten dagegen einer größeren Anzahl von Vögeln sowohl Lebensraum als auch Jagdrevier. Die Nahrungsgrundlage ist in der durch die Pflanzenvielfalt verursachten Insektenfülle zu sehen.

Die Deckschicht erzielt aufgrund ihrer Mächtigkeit von zwei Metern mit überwiegend schluffig-lehmigen und tonig-lehmigen Bodenarten als Speicherkörper sowohl sehr hohe Feldkapazitäten als auch hohe nutzbare Feldkapazitäten. Infolge der geringen Korngröße liegt die Wasserleitfähigkeit niedrig, was eine langsame Perkolation und einen geringen Abfluß aus der Deckschicht vermuten läßt. Sichtbar wird die geringe Durchlässigkeit durch das auftretende Stauwasser.

Aus einem Bedeckungsgrad von nahezu 100 % sowie der aus der Südexposition erfahrenen Einstrahlungsenergie resultieren hohe Transpirationsleistungen der Pflanzen. Die mit der "HELP"- Simulation ermittelten Evapotranspirationswerte liegen bei ca. 80 % vom Niederschlag. Der Abfluß beträgt ca. 20 %, wobei dieser aufgrund der erwähnten Programmängel eher niedriger anzusetzen ist.

Der oben dargelegten Situation, steht bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung die Verringerung des Abflusses in den Deponiekörper gegenüber. Bei der "HELP"- Simulation werden Werte  $< 0,6$  % vom Niederschlag erreicht.

Die zur Sicherung des Schutzgutes Grundwasser getroffenen Maßnahme führt allerdings im Landschaftshaushalt zu erheblichen Eingriffen (vergl. Kap. 8.2.2), die technische Probleme wie die Entfernung der Vegetationsdecke, Erdbewegungen aufgrund der Ausräumung der Deckschicht, eventuelle Umgestaltung des Reliefs sowie die Entsorgung der anfallenden Reststoffe (Vegetationsreste, Erdaushub) umfassen. Die Arbeiten führen zu einem stark erhöhten Schwerlastverkehrsaufkommen, das den Freizeit- und Erholungswert des Untersuchungsgebietes mindert.

Die auf die Rekultivierungsschicht aufzubringende flach wurzelnde Grasvegetation erfordert aufwendige Nachsorgemaßnahmen, wie die Beseitigung von tief wurzelnden Arten und Erdbewohnern, eventuell auch unter Gifteinsatz. Die Folgen hiervon können eine gehemmte Bodenbildung sowie aufgrund mangelhafter Bodenstabilisierung ohne Fauna und Durchwurzelung eine höhere Erosionsanfälligkeit sein, die im Extremfall zur Zerstörung der Dichtungsschicht führen kann.

Allgemein nimmt die derzeit auf der Altablagerung vorhandene Artenvielfalt der Vegetation ab, wodurch auch viele Tierarten ihren Habitat verlieren.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen sowie den nachfolgenden Aspekten zum Thema Oberflächenabdichtung, soll für den konkreten Fall der "Hinteren Halde" die Diskussionsgrundlage erweitert werden.

In Kapitel 8.1 werden die noch offenen Fragen bezüglich des Langzeitverhaltens von Oberflächenabdichtungen verbunden mit den Auswirkungen eventueller Schadensfälle dargelegt. Hierzu wurde bereits in Teil I der Studie noch erheblicher Forschungsbedarf aufgezeigt. Für die "Hintere Halde" kann infolge der in Kapitel 7.1 angeführten Abfallzusammensetzung, die durch zu geringes Datenmaterial keineswegs repräsentativ ist, von einem noch über längere Zeit andauernden Belastungspotential ausgegangen werden. Bezüglich der ebenfalls in Teil I aufgezeigten, durch Einbaufehler verursachten Schadensfälle könnte mittels einer verstärkten Überwachung des Qualitätssicherungsplanes (nach DIN 55350) der TA Siedlungsabfall Abschnitt 10.4.1.2 wirksam entgegengetreten werden.

Die erkannte Schadanfälligkeit der Dichtungsschicht von mineralischen Oberflächenabdichtungen durch Frost, Austrocknung und Durchwurzelung wird gemäß TA Siedlungsabfall durch die Aufbringung von mindestens 100 cm "kulturfähigem" Boden entschärft. Durch die während der Umbaumaßnahmen anfallenden Mengen an Bodenmaterial wäre an der "Hinteren Halde" diese Forderung ohne Schwierigkeiten zu erfüllen.

Allgemein ist eine Oberflächenabdichtung im Rahmen von Sicherungsmaßnahmen Bestandteil des Verfahrens zur Einkapselung von Altablagerungen. Mit einer Barriere gegen Niederschläge werden durch Schichtwasser und ähnliches verursachte, unterirdische und seitliche Zuflüsse nicht verhindert. Im Rahmen der Erkundungsmaßnahmen gilt es daher die Herkunft des anfallenden Sickerwassers zu klären, um eine weitere Entscheidungshilfe zu erhalten. Sollte aufgrund der hydrogeologischen Gegebenheiten, wie an der "Hinteren Halde", ein Schichtwasserzufluß zu vermuten sein, können andere Sicherungs- oder Sanierungsmaßnahmen wie eine Oberflächenabdichtung erforderlich werden.

Auf der Basis der erweiterten Diskussionsgrundlage gilt es die Beziehungen Kosten-Nutzen und Zerstörung-Nutzen abzuwägen.

Der unbestreitbare Nutzen einer Oberflächenabdichtung liegt in der Barrierewirkung gegen das in den Abfallkörper eindringende Niederschlagswasser. Damit ist in der Regel eine Austrocknung des Deponiekörpers verbunden, woraus ein verringerter Sickerwasseranfall resultiert.

Die Ist-Situation der "Hinteren Halde", eine Szenario-Abschätzung der Oberflächenabdichtung sowie die noch allgemeinen offenen Fragen bezüglich Langzeitwirkung und Schadensfällen wurden in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich dargelegt. Durch erweiterte Untersuchungen, wie eingehende technische Erkundungen, ungefähre Berechnungen sowohl des Schadstoffpotentials als auch der Dauer bis die anfallenden Frachten eine akzeptable, ökologisch verträgliche Konzentration erreicht haben, läßt sich dann der jeweilige Handlungsbedarf für die Altablagerung ableiten.

Unter der Annahme tolerierbarer Belastungen über absehbare Zeiträume, die allerdings auch in geringen Mengen zu Einträgen in anderen Ökosystemen führen, sollte die derzeitige Situation an der "Hinteren Halde" akzeptiert werden. Durch die Intensivierung der Vegetationsdecke durch die Einbringung von Baumarten, einer weiteren Verbesserung der standortkundlichen Voraussetzungen (Humuseintrag) sowie gezielten kleineren Sanierungsmaßnahmen, wie die Einfassung und Ableitung von Sickerwasseraustrittsstellen, Bodentausch an durch Deponegas beeinträchtigten Stellen und Erosionsschutzmaßnahmen, könnte die "Leistungsfähigkeit" der bestehenden Abdeckung noch erhöht werden. Durch diese Maßnahmen würde zwar keine absolute Lösung erzielt werden, -eine Oberflächenabdichtung stellt ebenfalls keine absolute Lösung dar-, aber ein weitreichender Eingriff in den Landschaftshaushalt, mit dem Verlust der derzeit vorhandenen Flora und Fauna, würde ausbleiben.

Unter Beachtung der vorliegenden Arbeit sowie den noch zu klärenden ökotoxikologischen Aspekten, ist in der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung, die mit erheblichen Kosten verbunden wäre, kein gravierender Vorteil gegenüber der derzeit vorhandenen Lehmabdeckung und Vegetationsschicht zu sehen.

Zur Verbesserung der Situation sollten vielmehr kleinere Sanierungs- und Erosionsschutzmaßnahmen sowie eine Intensivierung der Vegetationsdecke durchgeführt werden. Werden darüber hinaus ökologisch verträgliche Frachten in absehbarer Zeit erreicht, könnte durch den Erhalt der bestehenden Verhältnisse im Vergleich zu den Folgen einer technischen Maßnahme, eine höhere Umweltverträglichkeit erzielt werden.

## 10. Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie untersucht der hier vorliegende Teil IV die Beziehungen zwischen einer Altablagerung und ihrer Umgebung sowie die Wirkung einer nachträglich aufgetragenen Oberflächenabdichtung.

Zur Gewinnung von Datengrundlagen wird ein Untersuchungsprogramm auf zwei Altablagerungen angewendet. Aus einer Vielzahl von Altdeponien wurden mit Hilfe des Amtes für Wasserwirtschaft und Bodenschutz in Kirchheim/Teck die ehemaligen Kreismülldeponien "Feder-lesmahd" in Leinfelden-Echterdingen sowie die "Hintere Halde" nahe der Ortschaft Ober-boihingen ausgewählt.

Die zur Untersuchung herangezogenen ehemaligen Deponien wurden unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewählt. Zum einen sollten die Deponien bereits seit einigen Jahren stillgelegt sein und zum anderen eine bereits ausgeprägte Vegetationsdecke aufweisen. Des Weiteren sollte auf den Deponien überwiegend Hausmüll zur Ablagerung gekommen sein. Die ausgewählten Deponien weisen in den Punkten Alter, Art und Menge der verfüllten Abfälle, Deponietechnik sowie hinsichtlich Maßnahmen und Zeitraum der Rekultivierung weitgehende Übereinstimmungen auf. Unterschiede ergeben sich aufgrund der Geologie, des Reliefs und der Exposition.

Für die Altablagerungen werden anhand eines Untersuchungsprogramms, das auch eine kurze historische Erkundung beinhaltet, Untersuchungen durchgeführt, die im wesentlichen auf standorts- und vegetationskundliche Aspekte ausgerichtet sind.

Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage zur Darstellung der Ist-Situation am Standort. Im Vordergrund steht dabei die standorts- und vegetationskundliche Beschreibung der Altablagerung an sich sowie in ihrer Beziehung zur Umgebung. Eine vegetationskundliche Gegenüberstellung der Situation von 1981 zeigt dabei die Veränderungen bzw. die Entwicklungen der Pflanzendecke der Altablagerung. Ziel war es, Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Altablagerung und der Umgebung aufzuzeigen, um daraus die ökologische Einfügung in den bestehenden Landschaftshaushalt ableiten zu können.

Als nächster Schritt erfolgte die Bewertung der vorhandenen Deckschicht hinsichtlich ihrer Barrierewirkung gegen eindringendes Niederschlagswasser. Diese wurde mittels einer "Ökologischen Bodenbewertung" bezüglich der Speicherkapazitäten, Verdunstungsleistungen und Leitfähigkeiten durchgeführt. Auf der Basis der hierbei gewonnenen Daten wurde der Wasserhaushalt der Deckschicht mit dem Rechnerprogramm "HELP" simuliert.

Nachfolgend wurden in einem Szenario die Auswirkungen einer mineralischen Oberflächenabdichtung gemäß Deponieklasse I zum einen unter dem Aspekt der Barrierewirkung und zum anderen unter Betrachtung der Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt dargestellt. Die sehr gute Barrierewirkung der Oberflächenabdichtung konnte mittels der "HELP"-Simulation bestätigt werden. Die Entwicklung eines Szenarios für die Auswirkungen einer Oberflächenabdichtung zeigt die negativen Folgen für das bestehende Ökosystem, das infolge der beschränkenden Vorgaben für die Rekultivierung auch nicht ersetzt werden kann.

Auf den beiden untersuchten Altablagerungen herrscht aufgrund des noch jungen Sukzessionsstadiums, das sowohl Freiflächen- als auch bereits Waldcharakter aufweist, eine im Vergleich zur Umgebung höhere Artenvielfalt. Dieser unter ökologischen Gesichtspunkten als positiv zu bewertende Entwicklungszustand, würde durch die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung irreversibel gestört werden, da die Nachfolgegesellschaft, bestehend aus einer Grasgesellschaft, als ökologisch verarmt und unbedeutend anzusehen ist.

Dennoch kann der landschaftsökologische Aspekt kein alleiniges Entscheidungskriterium darstellen, da auch durch den Austrag umweltrelevanter Stoffe aus dem Deponiekörper direkt, aber meist weniger offensichtlich, in Ökosysteme eingegriffen wird.

Da Altablagerungen in der Regel über keine Basisabdichtung verfügen, sollte durch weitergehende technische Erkundungsmaßnahmen geprüft werden, inwieweit der Sickerwasseranfall sowie auftretende Sickerwasseraustritte tatsächlich auf Niederschläge und nicht auf Schichtwasserzutritte zurückzuführen sind. Bei überwiegenden unterirdischen Zuflüssen müßte dann im Rahmen von Sicherungsmaßnahmen eine weitergehende Einkapselung der Deponie in Betracht gezogen werden.

Für die Entscheidung über die Notwendigkeit einer Oberflächenabdichtung muß auch das bestehende emissionsmindernde Potential in Form von Speicherkapazitäten und Evapotranspirationsvermögen Berücksichtigung finden. Bestätigen labortechnische Untersuchungen der Bodenarten der Deckschicht eine geringe Wasserleitfähigkeit und werden durch entsprechende Anpflanzungen Transpiration und Evaporation erhöht, so kann diese "natürliche" Barriere zumindest teilweise die Funktion einer Oberflächenabdichtung übernehmen. In Verbindung mit kleineren Sanierungsmaßnahmen, wie z.B. Fassung der Sickerwasseraustritte und Drainleitungen am Deponiefuß, kann dadurch zwar keineswegs der gleiche Wirkungsgrad einer Oberflächenabdichtung erreicht werden, aber es bleibt abzuwägen, ob bezüglich des jeweiligen Gefährdungspotentials diese Lösung nicht die am ehesten mit der Umwelt verträgliche Maßnahme darstellt.

Eine überlegenswerte Alternative wären Insitu-Maßnahmen, die auch einen geringeren Eingriff in den Natur- und Landschaftshaushalt darstellen, dafür aber ebenfalls nur eingeschränkt wirksam sind.

Bei der allgemeinen Diskussion um Oberflächenabdichtungen stellt sich generell die Frage ob es überhaupt vertretbar ist, mit der Aufbringung einer Abdichtung eine Konservierung des Schadstoffpotentials vorzunehmen. Eine Verminderung oder Beseitigung des Schadstoffpotentials ist prinzipiell nur durch Sanierungsmaßnahmen möglich, für die thermische, chemisch-physikalische oder biologische Verfahren zur Verfügung stehen (BACCINI et al.1992). Hierbei sollten Überlegung nach grundsätzlichen Lösungen auf fachtechnischer Ebene erarbeitet und auf politischer Ebene umgesetzt werden, da durch kostspielige Sicherungsmaßnahmen, wie die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung, die von einer Altablagerung ausgehenden Belastungen letztlich nur verzögert an die Umwelt abgegeben werden. Die oben angesprochenen Sanierungsmaßnahmen hätten voraussichtlich ebenfalls einen schwerwiegenden Eingriff in den Landschaftshaushalt zur Folge, doch wäre danach eine neue Ausgangslage für die natürliche Entwicklung gegeben.

## 11. Literaturverzeichnis

- AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung,, Hannover, 331 S.
- AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND BODENSCHUTZ KIRCHHEIM/TECK (1993):  
Akteneinsicht in diverse Unterlagen betreffs der Altablagerungen "Federlesmahd" und "Hintere Halde"
- BACCINI, P.; BELEVI, H.; LICHTENSTEIGER, T. (1992): Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft, GAIA 1/1992, S: 34-49
- BAUR, A. (1990): Simulation des Wasserhaushaltes einer Deponie, Studienreihe Abfall-Now, Bd.7, Stuttgart, 93 S.
- BORCHERDT, C. (1991): Baden-Württemberg: eine geographische Landeskunde, Darmstadt 291 S.
- BRECHTEL, H.-M. (1984): Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Mülldeponien, Müll-Handbuch Kap. 4623, Berlin, 16 S.
- DYCK, S. u. PESCHKE, G. (1983): Grundlagen der Hydrologie, Dresden, 388 S.
- ELLENBERG, H. (1986): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht, Stuttgart, 989 S.
- FRANZIUS, V. (Hrsg) (1979): Wasserhaushalt von Deponien und Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen; Umweltbundesamt Berlin, 107 S.
- GEOLOGISCHE KARTE 1:25.000 VON BADEN WÜRTTEMBERG BLATT 7320 BÖBLINGEN (1984) UND ERLÄUTERUNGEN (1985), Stuttgart 128 S.
- GEOLOGISCHE KARTE 1:25.000 VON BADEN WÜRTTEMBERG BLATT 7322 KIRCHHEIM/TECK (1988) UND ERLÄUTERUNGEN, Stuttgart, 104 S.
- INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND STANDORTSLEHRE UNIVERSITÄT HOHENHEIM (1990): Praktikumsanleitung zur Beschreibung, Deutung und ökologischen Bewertung von Böden, Hohenheim, 32 S.
- JÄGER, B; JAGER, J. (1984): Sicherung der Nutzung abgeschlossener Deponien; BMFT - Forschungsbericht T 84-237, TU Berlin, 104 S.
- JÄGER, B.; WIEMER, K. (1979): Untersuchungen zur Verminderung des Eintritts von Niederschlagswasser in Deponien; Umweltbundesamt Berlin, 78 S.
- KONOLD, W. u. ZELTNER, G.-H. (1981): Untersuchungen zur Vegetation abgedeckter Mülldeponien, Beihefte zu den Veröffentlichungen von Naturschutz und Landespflege in Baden Württemberg, Bd. 24, Karlsruhe, S.83
- LAGA (1990): Informationsschrift Altlasten, Müll-Handbuch Kap. 4470, Berlin, 176 S.
- LANDESARCHIVDIREKTION BADEN-WÜRTTEMBERG (1977): Das Land Baden-Württemberg: Amtl. Beschreibung nach Kreisen und Gemeinden Bd 1, 110 S.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1992): Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen, Materialien zur Altlastenbearbeitung Band 10, Karlsruhe, 150 S.

- LARCHER, W. (1984): Ökologie der Pflanzen, Stuttgart, 403 S.
- LESER, H. et al (1985): Wörterbuch der Allgemeinen Geographie, 2 Bde, München, 843 S.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1988): Altlasten Handbuch Teil I - Altlasten-Bewertung, Stuttgart, 128 S.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1988): Altlasten Handbuch Teil II - Untersuchungsgrundlagen, Stuttgart, 96 S.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1993): TA Siedlungsabfall vom 29. Mai 1993, 100 S.
- MÜLLER, T. u. OBERDORFER, E. (1974): Die potentielle natürliche Vegetation von Baden-Württemberg, Beihefte zu den Veröffentlichungen der Landesstelle für Naturschutz und Landschaftspflege Baden-Württemberg, Bd.6, Ludwigsburg, 46 S.
- PEYTON, L.; SCHROEDER, P.L.: Verification of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model Using File Data, 12 Annual Research Symposium, 1986, EPA, Cincinnati Ohio
- RENGER, M. et al (1989): Verminderung der Versickerung von Niederschlägen - Wasserhaushaltsbetrachtungen für Altablagerungen/Altlasten -, in FRANZIUS, V. (Hrsg.): Sanierung kontaminierter Standorte 1989, Berlin, S. 95-112
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde; Stuttgart, 491 S.
- SCHROEDER, D. (1983): Bodenkunde in Stichworten, Würzburg, 160 S.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE 1:25.000 (1991) BLATT 7320 BÖBLINGEN
- TOPOGRAPHISCHE KARTE 1:25.000 (1989) BLATT 7322 KIRCHHEIM u. TECK
- WEBER, B. (1990): Minimierung von Emissionen der Deponie; Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hanover, H. 74, 328 S.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. I- 1.1: Emissionspfade aus einer Ablagerung bzw. Deponie [3] .....	3
Abb. I- 1.2: Einflußgrößen für die Mobilität von Schadstoffen im Sickerwasser [4] .....	4
Abb. I- 1.3: Zusammenspiel der Teilberichte des Gesamtprojektes.....	6
Abb. I- 2.1: Einteilung der Einkapselungsverfahren [17].....	8
Abb. I- 2.2: Deponieoberflächenabdichtungssystem nach TA-Siedlungsabfall [20] .....	10
Abb. I- 3.1: Folgen von Beanspruchungen bei Oberflächenabdichtungen .....	19
Abb. I- 3.2: Ursachen extremer Verformungskonturen an Deponieoberflächen [28] .....	22
Abb. I- 3.3: Problemzonen bei der Sanierung von Altdeponien [30].....	23
Abb. I- 3.4: Potentielle Bruchzonen im Bereich der Bermen von Deponien [30].....	23
Abb. I- 3.5: Potentielle Reißbildung einer 20 m hohen Grubendeponie bei einer Gesamtsetzung von 10 % [30] .....	23
Abb. I- 3.6: Vorgänge bei der Setzung [31] .....	24
Abb. I- 3.7: Zeitsetzungskurven für ein Hochhaus (S1) und die Oberflächenabdeckung einer Deponie (S2), rechts Dehnungsmaßstäbe für Endabdeckungen von 2 - 6 % [32].	25
Abb. I- 3.8: Druck-Setzungsdiagramm der Deponie Halver [36].....	26
Abb. I- 3.9: Steifemodul als Funktion der Druckspannung bei verschiedenen Deponietypen [36].....	27
Abb. I- 3.10: Ablagerungsdichte in Abhängigkeit von der Deponietiefe [35] .....	28
Abb. I- 3.11: Schema der inneren und äußeren Stabilität [44] .....	29
Abb. I- 4.1: Beobachtete Versagensformen unbelasteter, bindiger Abdichtungsschichten im Grundriß und Querschnitt .....	32
Abb. I- 4.2: Zur Definition von Erosion und Suffosion [72].....	34
Abb. I- 4.3: Dichtungsaufbau an Böschungen [77] .....	36
Abb. I- 4.4: Erhöhte Wegsamkeiten bei mineralischen Dichtungen [76].....	36
Abb. I- 4.5: Aufbau der Testfelder auf der Deponie Georgswerder [79] .....	38
Abb. I- 4.6: Bindige mineralische Dichtung auf der Deponie Georgswerder, Abflüsse und Tensiometerdaten [136] .....	40
Abb. I- 4.7: Mineralische Abdichtung der Deponie Gerolsheim, Testfeld B .....	41
Abb. I- 4.8: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems der Deponie Dreieich-Buchschlag [81].....	42
Abb. I- 4.9: Schnitt durch die Abdeckung der Deponie Karsau [98] .....	49
Abb. I- 4.10: Leckagen beim Abriß beider Dichtungsbahnen [98] .....	50
Abb. I- 4.11: Oberflächenabdichtung der Deponie Gerolsheim (Testfeld A) [135].....	52
Abb. I- 4.12: Beanspruchungsformen von Geotextilien bei ihrem Einsatz im Deponiebau [109].....	58
Abb. I- 4.13: Zusammenwirken von mineralischer Dichtung und Kunststoffdichtungsbahn [112].....	60
Abb. I- 4.14: Örtliche Spannungs-Dehnungs-Verteilungen über eine Setzungskante bei der Prüfung von HDPE-Bahnen mit einseitiger Reibung im Berstdruckversuch. ....	61
Abb. I- 4.15: Temperaturgradient an einer Basisabdichtung [118] .....	63
Abb. I- 4.16: Mögliche Scherfugen in einem Oberflächen- und einem Basisabdichtungssystem [115].....	64
Abb. I- 4.17: Kombinationsdichtung der Deponie Gerolsheim.....	67

Abb. I- 5.1: Aufbau einer Kapillarsperre [121] .....	70
Abb. I- 5.2: Aufbau des Dichtungssystems mit Wasserfassung auf der Deponie "Am Stempel" [122].....	71
Abb. I- 5.3: Geplante Probefelder 15 * 40 m mit Kombinationsdichtung auf dem Monte Scherbelino, Frankfurt a. M. [121] .....	72
Abb. I- 5.4: Konstruktive Ausbildung der Abdeckung "Essen, Zinkstraße" [123] .....	74
Abb. I- 6.1: Eine mögliche Voraussetzung für unregelmäßige Setzung.....	82
Abb. I- 6.2: Reaktion der Dichtung auf unterschiedliche Setzungen .....	82
Abb. I- 6.3: Schnitt mit der Zeitstandfestigkeit .....	83
Abb. II- 3.1: Idealisiertes Abfallsegment mit Ein- und Ausgangsgrößen.....	103
Abb. II- 4.1: Typisches Deponieprofil .....	107
Abb. II- 4.2: Beziehungen zwischen Oberflächenabfluß, Niederschlag und Retention [401]	109
Abb. II- 4.3: Blattflächenindex verschiedener Vegetationstypen entlang eine Stufenfolge in den Alpen, zitiert von [413].....	115
Abb. II- 5.1: Monatswerte der gemessenen und berechneten Abflüsse Mai - Dezember 1986 am Lysimeter in Berlin-Dahlem [508].....	119
Abb. II- 5.2: Monatswerte der gemessenen und berechneten aktuellen Evapotranspiration Mai - Dezember 1986 am Lysimeter Berlin-Dahlem [508].....	120
Abb. II- 5.3: Versickerung Variante unbewachsen [501]. .....	121
Abb. II- 5.4: Aktuelle Evapotranspiration Variante unbewachsen [501]. .....	122
Abb. II- 5.5: Versickerung Variante Gras ungedüngt [501]. .....	122
Abb. II- 5.6: Aktuelle Evapotranspiration Var. Gras ungedüngt [501]. .....	122
Abb. II- 5.7: Versickerung Variante Gras gedüngt [501]. .....	123
Abb. II- 5.8: Aktuelle Evapotranspiration Variante Gras gedüngt [501]. .....	123
Abb. II- 5.9: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems der Deponie Dreieich-Buchsschlag [510].....	124
Abb. II- 5.10: Gemessene und berechnete Versickerung durch die Abdichtungsschicht der Deponie Dreieich-Buchsschlag [509]. .....	124
Abb. II- 5.11: Gegenüberstellung von berechneten Varianten [512].....	125
Abb. II- 5.12: Ergebnisse der einzelnen Varianten [512]. .....	127
Abb. II- 6.1: BSB <sub>5</sub> /CSB-Relationen in Abhängigkeit vom Deponiealter [604].....	131
Abb. II- 6.2: Schematische Darstellung der beiden typischen, zeitunabhängigen Konzentrationsverläufe von Schadstoffen im Sickerwasser [608].....	134
Abb. II- 6.3: Schematische Darstellung der Kurvenfunktionen zur Beschreibung des Konzentrationsverlaufs von Schadstoffen im Sickerwasser [608] .....	135
Abb. II- 6.4: Koeffizienten K <sub>1</sub> und K <sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bei Schüttung der ersten Müllage [608]. .....	136
Abb. II- 6.5: Nomogramm zur Ermittlung von k <sub>2</sub> , C <sub>max</sub> und t <sub>2</sub> [608].....	137
Abb. II- 6.6: Korrelationsdiagramm für Chlorid, Kalium, Leitfähigkeit und Natrium [608].	138
Abb. II- 6.7: Korrelationsdiagramm für Eisen, CSB, BSB <sub>5</sub> und Abdampfdruckstand.....	139
Abb. II- 6.8: CSB-Werte verschiedener Deponien in Abhängigkeit vom Deponiealter und errechnetem Trend, der in der Methanphase stabilisierenden Werte [607].....	140
Abb. II- 6.9: Versuch der Abschätzung der Dauer von Stickstoffemissionen aus einer Deponie [611].....	141
Abb. III- 2.1: Schematische Darstellung anaerober Abbauprozesse [14].....	151
Abb. III- 2.2: Gaszusammensetzung während des Abbaus von Hausmüll [9] .....	152
Abb. III- 2.3: Schematische Darstellung des Abfalls als Dreiphasensystem [Haug R.T. 1980] .....	155
Abb. III- 3.4: Abgeschätzte Zeitspannen, bis umweltverträgliche Frachten im Sickerwasser einer Siedlungsabfalldeponie erreicht werden [1] .....	158

---

Abb. IV- 4.1: Wasserhaushalt von Deckschichten (Brechtel 1984) .....	171
Abb. IV- 4.2: Mittlere jährliche Gesamtverdunstung auf tiefgründiger Deckschicht aus Sand bis schwach sandigen Lehm, bei $N= 663 \text{ mm /a}$ (BRECHTEL 1984) .....	179
Abb. IV- 6.1: Lage der Altablagerung "Federlesmahd" .....	191
Abb. IV- 6.2: Perkolationsrate in Abhängigkeit von Niederschlag und Evapotranspiration des Deponieabschnitts IV .....	220
Abb. IV- 7.1: Lageplan Altablagerung "Hintere Halde" .....	225
Abb. IV- 7.2: Durchschnittliche Monatsmengen auf Deponiefläche II - Ist-Situation .....	252
Abb. IV- 8.1: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I .....	259
Abb. IV- 8.2: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I .....	261

## Tabellenverzeichnis

Tab. I- 3.1: Ursachen, Folgen und Mechanismen von Beanspruchungen .....	20
Tab. I- 3.2: Direkt schädigende Beanspruchungen .....	21
Tab. I- 3.3: Festigkeitsparameter von unbehandeltem und vorbehandeltem Abfall in Anfangs- und Endwerten [44] .....	30
Tab. I- 3.4: Zusammenstellung von Scherparametern und Dichte für Hausmüll [45] .....	30
Tab. I- 4.1: Auffangmengen [mm] der mineralischen Dichtung auf der Deponie Georgswerder für die Testfelder S1 und F1, Daten aus [79].....	38
Tab. I- 4.2: Untersuchungen an der Deponie Gerolsheim und Veränderungen der Parameter (mineralische Dichtung) im Zeitraum von 1985 - 1988, Daten aus [99].....	42
Tab. I- 4.3: Tabellarische Auflistung von Oberflächenabdichtungen in Hessen, Daten nach [139].....	44
Tab. I- 4.4: Berstversuche mit HDPE-Platten [19].....	46
Tab. I- 4.5: Einfluß der Schadensart bei einer Folienabdichtung auf den Abfluß in der Kontrolldränage, Daten aus [98].....	51
Tab. I-4.6: Bodenabtrag bei verschiedener Landnutzung [106] .....	55
Tab. I-4.7: Zunahme des relativen Bodenabtrags nicht begrünter bzw. bepflanzter Flächen, abhängig von Hangneigung und Hanglänge [106] .....	55
Tab. I- 4.8: Anhaltswerte zur Berechnung einer Dränage, in l/s*ha [131].....	56
Tab. I- 4.9: Untersuchungen an der Deponie Gerolsheim und Veränderungen der Parameter (Kombinationsdichtung) im Zeitraum von 1985 - 1988, Daten aus [99] .....	67
Tab. I- 5.1: Vergleich Kapillarsperre - Mineralische Dichtung [121] .....	73
Tab. I- 6.1: Abhängigkeit des Abtrages [kg/ha*a*m] von Hanglänge und Neigung, zugrunde liegende Daten aus [140] .....	85
Tab. II- 3.1: Mittelwerte und Bereiche des Verdunstungsanteils an Niederschlag in Prozent [305].....	104
Tab. II- 4.1: Literaturstellenverweise der Verfahren .....	108
Tab. II- 4.2: Blattflächenindex verschiedener Vegetationsformen und deren Spanne [413]..	115
Tab. II- 5.1: Kenndaten des Bodenprofils im Lysimeter in Berlin- Dahlem [508].....	118
Tab. II- 5.2: Aktuelle Evapotranspiration in Prozent des Niederschlags bei drei Varianten, Werte aus [501]. .....	121
Tab. II- 6.1: Chemisch-Physikalische Untersuchung von Siedlungsabfällen (Hausmüll), Schadstofffrachten BRD, Massenraten in mg/Jahr [601]. .....	129
Tab. II- 6.2: Schwermetallgehalte nach bundesweiter Hausmüllanalyse 1979/80 [602].....	130
Tab. II- 6.3: Schwermetallgehalte im Hausmüll bei verschiedenen Untersuchungen [603]. .	130
Tab. II- 6.4: Mittelwerte, Bereiche und zum Teil obere 95 %-Grenze verschiedener Sickerwasserinhaltsstoffe [308].....	132
Tab. II- 6.5: Anfangskonzentrationen verschiedener Sickerwasserparameter [608].....	135
Tab. II- 6.6: Zeit bis zur Auslagerung von 10 % der in Deponien vorhandenen Schwermetalle. ....	141
Tab. III- 3.1: Beispielhaft aufgeführte leichtflüchtige Einzelstoffe im Hausmüll [11] .....	157
Tab. III- 3.2: Jährliche mittlere Konzentration der wichtigsten Elemente im Sickerwasser nach der intensiven Phase und Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer (Schweizerische Einleiterbestimmungen) [1].....	158

Tab. IV-4.1: Übersicht über die pflanzenverfügbare Wassermenge in Abhängigkeit von der Bodenart (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1989) .....	176
Tab. IV- 4.2: Mittlere jährliche Gesamtverdunstung auf tiefgründiger Deckschicht aus Sand bis schwach sandigen Lehm, bei N= 663 mm /a (BRECHTEL 1984) .....	178
Tab. IV- 5.1: Ökologisches Verhalten - Zeichenerklärung (ELLENBERG 1969; geändert und gekürzt) .....	186
Tab. IV- 6.1: Durchschnittliche Zeigerwerte der Deponieflächen und der Umgebung.....	207
Tab. IV- 6.2: Deponiegasmessungen Fläche I .....	215
Tab. IV- 6.3: Deponiegasmessungen Fläche II+IV .....	216
Tab. IV- 6.4: Deponiegasmessungen südlicher Böschungsbereich .....	217
Tab. IV- 6.5: Wasserhaushalt der Ist-Situation.....	219
Tab. IV- 6.6: Durchschnittliche Monatsmengen auf Fläche IV - Ist-Situation.....	219
Tab. IV- 7.1: Durchschnittliche Zeigerwerte der Deponieflächen und der Umgebung.....	240
Tab. IV- 7.2: Deponiegasmessungen im Bereich der Flächen I und II.....	249
Tab. IV- 7.3: Wasserhaushalt der Ist-Situation.....	251
Tab. IV- 8.1: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I .....	258
Tab. IV- 8.2: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I .....	261

## Indexverzeichnis

### A

Acidität	
Boden.....	182
aerobe Prozesse	
Deponiekörper .....	149
aktuelle Evapotranspiration .....	111, 121
Altablagerung	
Allgemeines .....	2, 166
Begehung mit Gasspürgerät FID .....	186
Deckschichten-Kartierung .....	181
Emissionen .....	2
Emissionspfade .....	2
Geomorphologie .....	181
HELP-Computermodell.....	187
Problemstellung .....	168
vegetationskundliche Untersuchungen	
.....	183
Wasserhaushalt von Deckschichten..	171
alternative Dichtsysteme.....	69
Altlastensanierung	
Allgemeines .....	7
anaerobe Prozesse	
Deponiekörper .....	150
Anfangskonzentrationen	
Sickerwasserparameter .....	135

### B

biochemische Vorgänge	
Deponiekörper .....	149
Blattflächenindex.....	114
Boden	
Acidität .....	182
Bodenart.....	182
Bodenfarbe.....	182
Carbonatgehalt.....	182
Deckschichten-Kartierung .....	181
Feldkapazität.....	182
Gefüge .....	182
Geomorphologie .....	181
Lagerungsdichte.....	182
nutzbare Feldkapazität .....	183
Schichtmächtigkeiten.....	181
vegetationskundliche Untersuchungen	
.....	183
Wasserleitfähigkeit .....	183
Bodenart	
Allgemeines .....	182

Bodenfarbe .....	182
Bodenprofil	
Kenndaten .....	118
Bodenwasserhaushalt .....	116
<b>C</b>	
Carbonatgehalt	
Boden .....	182
chemisch-physikalische Untersuchung	
Hausmüll .....	129
CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)	
.....	106
Curve Number (CN).....	109
<b>D</b>	
Datenbank für Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen und Bauwesen (RSWB).....	11
Datenbankanbieter .....	11
Deckschichten-Kartierung	
Boden .....	181
Deponie	
aktuelle Evapotranspiration.....	111
Allgemeines .....	2
Anfangskonzentrationen	
Sickerwasserparameter.....	135
Begehung mit Gasspürgerät FID.....	186
Bodenwasserhaushalt .....	116
chemisch-physikalische Untersuchung	
Hausmüll .....	129
Deckschichten-Kartierung.....	181
Druck-Setzungsdiagramm.....	26
Emissionen .....	2
Emissionspfade .....	2
Evaporation .....	111
Evapotranspiration .....	111
externe Datenbanken.....	12
Festigkeitsparameter .....	30
Geomorphologie.....	181
HELP-Computermodell .....	187
Infiltration .....	110
Interzeption .....	111
Kurzzeitsetzung.....	24
Langzeitsetzung .....	24
lateraler Durchfluß .....	117
Literatur.....	11, 13, 145
Oberflächenabfluß.....	108

Oberflächenabfluß, Niederschlag und	
Retention.....	109
potentielle Bruchzonen .....	23
potentielle Evapotranspiration .....	111
potentielle Rißbildung .....	23
Retention.....	109
Schadstoffaustrag.....	132
Schadstoffe im Sickerwasser .....	133
Schadstoffpotential im Hausmüll .....	129
Schadstoffverhalten .....	129
Scherparameter und Dichte.....	30
Schwermetallgehalte Hausmüll .....	130
Setzung .....	24, 25
Setzungen des Abfallkörpers .....	21
Sickerwasserinhaltsstoffe .....	130, 131
Stabilität.....	29
Stabilität des Abfallkörpers .....	29
Steifemodul.....	26
Transpiration.....	111
vegetationskundliche Untersuchungen	
.....	183
Verformungskonturen.....	21
vertikale Durchsickerung.....	116
Wasserbilanzgleichung .....	102
Wasserhaushalt .....	102, 171
Deponie Wasserbilanz	
Allgemeines .....	102, 171
bodenkundliche Einflüsse.....	173
Einflüsse der Vegetation.....	176
pflanzenverfügbare Wassermenge....	176
standortbedingte und klimatische	
Einflüsse .....	172
Deponiekörper	
aerobe Prozesse.....	149
anaerobe Prozesse.....	150
biochemische Vorgänge.....	149
Gaszusammensetzung.....	152
Literatur .....	165
organische Schadstoffe .....	156
physikalisch-chemische Vorgänge ...	153
Schwermetalle .....	156
Setzungen.....	154
Vorgänge.....	149
Wasserhaushalt .....	153
Zusammenfassung .....	153, 158
Deponieoberflächenabdichtungssystem..	10
Deponieprofil.....	106
Deponietechnik	
Allgemeines .....	160
Mülleinbau.....	160
<b>E</b>	
Einkapselungsverfahren .....	8
Emission	
Allgemeines .....	2
Emissionspfade .....	2
Evaporation .....	111
Evapotranspiration .....	111
Evapotranspirationstiefe.....	114
<b>F</b>	
Fachinformationszentrum Karlsruhe.....	11
Feldkapazität	
Abfall .....	154
Boden .....	182
<b>G</b>	
Gefährdungspotential .....	8
Gefüge	
Boden .....	182
Geomorphologie	
Boden .....	181
<b>H</b>	
Hausmüll	
Scherparameter und Dichte .....	30
HELP-Modell	
allgemeine Beschreibung .....	106
Allgemeines .....	106
Anmerkungen.....	127
Verifizierung .....	118
Vorgehensweise .....	108
HSSWDS (Hydrologic Simulation Model	
for Estimating Percolation at Solid	
Waste Disposal Sites) .....	106
<b>I</b>	
Infiltration .....	110
International Construction Data Base	
(ICONDA) .....	11
Interzeption .....	111
<b>K</b>	
Kapillardichtung.....	69
Kapillarsperre.....	69
Kationenaustauschkapazität	
Boden .....	183
Kombinationsdichtung	
Ableiten.....	63
Allgemeines .....	65, 66, 89
Austrocknung.....	63
Belastungen.....	61
Deponie Georgswerder.....	65
Deponie Gerolsheim .....	66
Einbaufehler.....	62
Erfahrungen.....	65

Grundsätzliches .....	59	Beanspruchungsformen von	
Scherfugen .....	63	Geotextilien.....	57
Setzung .....	61	Begehung mit Gasspürgerät FID.....	186
Temperaturgradient.....	63	Belastungen .....	32, 44, 61
Kunststoff-Abdichtungssysteme.....	161	Bemessung .....	16
<b>L</b>		Berstversuche mit HDPE-Platten.....	46
Lagerungsdichte		Beurteilung.....	169
Boden.....	182	Bewertung der Dichtsysteme .....	75
lateraler Durchfluß.....	117	bodenkundliche Einflüsse .....	173
Literatur		Bodenwasserhaushalt .....	116
Deponie.....	11, 13, 145	chemische Beständigkeit.....	47
Deponiekörper .....	165	Computerprogramm HELP (Hydrologic	
Oberflächenabdichtung... 11, 15, 91, 272		Evaluation of Landfill Performance)	
Umweltliteraturdatenbank (ULIDAT) 11		.....	100
<b>M</b>		Deckschicht.....	9
mineralische Oberflächenabdichtung		Deckschichten-Kartierung.....	181
Allgemeines .....	88, 160	Decksubstrat und die Drainage-, Filter-	
Austrocknung.....	37	und Schutzschichten.....	89
Belastungen .....	32	Decksubstrat und Wurzelboden .....	52
Deponie Dreieich-Buchschlag .....	42	Dehnung der Dichtungsbestandteile ...	81
Deponie Georgswerder .....	38, 39	Deponie Am Stempel.....	71
Deponie Gerolsheim .....	41	Deponie Dreieich-Buchschlag ....	42, 123
Dichtungsaufbau an Böschungen .....	36	Deponie Georgswerder.....	38, 39, 65
Einbaufehler.....	35	Deponie Gerolsheim .....	41, 51, 66
Einfluß Pflanzenwurzeln und Tiere ...	35	Deponie Karsau.....	49
Erfahrungen und Versuchsergebnisse.	37	Deponie Lübars .....	83
Erosion und Suffosion .....	33	Deponiekörper.....	162
mechanische Beanspruchungen .....	34	Dichtungsaufbau an Böschungen.....	36
Oberflächenabdichtungen in Hessen ..	43	Dichtungsschicht.....	10
Setzungen und Sackungen .....	32	Dimensionierung .....	16
Versagensformen .....	32	direkt schädigende Beanspruchungen .	20
Wegsamkeiten .....	36	Drainage-, Filter- und Schutzschichten	56
Mülleinbau		Durchlässigkeit.....	86, 89
Deponietechnik.....	160	Einbau .....	48
Multibarrierenkonzept .....	9	Einbaufehler.....	35, 62
<b>N</b>		Einfluß Pflanzen.....	54, 176
nutzbare Feldkapazität		Einfluß Pflanzenwurzeln und Tiere ...	35
Boden.....	183	Einfluß Tiere .....	53
<b>O</b>		Erfahrungen.....	48, 65
Oberflächenabdichtung		Erfahrungen und Versuchsergebnisse .	37
Ableiten .....	56, 63	Erosion .....	54
aktuelle Evapotranspiration .....	111	Erosion des Decksubstrates.....	84
Allgemeines .....	2, 3, 8, 100	Erosion und Suffosion.....	33
alternative Dichtsysteme.....	69	Essen, Zinkstraße .....	74
Alternativen .....	89	Evaporation .....	111
Anforderungen.....	8	Evapotranspiration .....	111
Ausblick.....	90	Filter-, Trenn- und Schutzschichten....	10
Austrocknung.....	37, 63	Folgen von Beanspruchungen .....	18
Beanspruchungen.....	16	Gasverteil- bzw. Gassammelschicht ...	10

gemischtkörniges Dichtungsmaterial	Stauwasserspiegel im Decksustrat ....	46
Wülfrather Mineraldecke - Wülfralit	Temperaturgradient .....	63
.....	Testfelder auf der Deponie	
Geomorphologie .....	Georgswerder .....	37
Grundlagen .....	Transpiration .....	111
Grundsätzliches .....	Umweltverträglichkeit .....	163
HELP-Computermodell.....	unregelmäßige Setzung .....	81
HELP-Modell .....	Ursachen, Folgen und Mechanismen von	
Infiltration .....	Beanspruchungen .....	19
Interzeption .....	vegetationskundliche Untersuchungen	
Kapillardichtung .....	.....	183
Kapillarsperre .....	Verformungskonturen .....	21
Kombinationsdichtung.....	Vergleich Kapillarsperre - mineralische	
Kontrolle.....	Dichtung.....	72
Kosten.....	Versagen.....	7, 32, 88
Kunststoffdichtung .....	vertikale Durchsickerung .....	116
Kunststoffolie .....	Wasserdränschicht .....	10
Laborversuche für die Deponie der	wasserglasvergütete mineralische	
Aluminium Rheinfelden GmbH in	Abdichtungsschicht.....	69
Karsau .....	Wasserhaushalt .....	101, 171
Langzeitverhalten .....	Wegsamkeiten.....	36
lateraler Durchfluß.....	Witterungseinflüsse.....	47
Leckagen.....	Zeitsetzungskurven .....	24
Literatur .....	Zeitstandfestigkeit.....	82
Materialveränderungen Deponie	Zusammenfassung.....	88, 164
Gerolsheim.....	Oberflächenabdichtung Fallbeispiel	
mechanische Beanspruchungen .....	Altablagerung Federlesmahd	
mechanische Beschädigungen .....	Allgemeines .....	264
Mikroorganismen und biologischer	Beobachtungen zur Fauna .....	213
Einfluß .....	Beschreibung.....	197
mineralische.....	Böden .....	194
mittelbare Beanspruchungen .....	Deponiegasmessungen .....	215
Monte Scherbelino, Frankfurt a. M. ...	Geologie.....	192
Negativfolgen .....	Geomorphologie.....	199
Oberflächenabdichtungen in Hessen ..	Hydrogeologie.....	193
Oberflächenabfluß .....	Klima.....	195
Oberflächenabfluß, Niederschlag und	Lage.....	190, 191
Retention.....	Simulation des Wasserhaushalts .....	218
offene Fragen .....	Tektonik .....	194
pflanzenverfügbare Wassermenge ....	Vegetation .....	196
potentielle Evapotranspiration .....	Zusammenfassung Ist-Situation .....	221
Querschnitt.....	Oberflächenabdichtung Fallbeispiel	
Retention.....	Altablagerung Hintere Halde	
Schadensart.....	Allgemeines .....	267
Scherfugen .....	Beschreibung.....	231
Setzung .....	Bodengesellschaften.....	228
Setzungsgeschwindigkeit.....	Deponiegasmessung.....	248
sonstige Systeme.....	Geologie und Geomorphologie .....	226
standortbedingte und klimatische	Geomorphologie.....	233
Einflüsse .....	Hydrogeologie.....	228

Infrastruktur .....	225	Allgemeines .....	132
Klima .....	226	Schadstoffe	
Lage .....	224	im Sickerwasser .....	133
Lageplan .....	224	Schadstoffmobilität im Sickerwasser.....	3
Nutzungsformen .....	231	Schadstoffpotential	
Simulation des Wasserhaushalts.....	251	Hausmüll .....	129
Vegetation.....	229	Schadstoffverhalten.....	129
Oberflächenabdichtung mit		Schichtmächtigkeiten	
Kunststoffdichtungsbahn		Boden .....	181
Belastungen .....	44	Schwermetalle	
Berstversuche mit HDPE-Platten .....	46	Deponiekörper.....	156
chemische Beständigkeit .....	47	Hausmüll .....	130
Deponie Gerolsheim .....	51	Scientific and Technical Information	
Deponie Karsau .....	49	Network (STN) .....	11
Einbau.....	48	Setzungen	
Erfahrungen .....	48	Deponiekörper.....	21, 154
Laborversuche für die Deponie der		Sickerwasserinhaltsstoffe.....	130, 131
Aluminium Rheinfelden GmbH in		Sickerwasserparameter	
Karsau.....	48	Anfangskonzentrationen .....	135
Leckagen.....	49	Stabilität des Abfallkörpers.....	29
Materialveränderungen Deponie		<b>T</b>	
Gerolsheim.....	51	Transpiration .....	111
mechanische Beschädigungen .....	46	<b>U</b>	
Mikroorganismen und biologischer		Umweltforschungsdatenbank (UFORDAT)	
Einfluß .....	47	.....	11
Schadensart.....	51	Umweltliteraturdatenbank (ULIDAT) ....	11
Setzungen und Sackungen .....	44	<b>V</b>	
Stauwasserspiegel im Decks substrat ...	46	vegetationskundliche Untersuchungen	
Witterungseinflüsse .....	47	Boden .....	183
Oberflächenabfluß .....	108, 109	Verdunstungsanteil.....	104
organische Stoffe		vertikale Durchsickerung .....	116
Deponiekörper .....	156	<b>W</b>	
<b>P</b>		Wasserbilanzgleichung	
physikalisch-chemische Vorgänge		Deponie .....	102
Deponiekörper .....	153	wasserglasvergütete mineralische	
potentielle Evapotranspiration .....	111	Abdichtungsschicht.....	69
<b>R</b>		Wasserhaushalt	
Retention.....	109	Deponie .....	102
Risiko.....	8	Deponiekörper.....	153
<b>S</b>		Wasserleitfähigkeit	
Sanierung von Altdeponien .....	22	Boden .....	183
Schadstoffaustrag		Winterbedeckungsfaktor .....	113, 114