

32/446(247) 1^{er} ex

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Studie naar onderafdichtingsconstructies voor afval- en reststofbergen

D. Boels

Rapport 247

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1993



- 3 NOV. 1993

wn 588826 *

REFERAAT

Boels, D., 1993. *Studie naar onderafdichtingsconstructies voor afval- en reststofbergingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 247; 62 blz.; 6 fig.; 11 tab.

Een onderafdichtingsconstructie is een samenstel van isolerende elementen om emissie van schadelijke stoffen uit afval naar de bodem te voorkomen. Bepaalde kleisoorten, zandmengsels waaraan bentoniet of waterglas is toegevoegd, geomembranen en asfalt-beton zijn geschikte afdichtingsmaterialen. Kleihoudende materialen kunnen hun functie verliezen in contact met vloeistoffen met een hoge concentratie aan zouten of apolaire stoffen of met een lage of juist hoge pH. Aanbevelingen zijn gedaan voor gebruik van bepaalde materialen in specifieke situaties. De emissie naar de bodem kan worden beperkt met een combinatieafdichting (geomembraan en minerale afdichtingslaag), diffusieremmende lagen (bv. grind) (alleen effectief bij relatief hoge grondwaterspiegels), adsorberende lagen (vertragen emissie), een zeer goede percolaatdrainage en het creëren van een kunstmatige kwelsituatie (nul-emissie bereikbaar). Aanbevelingen zijn gedaan voor isolerende voorzieningen in verschillende hydrologische situaties. Locaties waar eventuele bodemverontreiniging onbeheersbaar is of pas in een zeer laat stadium kan worden waargenomen, zijn in principe ongeschikt voor afval- en reststofbergingen.

Trefwoorden: voorkomen emissie, minerale afdichtingen, materiaalkeuze, diffusieremming, adsorberende lagen, hydrologische situaties, nul-emissie.

ISSN 0927-4499

©1993 DLO-Staring Centrum voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Tel: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Project 7297

[CBL5.22010900.report]rapport7.297

INHOUD

	blz.
WOORD VOORAF	7
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	13
2 BEHEERSING BODEMVERONTREINIGING (ir. F. Bisschop)	15
2.1 Mogelijkheden en beperkingen van isolerende voorzieningen	15
2.2 Kwaliteitseisen	16
2.3 Duurzaamheid isolerende voorzieningen	17
2.4 Isolatiematerialen	18
2.5 Toetsing Milieueffectrapport aan milieu-eisen	19
2.6 Verdergaande kennisopbouw en ontwikkelingen	19
3 OORZAKEN EN MOGELIJKHEDEN TOT BEPERKING VAN BODEMVERONTREINIGING	21
3.1 Oorzaken	21
3.2 Mogelijkheden tot beperking van bodemverontreiniging	23
4 ISOLATIEMATERIALEN	27
4.1 Materiaalkenmerken	27
4.1.1 Geomembranen en asfaltbeton	27
4.1.2 Natuurlijke materialen	28
4.1.3 Kunstmatige toeslagmaterialen	29
4.1.4 Zelfvormende afdichtingslagen	29
4.2 Invloed van percolaat op doorlatendheid afdichtingslaag	30
4.2.1 Het zwelgedrag van klei	30
4.2.2 Invloed van percolaat op doorlatendheid klei	31
4.2.2.1 Invloed anorganische verbindingen op de doorlatendheid	31
4.2.2.2 Invloed organische verbindingen op de doorlatendheid	32
4.3 Beoordeling materialen	34
4.3.1 Criteria	34
4.3.2 Kwaliteitskenmerken van verschillende materialen	36
4.3.3 Keuzetabel van afdichtingsmaterialen	37
5 AFDICHTINGSCONSTRUCTIES	39
5.1 Ontwerp percolaatdrainage	40
5.2 Combinatie van geomembraan en minerale lagen	41
5.3 Capillaire barrières	43
5.4 Constructies om diffusie te remmen	45
5.4.1 Diffusieremmende lagen	45
5.4.2 Effect van adsorptie op verplaatsing van stoffen	46
5.4.3 Diffusieremming door luchthoudende lagen	47
5.5 Principe van diffusieremming door hydrologische isolatie	48
5.6 Keuze van bodembeschermende voorzieningen	53
5.6.1 Zettingsgevoelige locaties	53

	blz.
5.6.2 Locaties met diepe grondwaterstanden	54
5.6.3 Locaties in hellende zandgebieden	55
5.6.4 Locaties in wegzijgingsgebieden met een afdekkend pakket	55
5.6.5 Locaties in kwelgebieden	55
5.6.6 Locaties in vlakke gebieden	56
5.6.7 Locaties in afgravingen, groeven	56
5.7 Keuzetabel bodembeschermende voorzieningen	57

LITERATUUR	59
------------	----

FIGUREN

1 Schematische weergave van zelf-afdichting op poriënschaal	29
2 Constructies van onderafdichtingen met geomembranen en minerale lagen	42
3 Dwarsdoorsnede isolatie volgens het principe van de capillaire barrière	44
4 Dwarsdoorsnede constructie voor diffusieremming via het tegenstroomprincipe	49
5 Onderafdichting met een tussenlaag voor drukverhoging	50
6 Dwarsdoorsnede afvalberging met infiltratie van neerslagoverschot via infiltratielaag onder depot	51

TABELLEN

1 Samenstelling huishoudelijk afval en chemische samenstelling percolaat volgens Hoeks, 1983; de spreiding in de concentraties zijn ontleend aan Lema et al., 1988	21
2 Samenstelling percolaat uit Nederlandse Stortplaatsen	22
3 Geschikte natuurlijke grondsoorten voor de constructie van onderafdichtingslagen in Nederland	28
4 Doorlatendheid van verweerde löss en "Keuper-mergel" met 30% lutum, specifiek oppervlak en percolaatsamenstelling bij doorstroming met verschillende soorten testvloeistof.	31
5 Doorlatendheid van drie natuurlijke kleien in relatie tot samenstelling anorganische testvloeistof	32
6 Invloed van verschillende organische oplossingen op doorlatendheid van klei	33
7 Relatieve waardering geschikte afdichtingsmaterialen	38
8 Emissiereductie door een grindlaag tussen stortzool en grondwaterspiegel	48
9 Vereiste dikte van de slecht doorlatende laag onder het afval om emissie door diffusie te voorkomen	49
10 Waterbalans onderafdichtingsconstructie bij verschillende bodembeschermingsniveaus	52
11 Locatiekenmerken, risico's, geschiktheid en aanbevolen extra voorzieningen	58

WOORD VOORAF

Op initiatief van het Ministerie van VROM, Directoraat Generaal Milieuhygiëne, directie Afvalstoffen, is het project "Storten 90" in 1991 begonnen. Het doel van het project is nieuwe Modelvergunningvoorschriften op te stellen en een Leidraad Storten voor de inrichting van gecontroleerde stort- en opslagplaatsen. De projectleiding is opgedragen aan Heidemij Adviesbureau BV.

Een deelproject betreft een studie naar onderafdichtingsconstructies voor toekomstige gecontroleerde stortplaatsen. Dit deelproject is opgedragen aan Heidemij Adviesbureau BV en DLO-Staring Centrum heeft deze studie in 1992-1993 uitgevoerd. De projectcoördinatie is in handen van Ing. J.Th. Weisscher, VROM. De studie is begeleid door:

Ing. J.Th. Weischer, ministerie van VROM (voorzitter);

Ir. K. Strijbis, Heidemij Adviesbureau BV (secretaris);

Ing. P.A. Ruardi, ministerie van VROM;

Dr. Th.G. Aalbers, RIVM;

Ir. D. Beker, RIVM (corresponderend lid);

Ir. F.G. Bisschop, Regionale Inspectie Milieu-Hygiëne (RIMH) Overijssel & Flevoland (tevens auteur van hoofdstuk 2);

Drs. A.J. Stortenbeek, RIMH-Gelderland;

Ing. J. Drost, Vereniging van Afvalverwerkers (VVAV);

Ing. W.F. ter Hoeven, Heidemij Adviesbureau BV (uitvoerend projectleider);

Ir. D. Boels, DLO-Staring Centrum (uitvoerend projectleider).

SAMENVATTING

Verwacht wordt dat ondanks alle inspanningen om de afvalstoffenstroom zoveel mogelijk te beperken, hergebruik toe te passen, brandbaar afval te verbranden enz. altijd nog afvalstoffen moeten worden gestort. Als dit zonder enige vorm van isolatie op of in de bodem wordt gedaan zal als gevolg van emissie van (schadelijke) stoffen de bodem worden belast en zal meestal de streefwaarden van schadelijke stoffen voor de bodem en het grondwater worden overschreden.

Het bodembeschermingsbeleid voor lokale verontreinigingsbronnen beoogt de belasting van het milieu door (afval-) stoffen te beperken en de functies en kwaliteit van de bodem te behouden. Het storten en opslaan van afvalstoffen moet daarom voldoen aan de zogenoemde IBC-criteria (Isoleren, Beheersen en Controleren).

Op het moment is het onmogelijk om voor alle schadelijke elementen in de afvalstoffen een absolute isolatie te realiseren. Daarom zal elk voorgesteld isolatiesysteem moeten worden getoetst op de aanvaardbaarheid van de te verwachten effecten in de omgeving van een stortplaats. Het milieu-effectrapport (MER) dat voor grote stortplaatsen moet worden opgesteld, speelt daarbij een belangrijke rol.

Dit rapport is in opdracht van het ministerie van VROM tot stand gekomen en handelt over de isolatie aan de onderzijde van een stortplaats. Het betreft een literatuurstudie naar beschikbare minerale afdichtingsmaterialen en hun bestendigheid in contact met percolaat, naar isolatieprincipes en isolatieconstructies, uitgevoerd in 1992-1993 bij DLO-Staring Centrum. Resultaten van deze studie zullen worden gebruikt bij het op stellen van een richtlijn voor het ontwerp en constructie van onderafdichtingen en bij het ontwikkelen van keuzecriteria voor nieuwe stortlocaties.

Een stortplaats (of reststofberging) wordt beschouwd als een bouwwerk dat zodanig is geconstrueerd dat de milieubelasting wordt geëlimineerd of beperkt. Het geheel aan isolerende voorzieningen is opgebouwd uit (veiligheids-) elementen voor het vastleggen van stoffen, het beperken van vloeistoftransport vanuit de stortplaats naar de omgeving en stoftransport als gevolg van diffusie. De functie van onderafdichtingsconstructies moet langdurig in stand blijven: gedurende de stortfase en nog geruime tijd daarna als al een bovenafdichting is aangebracht. De constructie moet zijn afgestemd op de stortlocatie en in principe op elke locatie een gelijk beschermingsniveau garanderen.

Uitgeloopte stoffen kunnen worden geadsorbeerd in de constructie. In het algemeen is de adsorptiecapaciteit ontoereikend voor de totale hoeveelheid uitloegbare stoffen en zal na een stof afhankelijke retentietijd emissie naar de bodem optreden.

Vloeistoftransport kan worden beperkt door zeer slechtdoorlatende lagen (barrières) of door manipulatie van de hydraulische gradiënt. Met een combinatie van een geomembraan en een minerale afdichtingslaag blijft het lekverlies naar de bodem beperkt tot ca. 4 millimeter per jaar, zelfs als er scheuren in de folie voorkomen en de doorlatendheid van de minerale laag met een factor 10 is toegenomen. Ook

kunnen dichte lagen in de grond worden gevormd door kunstmatig via een chemische reactie de poriën te vullen met een neerslag. Deze methode bevindt zich nog in een testfase en praktijkervaringen zijn er niet mee opgedaan. Theoretisch kunnen capillaire barrières onder de onderafdichting vloeistoftransport elimineren. Zo'n barrière bestaat uit een laag grond met een zeer goede onverzadigde (zowel lucht als water in de capillairen)-doorlatendheid op een laag (grofkorrelig) met een zeer geringe onverzadigde doorlatendheid. De bovenste laag loopt af naar een drain. De helling moet minstens 5% bedragen, terwijl de drainafstand niet meer dan 5 m mag bedragen. Met deze constructie is nog geen ervaringen op praktijkschaal opgedaan; deze constructie zal waarschijnlijk geschikter zijn voor een bovenafdichting dan voor een onderafdichting.

De hydraulische gradiënt wordt verlaagd door een goed functionerende percolaatdrainage-systeem boven de onderafdichting en door een hydraulisch druk aan de onderkant van de onderafdichting die de druk aan de bovenzijde zo goed mogelijk benadert. Dit wordt bereikt door grondwaterstandsverhoging of door een overdruk aan te leggen in een infiltratielaag onder de onderafdichting (gevoed via het drainagesysteem in de bovenafdichting), of door een locatie te kiezen waar van nature kwel ("opwaarts"-gerichte grondwaterstroming) voorkomt.

Stoftransport door diffusie kan worden beperkt door absoluut dichte lagen, bijvoorbeeld geomembranen of door een chemische reactie kunstmatig in de bodem gevormde lagen waarbij poriën worden verstopt (geen praktijkervaring). Grindlagen kunnen diffusie remmen zolang gegarandeerd is dat ze droog blijven en geen grond uit bovenliggende lagen inspoelt. Hierover is onvoldoende bekend. Adsorberende lagen vertragen alleen het stoftransport en zijn geen echte diffusieremmers. Diffusie wordt effectief geremd door een waterstroming van ca. 35 mm per jaar in tegengestelde richting van de diffusiestroom. Dit water stroomt naar het afval en moet te samen met het percolaat worden afgevoerd en gezuiverd.

Dichte lagen kunnen worden geconstrueerd met leem, löss, inlandse klei, zand-bentoniet mengsels, folies en asfaltbeton. De keuze van de materialen wordt bepaald door

- de waterdoorlatendheid, waarvoor asfaltbeton en folies zeer goed scoren;
- resistentie tegen organische oplosmiddelen, waarvoor geomembranen minder goed scoren en de doorlatendheid van kleihoudende materialen kan toenemen als de diëlectrische constante van het bodemvocht wordt verlaagd;
- resistentie tegen opgeloste anorganische stoffen, waarvoor geomembranen, asfaltbeton en klei-loze afdichtingsmaterialen goed scoren;
- duurzaamheid, waarvoor de minerale stoffen goed scoren;
- gevoeligheid voor onregelmatige zetting, waarvoor asfaltbeton slecht scoort en leem en löss minder geschikt zijn;
- uniformiteit, verwerkbaarheid en controle mogelijkheden, waarvoor geomembranen en asfaltbeton goed scoren.

Een tabel is samengesteld met locatieafhankelijke isolatievoorzieningen om een bepaalde bodembeschermingsniveau te bereiken. Ondanks technische mogelijkheden lijken gebieden met een grote zettingsgevoeligheid of met diepe grondwaterstanden ongeschikt voor het storten van afval. In zettingsgevoelige gebieden moet het terrein

soms meer dan tien jaar worden voorbelast om effecten van ongelijke zetting te elimineren, terwijl de ongelijkmatigheid van restzettingen een onzekere risicofactor is. In gebieden met diepe grondwaterstanden geldt als bezwaar dat optredende bodemverontreiniging niet of nauwelijks kan worden gesignaleerd en bovendien tot grote diepte in de bodem kan doordringen, waardoor kosten van eventuele saneringen hoog kunnen oplopen.

1 INLEIDING

Het bodembeschermingsbeleid in Nederland heeft een juridische basis gekregen met de Wet Bodembescherming (Staatsblad 1986, 374). Het belang van de wet is gedefinieerd als: "...het belang van het voorkomen, beperken of ongedaan maken van veranderingen van de hoedanigheden van de bodem, die een vermindering of bedreiging betekenen van de functionele eigenschappen die de bodem voor mens, plant en dier heeft..." (artikel 1). De eis die daarbij aan de kwaliteit van de bodem dient te worden gesteld, definieert deze wet als een: "...eis betreffende de kwaliteit van de bodem, die aangeeft in welke toestand de bodem met betrekking tot een of meer bij die eis aan te geven grootheden ten minste moet of zou moeten verkeren..." (art. 1). De Leidraad bodemsanering, afl. 4, nov. 1988, zegt hierover dat met de multifunctionaliteit van de bodem als uitgangspunt, het huidige bodemgebruik de functies en de daarmee samenhangende gebruiksmogelijkheden van de bodem, die van nature aanwezig zijn, niet onomkeerbaar of onherstelbaar mag aantasten. De functies die de bodem altijd moet kunnen vervullen is in de Leidraad omschreven als de geschiktheid voor vestiging en overleving van de mens en (bij de bodemgesteldheid passende) planten en dieren en (binnen van nature aanwezige beperkingen) voor de winning van drinkwater, die zonder ingrijpende zuivering geschikt is voor drinkwaterbereiding. Daarnaast stelt de wet, dat "Ieder die op of in de bodem handelingen verricht als bedoeld in artikelen 8-13....., is verplicht alle maatregelen te nemen....., teneinde de verontreiniging of aantasting te voorkomen, dan wel....., deze zoveel mogelijk te beperken..... (art. 14). Met betrekking tot de controle op mogelijke bodemverontreiniging kunnen volgens art. 18 van de Wet bodembescherming, regels worden opgesteld bij algemene maatregel van bestuur.

Op het moment is de Richtlijn Gecontroleerd Storten (VROM, 1985) van kracht, die per 1 maart 1993 is herzien en voor nieuw in te richten stortplaatsen een vloeistofdichte onderafdichting en bovenafdichting voorschrijft (folies of geomembranen en minerale afdichtingen).

Onderzoek naar ontwerp en materiaalkeuze voor bovenafdichting is afgerond en verwerkt tot Richtlijnen.

In januari 1991 is een "Ontwerp van een besluit met betrekking tot het storten van afvalstoffen (Stortbesluit bodembescherming) gepubliceerd, dat technische maatregelen omschrijft om percolaatvorming in afval- en reststofbergingen zoveel mogelijk te beperken en om te voorkomen dat verontreinigende stoffen in de bodem terecht komen (Hfdst. III, art. 6). Art. 9 van dit besluit waarborgt de multifunctionaliteit van de bodem: "..... de stort kan worden teruggedragen, zonder ingrijpende aantasting van de bodem". In art. 10 is omschreven aan welke criteria een controlesysteem moet voldoen.

Aan het Stortbesluit is een Uitvoeringsregeling Stortbesluit gekoppeld (concept juli, 1992), waarin bepalingen en begrippen uit het Stortbesluit zijn uitgewerkt. In deze regeling is onder andere verwezen naar "Richtlijnen ten behoeve van, bodembeschermende maatregelen ter zake van opslag en stortactiviteiten". In deze

Richtlijn zijn technische maatregelen verder uitgewerkt (kwalitatief). In de Richtlijn is weer verwezen naar de "Handleiding voor ontwerp en constructie van bovenafdichting voor afval- en reststofbergingen", (Hoeks et al., 1990), die kwantitatieve informatie geeft. Ook verwijst deze Richtlijn naar de "Richtlijn voor toepassing van geomembranen ter bescherming van het milieu", (Der Kinderen et al., 1991).

Het doel van deze studie, in 1992-1993 uitgevoerd bij DLO-Staring Centrum, is voor onderafdichtingen van afval- en reststofbergingen:

- beschikbare minerale afdichtingsmaterialen en hun bestendigheid in contact met percolaat te inventariseren;
- isolatieprincipes te inventariseren;
- isolatieconstructies te inventariseren en evalueren.

Resultaten van deze studie zullen worden gebruikt bij het op stellen van een richtlijn voor het ontwerp, constructie van onderafdichtingen en bij het ontwikkelen van keuzecriteria voor nieuwe stortlocaties.

In hoofdstuk 2 is ingegaan op de doelstelling van de isolatie van afvalbergingen, de eisen waaraan afdichtingsconstructies behoren te voldoen en de rol van het Milieu-effectrapport bij het verlenen van vergunningen voor de inrichting van afvalbergingen. In hoofdstuk 3 is ingegaan op processen die een rol spelen bij emissie en verspreiding van stoffen in de bodem. De rol van verschillende voorzieningen bij de isolatie van afval van z'n omgeving is beschreven. De mogelijkheden voor ingrepen in fysische processen om emissies te beperken zijn besproken. Hoofdstuk 4 bevat een overzicht van beschikbare minerale afdichtingsmaterialen en een uiteenzetting van processen die van belang zijn als deze materialen in contact komen met verontreinigd percolaat. Dit hoofdstuk bevat materiaalkeuzecriteria en een tabel aan de hand waarvan voor bepaalde bepaalde omstandigheden materialen kunnen worden gekozen. Een overzicht van isolatieprincipes en voorbeelden van isolerende constructies is in hoofdstuk 5 gegeven. De effectiviteit van bepaalde constructies in bepaalde situaties is behandeld en voorbeelden zijn gegeven van voorzieningen op verschillende locaties.

2 BEHEERSING AFVALSTROMEN (ir. F. Bisschop)

2.1 Mogelijkheden en beperkingen van isolerende voorzieningen

Ondanks alle inspanningen om de afvalstoffenstroom zoveel mogelijk te beperken, hergebruik toe te passen, brandbaar afval te verbranden enz. zullen altijd nog afvalstoffen (b.v. verbrandingsresten, niet herbruikbare afvalstoffen, niet reinigbare verontreinigde grond enz.) moeten worden gestort. Als afvalstoffen zonder enige vorm van isolatie op of in de bodem worden gebracht, zal dit over het algemeen leiden tot een emissie van (schadelijke) stoffen naar de bodem. Meestal zullen hierdoor de streefwaarden van schadelijke stoffen voor de bodem en het grondwater direct onder en in de directe omgeving van de stort- of opslagplaats worden overschreden. Als gevolg van transportprocessen kunnen de geëmitteerde stoffen zich verspreiden waardoor op termijn de streefwaarden ook op grotere diepten in een groter gebied rondom de stortplaats worden overschreden. Daarbij kan het oppervlaktewater worden belast met (schadelijke) stoffen in het verspreidingsgebied.

Het bodembeschermingsbeleid voor lokale verontreinigingsbronnen is er op gericht zoveel mogelijk de belasting van het milieu door (afval-)stoffen te beperken. Hoofduitgangspunt hierbij is het behoud van functies en kwaliteit van de bodem. Indien geen maatregelen (kunnen) worden genomen om stoffen blijvend in het gestorte materiaal vast te leggen ("eeuwigdurende" immobilisatie), zullen bij afval- en reststofbergingen isolerende voorzieningen moeten worden aangebracht. Het storten en opslaan van afvalstoffen moet voldoen aan de zogenoemde IBC-criteria (Isoleren, Beheersen en Controleren).

Omdat een enkelvoudige isolatie vaak onvoldoende is, zal een samenstel van isolerende voorzieningen nodig zijn. Dit stelsel moet in principe zodanig zijn ontworpen dat emissie volledig wordt voorkomen danwel zodanig wordt beperkt dat de streefwaarden voor bodem en grondwater in de omgeving van de stort- of opslagplaats niet worden overschreden. Dit geldt voor zowel de korte als de zeer lange termijn ("eeuwigdurend", b.v. 10 000 jaar).

Bij het huidige kennisniveau en de beschikbare middelen volgens de huidige stand der techniek wordt het onmogelijk geacht om voor alle afvalstoffen en voor alle stoffen daarin, in alle omstandigheden volledig te voldoen aan de hierboven aangegeven "ideale randvoorwaarde" (men zou kunnen spreken van een in technische zin onvermijdbare emissie). Het is zelfs twijfelachtig of bij een verdere uitbouw van kennis en een verdere ontwikkeling van technieken en materialen het in de toekomst mogelijk zal zijn om daaraan volledig te voldoen. Er dient dan een optimaal beschermingsniveau te worden gerealiseerd waarvan het te verwachten resultaat zo min mogelijk afwijkt van de ideale randvoorwaarde. Een voorgesteld isolatiesysteem zal moeten worden getoetst op de aanvaardbaarheid van de te verwachten effecten in de omgeving van een stortplaats.

Zolang er geen landelijk effectgericht toetsingskader beschikbaar is waarmee bijvoorbeeld op zekere afstand van de stortplaats de te verwachten risico's worden

beoordeeld van de voorspelde contaminatie, zal het bevoegd gezag zelf een uitspraak dienen te doen over de aanvaardbaarheid van de bij de voorgestelde constructie(s) te verwachten emissies.

Bij grote stortplaatsen spelen de uitkomsten van het op te stellen milieu-effectrapport (MER) een belangrijke rol bij de keuzebepalende afweging. In deze afweging komen ook andere effecten van de risico's van stoffen voor bodem en grondwater aan de orde.

Voor de elementen van het samenstel van isolerende voorzieningen en de daarvoor bruikbare materialen worden/zijn richtlijnen opgesteld (bijvoorbeeld "Richtlijnen ten behoeve van bodembeschermende maatregelen ter zake van opslag en stortactiviteiten", "Richtlijn voor toepassing van geomembranen ter bescherming van het milieu", enz.). Dit rapport handelt over de isolatie aan de onderzijde van een stortplaats en dient als basis voor de op te stellen Richtlijn "Isolerende voorzieningen aan de onderzijde van een stortplaats".

2.2 Kwaliteitseisen

Een stortplaats (of reststofberging) moet worden beschouwd als een bouwwerk. De belangrijkste constructieve eis die daaraan wordt gesteld, betreft het elimineren of indien dit niet volledig realiseerbaar is, een zodanige beperking van de belasting van het milieu, dat gesproken kan worden van een optimaal beschermingsniveau. Het samenstel van isolerende voorzieningen waarmee dat kan worden bereikt, is opgebouwd uit (veiligheids-) elementen voor:

- het zoveel mogelijk vastgelegd houden van stoffen in het afval dan wel, het zoveel mogelijk vastleggen van stoffen in de isolatieconstructie;
- het elimineren of zoveel mogelijk beperken van vloeistoftransport vanuit de stortplaats naar de omgeving;
- het elimineren of zoveel mogelijk beperken van stoftransport als gevolg van diffusie vanuit de stortplaats naar de omgeving.

De elementen van een dergelijk samenstel van isolerende voorzieningen kunnen bestaan uit:

- voorzieningen die het ontstaan van omstandigheden tegengaan waarbij mobilisatie optreedt van (bepaalde) stoffen (bijvoorbeeld bovenafdichting tegen uitloging) en/of die stoffen vastleggen in de constructie (bijvoorbeeld adsorberende lagen);
- lagen (barrières) die de transportweg onderbreken (vloeistofdicht, diffusiedicht of -onderbrekend) danwel vanwege hun weerstandbiedende eigenschappen het transport sterk afremmen;
- voorzieningen die tot doel hebben transportbepalende gradiënten (hydraulische gradiënt; diffusiegradiënt) te elimineren, te beperken en in bepaald gevallen zodanig in te stellen dat de stromingsrichting in een gewenste richting wordt afgebogen;
- aanvullende onttrekkings-, verzamel- en afvoervoorzieningen.

Ook kunnen op een bepaalde locatie van nature aanwezige lagen en condities bij aangetoonde geschiktheid een functie vervullen in het systeem. Daarbij mag niet uit het oog worden verloren dat condities en (vaak dien tengevolge) eigenschappen van in het systeem bruikbare natuurlijke lagen in de loop van de tijd kunnen wijzigen.

Omdat de vervuilingspotentie van het gestorte afval meestal aanzienlijk is en het stoftransport vanuit de stortplaats bij toepassing van een effectief isolatiesysteem uiterst gering zal zijn, kan bij het uitvoeren van transportberekeningen ten behoeve van het ontwerp worden uitgegaan van constante (dwz. niet in tijd afnemende) concentraties van aanwezige stoffen in het percolaat of het porievocht. Wel moet rekening worden gehouden met de effecten van (omzettings-, afbraak-)processen die weinig mobiele stoffen kunnen omzetten in stoffen met een grote mobiliteit.

Verder kunnen (een deel van) de controle- en beheersvoorzieningen in het isolatiesysteem worden geïntegreerd. Bepaalde elementen kunnen tijdelijk of soms blijvend een dubbele functie vervullen (bijvoorbeeld isolatie en controle).

Bij de afwegingen die tot de keuze moeten leiden van een isolatiesysteem voor een stortplaats op een bepaalde locatie, spelen wat betreft isolerende werking de volgen de hoofdrol:

- de effectiviteit van het isolatiesysteem als geheel zowel op de korte als op de zeer lange termijn;
- beheersbaarheid bij het falen (van onderdelen) van de constructie (voor een belangrijk deel geschiktheid van de locatie);
- de controleerbaarheid (afhankelijk van zowel constructie als locatie).

Daarnaast is de mate waarin de constructie zelf of het instandhouden van de isolerende werking van het systeem een (milieu-) effect heeft op de omgeving medebepalend voor de keuze. Voor de beoordeling van de effectiviteit op de korte en de zeer lange termijn zijn factoren van belang:

- gevoeligheid voor fouten bij de aanleg (foutarme realiseerbaarheid) of de materiaalkeuze (certificering, kwaliteitsborging);
- betrouwbaarheid berekeningen en testmethoden;
- duurzaamheid van constructie en toegepast materiaal in relatie tot werkingsduur en chemische en/of fysische belasting;
- risicogevoeligheid (mede in relatie tot locatie-specifieke omstandigheden);
- onderhoudsgevoeligheid (vereiste mate en aard van "eeuwigdurende" onderhoudsinspanning);
- beschikbaarheid materiaal.

2.3 Duurzaamheid isolerende voorzieningen

Een isolatiesysteem voor een stortplaats dient "eeuwigdurend" voldoende effectief te zijn. De onderafdichting vormt een onderdeel van het systeem. De onderafdichting hoeft niet overal "eeuwigdurend" een functie te vervullen. Er zijn plaatsen waar voor de lange en zeer lange termijn een voldoende isolatie wordt verkregen door een bovenafdichting "eeuwigdurend" in stand te houden. Indien daarvoor zekerheid kan

worden geboden kan worden volstaan met een onderafdichtingsconstructie met een tijdelijke rol in het systeem: namelijk gedurende de tijd dat nog geen bovenafdichting is aangebracht en gedurende een bepaalde periode daarna, waarin nog vocht vrijkomt uit het afval.

Als, vergeleken met de voorgaande situatie, de omgeving relatief kwetsbaar is, de situatie een groter risico oplevert voor verspreiding over een groter gebied, de beheersbaarheid problematischer is en/of het vertrouwen in een "eeuwigdurende" zorg voor een bovenafdichting gering is, krijgt de onderafdichting een blijvende ("eeuwigdurende") en zwaardere rol in het isolatiesysteem.

Extra voorzieningen aan de onderzijde van de stortplaats kunnen ook nodig zijn om het functioneren van controlevoorzieningen mogelijk te maken. Immers bepaalde voorzieningen die onder een stortplaats worden aangebracht voor isolatie, controle, afvoer kunnen niet worden hersteld indien zij defect raken. In bepaalde gevallen kan men dit ondervangen door (voor zover beschikbaar en realiseerbaar) duurzame constructies en materialen toe te passen of door rekening te houden met naderhand aan te brengen of reeds bij de aanleg in te bouwen reservevoorzieningen voor zover de hoofdconstructie en de locatiespecifieke omstandigheden dit toelaten.

Er is sprake van een ongeschikte locatie indien als gevolg van de locatiespecifieke omstandigheden ook bij een verhoogd isolerend vermogen:

- het bereikte bodembeschermingsniveau als onvoldoende moet worden gekwalificeerd;
- of, er een onbeheersbare situatie dreigt te ontstaan bij het falen (van onderdelen) van het isolatiesysteem;
- of, controle op de effectiviteit van het isolatiesysteem onmogelijk moet worden geacht.

2.4 Isolatiematerialen

In dit rapport worden isolerende voorzieningen behandeld die als onderdeel van het isolatiesysteem kunnen worden toegepast om stoftransport naar de omgeving tegen te gaan als gevolg van vloeistofverlies of diffusie aan de onderzijde van een stortplaats. Daarbij wordt ook rekening gehouden met andere verschijnselen die van invloed zijn op het transport zoals dispersie, dichtheidsstroming e.d.

Voor materialen en constructies worden eigenschappen en isolerende werkingen behandeld, waarmee toepassingsmogelijkheden en effectiviteit als onderdeel van het systeem nader worden beschreven. Voor verschillende situaties (sets van locatiespecifieke omstandigheden) is beschreven welke isolatiesystemen bruikbaar zijn.

De verwachte emissies worden met elkaar vergeleken. Als vergelijkingsbasis geldt een nader te beschrijven isolatiesysteem op een in alle opzichten (uit isolatieopzicht gezien) gunstige locatie met als resultaat een zeer geringe (of zo mogelijk geen) emissie.

Een belangrijke onzekerheid wordt gevormd door de te verwachten poriewaterkwaliteit bij een sterk veranderend afvalaanbod. Hiervoor moet noodgedwongen worden uitgegaan van een zinnige aanname.

2.5 Toetsing Milieueffectrapport aan milieu-eisen

Indien het niet mogelijk is om de emissie van stoffen vanuit een geprojecteerde stortplaats "eeuwigdurend" volledig te voorkomen of zodanig te beperken dat de streefwaarden voor bodem en grondwater in de omgeving niet worden overschreden, dienen de effecten van de potentiële emissie op de omgeving te worden getoetst op aanvaardbaarheid. Op dit moment is echter geen landelijk effectgericht toetsingskader beschikbaar.

Bij de uitspraak die het bevoegd gezag voor de vergunningverlening moet doen over toelaatbaarheid van de inrichting i.c. de aanvaardbaarheid van de te verwachte (beperkte) emissie, speelt voor grote stortplaatsen het op te stellen Milieueffectrapport (MER) een belangrijke rol. In het MER worden immers voor verschillende isolatievarianten de te verwachten effecten zichtbaar gemaakt voor de omgeving van de gekozen locatie.

Daarnaast worden risicogevoeligheid, faalkansen en de gevolgen van het falen van (onderdelen van) voorzieningen in beeld gebracht. In het MER worden ook andere aspecten behandeld die bij de besluitvorming worden betrokken: ecologie, landschap, andere beïnvloedbare functies van de locatie en zijn omgeving e.d.

Een ontwerp dat wat betreft emissiebeperking en/of minimalisatie van de effecten van een emissie op bodem en grondwater als optimaal te beschouwen is, kan bij aanleg, exploitatie of als gevolg van het in werking houden van het isolatiesysteem een milieubelasting teweeg brengen op de omgeving. Het resulterende milieurendement is dan beperkt en kan zo gering zijn vergeleken met minder isolerende andere varianten, dat de keuze op een andere variant moet wegvallen. Ook is het niet uit te sluiten dat een optimale isolatievariant voor een bepaalde locatie toch nog onaanvaardbare effecten teweegbrengt voor de omgeving. Dan zal moeten worden uitgezien naar een andere locatie.

2.6 Verdergaande kennisopbouw en ontwikkelingen

Er bestaan tegenwoordig nog grote leemten in de kennis die noodzakelijk is voor het ontwerpen van stortplaatsen die blijvend ("eeuwigdurend") emissievrij zijn danwel zodanig geïsoleerd zijn dat de beperkte emissie geen onacceptabele effecten teweegbrengt in de omgeving van een stortplaats. Ook de ontwikkelingen van in dergelijke constructies toegepaste materialen is tot zover achtergebleven bij de aan die materialen te stellen zware eisen. Bij constructies die "eeuwigdurend" onderhoud vergen wordt de veiligheid voor de lange termijn bepaald door het vertrouwen dat men kan (mag) stellen in de toekomstige beheerders van de locatie. Daarbij is een

extra moeilijkheid dat het falen (van onderdelen) van het isolatiesysteem zich niet onmiddellijk manifesteert als een duidelijke voor iedereen waarneembare calamiteit.

Praktijkgegevens over het gedrag van constructies en materialen op de (zeer) lange termijn ontbreken en zullen waarschijnlijk nooit in de gewenste kwaliteit en detaillering beschikbaar komen voor de periode waaraan de isolerende voorzieningen effectief behoren te zijn: "eeuwigdurend". Noodgedwongen zal men zich moeten behelpen met theoretische beschouwingen, inzicht, berekeningen waarvan de relevantie aannemelijk is en testen die op grond van de huidige inzichten zijn ontworpen om het lange termijngedrag te voorspellen. Ook leiden ontwikkelingen als gevolg van het zich wijzigende afvalstoffenbeleid op het gebied van de bij stortplaatsen aangeboden soorten afvalstoffen ertoe dat geen gegevens beschikbaar zijn over de te verwachten chemische samenstelling van het poriewater in het gestorte afval. Voor ontwerpberekeningen zal daarom (wellicht blijvend) moeten worden uitgegaan van veronderstellingen die gebaseerd zijn op theoretische beschouwingen en huidige verwachtingen over de samenstelling van het aangeboden afval.

Over het gedrag en eventuele interacties onder de in de stortplaats gecreëerde omstandigheden is nog weinig bekend. Voorspellingen van de te verwachten poriewatersamenstelling blijven het karakter houden van "zinnige" aannamen zolang er nog onvoldoende praktijkgegevens beschikbaar zijn. Voor berekeningen die worden gemaakt om inzicht te krijgen in de effectiviteit van een isolatiesysteem en de potentiële verspreiding van stoffen in de bodem zal men uit dienen te gaan van "veilige" aannamen: waarden voor de chemische samenstelling die zijn gebaseerd op een relatief ongunstig verwachtingspatroon.

Dit rapport is gebaseerd op huidige inzichten over processen, toepasbare constructies, beschikbare materialen e.d. Het is niet de bedoeling dat de ontwikkelingen in kennisopbouw, kwaliteitsverbetering van materialen e.d. stilstaan na het uitbrengen van dit rapport en de daarop gebaseerde richtlijnen. Men zal moeten blijven streven naar de ontwikkeling van isolatiesystemen die zoveel mogelijk aan de "ideale" randvoorwaarde voldoen en tevens onderhoudsarm en risicoarm zijn. Bij het verdergaand beperken van emissies uit stortplaatsen en het onderhoudsvrij en risicovrij maken van deze voorzieningen zal onontkoombaar meer aandacht moeten worden geschonken aan het immobiliseren van stoffen in het gestorte materiaal.

Verdergaande kennisopbouw en ontwikkelingen van toepasbare materialen nopen tot het periodiek herzien van dit rapport en de daarop gebaseerde richtlijnen, omdat regels geen belemmering mogen vormen voor het bereiken van een in alle opzichten aanvaardbaar bodembeschermingsniveau.

13 OORZAKEN EN MOGELIJKHEDEN TOT BEPERKING VAN BODEM- VERONTREINIGING

3.1 Oorzaken

Veel afval en reststoffen worden overwegend onafgedekt gestort, waardoor regen ongehinderd infiltreert. Een deel van het intredend water wordt afhankelijk van de aard en dichtheid van het gestort materiaal geabsorbeerd en het resterend deel verdwijnt als (verontreinigd) percolatiewater uit het afval. Gedurende de stortfase bedraagt de hoeveelheid percolaat (uitgedrukt als de dikte van een schijf water) afhankelijk van de aard van het afval, de jaarlijkse storthoogte en de wijze van compacteren, 200 tot 450 mm per jaar.

Tabel 1 Samenstelling huishoudelijk afval (Baccini, 1987), en chemische samenstelling percolaat (A- gedurende de verzuringsfase, B- gedurende de methanogene fase), volgens Hoeks, 1983; de spreiding in de concentraties zijn ontleend aan Lema et al., 1988

Component	Samenstelling afval (ppm)	Samenstelling percolaat			
		A (mg.l ⁻¹)	B (mg.l ⁻¹)	min. (mg.l ⁻¹)	max. (mg.l ⁻¹)
pH		5,7	7,6	3,7	8,5
EC bij 25 0C		3 500	2 700		
COD		65 000	7 000	40	90 000
TOC	350 000 vetzuren	26 600	1 020	25 600	
Aminen			250		
HCO ₃		17	12 000		
SO ₄		1 500	150		
Water	300 000				
IJzer	45 000	1 500	40		
Aluminium	6 500				
Chloride	7 000	4 000	4 000		
Na		3 000	2 500		
K		2 000	2 400		
Ca		2 600	100		
Mg		450	125		
NH ₄ -N		1 500	2 000	10	2 100
Lood	500	0,17	1,0	0,01	2,0
Cadmium	10	0,01	0,02	0,01	17,0
Chroom	60			0,04	0,75
Kobalt	6				
Koper	400	0,65	0,20	0,02	9,0
Molybdeen	10				
Nikkel	40	1,04	0,40	0,01	6,11
Kwik	4				
Zink	1 500	54	1,6	0,22	370

Een overzicht van de samenstelling van percolaat van verschillende stortplaatsen in Nederland is gegeven door Beker (mondelinge mededeling, 1991; tabel 2).

De samenstelling van het percolaat hangt samen met de aard en leeftijd van het afval. Bevat dit een relatief hoog gehalte aan organische stof (zoals bij niet-gescheiden ingezameld huishoudelijk afval) dan is het gehalte aan organische verontreinigingen in het percolaat aanvankelijk hoog. Binnen enkele jaren komt een vergistingsproces op gang

(methaanvorming) waarbij de organische verontreiniging in het percolaat aanzienlijk terug loopt (Hoeks, 1983; tabel 1). Als omzettingsprocessen zuurstof verbruiken, ontstaat een anaërobe situatie (het potentieel verbruik is dan veel hoger dan de potentiële zuurstof toevoercapaciteit), waarin ook zuurstof kan worden onttrokken aan verschillende verbindingen (reductieprocessen), die dan onoplosbaar worden en neerslaan (bijvoorbeeld sulfiden van zware metalen).

Tabel 2 Samenstelling percolaat uit Nederlandse Stortplaatsen (Beker, 1991)

Component	Eenheid	Gem.	Min.	Max	n1	n2	Periode
CZV	mg.l ⁻¹	5424	1	68 330	319	13	70-88
pH	-	6,8	4,7	8,4	156	12	70-88
Cl	mg.l ⁻¹	743	26	7 122	146	10	70-88
NH ₄ -N	mg.l ⁻¹	237	6	1 410	72	8	70-88
NO ₃	mg.l ⁻¹	218	0	1 740	8	4	74-85
Kjeldahl-N	mg.l ⁻¹	438	3	2 250	124	10	82-88
SO ₄	mg.l ⁻¹	842	36	5 865	70	5	70-88
As	µg.l ⁻¹	51	0	499	58	9	73-88
Cd	µg.l ⁻¹	4	0	140	113	12	73-88
Cr	µg.l ⁻¹	67	0	1 750	116	13	73-88
Cu	µg.l ⁻¹	30	0	830	120	13	73-88
Hg	µg.l ⁻¹	1	0	26	61	10	73-88
Ni	µg.l ⁻¹	92	0	1 050	121	13	73-88
Pb	µg.l ⁻¹	394	0	30 300	116	13	73-88
Zn	µg.l ⁻¹	720	0	30 300	140	13	73-88
Ba	µg.l ⁻¹	556	0	7 810	33	2	83-87
Fe	mg.l ⁻¹	417	1	2 300	27	6	71-88
Ca	mg.l ⁻¹	787	33	3 677	21	5	74-88
Mg	mg.l ⁻¹	177	20	729	21	5	74-88
Na	mg.l ⁻¹	2988	1640	4 335	3	2	74-88
K	mg.l ⁻¹	1813	1450	2 190	3	2	74-88
PAK	µg.l ⁻¹	2	0	10	7	2	85-88
EOCl	µg.l ⁻¹	29	0	450	45	5	83-88
Olie	mg.l ⁻¹	1386	0	30 200	48	5	84-88
Ar. oplosm.	µg.l ⁻¹	1042	7	2 550	8	2	86-88

gem = gemiddeld; n1 = aantal analyses; n2 = aantal stortplaatsen; periode = periode van bemonsteren; PAK = polycyclische aromatische koolwaterstoffen; EOCl = extraheerbaar organisch chloor; Ar = aromatisch

Als gevolg van andere verwerkingsprocessen van afval en reststoffen (gescheiden inzameling, hergebruik, verbranding, immobilisatie) en verandering van de aard van verwijderde stoffen, zal het percolaat in de toekomst volgens mondelinge mededeling van Beker (RIVM, 1991) waarschijnlijk aanzienlijk minder organische componenten bevatten, minder stikstof (N-Kjeldahl) en mogelijk meer totaal zout. Op grond van huidige kennis is geen goede prognose te geven van de toekomstige percolaatsamenstelling.

Water (percolaat) treedt uit het afval naar buiten als een zekere vochtverzadiging is bereikt en veroorzaakt milieuverontreiniging als het ongehinderd in de bodem dringt of terecht komt in het oppervlaktewater. Met een onderafdichting wordt bodemverontreiniging voorkomen. Percolaat wordt opgevangen en na behandeling in een zuiveringsinstallatie op het oppervlaktewater geloosd. Omdat zuivering nooit volledig is, komt een deel van de verontreiniging in het oppervlaktewater terecht. De niet afgebroken

verwijderde verontreiniging wordt met het zuiveringsslib afgevoerd (gestort, verbrand of nuttig toegepast in de land- en tuinbouw). Vooral tijdens de stortfase wordt veel percolaat gegenereerd. De capaciteit van het percolaat-opvangsysteem moet daarom in die fase vrij groot zijn.

Bij een bepaalde percolaatsamenstelling kunnen drainbuizen en drainfilters verstopt raken als gevolg van chemische of biochemische reacties (North West Disposal Officers, 1991). Vooral de neerslag van calciumcarbonaat en ijzersulfide zijn hiervoor verantwoordelijk (Brune et al., 1991). Als dit gebeurt, moet de drainlaag zelf nog een voldoende afvoercapaciteit hebben ook als deze laag gedeeltelijk verstopt zou raken. Door verstoppingen neemt de stijghoogte van percolaat in het stort toe omdat de stromingsweerstand toeneemt en bij eenzelfde percolaataanbod een grotere drukhoogte gradient nodig is voor afvoer van het percolaat naar de drains. Deze ophoping moet beperkt blijven omdat anders het gevaar bestaat dat percolaat door de taluds naar buiten treedt.

3.2 Mogelijkheden tot beperking van bodemverontreiniging

Na beëindiging van de stortactiviteiten wordt een bovenafdichting aangelegd om infiltratie van regenwater te voorkomen. De oorzaak van het ontstaan van percolaat wordt daarmee aangepakt. Het overtollige regenwater wordt nu door een drainagesysteem in de afdeklaag opgevangen en afgevoerd naar het oppervlaktewater. Minerale afdichtingen zijn niet absoluut vloeistofdicht. De infiltratie door goed functionerende minerale afdichtingslagen is volgens modelberekeningen minder dan 10-15 mm per jaar (Boels et al., 1993). Door hierop nog een folie te leggen wordt de isolatie verbeterd, echter niet volmaakt. Fouten tijdens de uitvoering worden altijd gemaakt en soms niet gesignaleerd (Bass, 1985). De infiltratie bedraagt nog enkele millimeters per jaar afhankelijk van aanleg-, constructie- of fabricagefouten en van ongelijkmatige zetting van het gestort materiaal, zolang de drainage in de eindafwerking goed functioneert. Door zetting van gestort materiaal en door (biochemische) omzettings- en afbraakprocessen vermindert het afvalvolume. Deze afname hangt nauw samen met de hoeveelheid (afbreekbare) organische stof. Door volume-afname kan minder water in het afval worden vastgehouden, het teveel stroomt als percolatiewater weg. Ook als gevolg van (langzame) stromingsprocessen in het afval blijft na het aanbrengen van de bovenafdichting water naar beneden stromen. De afvoer van percolaat neemt dus niet plotseling af maar vermindert na verloop van tijd. De drainage in het stortlichaam moet ook lang na het aanbrengen van de bovenafdichting nog functioneren.

Emissie (uitstoot van stoffen uit opgeslagen afval- of reststoffen die volgens de vigerende milieuwetgeving schadelijk of ongewenst is) begint vanaf het moment, waarop met storten wordt begonnen. Door eventuele lekken in de onderafdichting worden opgeloste stoffen in de lekstroom meegevoerd en dus verplaatst (advectief of convectief transport). Door niet-lekkende afdichtingen kunnen stoffen door diffusie naar buiten treden.

Diffusie is het gevolg van beweging van moleculen in alle richtingen. Als ergens de concentratie van een bepaalde (opgeloste) stof hoger is dan op een andere plaats, zal het aantal moleculen dat zich in de richting van de lagere concentratie beweegt groter zijn dan het aantal dat zich in tegengestelde richting beweegt. Het gevolg is een netto-transport in de richting van de geringste concentratie. De concentratie van opgeloste

stoffen wordt daarbij genivelleerd. Diffusie treedt ook op in stromend water. De bijdrage van diffusie aan het stoftransport hangt af van de grootte en richting van de waterstroom en het verloop van de concentratie van opgeloste stoffen. In het geval de concentratie van een bepaalde opgeloste stof "stroomafwaarts" geringer is dan "stroomopwaarts", zal diffusie het totaal stoffen transport versterken. Geldt het tegendeel, dan vermindert diffusie het netto transport van die stof in de richting van de stroming. Hiervan kan gebruik worden gemaakt om het totaal stoftransport in een bepaalde richting juist nul te maken (tegenstroomprincipe). Opgeloste stoffen kunnen niet door elk medium diffunderen. Anorganische verbindingen diffunderen niet door een geomenbraan, terwijl bepaalde organische verbindingen dit wel doen. Minerale afdichtingen zijn voor geen enkele stof diffusie-dicht.

Bij verspreiding van stoffen in de bodem spelen de volgende mechanismen een rol:

- verplaatsing als opgeloste stof in de richting van de grondwaterstroming;
- verplaatsing in alle richtingen via diffusie;
- verplaatsing in en loodrecht op de stromingsrichting door dispersie;
- adsorptie van stoffen uit de bodemoplossing aan bodembestanddelen;
- afbraak of neerslag van opgeloste stoffen.

Dispersie wordt wel beschreven als een soort diffusie en ontstaat als gevolg van stroomsnelheidsverschillen. Deze ontstaan omdat de bodemporiën verschillen van vorm en diameter (microschaal). Door snelheidsverschillen worden opgeloste stoffen niet met de zelfde snelheid getransporteerd. Omdat de stroomrichting op micro-schaal in de bodem steeds verandert vindt ook zijdelingse stoffentransport plaats. Op macro-schaal ontstaan snelheidsverschillen als gevolg van een niet-uniforme bodemopbouw (gelaagdheid, textuurverschillen, dichtheidsverschillen). Dispersie is afhankelijk van de stroomsnelheid en bevordert het stoftransport niet alleen in de hoofdstroomrichting maar ook loodrecht daarop.

Adsorptie kan betrekking hebben op de binding van bepaalde stoffen aan organische bodemcomponenten en op de uitwisseling van stoffen in de bodemoplossing tegen geadsorbeerde stoffen aan het bodemadsorptiecomplex. Bij de uitwisseling van stoffen speelt een adsorptiepreferentie een rol. Meerwaardige ionen (bijvoorbeeld cadmium, koper, kwik, ijzer) worden sterker gebonden dan bijvoorbeeld eenwaardige ionen (natrium, kalium). Binnen ionen met eenzelfde waardigheid bestaat een voorkeursvolgorde voor adsorptie (de zogenaamde permutatiereeks). In een evenwichtssituatie bestaat er een bepaalde verhouding tussen de bezetting van het adsorptiecomplex met bepaalde ionen en de verhouding van concentraties van die ionen in de bodemoplossing. Via uitwisseling ontstaat dit evenwicht. Bij verandering van de concentratieverhouding in de bodemoplossing, verandert ook de bezetting van het adsorptiecomplex. Het gevolg is dat bepaalde stoffen gedurende een zekere tijd uit de percolaatstroom worden geadsorbeerd tot een nieuw evenwicht is bereikt. Vanaf dat moment vindt geen adsorptie meer plaats en stroomt het percolaat in voor de bewuste stof ongewijzigde samenstelling door die bodemlaag. Als de concentratie of de concentratieverhoudingen na verloop van tijd afnemen resp. veranderen, verlaten geadsorbeerde stoffen het adsorptiecomplex en komen in de bodemoplossing terecht ("nalevering" van de bodem). Stoffen die worden geadsorbeerd verplaatsen zich langzamer dan stoffen die niet worden geadsorbeerd. De verhouding tussen de verplaatsingssnelheid van een niet geadsorbeerde stof in het grondwater en van een stof die wel wordt geadsorbeerd, wordt retardatie genoemd. Deze verhouding is afhankelijk van de adsorptiecapaciteit van de bodem, de bodemdichtheid en de aard van de stof.

Volgens de Wet Bodembescherming moet emissie naar de bodem worden voorkomen. Als dat technisch niet kan, moet de best haalbare oplossing worden gerealiseerd. Dit betreft duurzame voorzieningen die nog functioneren onder de slechts denkbare situatie (bijvoorbeeld wanneer enkele onderdelen niet meer functioneren) en waarbij de totale emissie en verspreiding van stoffen minimaal en beheersbaar is.

Het materiaal waaruit afdichtingslagen is opgebouwd kan worden aangetast door bepaalde componenten in het percolaat. Folies verliezen hun sterkte in contact met bepaalde organische componenten, waardoor ze bij ongelijkmatige zettingen in de ondergrond gemakkelijker scheuren. Omdat zettingen in de opbouwphase van het stort relatief groot zijn en de folie nog niet kan zijn aangetast, heeft de folie de grootste treksterkte op het moment dat dit het meest nodig is. De waterdoorlatendheid van -minerale afdichtingslagen neemt in contact met anorganische componenten uit percolaat toe en percolaatdrains kunnen verstopt raken. Aangenomen kan worden dat op den duur het drainagesysteem in het stortlichaam niet meer functioneert. Als ook zijdelingse afvoer van percolaat onmogelijk is komt een hoeveelheid percolaat in de bodem die gelijk is aan de infiltratie door de bovenafdichting.

Als verontreiniging in de bodem geraakt, wordt het verspreid in het grondwater. Uit berekeningen (Boels et al., 1993) blijkt dat de diepte tot waar verontreiniging in de bodem kan dringen en de afstand waarover verontreiniging kan worden verplaatst (verspreiding van verontreiniging) samenhangen met de geo-hydrologische toestand. Op locaties in vlakke gebieden waar nauwelijks horizontale stroming in het bovenste watervoerend pakket voorkomt, maar waar wel kwel optreedt, zal ook op zeer lange termijn de indringingsdiepte en de horizontale verplaatsing van verontreiniging beperkt blijven. Op locaties met een dik watervoerend pakket, waar wel een horizontale grondwaterstroming voorkomt en waar sprake is van inzijging (neerwaartsgerichte stroming), zal zowel de indringingsdiepte als de horizontale verplaatsing van verontreiniging (op de lange termijn) erg groot zijn. In principe zijn zulke locaties niet geschikt voor een stortterrein, omdat de situatie niet beheersbaar is. Indien op zulke locaties om bepaalde zwaarwegende redenen toch een stortterrein moet worden aangelegd, kan het nuttig zijn in het ontwerp van de onderafdichting voorzieningen op te nemen (extra afdichtingen, hydrologische isolatie) om te grote verspreiding te voorkomen. Het is echter beter om een stortlocatie te kiezen waar de omvang van de verspreiding van nature beperkt blijft.

Om emissie naar de bodem te beperken moeten afdichtende lagen zo goed mogelijk functioneren. Daarom moeten hoge eisen worden gesteld aan materiaaleigenschappen (uniformiteit, waterdoorlatendheid, bestendigheid tegen deformatie en invloed percolaat) en aan de uitvoeringsnauwkeurigheid tijdens de bouwphase. De uitvoeringskwaliteit wordt bepaald door het ontwerp, de uitvoeringsmethode en de controle tijdens de uitvoering. De kwaliteit van het percolaatopvangsysteem (percolaatdrains) is in dit verband van belang omdat daarmee drukhoogtes boven afdichtingslagen laag worden gehouden en de drijvende kracht voor vloeistofstroming beperkt.

4 ISOLATIE MATERIALEN

4.1 Materiaalkenmerken

Isolatiematerialen zijn materialen die in constructies worden toegepast om stoftransport tegen te gaan. Het kenmerk van deze materialen is dat hun doorlatendheid voor water erg gering is. Onderscheiden worden kunstmatige materialen (folies, asfaltbeton), kleihoudende natuurlijke materialen (natuurlijke kleien, zand-bentoniet mengsels), waarin het kleimineraal zwelt bij wateropname en krimpt bij waterafgifte en inerte natuurlijke materialen (löss, keileem) die geen zwel of krimpeigenschappen hebben.

Kunstmatige materialen ontleen hun waterdichtheid aan een zeer dichte structuur. Kleihoudende materialen ontleen hun zeer lage doorlatendheid aan het zwelvermogen van kleimineralen die in gezwollen toestand poriën blokkeren. Inerte materialen kenmerken zich door een bepaalde korrelgrootteverdeling (Denson et al., 1986). De grootste korrels vormen een bepaalde poriënstructuur. Korrels van een iets kleinere omvang passen juist in deze ruimtes maar vullen ze net niet op. Korrels van weer kleinere afmetingen passen weer juist in deze resterende holtes, maar vullen ze net niet helemaal op, etc.. Natuurlijke materialen (zand) die door chemische reacties dicht worden gemaakt, vormen een aparte categorie. Het kenmerk van deze materialen is dat poriën worden geblokkeerd door neerslag van onoplosbare verbindingen die bij chemische reacties worden gevormd of door gelvorming.

4.1.1 Geomembranen en asfaltbeton

De huidige geomembranen zijn dunne (tot ca. 2 mm) folies die waterdicht zijn. Opgeloste anorganische en polaire organische verbindingen worden in geringe mate opgenomen en doorgelaten door polyethyleenfolies, terwijl lipofiele organische verbindingen in grote mate worden opgenomen en doorgelaten (Breen en Der Kinderen, 1992). Folies verdragen een alzijdige rek tot ca. 5%, terwijl breuk optreedt bij ca. 20% rek. Puntbelastingen leiden tot breuk.

Asfaltbeton is een mengsel waarin op gewichtsbasis ca. 7% koolwaterstofverbindingen voorkomt en als een laag van 6-8 cm wordt aangebracht. Het materiaal is vooral in de natte waterbouw toegepast, waar het duurzaam is gebleken (meer dan 60 jaar). Een goede afdichting wordt verkregen als het poriënvolume minder is dan 3%. Asfalt is een duurzaam produkt, maar kan oplossen in olie en aardoliederivaten. Von Schönian (1991) vermeldt dat asfalt uit de Babylonische tijd nog steeds de zelfde eigenschappen bezit als asfalt dat recent is geproduceerd. Het materiaal is slecht bestand tegen ongelijkmatige belastingen: afschuiving en scheurvorming treedt gemakkelijk op. De ondergrond moet een grote stabiliteit hebben. In Zwitserland zijn sinds 1979 17 stortplaatsen voorzien van een asfaltbeton onderafdichting. In Duitsland wordt het sinds 1974 toegepast, echter op zeer beperkte schaal.

4.1.2 Natuurlijke materialen

In Nederland komen verschillende grondsoorten voor die na verdichting en verkneding een zeer lage doorlatendheid krijgen en daarom geschikt zijn voor afdichtingslagen. Tabel 3 geeft een overzicht van onderzochte grondsoorten.

Tabel 3 In Nederland voorkomende geschikte natuurlijke grondsoorten voor de constructie van onderafdichtingslagen

Grondsoort	Lutum (%)	Sloef (%)	Doorlatendheid (*10 ⁻¹⁰ m.s ⁻¹)
matig zware tot zeer zw. klei	> 35		< 1,0
lichte klei	28-35		1,0-100,0
löss		> 70	< 1,0
keileem		50-70	1,0-10,0
lemig zand		< 50	> 10,0
Tegelse klei	50		1,5
Reuver klei	38		1,3
Potklei	74-80	< 12	0,5
Boomklei	38-62		0,7
Zand-bentoniet	5		5,0
Zand-bentoniet	7		2,0
Zand-bentoniet	10		1,5

De materialen in tabel 3 zijn vaak het eindprodukt van zeer langzaam verlopende verweringsprocessen en zijn derhalve erg duurzaam. Ze laten water en opgeloste stoffen door. Bij afwezigheid van vloeistof stroming kunnen alle opgeloste stoffen via diffusie door deze materialen dringen. Bij vervormingen behouden ze hun eigenschappen.

De Reuver en Tegelse klei is in beperkte hoeveelheden lokaal beschikbaar. Potklei (Formatie van Peelo) komt vooral voor in Groningen. Plaatselijk ligt het aan maaiveld, maar in het algemeen op ca. 25 m -NAP. Laagdiktes tot 25 m komen voor. Ook in Drenthe en in het oostelijk deel van Friesland wordt potklei aangetroffen. Boomklei dagzoomt (komt aan het oppervlak) in de Achterhoek (Winterswijk). Deze klei komt op grote schaal voor op 150 m -NAP en dieper in diktes van meer dan 100 m. In principe is in Nederland een zeer grote voorraad natuurlijke klei beschikbaar. De werkelijk beschikbare hoeveelheid wordt bepaald door bereidheid van de (provinciale) overheid om voor de winning de vereiste vergunningen (o.a. ontgrondingsvergunning) te verlenen.

Zeer geringe doorlatendheden kunnen ook worden bereikt met mengsels van zand en bentoniet. Bentoniet (klei met meer dan 70% montmorilloniet) wordt niet in Nederland gevonden, maar wordt geïmporteerd. Hieraan is al veel onderzoek verricht.

Klei- en organische-stofhoudende minerale materialen bezitten de mogelijkheid om opgeloste stoffen te adsorberen. Het gehalte en de aard van de klei- en de organischestofffractie bepalen de adsorptiecapaciteit.

4.1.3 Kunstmatige toeslagmaterialen

Door kunstmatige stoffen te mengen met grond kan de doorlatendheid worden beperkt. Waterglas is zo'n materiaal (VROM, 1982). Belouschek en Novotny (1989) rapporteren dat menging van een leem-löss grond met "Deposil N" (een poedervormig waterglasprodukt) ook op termijn een geringe doorlatendheid behoudt ($\sim 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$). Bogusch (1978) beveelt aan om grond met een ruime gradatie te mengen met waterglas en klei (bv. bentoniet) om de doorlatendheid te verlagen. Toevoeging van waterglas (Deposil N) deed de doorlatendheid verlagen van $3,6\text{--}52 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ tot $1,3\text{--}7,2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. De werking van waterglas is nog wat twijfelachtig, omdat het poriënstelsel gedeeltelijke verstopt kan raken door zwevend materiaal in het percolaat (Albiker, 1986). Door deze verstopping kan de doorlatendheid met een factor 1000 afnemen. Recent onderzoek van DLO-Staring Centrum aan waterglas-afdichtingen laat zien dat door gelvorming van waterglas te bevorderen in fijnzandig materiaal met FeCl of MgCl, een doorlatendheid van minder dan $1 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ kan worden bereikt. Verdere uitwerking van de vereiste technologie en praktijkbeproeving zijn daarbij nog nodig.

4.1.4 Zelfvormende afdichtingslagen

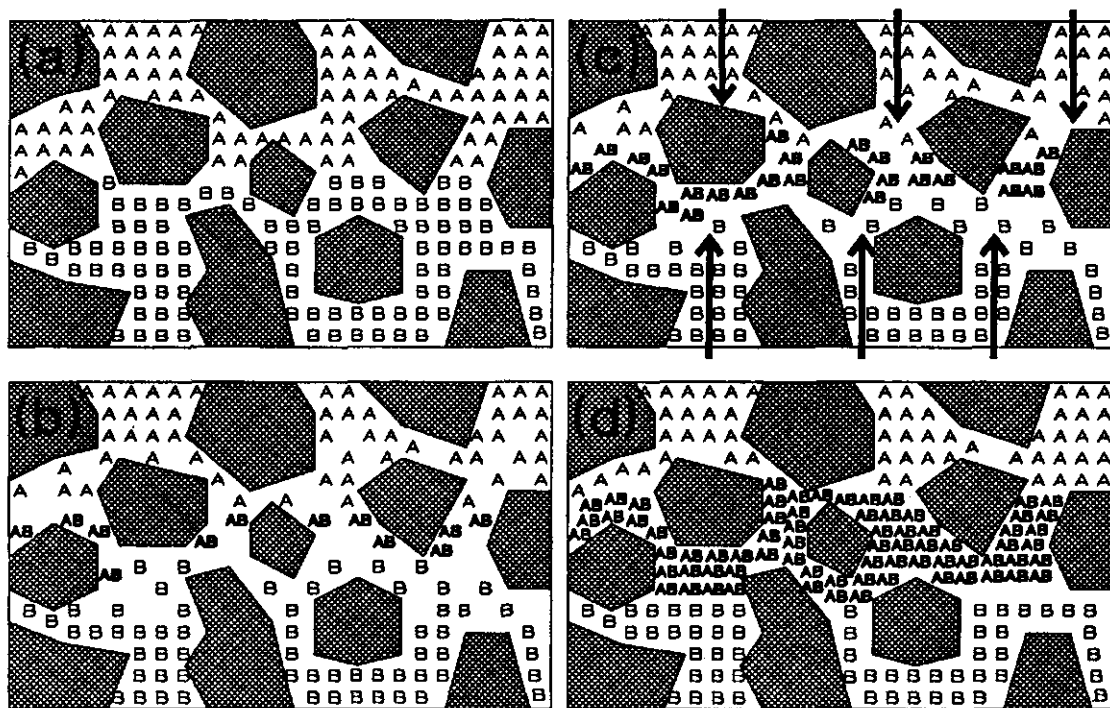


Fig. 1 Schematische weergave van zelfafdichting op poriënchaal (naar Hockley et al. 1991)

- (a) Poreuze materialen met reactanten A en B
- (b) Precipitatie van AB en begin van diffusie
- (c) Diffusie van reactanten naar het grensvlak
- (d) Afdichtende laag

Een mogelijkheid om de doorlatendheid te verlagen is om de poriën in de bodem op te vullen met vaste stoffen. Door Hockley et al. (1991) is een methode ontwikkeld om

opgeloste stoffen met elkaar in een grensvlak te laten reageren, waarbij onoplosbare verbindingen ontstaan die neerslaan en de poriën opvullen (fig. 1). Praktisch wordt dit gerealiseerd door lagen grond die zijn verzadigd met matig oplosbare zouten op elkaar te leggen. De reagentia vormen in het grensvlak tussen de lagen een neerslag (bv. magnesiumhydroxide, calciumcarbonaat). Als gevolg van de afnemende concentratie van de reagentia in het contactvlak diffunderen de reagentia naar het grensvlak. De reactie gaat door en de hoeveelheid neerslag neemt toe totdat de poriën volledig zijn gevuld. De benodigde reactietijd om een bepaalde lage doorlatendheid te bereiken is nog niet bekend. Evenmin is bekend welke reactie tijd nodig is om een diffusiedichte laag te maken, vooropgesteld dat deze mogelijkheid bestaat.

De lagen met reagentia zijn door andere grondlagen omgeven. Als de concentratie van de reagentia in de andere grondlagen geringer is, zal ook diffuus transport naar die grondlagen kunnen optreden, waardoor er minder reagentia overblijven voor het vormen van neerslag. Bij toepassing op praktijkschaal zal hiermee rekening moeten worden gehouden door voldoende reagentia toe te voegen of door meerdere lagen te creëren waartussen dichte lagen worden gevormd die voorkomen dat de reagentia gemakkelijk verdwijnen. Ook moet nog worden onderzocht of de dichte lagen in contact met percolaat intact blijven.

Op het moment vindt nader onderzoek plaats door ECN en GD naar omstandigheden waaronder deze techniek in de praktijk kan worden toegepast.

4.2 Invloed van percolaat op doorlatendheid afdichtingslaag

In deze paragraaf wordt de invloed van percolaat op het functioneren van kleihoudende minerale afdichtingsmaterialen behandeld. Deze materialen ontleen hun eigenschappen aan het zwelgedrag van kleimineralen. Percolaat kan daarop invloed hebben. Klei- of natuurlijke materialen (löss, leem, keileem) zijn daarom ongevoelig voor percolaat.

4.2.1 Het zwelgedrag van klei

Een aantal kleisoorten bezit het vermogen te zwellen door wateropname, waardoor de afstand tussen de kleiplaatjes toeneemt. Ook bezitten deze kleisoorten het vermogen om opgeloste ionen uit de waterfase te adsorberen. De lading en aard van de ionen bepalen de adsorptiepreferentie. De verhouding tussen de hoeveelheden geadsorbeerde ionen is afhankelijk van de verhouding van de concentraties van die ionen in de oplossing. Positief geladen ionen worden door het kleioppervlak "aangetrokken", negatief geladen ionen worden in het algemeen door dit oppervlak "afgestoten". De aantrekkings- of afstotingskracht is afhankelijk van de afstand tussen het ion en het adsorptieoppervlak. De concentratie van de verschillende ionen in een denkbeeldig vlak op zekere afstand van het kleimineraaloppervlak is gelijk aan de concentratie in de oplossing. Vanaf dit vlak verandert de concentratie in de richting van het kleimineraaloppervlak. De laag tussen dit denkbeeldig vlak en het kleimineraaloppervlak wordt de diëlectrische dubbellaag genoemd. Aangenomen wordt dat een deel van het water in deze laag immobiel is. Naarmate het volume van de dubbellaag groter is, is het effectief poriënvolume waarin stroming kan optreden kleiner. De dikte van de dubbellaag is in oplossingen van eenwaardige ionen groter dan in oplossingen van meerwaardige ionen.

Evenzo is de dikte van deze laag geringer, naarmate de totale zoutconcentratie in de bodemoplossing groter is. De doorlatendheid hangt samen met de dikte van de dubbellaag. De dikte kan afnemen door:

- toenemende zoutconcentratie in de bodemoplossing;
- uitwisseling van eenwaardige kationen (bijvoorbeeld Na) tegen meerwaardige kationen (bijvoorbeeld Ca, Mg, Fe, Hg);
- vochtonttrekking (bijvoorbeeld door uitdroging);
- afname van de diëlectrische constante van de bodemoplossing;
- aantasting van kleikristallen door sterke zuren en basen.

4.2.2 Invloed van percolaat op doorlatendheid klei

Percolaat bevat zowel zwevende stoffen als opgeloste stoffen. Zwevende stoffen verlagen de doorlatendheid omdat poriën worden geblokkeerd (Metzger et al., 1983; Finno and Schubert, 1986; Albiker, 1986; Miller et al., 1985, Rowsell et al., 1985). Afname met een factor 10-100 is mogelijk.

4.2.2.1 Invloed anorganische verbindingen op de doorlatendheid

De invloed van de aard en samenstelling van de testvloeistof is door verschillende onderzoekers bepaald. In tabel 4 staan resultaten van Heling en Klapperich (1987) en in tabel 5 resultaten van Meseck en Reuter (1985). Het totaal doorstroomd volume is 50 keer het poriënvolume en de doorlatendheid is bij een gradiënt van 500 bepaald.

Tabel 4 Doorlatendheid van verweerde löss en "Keuper-mergel" met 30% lutum, specifiek oppervlak en percolaat samenstelling bij doorstroming met verschillende soorten anorganische testvloeistof

Testvloeistof	Doorlatendheid ($\cdot 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$)	Specifiek oppervlak ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Samenstelling uitstromende vloeistof ($\cdot 10 \text{ mg.l}^{-1}$)	
			Si ⁴⁺	Al ³⁺
H ₂ O	1,8	36,6		
1n NaCl	2,5	38,0		
1n KCl	2,6	38,7		
1n NH ₄ Cl	2,0	39,0		
0,5N Al(NO ₃) ₃	1,5	44,8		
0,5N CuSO ₄	0,8	38,1		
0,01N Na ₂ P ₂ O ₇	0,5	37,2		
1N NaOH	1,0	18,9	8	4
1N KOH	1,8	21,9	8	3,5
1N H ₂ SO ₄	2,1	64,6	1	10
1N HCl	1,9	57,5	1	10

Uit tabel 4 blijkt dat de kristalstructuur van löss en "Keuper-mergel" door logen wordt aangetast, wat blijkt uit het vrijkomen van silicium en aluminium. Dit resulteert in een kleiner specifiek oppervlak van de kleimineralen. De doorlatendheid van kaolinite-achtige mineralen blijkt volgens tabel 5 onder invloed van anorganische logen enorm toe te nemen. Dit effect is veel kleiner bij illieten en nog geringere mate bij montmorilloniet.

Anorganische zuren hebben een relatief gering effect op de doorlatendheid van kaolinit, maar een grote invloed op de doorlatendheid van illiet en montmorilloniet. De invloed van meerwaardige ionen (Al^{3+}) lijkt volgens Heling en Klapperich (1987) verwaarloosbaar. Mogelijk speelt het relatief groot specifiek oppervlak van het onderzocht materiaal een rol, waardoor de adsorptiecapaciteit en het volume immobiel water veel groter is dan in de andere proeven. Het verschil tussen het effect van 1 N NaCl en 0,01 N $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een dunnere diëlectrische dubbellaag bij de natriumchloride-oplossing dan bij de veel meer verdunde natriumdifosfaatoplossing.

Tabel 5 Doorlatendheid van drie natuurlijke kleien in relatie tot samenstelling testvloeistof

Testvloeistof	Doorlatendheid ($10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$)		
	kaolinit	illiet	montmorilloniet
Gedest. water	9,5	47	11
Anorg. loog	2300	950	40
Org. zuur	600	480	103
Anorg. zuur	33	380	185
opl. v. zouten van zw. metalen	17	180	22
Neutrale zoutopl.	160	-	31
Synth. percolaat I	100	330	13
Synth. percolaat II	65	-	29
Zuur percolaat	-	60	-
Alkalisch percolaat	-	109	-

Uit langdurige proeven blijkt dat dat percolaat een beperkte (Oosterom, 1990) tot geen (Koenis en Loovers, 1991) invloed heeft op de doorlatendheid.

Ustrich (1991) concludeert uit onderzoek aan verschillende kleisoorten dat voor de beoordeling van de duurzaamheid van minerale afdichtingslagen onderscheid moet worden gemaakt tussen montmorilloniehoudende en -arme kleien. Montmorilloniet toont onder invloed van verdunde electrolietoplossingen dispersie en zwelverschijnselen; bij inwerking van hogere zoutconcentraties en zware metaalionen en koolwaterstoffen met lange ketens overheerst agregatie, waardoor de effectieve porositeit (iets) toeneemt. De invloed van percolaat op de doorlatendheid is niet groot. Een zelfde conclusie trekken Finno en Schubert (1986) uit een drie jaar durend experiment, waarbij de concentratie van organische oplosmiddelen in het percolaat gering was. Ook hebben deze onderzoekers een neerslag van verbindingen van verschillende metalen aangetoond in het grensvlak tussen afval en de kleionderafdeling.

4.2.2.2 Invloed organische verbindingen op de doorlatendheid

De dikte van de diëlectrische dubbellaag heeft invloed op de effectieve porositeit. Naarmate deze porositeit geringer is, is ook de doorlatendheid voor water geringer. De

dikte van de dubbellaag wordt beïnvloed door de diëlectrische eigenschappen van de vloeistof waarin de klei zich bevindt. De dikte van deze laag is recht evenredig met de wortel uit de diëlectrische constante van de vloeistof. De effectieve porositeit is recht evenredig met de dikte van de dubbellaag en de doorlatendheid ongeveer evenredig met het kwadraat van de porositeit. De diëlectrische constante van water is ca. 80, van methanol 32, van diethylether 4,4 en van n-hexaan 1,9. Juist omdat de diëlectrische constante van sommige organische verbindingen zo gering is, mag worden verwacht dat deze een nadelige invloed hebben op de doorlatendheid. De invloed blijkt vooral uit de vorming van (krimp) scheurtjes (Anderson et al., 1985).

Tabel 6 *Invloed van verschillende organische oplossingen op doorlatendheid klei (volgens Goldman et al., 1990)*

Testvloeistof	Invloed op doorlatendheid (t.o.v. water)
ALIFATISCHE EN AROMATISCHE HYDROCARBONATEN	
* heptaan	+ 3 keer
* benzeen	+/- (kaolinet) zeer veel groter (potklei-achtig)
* xyleen	+/- 0,5 keer
* xyleen/ aceton	+ 1,5 keer
* kerosine	+ 3-4 keer
* nafta	vele keren
* diesel	+ 2-3 keer
* paraffine- olie	+ 2 keer
* motorolie	+ 2-3 keer
ETHERS	
* dioxaan	+ 1,3 keer
KETONEN	
* aceton	beperkte meetduur, zichtbare scheuren
ALCOHOLEN, GLYCOL, FENOLEN	
* methanol	+/- tot zichtbare krimpscheuren
* isopropyl- alcohol	+/- tot + 2 keer
* glycerol	+
* ethyl- alcohol	geleidelijke toename (smectieten)
* fenol (949 mg.l ⁻¹)	+/-
AMINEN	
* aniline	zichtbare krimpscheuren
* pyridine	zeer veel groter
GECHLOREERDE ALIFATEN	
* koolstof- tetrachloride	+/- (zeer korte proef)
* trichloor- ethyleen	geringe toename, proef van beperkte duur
ANDERE	
* azijnzuur	- (proef van beperkte duur)
* nitrobenzeen	zeer veel groter, +/- 2 keer (kaolinet)

Uit onderzoek van Komodromos en Göttner (1986) blijkt dat de doorlatendheid van klei (muskoviet-illiet en calciëtmuskoviet-illiet) nauwelijks verandert als methanol of n-hexaan als testvloeistof wordt gebruikt. De proef met hexaan werd echter wegens het ontbreken van voldoende testvloeistof afgebroken, zodat de conclusies niet correct zijn.

Goldman et al., 1990, geven een overzicht van doorlatendheidsproeven met uiteenlopende soorten testvloeistof. De resultaten zijn samengevat in tabel 6.

De invloed van organische oplossingen op de doorlatendheid van kleien in tabel 6 is bepaald voor de zuivere stof. Als organische verbindingen oplosbaar zijn in water, komen ze in percolaat sterk verdund voor, waardoor hun invloed verwaarloosbaar is. Niet in water oplosbare organische verbindingen (heptaan, xyleen) zullen plaatselijk in onverdunde vorm in contact komen met afdichtingsmaterialen en de doorlatendheid beïnvloeden zoals in bovenstaande tabel is aangegeven.

4.3 Beoordeling materialen

4.3.1 Criteria

De bruikbaarheid van afdichtingsmaterialen wordt beoordeeld op basis van de volgende criteria:

- de waterdoorlatendheid;
- diffusie eigenschappen;
- het gedrag in contact met percolaat (anorganische en organische componenten);
- duurzaamheid;
- adsorptiecapaciteit anorganische en organische stoffen;
- gevoeligheid voor deformatie (alzijdige rek);
- verkrijgbaarheid;
- uniformiteit;
- verwerkbaarheid;
- kwaliteitsmeting in het werk.

De *waterdoorlatendheid* is de belangrijkste eigenschap van afdichtingsmaterialen. In constructies moet echter een weerstand tegen stroming worden aangebracht, waarbij een bepaalde flux niet wordt overschreden bij een bepaald (water)drukverschil ter weerszijden van de afdichtingslaag. Deze weerstand is evenredig met de laagdikte en omgekeerd evenredig met de waterdoorlatendheid.

De *diffusie* van opgeloste stoffen door een minerale afdichtingslaag wordt bepaald door de bewegelijkheid van die stoffen in water. Deze "bewegelijkheid" wordt gekarakteriseerd door een diffusiecoëfficiënt. Deze is gedefinieerd als de hoeveelheid opgeloste stof die per tijdseenheid (seconde) een dwarsdoorsnede van 1 m^2 passert als de concentratiegradiënt gelijk is aan 1. Deze gradiënt is gedefinieerd als het verschil tussen de concentraties op twee plaatsen gedeeld door de afstand tussen die plaatsen. De diffusiecoëfficiënt van een bepaalde stof in de bodem wordt bepaald door de diffusiecoëfficiënt van deze stof in water ($1\text{--}2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), de porositeit van de afdichtingslaag (0,3-0,4), de fractie van de met watergevulde poriën en de poriëngeometrie. De vaste bodemdeeltjes vormen obstakels voor stoftransport. De stof moet als het ware om de deeltjes heen en legt daardoor een langere weg af dan in een zuivere waterige oplossing. Hierdoor lijkt het alsof de diffusiecoëfficiënt kleiner is dan in zuiver water. Om hiermee rekening te houden wordt een factor ingevoerd, die de labyrint-factor of "tortuositeit" wordt genoemd en ongeveer 0,2-0,5 bedraagt. De schijnbare diffusiecoëfficiënt is het produkt van de diffusiecoëfficiënt van een bepaalde stof in water, de porositeit en de tortuositeit. Transport door diffusie verloopt langzaam en is alleen op een zeer lange termijn (honderden tot duizenden jaren) van belang. Uit

lokaal te verrichten analyses zal moeten worden bepaald of emissie door diffusie acceptabel is. Is dat niet het geval, dan zijn extra voorzieningen nodig (hydrologische isolatie, adsorberende lagen).

Het gedrag in *contact met anorganische of organische componenten* kan van belang zijn bij bepaalde afvalstorten. Als relatief veel organische componenten of relatief hoge concentraties anorganische zouten worden verwacht, zal eerder worden gekozen voor de meer inerte materialen (bijvoorbeeld löss). Worden daarentegen anorganisch loog of organische zuren verwacht dan kan beter een montmorilloniet-houdend materiaal worden gekozen.

Onder *duurzaamheid* van materialen wordt verstaan de tijdsduur dat de oorspronkelijke eigenschappen behouden blijven. De kwaliteit van het materiaal kan worden aangetast door deformatie, verandering van kristalstructuren onder invloed van inwerking van percolaat, krimp van kleihoudende materialen door vochtonttrekking of onder invloed van percolaat en micro-organismen. Voor minerale stoffen geldt dat ze zelf vaak het eindproduct zijn van zeer langzaamverlopende processen, waardoor het niet waarschijnlijk is dat de kwaliteit snel zal veranderen.

Adsorptie van stoffen door afdichtingslagen of speciale adsorptielagen kan van belang zijn bij tijdelijke opslag van stoffen. De adsorptie van anorganische componenten is afhankelijk van de pH, temperatuur, redoxpotentiaal, kation-uitwissel-capaciteit. Er bestaat bij lage concentraties van stoffen in de bodemoplossing een evenwicht tussen die concentratie en de geadsorbeerde hoeveelheid aan bodemdeeltjes. De adsorptiecapaciteit van organische stoffen hangt af van de aard van de stof. Bepaalde organische stoffen worden waarschijnlijk door asfalt gebonden. Een met organische kationen gemodificeerde klei is in staat apolaire stoffen (pentachloorfenol, hexachloor-cyclohexaan) te binden (De Bree, 1990). Toevoeging van 2% van deze klei aan een een klei-achtige afdichtingslaag doet de retardatiefactor (een maat voor de immobiliteit van een stof in een bepaald medium) van die laag met meer dan een factor 20 toenemen.

De gevoeligheid voor *deformatie* (alzijdige rek) is van belang op zettingsgevoelige gronden. Er is een beperkt inzicht in de samenhang tussen vervorming van minerale materialen en de doorlatendheid. Materialen met een relatief grote plasticiteitsindex (verschil in vochtgehalte bij vloeigrens en uitrolgrens) zullen waarschijnlijk ongevoelig zijn voor deformatie. Gelijkmatige verdeelde zettingsverschillen van enkele decimeters over een afstand van 1 meter betekent een rek van hooguit 3%. Op abrupte overgangen en bij ongelijkmatige bovenbelasting kan de rek lokaal veel groter zijn. Grondlagen op of onder afdichtingslagen fungeren meestal als drukverdelingslagen en voorkomen ongelijkmatige belastingen. Een rek van 5% betekent een zeer ongelijkmatige zetting.

De *verkrijgbaarheid* is van belang als inlandse kleien worden overwogen. De beschikbare hoeveelheid, de afstand tot de groeve in verband met transportkosten zijn belangrijke factoren.

De *uniformiteit* van het materiaal is van belang omdat uit vooronderzoek de geschiktheid moet blijken. Niet-uniform materiaal vereist in principe een intensievere kwaliteitscontrole, terwijl de kans groter wordt dat afwijkingen niet worden geconstateerd. Bij een grote variatie in kwaliteit bestaat de kans dat tijdens de uitvoering vaker materiaal wordt afgekeurd dan bij uniform materiaal. Dit werkt kostenverhogend en remmend op de voortgang van het werk. Soms kunnen malen en mengen de

uniformiteit van natuurlijke kleien vergroten.

Verwerkbaarheid houdt verband met de hoedanigheid en gedrag van het materiaal tijdens de constructie onder invloed van omgevingsfactoren (temperatuur, neerslag, wind, zonneschijn). Folies worden bij lage temperaturen stug en zelfs bros, terwijl het leggen bemoeilijkt wordt door veel wind. Klei, aangevoerd in grote brokken, laat zich bijvoorbeeld minder gemakkelijk tot een uniforme laag verwerken dan wanneer dezelfde klei gemalen en in zeer kleine aggregaten wordt geleverd. Droge klei kan niet tot een plastische laag worden verwerkt, terwijl een te natte klei blijft kleven aan de werktuigen. Leemhoudend zand vormt bij uitdroging harde kluiten. Gebruik van zulk materiaal voor het maken van zand-bentonietmengsels kan de menguniformiteit nadelig beïnvloeden.

De kwaliteit van het geleverd werk is beter naarmate de *kwaliteitscontrole* intensiever en sneller gebeurt. Controle op lekken in lasnaden van folies verloopt aanmerkelijk sneller (uren/dagen) en wordt daarom uitvoeriger gedaan dan meting van de doorlatendheid van minerale afdichtingslagen (weken). Bij industrieel vervaardigde produkten kunnen betrekkelijk eenvoudig keuringen op grondstoffen en controles tijdens en na de produktie worden uitgevoerd. Certificering van zulke produkten is mogelijk.

4.3.2 Kwaliteitskenmerken van verschillende materialen

De levensduur van folies is niet bekend. Onder invloed van organische verbindingen kunnen de sterkte-eigenschappen worden aangetast (Haxo et al. 1985). "High Density Poly Ethylene" (HDPE) wordt vooral sterk aangetast door enkele halogene koolwaterstoffen (produktinformatie Geotechnics Holland BV). Bij ongelijkmatige zetting van de bodem kunnen verzwakte folies scheuren, bij grote verschilzettingen scheuren alle folies. Volgens een grootschalig onderzoek van het USA-EPA lijkt de levensduur zeker 25 jaar te zijn (ERTEC, 1983, geciteerd door Schevon en Damast, 1986).

Tijdens de aanleg worden fouten gemaakt waardoor de afdichting niet volledig is. Door Bass et al. (1985) en Parkinson (1991), werd gevonden, dat 10 van de 27 onderzochte onderafdichtingen lekten. Parkinson (1991) stelt, dat 10 tot 20 gaten per ha in een geomembraam verwacht mag worden bij een goede uitvoering. Meer dan 30 gaten worden gezien als een slechte uitvoering. Het aantal geconstateerde gaten is geringer naarmate de controle tijdens de uitvoering intensiever is.

Geomembranen zijn goed verkrijgbaar, zijn van een constante kwaliteit en worden tijdens de produktiefase voortdurend gecontroleerd. De verwerkbaarheid is goed en controle na aanleg is goed geregeld. Geomembranen zijn waterondoorlatend en dicht voor opgeloste anorganische verbindingen. Lipofiel organische verbindingen permeëren gemakkelijk door dit materiaal. De weerstand tegen alzijdige rek is beperkt (< 5%). De adsorptiecapaciteit voor opgeloste anorganische verbindingen is nihil. Folies zijn op grote schaal toegepast op stortterreinen.

Asfaltbeton is een uniform produkt waarvoor bij toepassing in de waterbouw keurings- en acceptatiecriteria bestaan. Olie en aardolie-derivaten kunnen de kwaliteit aantasten. De verwerkbaarheid is goed. Al bij beperkte ongelijkmatige zettingen kunnen scheuren optreden. Zeer langzaam verlopende deformaties schijnen te kunnen worden opgevangen. In Nederland is geen ervaring met toepassing onder stortterreinen opgedaan, wel in Zwitserland en op beperkte schaal in Duitsland.

Inlandse minerale materialen zijn doorlatend voor water en alle opgeloste stoffen. De doorlatendheid lijkt behouden te blijven in contact met percolaat uit overwegend huishoudelijk afval. De verkrijgbaarheid is potentieel niet beperkt, het ontbreken van voldoende winplaatsen met de vereiste vergunningen beperkt in Nederland de beschikbaarheid. De afstand tussen bouwplaats en winning mag niet al te groot zijn om vochtverlies tijdens transport te voorkomen en om transportkosten te beperken. De uniformiteit is beperkt. Om een uniform produkt te maken zal het soms nodig zijn om deze materialen te malen en te mengen. De verwerkbaarheid van klei is lastig, van zand-bentoniet daarentegen eenvoudig. De levensduur van deze materialen is groot. Bij voldoende plasticiteit verdragen deze materialen relatief grote deformaties zonder significant functieverlies. Waarschijnlijk krijgen dichte zand-bentoniet lagen bij deformatie een geringere dichtheid. Het is niet bekend of daardoor de doorlatendheid toeneemt omdat in principe de bentoniet nog een rest-zwelcapaciteit heeft die in een dichte pakking niet volledig wordt benut. Controle van minerale lagen na aanleg op de bereikte doorlatendheid is tijdrovend en betreft slechts enkele steekproeven. Door het Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR, commissie C85) wordt op het moment onderzoek gedaan naar mogelijkheden om de meettijden te verkorten. Zand-bentoniet, verschillende kleisoorten en leem zijn toegepast op storterreinen in Nederland en daarbuiten.

Er zijn geen praktijktoepassing bekend van zelfdichtende lagen en deze worden daarom buiten de beoordeling gehouden.

4.3.3 Keuzetabel van afdichtingsmaterialen

Uit laboratorium- en praktijkonderzoek is gebleken dat een aantal materialen geschikt zijn voor de constructie van afdichtingslagen. Welke materialen op een bepaalde locatie het best kunnen worden toegepast, hangt af van de omstandigheden: samenstelling percolaat, zettingsgevoeligheid van de ondergrond, vereiste bodembeschermingsniveau in verband met de kans op verspreiding van stoffen in de bodem.

De waterdoorlatendheid, duurzaamheid en betrouwbaarheid van de materialen zijn van primair belang. Eigenschappen als adsorptievermogen en stoffendoorlatendheid (difusie) kunnen van belang zijn op locaties waar extra voorzieningen nodig worden geacht.

Eigenschappen en kenmerken die in tweede instantie een rol spelen bij de materiaalkeuze zijn beschikbaarheid, verwerkbaarheid, uniformiteit en controlemogelijkheden. De vakbekwaamheid en ervaring van (potentiële) aannemers kan hierbij een belangrijke rol spelen.

Het kostenaspect speelt bij de materialenkeuze een relatief ondergeschikte rol omdat de bescherming van de bodem voorop staat en het uitgangspunt van het bodembeschermingsbeleid (geen emissie) zo goed mogelijk benaderd moet worden.

In tabel 7 is voor elk materiaalkenmerk een relatieve waardering opgenomen. Gekozen is voor een waardering "matig" (" - "), "gemiddeld" (" 0 ") en "beter" (" + "). In enkele gevallen is de waardering "onvoldoende" (" -- ") en "aanmerkelijk beter" (" ++ ") toegekend. Een waardering "matig" en "gemiddeld" betekent dat er andere materialen bestaan die voor dat kenmerk beter scoren.

Tabel 7 Relatieve waardering geschikte afdichtingsmaterialen

Karakteristiek	Leem/ löss	Inl. klei	Zand- bentoniet	Folie	Asfalt- beton
doorlatend	0	0	0	+	+
diffusie	0	0	0	0/+	0/+
percolaat, anorg.	+	0	0	+	+
idem, org.	+	0	0	-	0
duurzaamheid	+	+	+	-/0	0
ads. anorg.	-	+	0	-/0	-/0
idem, org.	-	0	-	+	+
druk/trek	0	++	+	-	--
verkrijgb.h.	-	-	0/+	+	+
uniformiteit	-	-	0	+	+
verwerkb.	-	-	0	+	+
controle	-	-	-	0	++

- = matig; 0 = gemiddeld; + = goed

Inl. klei = Potklei, Boomse klei, Tegelse en Reuverklei, zeeklei

Uit tabel 7 kan worden afgeleid, dat bijvoorbeeld asfaltbeton bij voorkeur niet moet worden toegepast op zettingsgevoelige gronden, terwijl klei daar bij voorkeur toegepast zou kunnen worden. Globaal geldt dat de duurzaamheid en deformatieongevoeligheid van minerale afdichtingsmaterialen beter is dan van kunstmatige materialen. Voor de verkrijgbaarheid, verwerkbaarheid, uniformiteit en controlemogelijkheden scoren kunstmatige materialen beter dan de minerale.

5 AFDICHTINGSCONSTRUCTIES

Een (onder)afdichtingsconstructie is het geheel van technische voorzieningen om emissies naar de bodem te remmen of tegen te gaan. Gecontroleerde percolaatafvoer speelt een rol bij het laag houden van het vloeistofniveau in het afval. De functie van de voorzieningen betreft het remmen of voorkomen van de stroming van water en diffusie van opgeloste stoffen door isolerende voorzieningen. Met constructies en de daarbij gebruikte materialen moet worden bereikt, dat:

- in principe emissie naar de bodem wordt voorkomen;
- op elke locatie de bodem in gelijke mate is beschermd;
- de onderafdichting ook na het aanbrengen van de bovenafdichting nog geruime tijd blijft functioneren;
- percolaatdrainage en -opvang mogelijk blijven bij verstopping van alle drains en gedeeltelijke verstopping van de drainlaag;
- controle op lekkages mogelijk is;
- de omvang van eventuele bodemverontreiniging beperkt en beheersbaar is.

De huidige isolatiematerialen zijn geen van alle absoluut dicht zodat er een (beperkte) emissie naar de bodem zal optreden. De omvang van zo'n emissie wordt bepaald door de technische mogelijkheden van het moment. Bij de keuze van de isolatievoorzieningen kunnen ook financiële overwegingen mogelijk een rol spelen.

In principe zal op elke locatie eenzelfde niveau van bodembescherming moeten worden gerealiseerd. Daarbij gaat het niet alleen om emissies, maar ook om de omvang van de verspreiding van stoffen in de bodem, de mogelijkheden om lekken te signaleren en de mogelijkheid om de verspreiding te beperken. Als referentie voor het beschermingsniveau geldt een stortterrein in een gebied, waarin geen significante zettingen optreden, een kwelsituatie bestaat, de stortzool (onderzijde afvalberg) zonder extra ophogingen minstens 0,7 m boven de gemiddeld hoogste grondwaterstand ligt, geen onderbemaling nodig is om een bepaald peil te handhaven en de controledrains uitmonden onder polderpeil (bij zuurstoftoetreding in de drains kunnen bepaalde stoffen oxideren, neerslaan en verstopping veroorzaken, Bass, 1985). De onder- en bovenafdichting bestaat uit een folie op een minerale afdichtingslaag. Uit modelberekeningen (Boels et al., 1993) is gebleken dat onder deze condities de indringingsdiepte van de verontreiniging in de bodem onder het stort hooguit enkele meters bedraagt en dat de verontreiniging in een zone van enkele tientallen meters naast het stort naar de ontwateringsmiddelen stroomt en verdund in het oppervlaktewater terechtkomt. Daar treedt ook weer verdunning op. Bij relatief geringe belasting van het oppervlaktewater (dus groot debiet in de waterloop en geringe hoeveelheid verontreinigd grondwater) zal waarschijnlijk de kwaliteit van het oppervlaktewater aanvaardbaar blijven. In dit verband is een ligging van een stortterrein in de nabijheid van waterlopen met relatief hoge debieten gunstig.

Als op een bepaalde locatie dit referentie-beschermingsniveau niet kan worden bereikt, zullen extra voorzieningen nodig zijn of moet een andere, beter geschikte locatie worden gezocht.

Minerale afdichtingen worden ontworpen voor bepaalde randvoorwaarden. Voor bovenafdichtingen geldt dat bij afwezigheid van een folie, met aan de bovenzijde van de afdichtingslaag een waterkolom van 0,5 m en een onderdruk aan de onderzijde van

0,5 m waterkolom, er gedurende 200 dagen (=ongeveer de duur van neerslagoverschot) niet meer dan 20 mm water door een afdichtingslaag met een effectieve dikte van 0,25 m mag stromen. De doorlatendheid bedraagt dan $1-3 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Deze doorlatendheid blijkt onder praktijkomstandigheden te kunnen worden gerealiseerd (Boels, 1990; Boels en Wiebing, 1990).

Daarentegen wordt bij onderafdichtingen het gehele jaar een waterstand boven de afdichting aangetroffen. De hoogte ervan hangt af van het afvoerend vermogen van de percolaatdrainage en de hoeveelheid neerslag die niet door het afval wordt geabsorbeerd en tot afstroming komt. Gedurende de stortfase zal de percolaatdrainage nog goed werken zodat waarschijnlijk de benodigde hoogte van de vloeistofkolom de voor de percolaatvoer midden tussen de drains minder zal zijn dan 0,5 m. De drukhoogte aan de bovenzijde van de onderafdichting zal daarom hooguit 0,5 m waterkolom bedragen. De situatie aan de onderzijde van de afdichtingslaag wordt bepaald door de bodemeigenschappen en de gemiddelde grondwaterdiepte. Deze laatste moet minstens 0,7 m onder de stortzool liggen. Bij een drainlaag van 0,3 m, een dikte van de minerale afdichtingslaag van 0,3 m, is de onderdruk aan de onderzijde van de afdichtingslaag minder dan 0,1 m waterkolom. Veiligheidshalve kan hiervoor een waarde van 0,3 m worden gekozen. Onder deze condities zal bij afwezigheid van een folie, de emissie door een minerale laag met een doorlatendheid van $1-3 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$, jaarlijks 12-35 mm bedragen, wat gemiddeld meer is dan de flux die bij het dimensioneren van de bovenafdichting wordt gehanteerd. Omdat voorlopig niet wordt verwacht dat nog geringere doorlatendheden in het veld realiseerbaar zijn, is een folie als extra afdichtende laag nodig.

5.1 Ontwerp percolaatdrainage

De drainagelaag moet zo'n dikte en doorlatendheid hebben dat de stijghoogte van het percolaat in het midden van het stort beperkt blijft als alle drainbuizen verstopt zijn en de doorlatendheid van de drainlaag aanzienlijk is gereduceerd. De vereiste transportcapaciteit van de drainlaag, die onder een hoek α ligt, is:

$$KD > \{N.L^2\} \cdot \{\Delta h \cdot \cos \alpha + L \cdot \sin \alpha\}^{-1}$$

hierin is:

KD = transmissiviteit drainlaag ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)

K = (oorspronkelijke) doorlatendheid drainlaag ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)

D = dikte drainlaag (m)

N = gemiddelde infiltratie door bovenafdichting ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)

L = halve diameter/breedte afvalstort (m)

Δh = opbolling waterspiegel t.o.v drainlaag ($< 0,5$ m) (m)

α = hellingshoek drainlaag (graden)

Bij een gemiddelde infiltratie bij afwezigheid van een bovenafdichting van $0,001 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, een halve breedte van het afval stort van 150 m, een helling van de drainlaag van 0,001 ($\sim 0,06$ graden), een 0,3 m dikke drainlaag en een opbolling van 0,5 m, is de vereiste doorlatendheid van de drainlaag minstens $115 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Zou de opbolling 2,0 m mogen zijn, dan is de vereiste doorlatendheid nog $35 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Deze hoge doorlatendheden zijn nauwelijks te realiseren met een zandlaag. Met grof grind en puin lukt het waarschijnlijk wel. Deze materialen mogen niet direct op folies worden gestort, een drukspreidingslaag

is daarbij nodig. Bij een goed-functionerende bovenafdichting is de infiltratiesnelheid door een minerale bovenafdichting minder dan 10 mm per jaar. De vereiste (oorspronkelijke) doorlatendheid van de drainlaag zou dan minstens 7 m.d^{-1} moeten zijn bij een opbolling van 0,5 m en 2 m.d^{-1} bij een opbolling van 2,0 m. Met zand zijn deze doorlatendheden te realiseren. Dit rekenvoorbeeld illustreert dat met een goed functionerende bovenafdichting percolaatophoping in het afvalstort kan worden voorkomen, zelfs in situaties waarin de percolaatdrainage voor een belangrijk deel is uitgeschakeld. De percolaatopvang langs de rand van het stort moet echter wel blijven functioneren.

Uit voorgaande (voorbeeld)berekeningen kan worden geconcludeerd, dat de hoogte van de vloeistofkolom boven de onderafdichting niet groter zal zijn dan 0,5 m en dat aan de onderzijde een onderdruk van 0,3 m waterkolom aannemelijk is. Zou geen folie worden toegepast, terwijl de percolaatdrainage matig en de bovenafdichting goed functioneert, dan zal ca. 80% van de lekverliezen door de bovenafdichting door de onderafdichting naar de bodem stromen.

Om de minerale onderafdichting te dimensioneren, kan worden uitgegaan van een laag water van 0,5 m aan de bovenzijde en een onderdruk van 0,3 m waterkolom aan de onderzijde van de onderafdichting. Onder die condities zou de flux geringer moeten zijn dan 20 mm per jaar.

5.2 Combinatie van geomembraan en minerale lagen

Sinds 1970 worden in de VS van Amerika geomembranen en minerale afdichtingslagen gebruikt om stortplaatsen aan de onderzijde af te dichten (Schevon en Damast, 1986). Hierbij ligt een flexibele geomembraan (dikte 0,76 mm) op een kleilaag van ca. 0,9 m. De doorlatendheid van de kleilaag moet geringer zijn dan $1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Verschillende constructies zijn hiervoor gangbaar (fig. 2).

De minerale (onder-)afdichtingslaag fungeert tijdens het stortbedrijf als een secundaire barrière. Een lekdetectie drain ligt hierop. Als de eerste folielaag defect raakt, kunnen de controledrains de functie van de percolaatdrains geheel of gedeeltelijk overnemen. Steffen (1990) beveelt aan om het flexibele geomembraan direct op de minerale afdichtingslaag te leggen. Als het geomembraan defect raakt (scheuren) blijft een groot deel van deze laag bedekt met de folie en is de gemiddelde, schijnbare doorlatendheid kleiner dan de werkelijke doorlatendheid van de minerale laag.

Bij afval- en reststofbergingen is de laagopbouw onder het geomembraan van belang als een relatief hoge temperatuur in het gestort materiaal wordt verwacht. Door warmteafgifte naar de omgeving ontstaat een temperatuursgradiënt waardoor waterdamp in de richting van lagere temperaturen diffundeert waar het condenseert. Holzhohner (1988) maakt aannemelijk dat een onderafdichtingslaag onder een geomembraan kan uitdrogen als deze laag op een laag met grove textuur ligt. Ligt deze laag daarentegen op een laag met een fijne textuur, dan is uitdroging niet waarschijnlijk (Collins et al., 1988).

De effectiviteit van een folie op een minerale laag wordt bepaald door het aantal en de oppervlakte van de gaten in de folie, de doorlatendheid van de minerale laag en de stijghoogte gradiënt over deze laag. Bij een goed-functionerende afdichting is het aantal

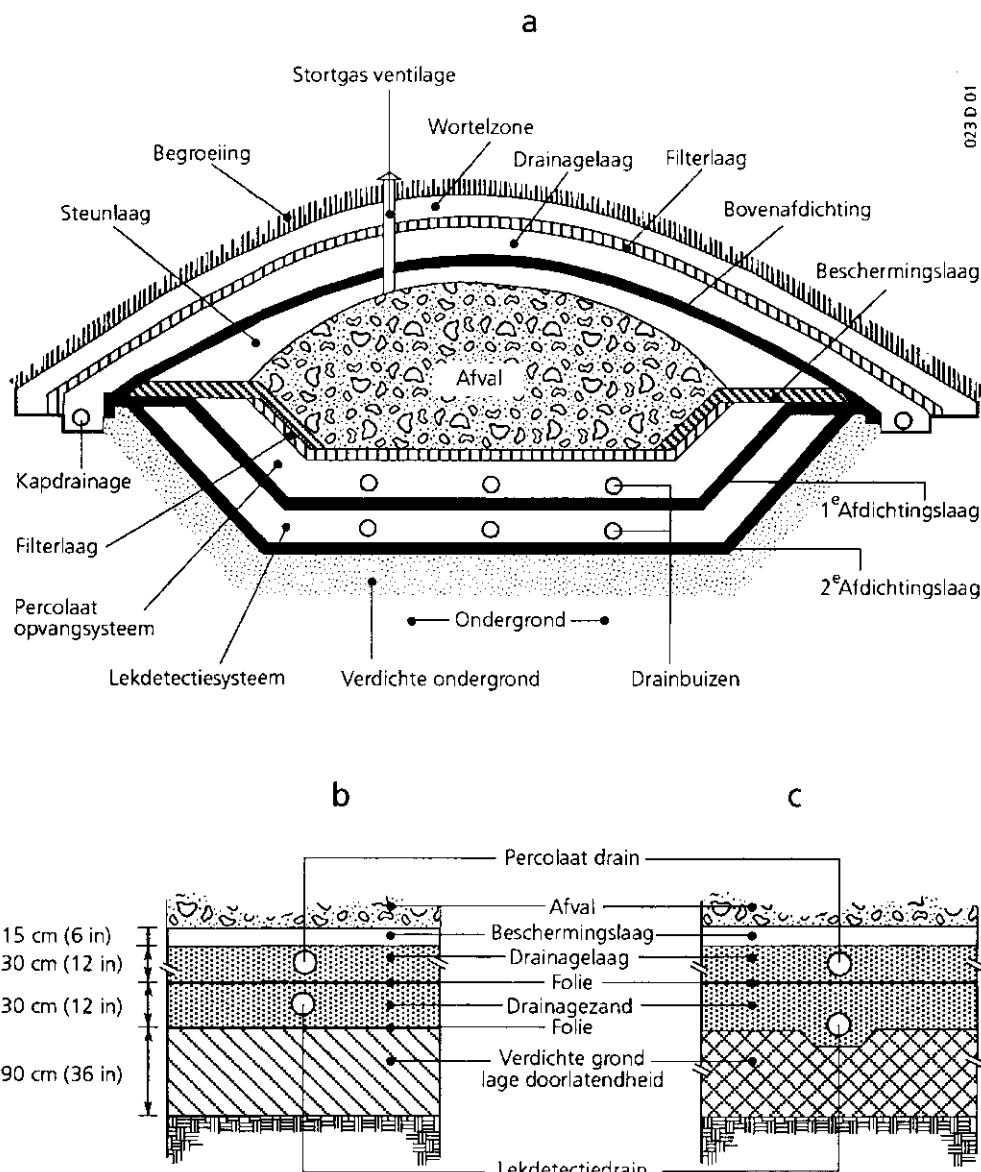


Fig. 2 Constructies van onderafdichtingen met geomembranen en minerale lagen (naar Schevon and Damast, 1986)

a- boven en onderafdichting stortplaats

b- onderafdichting met twee geomembranen

c- onderafdichting met geomembraan in drainage laag

lekken gering. Bij bijvoorbeeld 20 gaten per ha met elk een oppervlak van $0,01 \text{ m}^2$, een goed functionerende percolaat-drainage (stijghoogtes kleiner dan $0,5 \text{ m}$) en een doorlatendheid van een $0,3 \text{ m}$ dikke minerale laag van $5 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ is het lekverlies geringer dan 1 mm per jaar. Bij een slechter functionerende percolaatdrainage waarbij het niveau van het percolaat bijvoorbeeld tot een hoogte van 2 m boven de afdichting is gestegen, de doorlatendheid van de minerale laag is toegenomen tot 10^{-9} m.s^{-1} en de gaten in de folie 1% van de oppervlakte innemen als alle lasnaden van 4 m brede banen zijn gescheurd, die vervolgens 4 cm uit elkaar zijn getrokken, dan wordt een jaarlijks lekverlies ca. 4 mm verwacht. Ter plaatse van de lekken is de flux veel groter ($\sim 400 \text{ mm}$ per jaar).

Uit de voorbeelden blijkt dat lekkages beperkt blijven als een combinatie van folie en minerale afdichting wordt toegepast. De doorlatendheid van de minerale laag moet bij een dikte van 0,3 m minder dan $10 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ zijn.

Ook kunnen afdichtingen als een sandwichconstructie worden uitgevoerd. De minerale laag is daarbij ingesloten tussen twee lagen folie. Zaslavsky (1980) toont aan dat zelfs als de folies niet worden gelast de lekverliezen verwaarloosbaar zijn uit een waterreservoir met een waterdiepte van ettelijke meters. De aansluitingen tussen de

banen folie aan de bovenzijde mogen bij deze constructie niet tegenover de aansluiting van de banen aan de onderzijde liggen. Deze zijn verspringend aangebracht, zodat de afstand er tussen gelijk is aan de halve breedte van de foliebanen. Weglekkend water dringt de minerale laag binnen door de opening tussen de bovenste foliebanen, stroomt vervolgens horizontaal door de minerale laag en treedt door de opening tussen de onderste foliebanen naar buiten. Het "stromingspad" is daardoor verlengd; het lijkt alsof de minerale laag erg dik is (~ halve breedte van de foliebanen). Omdat bovendien maar een deel van de oppervlakte in contact staat met de minerale laag (schijnbaar een strook ter dikte van de minerale laag per baanbreedte van de folie), lijkt het alsof er een minerale laag is aangebracht met een dikte van een halve foliebaan en een doorlatendheid die slechts een fractie is van de werkelijke doorlatendheid van de minerale laag. Deze fractie is de verhouding tussen de (werkelijke) dikte van de minerale laag en de halve breedte van de foliebaan. Bij een stijghoogte van het percolaat van 2 m boven de afdichtingslaag, een minerale laag van 0,3 m met een doorlatendheid van 10^{-9} m.s^{-1} en foliebanen van 4 m aan beide zijden van de minerale laag (open naden), is het maximale percolatieverlies 5 mm per jaar als wordt aangenomen dat ter plaatse van de folieaansluiting de doorlatendheid van de minerale laag zeer groot is.

Deze constructie kan worden overwogen voor tijdelijke opslag van afval of reststoffen op locaties waar slechts met beperkte middelen en ter plaatse beschikbare, matig-geschiedte minerale afdichtingsmateriaal een onderafdichting kan worden gemaakt. Een stabiele ondergrond tijdens de aanleg is hierbij een voorwaarde, omdat anders al tijdens het verdichten van de minerale laag de onderste folielaag kan worden beschadigd.

5.3 Capillaire barrières

De doorlatendheid van poreuze materialen wordt bepaald door het volume en de geometrie van de poriën die bijdragen aan het watertransport (doorlatendheid). Een lage doorlatendheid wordt meestal verkregen door het effectief poriënvolume te beperken (verdichting) en de geometrie te wijzigen (verkneding/deformatie). Daarbij wordt stilzwijgend aangenomen dat alle poriën aan het transport bijdragen, dus met water zijn gevuld. Is echter een deel van de poriën gevuld met lucht, dan neemt het effectieve poriënvolume af en daardoor ook de doorlatendheid. Grond boven de grondwaterspiegel is niet met water verzadigd, bevat lucht en heeft daarom een geringere doorlatendheid dan de verzadigde grond. De (onverzadigde) doorlatendheid van grof zand (bijvoorbeeld Veluwezand) waarvan slechts 50% van de poriën met water is gevuld, is ca. $5 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$, terwijl deze bij verzadiging ca. $3 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ is. Hiervan kan gebruik worden gemaakt om "vloeistofdichte" lagen, ook wel aangeduid als capillaire barrières, te maken. Zo'n barrière bestaat uit een laag grond die in onverzadigde toestand (vergelijkbaar met de toestand boven de grondwaterspiegel) een goede doorlatendheid heeft en percolaat of neerslagoverschot zijdelings (onder een zekere helling) afvoert naar een drain. Deze laag

ligt op een andere laag grond die in de onverzadigde toestand een een zeer lage doorlatendheid heeft (bijvoorbeeld grof zand, grint). Deze laag wordt zo droog mogelijkgehouden.

Door Rasmuson en Eriksson (1988), Wohnlich (1990) en Von der Hude (1991) is het principe van de capillaire barrière theoretisch en praktisch (schaalmodellen) onderzocht. De onderzochte constructies bestaan uit een laag met een goede onverzadigde doorlatendheid (fijne textuur) op een laag met een slechte onverzadigde doorlatendheid (grove textuur). Percolaat wordt in de bovenste laag door de onverzadigde zone afgevoerd naar een drain. In de buurt van de drain raakt de bodem verzadigd. Het grensvlak moet in de richting van de drain hellen. De drain ligt op een gootvormige ondoorlatende laag om weglekken van de vloeistof naar de tweede laag te voorkomen (fig. 3).

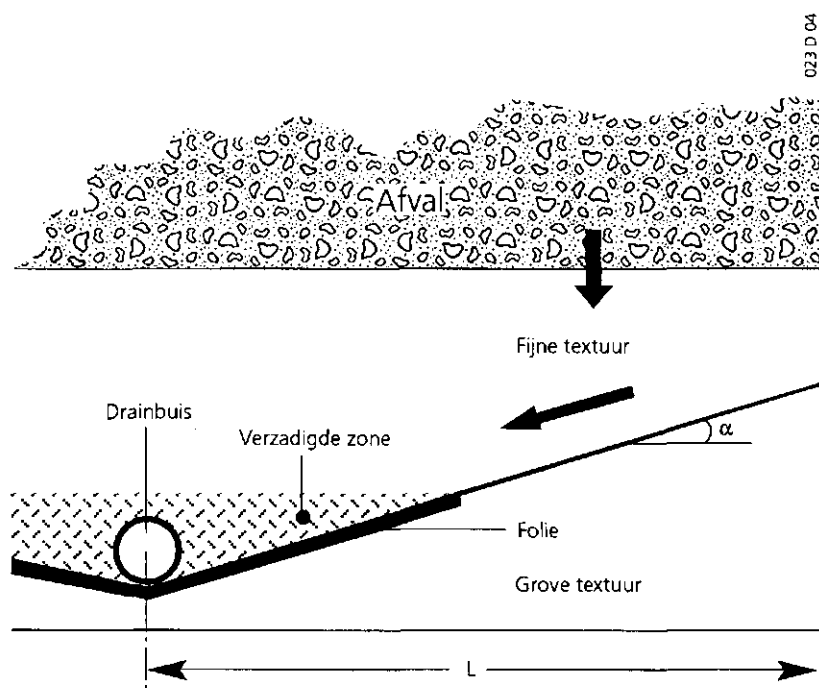


Fig. 3 Dwarsdoorsnede isolatie volgens het principe van de capillaire barrière

De (onverzadigde) doorlatendheid in de onderste laag is kleiner naarmate het vochtgehalte geringer is. Het vochtgehalte in deze laag kan met een lage vochtspanning worden bereikt (bijvoorbeeld een grote afstand tot de grondwaterspiegel). De percolatie is getalsmatig ongeveer gelijk aan de onverzadigde doorlatendheid van de onderste laag. Bestaat deze uit grof zand dan is het percolatieverlies bij een vochtspanning van - 50 mBar ca. $4 \cdot 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$. Bij een vochtspanning van -30 mBar is het verlies gelijk aan het gemiddeld neerslagoverschot en functioneert de barrière niet. Volgens Rasmuson en Eriksson (1988) zijn deze constructies toepasbaar als de helling van het grensvlak relatief groot is (5%) en de lengte, afhankelijk van de toelaatbare emissie, niet meer dan 5 m. De dimensionering wordt bepaald door de eigenschappen van de twee lagen en het verwachte percolaataanbod vanuit de stort of neerslagoverschot als het een bovenafdichting betreft.

Het principe van de capillaire barrière werkt alleen als in de tweede laag lucht kan toetreden en onverzadigd blijft. Diffusie vanuit de eerste naar de tweede laag blijft

mogelijk, hoewel als gevolg van het onverzadigd karakter van de tweede laag deze als diffusieremmer functioneert. De effectiviteit van deze constructie vermindert als de onderste laag zwaar wordt verdicht en verder door zetting van de ondergrond en door vermenging met materiaal uit de bovenste laag. Er zijn geen praktijkervaring bekend van dit isolatieprincipe.

5.4 Constructies om diffusie te remmen

De samenstelling van het percolaat kan in sommige gevallen zodanig zijn, dat emissie via diffusie door de folie en minerale laag naar het grondwatersysteem niet aanvaardbaar is en geremd moet worden. Diffusie is een langzaam verlopend transportproces, dat optreedt onder invloed van een concentratiegradiënt. De verplaatsingssnelheid van stoffen wordt effectief geremd als de opgeloste stoffen geadsorbeerd worden aan bodembestanddelen. Zodra echter het adsorptiecomplex is verzadigd, stroomt de opgeloste verontreiniging ongehinderd door de bodem. Adsorptie is alleen effectief als de totale adsorptiecapaciteit veel groter is dan de totale emissie van de bewuste stof. In overige gevallen betekent adsorptie alleen vertraging van verspreiding van stoffen.

5.4.1 Diffusieremmende lagen

Geomembranen kunnen worden gerekend tot materialen met een specifieke poriënstelsel. Door hun dichte structuur vormen ze een absolute barrière voor anorganische stoffen maar niet voor lipofiele organische verbindingen (Steffen, 1990, Breen en Der Kinderen, 1992). Dit type verbinding kan de folie als het ware ongehinderd passeren.

Hockley et al. (1991) laten poriën in het grensvlak tussen twee verschillende grondsoorten verstoppert door twee opgeloste stoffen te laten reageren, waarbij een neerslag wordt gevormd. De reactie wordt in gang gehouden door diffusie van de opgeloste stoffen naar het grensvlak. Tritium zou niet door het (dichte) grensvlak diffunderen. De waterdoorlatendheid is niet gemeten. De dichte laag lijkt als diffusieremmer te fungeren.

Volgens Weiss (1989) gedraagt bentoniet zich als een membraan dat bepaalde gehydrateerde anorganische ionen niet doorlaat. Deze bevinding moet met enige twijfel worden gezien, omdat de conclusie is getrokken op basis van een gevormde neerslag van lood- en ijzerchloride op de overgang van bentonietblokken en zand. Het is denkbaar dat een zelfde proces een rol heeft gespeeld als is beschreven door Hockley et al. (1991).

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd, dat opgeloste stoffen door de meeste materialen diffunderen. Folies vormen hierop voor anorganische stoffen een uitzondering. Voor de praktijk moet voorlopig worden aangenomen dat diffusie niet kan worden voorkomen door bepaalde materialen toe te passen. De emissie naar de bodem kan echter wel met een adsorberende laag worden vertraagd.

5.4.2 Effect van adsorptie op verplaatsing van stoffen

Er bestaat een evenwicht tussen de hoeveelheid geadsorbeerd stof per massa-eenheid grond en de concentratie van die stof in het bodemvocht. De verhouding tussen deze hoeveelheid en de concentratie wordt de distributiecoëfficiënt (K_d) genoemd. Zolang het adsorptiecomplex niet verzadigd is met de bewuste stof (er is nog geen evenwicht) zal uit de bodemoplossing stof worden geadsorbeerd, waardoor het lijkt alsof die stof zich langzamer verplaatst dan een stof die niet wordt geadsorbeerd. De verhouding tussen de loopsnelheid van de stof die wordt geadsorbeerd en de stof die niet wordt geadsorbeerd wordt de retardatiecoëfficiënt (R_d) genoemd.

De retardatiecoëfficiënt wordt berekend volgens (naar Van de Bogaard en Hoeks, 1989):

$$R_d = 1 + (\rho/\epsilon) \cdot K_d$$

Hierin is:

R_d = retardatie

ρ = droogvolume gewicht (kg.m^{-3})

ϵ = porositeit (-)

K_d = distributie coëfficiënt ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)

De verhouding tussen de loopsnelheid van een bepaalde stof, v_s , en de verplaatsingssnelheid van het grondwater, v , is:

$$v_s/v = 1/R_d$$

De "doorbraaktijd" van een bepaalde stof door een laag van x m wordt berekend met:

$$t = R_d \cdot v^{-1} \cdot x$$

Als van een stof de distributiecoëfficiënt, de verwachte stroomsnelheid door een adsorberende laag, de dichtheid en porositeit van die laag bekend is, kan worden bepaald welke dikte deze laag moet hebben om te voorkomen dat gedurende een zekere periode de bewuste stof niet uit de laag treedt. Deze dikte moet minstens gelijk zijn aan het produkt van tijdsduur en loopsnelheid van de bewuste stof. Deze benadering van de verplaatsing van een bepaald stoffront mag niet worden toegepast als de grootte van het transport door diffusie van dezelfde orde is.

Voor transport door alleen diffusie kan een overeenkomstige benadering worden gebruikt. In plaats van de verplaatsingssnelheid van een niet geadsorbeerde stof, wordt de verplaatsingssnelheid van de beschouwde stof genomen, waarbij geen adsorptie optreedt en die alleen afhangt van de concentratiegradiënt en de diffusiecoëfficiënt. De verplaatsingssnelheid van een denkbeeldig front wordt dan berekend met:

$$v_s = D_s \cdot R_d^{-1} \cdot x^{-1}$$

Hierin is:

D_s = schijnbare diffusiecoëfficiënt

x = afstand front tot bron

De positie van het front op een zekere tijdstip is dan:

$$x = \{2.D_e.Rd-1\}^{0.5}t^{0.5}$$

en de "doorbraaktijd" is:

$$t = \{2.D_e.Rd-1\}^{-1}.x^2$$

Wordt rekening gehouden met stroming en diffusie dan kan de doorbraaktijd worden benaderd met:

$$t = Rd.v^{-1}.x - D_e.Rd.v^{-2}.Ln(x.v.D_e^{-1} + 1)$$

Voor $K_d = 0,3$ en een verhouding tussen dichtheid en porositeit van 4 ($Rd = 2,2$), een diffusie coëfficiënt van $1.0 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ is de doorbraaktijd door een adsorberende laag van 0,5 m bij een stroomsnelheid van $8.0 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ (Darcy snelheid $\sim 10 \text{ mm.jr}^{-1}$) ca. 7 jaar (gecombineerd effect). Ontbreekt in dit voorbeeld de stroming (alleen diffusie), dan is de doorbraaktijd ca. 9 jaar. Bij een distributiecoëfficiënt 1 (bijvoorbeeld NH_4^+) is de doorbraaktijd respectievelijk ca. 18 en 20 jaar en bij een distributiecoëfficiënt 5 (bijvoorbeeld koper, lood) is de doorbraaktijd respectievelijk 75 en 85 jaar.

5.4.3 Diffusieremming door luchthoudende lagen

De transportsnelheid van stoffen door diffusie wordt onder meer bepaald door de diffusiecoëfficiënt en de fractie met watergevlude poriën. De ontwateringsdiepte en de afstand tussen de ontwateringsmiddelen beïnvloeden deze fractie.

Voor elke minerale stof bestaat een relatie tussen de hoeveelheid geabsorbeerd water en de waterspanning in de porën (aangeduid als zuigspanning omdat de waterspanning kleiner is dan de atmosferische spanning). In het algemeen neemt het vochtgehalte af als de zuigspanning groter wordt. Bij afwezigheid van capillaire stroming in de bodem komt de zuigspanning overeen met de plaatshoogte ten opzichte van de grondwaterspiegel. In dat geval neemt het vochtgehalte af naarmate de afstand tot de grondwaterspiegel toeneemt. Kleigronden kunnen ook bij hoge zuigspanningen nog grote hoeveelheden water vasthouden. Grof zand en grint verliezen al veel water bij geringe zuigspanningen (enkele millibar). Een grindlaag op enkele decimeters boven de grondwaterspiegel bevat dus nauwelijks water (zolang er lucht kan toetreden). Van deze eigenschap wordt gebruikt gemaakt om diffusie te remmen. In tabel 8 is de effectiviteit van deze toepassing gegeven. Als voorbeeld is een situatie gekozen waarin de afstand tussen stortzool (onderkant afval) en grondwaterspiegel 0,7 m bedraagt. De stroomsnelheid in het grondwater is zo groot dat daardoor concentratieverhoging verwaarloosbaar is. Voorts is aangenomen dat de onderafdichting vloeistofdicht is. Stoffen komen alleen door diffusie naar buiten. De emissie is op 100% gesteld in de situatie zonder grindlaag. De reductie in de emissie die kan worden bereikt door tussen stortzool en grondwaterspiegel een grindlaag aan te brengen, wordt bepaald door de dikte van de grindlaag en de actuele diffusiecoëfficiënt. Als gronddeeltjes in de grindlaag terecht komen of het vochtgehalte stijgt, neemt de diffusiecoëfficiënt toe. De diffusiecoëfficiënt van de grindlaag is weergegeven als een fractie van de diffusiecoëfficiënt van de oorspronkelijke grond. Is deze fractie veel kleiner dan 1, dan functioneert de grindlaag als een goede barrière, is deze fractie in de buurt van 1, dan functioneert de grindlaag niet.

Tabel 8 Emissiereductie' (%) door een grindlaag tussen stortzool en grondwaterspiegel

Dikte grindlaag (m)	Verhouding diffusiecoëff. grindl./grond					
	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
0,14	80	64	45	23	12	5
0,28	90	79	62	37	22	10
0,42	92	84	72	48	29	23

* ten opzichte van de situatie zonder grindlaag

Uit tabel 8 valt af te leiden dat emissie door diffusie met 80 % is terug te dringen door een grindlaag van 0,14 m aan te brengen (verhouding diffusiecoëfficiënt grindlaag-oorspronkelijke bodem 0,05). Bij grondinrusie of een groter vochtgehalte (verh. diffusiecoëfficiënt grindlaag : bodem ~ 0,4) bedraagt de emissiereductie 23%. Uit tabel 8 is af te leiden dat met een grindlaag van beperkte dikte diffusie effectief kan worden geremd, zolang er geen verontreiniging met grond uit de omliggende lagen optreedt, de laag droog blijft en, zoals in het gegeven voorbeeld, de grondwaterspiegel betrekkelijk ondiep is.

Bij toenemende afstand tussen stortzool en grondwaterspiegel neemt de emissie naar het grondwater door diffusie af. Bij bijvoorbeeld een afstand van 10 m is de emissie door diffusie nog ongeveer 10% van de emissie bij een afstand van 0,7 m tussen stortzool en grondwaterspiegel. Bij diepe grondwaterstanden zijn grindlagen dan ook weinig effectief.

Bij de voorgaande berekening is uitgegaan van perfect vloeistofdichte onderafdichtingslagen. Laten deze lagen wel vloeistof door, dan neemt de betekenis van diffusie af. Indien de afstand tussen stortzool en grondwaterpeil 0,50 m bedraagt en een horizontale stroming onder de stort het grondwater relatief vaak ververst (geringe concentratie opgeloste stof) en een lekkage van ca. 15 mm per jaar optreedt, bedraagt de bijdrage van diffusie aan de totale emissie nog 30%. De totale emissie kan in dit geval met 15% worden verminderd door een goede grindlaag aan te brengen. Bij diepere grondwaterstanden en overigens dezelfde lekverliezen, is de bijdrage van diffusie aan het stoftransport relatief gering. Het effect van een diffusie remmende laag is verwaarloosbaar als het percolatieverlies groter is dan 20 mm per jaar of als plaatselijk lekken aanwezig zijn waar de verliezen relatief groot zijn.

5.5 Principe van diffusieremming door hydrologische isolatie

In kwelgebieden stroomt water in opwaartse richting. Het water is afkomstig uit (hooggelegen) inzijgingsgebieden of als het een lokaal verschijnsel is, uit een kanaal of meer waarin het peil hoger is dan het freatisch peil. In deze gebieden dringt percolatiewater meestal niet diep in de bodem. Opgeloste stoffen kunnen daarentegen door diffusie over een grote afstand en diepte worden verspreid als het diffuus transport groter is dan het tegengesteld gericht advectief transport, dus bij een geringe kwelstroom.

Boekelman en Dekker (1985) hebben een constructie ontworpen waarbij een kwelstroom door een laag van een zekere dikte en doorlatendheid het stoftransport door diffusie juist compenseert. Percolatiewater uit het stort en de kwelstroom worden door een drainagesysteem boven de slecht doorlatende laag opgevangen en afgevoerd. In fig. 4

is deze constructie schematisch weergegeven.

In tabel 9 is een rekenvoorbeeld gegeven waarin de benodigde dikte van de diffusie remmende laag is weergegeven in relatie tot de beschikbare kwelintensiteit (als Darcy stroming).

Voor electrolyten is de diffusiecoëfficiënt van NaCl gebruikt en voor de niet-electrolyten die van benzeen. De verplaatsingssnelheid van opgeloste stoffen door diffusie hangt samen met de aard van de stof. Als het hier beschreven principe in een constructie wordt toegepast, zal bekend moeten zijn van welke stoffen verspreiding moet worden tegengegaan. De grootste diffusiecoëfficiënt is maatgevend voor de bepaling van de vereiste (minimum) laagdikte tussen het afval en de bodem, en voor de vereiste minimum kwelstroom. Het principe om diffusie door een kwelstroom tegen te koppelen kan alleen worden toegepast als geen vloeistofdichte lagen, zoals folies, voorkomen. Voor een effectieve diffusieremming moet de dikte van de dichte laag groot zijn of moet de kwel groot zijn. De kwelstroom mengt zich met het percolaat. Om diffusie van niet-electrolyten tegen te gaan, is bij een dikte van de slecht-doorlatende laag van ca. 0,9 m een kwelstroom van 0,1 mm per dag nodig. Jaarlijks is dat ruim 35 mm. Een goed functionerende bovenafdichting laat jaarlijks ca. 10 mm water door, zodat de hoeveelheid af te voeren en te zuiveren percolaat meer dan verviervoudigd wordt als diffusie volgens dit principe wordt geremd.

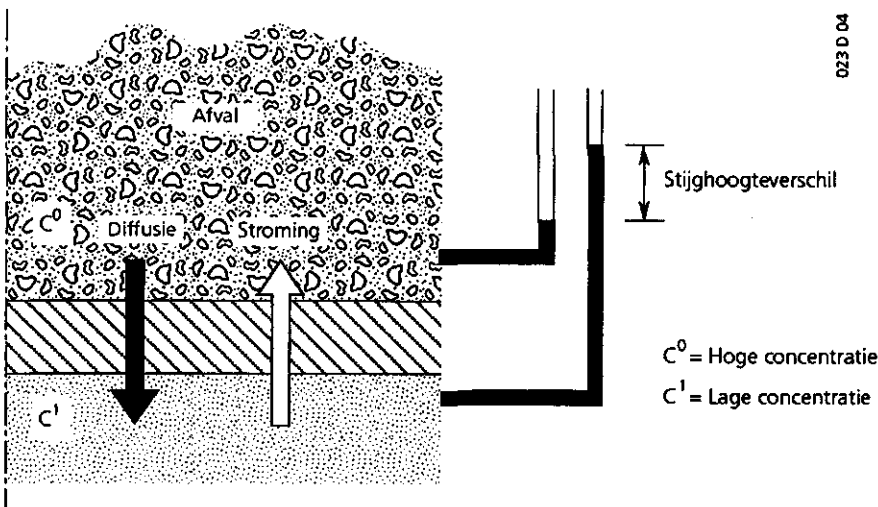


Fig. 4 Dwarsdoorsnede constructie voor diffusie remming via het tegenstroomprincipe (naar Boekelman en Dekker, 1985)

Tabel 9 Vereiste dikte van de slecht doorlatende laag onder het afval om emissie door diffusie te voorkomen

Kwelintensiteit (mm.d ⁻¹)	Dikte slecht doorlatende laag (m)	
	electrolyten	niet-electrolyten
1,0	0,16	0,21
0,5	0,20	0,29
0,25	0,28	0,45
0,1	0,51	0,93
0,01	3,96	8,15

In gebieden met grondwater op grote diepte (hooggelegen zandgronden) verdienen twee aspecten extra aandacht: de omvang van verspreiding van stoffen bij lekken en de detectie van lekken in de onderafdichting. Als verontreinigd percolaat in de bodem terecht komt, verplaatst het zich aanvankelijk in de onverzadigde zone onder het stortterrein en komt na een lange verblijftijd in het grondwater terecht. Controledrains in de onverzadigde zone hebben geen enkele functie omdat ze alleen water afvoeren als ze onder de grondwaterspiegel liggen. En pas dan kan een verontreiniging worden gesignaleerd. Afhankelijk van de locatie wordt de verontreiniging in het grondwater over grote afstanden getransporteerd en verdund. Omdat het onmogelijk is om verontreinigingen onder het afvalstort op te vangen zal een extra voorziening moeten worden aangebracht om in noodgevallen (lekkende afdichtingslagen) het weglekkend percolaat te kunnen opvangen en afvoeren. Hiervoor is een constructie nodig die bestaat uit twee afdichtingslagen met daar tussen een drainagelaag met drainbuizen.

In de drainagelaag kan kunstmatig een bepaalde waterspanning worden aangelegd om emissie te beperken. Door de overdruk te vergroten kan de stromingsrichting worden omgekeerd en stroomt er water naar het afval zodat zelfs diffusie van stoffen vanuit het afval wordt tegengegaan.

Kunstmatig instand
gehouden drukhoogte

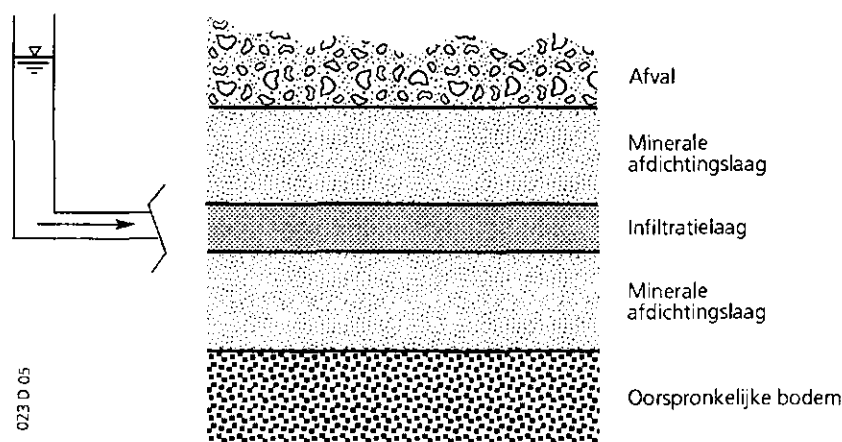


Fig. 5 Onderafdichting met een tussenlaag voor drukverhoging

Kluitenberg en Horton (1989) tonen in laboratoriumexperimenten aan dat bij een plaatselijk doorboorde bovenlaag de emissie naar de ondergrond bij een tegendruk veel geringer is als deze ontbreekt. Een nadeel van deze constructie is dat percolaat uit lekken wordt verspreid onder de minerale afdichting en op grote schaal de kwaliteit van deze laag zou kunnen aantasten. Emissie door diffusie speelt bij deze constructie nog een rol, maar kan in principe worden voorkomen door een kunstmatige kwelsituatie te creëren. Hiervan is in fig. 6 een voorbeeld gegeven.

In dit voorbeeld beperkt de bovenafdichting percolaatvorming. Het neerslagoverschot wordt via een drainlaag in de eindafdekking afgeleid naar een ondergronds reservoir, dat bestaat uit bijvoorbeeld puin, grind of zeer grof zand. Van daaruit kan water infiltreren

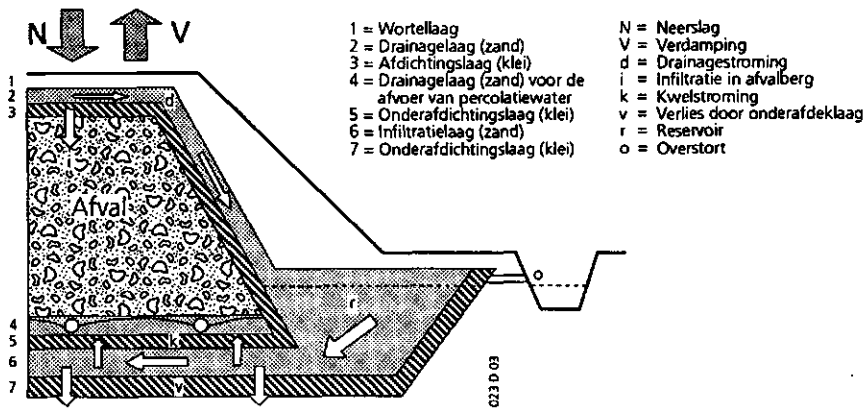


Fig. 6 Dwarsdoorsnede afvalberging met infiltratie van neerslagoverschot via infiltratielaag onder depot. Door infiltratie wordt de waterspanning aan de onderzijde van het depot verhoogd. Emissie door diffusie wordt geremd door een naar binnen gerichte flux

in de zogenaamde infiltratielaag, die een grote doorlatendheid moet hebben. Het gaat immers om het aanleggen van een bepaalde waterspanning die overal zoveel mogelijk gelijk moet zijn. Op deze infiltratielaag ligt een matig dichte laag waarvan de doorlatendheid niet extreem laag is, omdat de diffusie moet worden tegengekoppeld. Onder de infiltratielaag ligt een basisafichting die is voortgezet tot onder het reservoir. Het niveau van het percolaat in het stort wordt geregeld door het percolaatdrainagesysteem. Het peil in het reservoir fluctueert afhankelijk van het verloop van het neerslagoverschot. Aan het einde van de winter heeft dit peil zijn hoogste en aan het einde van de zomer zijn laagste stand. Vanuit het reservoir stroomt water naar de infiltratielaag en vervolgens door de onderafichting naar de ondergrond. Als de waterdruk in de infiltratielaag groter is dan in het afvallichaam, stroomt ook water naar het afval en wordt tegelijkertijd emissie door diffusie geremd of volledig gestopt als de stroomsnelheid voldoende hoog is. Het gevolg is dus dat hoe meer de emissie wordt geremd des te meer (verdund) percolaat uit het afval moet worden afgevoerd: een extra percolaatvolume komt in de plaats van emissie naar de bodem.

Drie verschillende niveaus van emissiebeperking worden onderscheiden:

- 1- De gemiddelde emissieflux (advectief transport) is nul. Gedurende een deel van het jaar (winter) stroomt water vanuit de infiltratielaag naar de stort en gedurende een deel van het jaar vanuit de stort naar de infiltratielaag. Deze hoeveelheden zijn aan elkaar gelijk. Uit een verdere analyse moet blijken hoe groot de nettoemissie is als de diffusie erbij wordt betrokken. De percolaatdrainage is in dit geval gelijk aan het neerslagoverschot (als de stort nog in bedrijf is) of aan de infiltratie door de bovenafichting;
- 2- De emissieflux is op elke plaats en elk moment nul of negatief (instroming vanuit infiltratielaag naar stort). Aan deze eis is voldaan als bij het laagste peil in het reservoir de emissieflux midden onder de stort juist nul is. Op alle andere plaatsen stroomt het gehele jaar water vanuit de infiltratielaag naar de stort. Emissie van stoffen naar de bodem kan in deze situatie nog steeds optreden als gevolg van diffusie. De hoeveelheid op te vangen percolaat neemt toe omdat er (schoon) water vanuit de infiltratielaag naar de stort stroomt;
- 3- Emissie via diffusie wordt op elke plaats en elk moment tegengegaan. Deze situatie wordt bereikt als bij het laagste peil in het reservoir de diffusie midden onder de stort juist volledig wordt tegengegaan. Hiervoor is een permanente, minimum stroming vanuit de infiltratielaag naar de stort nodig. Bij deze variant wordt de bodem niet belast (maximale bescherming). De naar het afval gerichte stroom vergroot de hoeveelheid percolaat en verdunt het.

Afhankelijk van de laagdikten, doorlatendheden en randvoorwaarden is een hoeveelheid water nodig om de emissies te beperken. Als rekenvoorbeeld dient een stort met een breedte van 400 m, een dichte laag boven de infiltratielaag met een dikte van 1,0 m en een doorlatendheid van 10^{-8} m.s^{-1} , een infiltratielaag van 0,5 m met een doorlatendheid van $2,31 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, een basisafdichting van 0,5 m met een doorlatendheid van $6 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Het gemiddeld niveau van het percolaat in de stort wordt als referentiehoogte gekozen. De waterspanning onder de basisafdichting komt overeen met een waterkolom van -2,5 m (= waterspanning onder afdichting is -0,5 m waterkolom, plaatshoogte -2,0 m t.o.v referentieniveau).

Tabel 10 Waterbalans onderafdichtingsconstructie bij verschillende bodem-beschermingsniveaus

Beschermings-niveau	Extra percolaat (mm.j ⁻¹)	Infiltratie n. bodem (mm.j ⁻¹)	Totaal benodigd voor instandh. bescherming (mm.j ⁻¹)
gemiddeld 0-flux	0	90	90
overall 0-flux of stroming vanuit infiltr. laag n. stort	35	95	130
nergens emissie, ook niet door diffusie	160	110	270

Uit tabel 10 blijkt, dat bij de tweede variant al een hoog beschermingsniveau wordt bereikt. In het voorbeeld is een kunstmatige kwelstroom van ca. 35 mm.j⁻¹ voldoende om de diffusie vanuit het stort geheel tegen te koppelen. Dicht bij de buitenrand van het stort is deze kwelstroom groter dan gemiddeld, meer naar het midden is deze minder dan de gemiddelde kwelstroom. Emissie door diffusie komt in dit voorbeeld voor nabij het centrum van de afvalstort.

Diffusie kan alleen worden tegengegaan als een stroming bestaat in tegengestelde richting van het concentratieverval. Voor afdichtingen met geomembranen en overige vloeistofdichte lagen is tegenkoppeling van diffusie volgens dit principe niet mogelijk, omdat de waterdoorlatendheid veel te gering is om de vereiste stroomsnelheid te realiseren.

Een onderafdichtingsconstructie volgens fig. 6 is ook bruikbaar als de ondergrond zettingsgevoelig is. De dikte van de infiltratielaag zal dan waarschijnlijk groter moeten zijn om eventuele verstoring door ongelijkmatige zetting te compenseren. Het drainagesysteem in de stort moet in dat geval berekend zijn op de zettingen.

De effectiviteit van de constructie kan verminderen als het drainagesysteem in het stort verstopt raakt of als de bovenafdichting gaat lekken. Door het reservoir groter te dimensioneren en vanuit het oppervlaktewater te vullen kan de effectiviteit op peil worden gehouden.

De hier beschreven constructie ook fungeren als een (nood)voorziening voor opvang en detectie van lekkages door de eerste afdichtingslaag. Lekverliezen door de tweede

afdichtingslaag kunnen niet worden gesignaleerd met controledrains.

5.6 Keuze van bodembeschermende voorzieningen

Bij de bepaling van bodembeschermingsvoorzieningen wordt ervan uitgegaan dat ongeacht de locatie eenzelfde niveau van bodembescherming wordt geboden. Het hangt af van de locatieomstandigheden welke technische voorzieningen daarvoor nodig zijn.

Als referentie voor het niveau van de bodembescherming is gekozen voor een terrein dat is gesitueerd op een locatie waar zeer geringe zettingen optreden (bijvoorbeeld minder dan 0,2 m) en waar een geringe kwelstroom de indringingsdiepte van verontreinigingen beperkt. Een relatief dicht netwerk van ontwateringsmiddelen in de omgeving van het stortterrein limiteert de horizontale verspreiding. De oorspronkelijke bodem bestaat uit een matig tot goed-doorlatende grond, waarin controledrains goed kunnen functioneren. De gemiddeld hoogste grondwaterstand is zodanig dat de afstand tussen de gemiddeld hoogste grondwaterstand en de stortzool minstens 0,7 m is, zodat geen extra ophoging nodig is om de vereiste drooglegging te realiseren. De ondergrond heeft een matige doorlatendheid waarin (controle-)drains goed kunnen functioneren.

De bodembeschermende voorzieningen bestaan uit een goed functionerende bovenafdichting en aan de onderzijde een gedeeltelijk functionerende percolaatdrainage, een combinatie-afdichting (folie op een minerale afdichting) en daaronder controledrains. Lekverliezen door de (combinatie)onderafdichting bedragen minder dan 5 mm per jaar. De doordringingsdiepte van eventueel in de bodem geraakte verontreiniging blijft tot enkele meters beperkt, terwijl maximale horizontale verspreiding van verontreinigingen tot hooguit 100 m waarneembaar is.

5.6.1 Zettingsgevoelige locaties

Op zettingsgevoelige gronden kunnen percolaat- en controledrains verstopt raken door deformatie en verstoring op aansluitingen. Folies weerstaan alzijdige rek van 5% zonder functieverlies en scheuren bij een alzijdige rek van ca. 20%. Bij verschilzettingen tot ca. 0,3 m per meter wordt een rek van 5% niet overschreden en hoeft geen schade aan folies te worden verwacht. Bij verschilzettingen van 0,65 m of meer is de rek meer dan 20% en treedt schade op. Minerale afdichtingen kunnen plaatselijk dunner worden ("squeeze") en deformeren. In hoeverre daardoor ook de doorlatendheid achteruitgaat is onvoldoende bekend.

Door zetting wordt de afstand tussen stortzool en grondwaterniveau verkleind. Als daardoor de vereiste drooglegging niet wordt gehaald, zal ophoging nodig zijn. Ophogingen moeten al geruime tijd voor de aanvang van stortactiviteiten zijn aangebracht om een deel van de zettingen te realiseren. De tijdsduur van de voorbelasting hangt samen met de dikte van het pakket, de doorlatendheid en de samendrukbaarheid. Voor de schatting van de benodigde tijdsduur zijn gedetailleerde metingen en berekeningen nodig. Om schades aan onderafdichtingen en percolaatdrains te beperken kan het nodig zijn een extra ophoging aan te brengen die voor aanvang van de stortactiviteit wordt verwijderd. Rekening moet worden gehouden met een lange consolidatie-periode (soms meer dan tien jaar).

Zetting kan worden verwacht in gebieden waar slappe klei- en veenlagen in de boden voorkomen vooral in het westen en noorden van Nederland, het rivierengebied en de nieuwe polders. Consolidatie van slappe gronden verlaagt de doorlatendheid waardoor een extra barrière ontstaat. Het adsorptievermogen van deze gronden is vaak groot, zodat doorbraak van verontreiniging lang duurt. De risico's op deze locatie bestaan uit het defect raken van percolaat- en controledrains, geomembranen en mogelijk toename van de doorlatendheid van minerale afdichtingslagen als gevolg van ongelijkmatige zetting. Omdat drains in een slechtdoorlatende grond matig functioneren, kan het nodig zijn onder de onderafdichting een drainlaag voor lekdetecties aan te leggen of drainsleuven met zand op te vullen. Als ophoging nodig is om de gevolgen van zettingen te voorkomen, moet hiervoor goeddoorlatende grond worden gebruikt. Bij onvoorziene lekkages van de onderafdichting kan op deze locaties op een eenvoudige manier een hydrologische isolatie worden gerealiseerd door ringsloten in verbinding te brengen met de ophoging en daarin een laag peil te onderhouden.

Het nadeel van zettingsgevoelige locaties is dat al met het aanbrengen van de voorbelasting moet worden begonnen op een moment waarop prognoses van toekomstige ontwikkelingen en de noodzaak van een nieuwe locatie nog onzeker zijn. Beter is om zettingsgevoelige locaties te vermijden.

5.6.2 Locaties met diepe grondwaterstanden

Locaties waar de grondwaterstand gemiddeld erg diep is, worden aangetroffen in hooggelegen zandgebieden. Daar komen vaak dikke watervoerende pakketten voor waarin stoffen ver en diep kunnen worden verspreid en waar deze verspreiding niet kan worden beheerst. De afstand tussen stortzool en grondwaterspiegel bedraagt soms meer dan 10 meter. Het adsorberend vermogen van deze gronden is gering en de doorlatendheid van de bovengrond groot. Controledrains zijn hier niet zonder meer mogelijk. De risico's voor bodemverontreiniging op deze locatie hangen samen met de onzekerheid omtrent de levensduur van de onderafdichting en de percolaatdrainage. *Deze locaties zijn in principe ongeschikt.*

Als de aanleg van een stortterrein onvermijdelijk is, kunnen deze locaties geschikt worden gemaakt door voorzieningen te treffen om verspreiding van stoffen te beperken, controle op lekkages in de onderafdichting mogelijk te maken en in geval van lekkages via hydrologische isolatie of afscherming de verspreidingsomvang te beperken. De extra voorzieningen betreffen een extra afdichting en een drainagelaag tussen de "standaard"afdichting en de extra afdichting. De tweede laag moet fungeren als een absolute barrière en moet bestaan uit een folie op een minerale afdichting. De dikte en doorlatendheid van de drainlaag moet zodanig zijn, dat bij het uitvallen van de controle drains een voldoende drainagecapaciteit overblijft om weglekkend percolaat naar de zijanten af te voeren en op te vangen. De drainlaag tussen beide afdichtingslagen kan worden benut als infiltratielaag voor een kunstmatige hydrologische isolatie. De hiervoor benodigde hoeveelheid water kan via de drainage in de eindafdekking wordt verkregen. Door in deze drainlaag drainbuizen aan te leggen is een kunstmatige lekdetectiesysteem gecreëerd voor normale situaties. Bij het falen van de "standaard"-afdichting kan dit drainagesysteem, althans gedurende een zekere tijd, fungeren als percolaatdrainage. *Lekken in de tweede afdichtingslaag kunnen niet worden gesignaleerd.*

Op de lange termijn moet er op deze locaties vanuit worden gegaan dat de bovenafdichting de enige isolerende voorziening is en dat daarom de nazorg (fondsen, beheer) goed geregeld moet zijn.

5.6.3 Locaties in hellende zandgebieden

Het kenmerk van locaties in hellende zandgebieden is een goed doorlatende grond, dikke watervoerende pakketten en een relatief grote gebiedsströmning (= neerslagoverschot in bovenstroomsgebied). De grondwaterstanden zijn geschikt voor controledrains, die soms kunstmatig bemalen moeten worden. Stoffen die in het grondwater terecht komen worden daarin snel en over grote afstanden getransporteerd. De risico's op deze locaties worden gevormd door de effectiviteit van het lekdetectiesysteem. Weglekkend percolaat stroomt door de bodem als een dunne "pluim", die gemakkelijk "gemist" wordt in een lekdetectiesysteem. Treedt een lek op, dan is het mogelijk om na zeer intensief terreinonderzoek een stelsel van pompputten te installeren, die juist de "pluim" wegvangen. Lokale veranderingen in het grondwaterregime kunnen de effectiviteit van zulke voorzieningen aantasten. Bij een goed functionerende afdichting kan emissie door diffusie in deze gebieden nog worden beperkt door een grindlaag aan te brengen tussen de onderafdichting en de hoogste grondwaterspiegel. De effectiviteit van deze voorziening is alleen van betekenis als de afstand tussen stortzool en de (gemiddeld hoogste) grondwaterspiegel niet meer bedraagt dan 1 m.

5.6.4 Locaties in wegzijgingsgebieden met een afdekkend pakket

Locaties in wegzijgingsgebieden met een afdekkend pakket worden vooral aangetroffen in het zuid-westen en westen van Nederland. Voorbeelden zijn relatief hooggelegen polders naast diepbemalen polders. Het afdekkend pakket is vaak 5 tot 10 m dik en bestaat uit kleihoudend materiaal, soms met zandlagen, soms met veenhoudende lagen. Het afdekkend pakket rust op een watervoerend pakket van soms beperkte dikte. De ontwatering is relatief fijnmazig en de doorlatendheid van de toplagen is beperkt. Stoffen verspreiden zich hier vooral in verticale richting door het afdekkend pakket en in horizontale richting in het watervoerend pakket. De verspreiding verloopt uiterst langzaam in het afdekkend pakket. De verspreiding is moeilijk te beheersen als de verontreiniging tot in het watervoerend pakket is doorgedrongen. Dit maakt deze locaties minder geschikt. Moet er toch een stortterrein worden aangelegd, dan moeten extra voorzieningen gericht zijn op het creëren van de mogelijkheid van hydrologisch isolatie. Daartoe kan een drainlaag tussen de oorspronkelijke (slecht doorlatend gemaakte) bodem en de onderafdichting worden aangelegd. Deze drainlaag bevat de controledrains; de dikte en doorlatendheid ervan moeten echter zodanig zijn dat deze laag ook een functie kan vervullen bij een eventuele hydrologische isolatie als lekkages van de onderafdichting te groot mochten worden.

5.6.5 Locaties in kwelgebieden

Kwelgebieden worden aangetroffen in laaggelegen zandgebieden (o.a. beekdalen) en in polders, die dieper zijn bemalen dan omliggende gronden. In de polders bestaat de

bodem in het algemeen uit een slecht tot matig doorlatende afdekkendpakket op een watervoerendpakket. In zandgebieden worden soms lemlagen aangetroffen met een matige doorlatendheid. De detailontwatering in kwelgebieden is meestal fijnmazig. In beekdalen kan in het algemeen worden volstaan met de standaard-onderafdeling. Wel moet rekening worden gehouden met de drooglegging van de stortzool (minstens 0,7 m boven gemiddeld hoogste grondwaterstand). Bij een dikte van de minerale onderafdeling van 0,3 m en een drainlaag op de folie van 0,3 m, is pas een ophoging nodig als de gemiddeld hoogste grondwaterspiegel in de oorspronkelijke situatie hoger komt dan 0,1 m onder maaiveld.

Bij aanleg van een afvalstort wordt de werking van de ontwateringsmiddelen verstoord, maar wordt tegelijkertijd infiltratie van regen in de bodem voorkomen. Dit kan gevolgen hebben voor de ontwateringssituatie. In het algemeen zal het uitgangspunt moeten zijn dat in de nieuwe situatie een vervangende drainage het grondwaterregime in stand houdt. Als de doorlatendheid van de bovenste grondlagen gering is, kan de bovengrond eventueel worden afgegraven (en hergebruikt in de eindafdekking) of kan een drainlaag onder de onderafdeling worden aangebracht.

Risico's op deze locatie worden gevormd door onzekerheden omtrent het hydrologisch systeem. Ingrepen die leiden tot verandering van de gebiedsströmung of tot een wegzijgingssituatie kunnen eventuele verontreinigingen in de bodem over grote afstanden transporteren. Om deze risico's te beperken moeten wellicht bepaalde eisen worden gesteld aan het grond- en oppervlaktewaterbeheer in een gebied rond het stortterrein.

5.6.6 Locaties in vlakke gebieden

Onder locaties in vlakke gebieden worden locaties verstaan waar in de diepere ondergrond geen gebiedsströmung optreedt, terwijl de grondwaterstanden relatief ondiep zijn. Al het neerslagoverschot wordt via een relatief ondiep ontwateringssysteem afgevoerd. Onder het stortterrein kan de verontreiniging relatief diep in de bodemdoordringen als de bodem uniform is opgebouwd. Is daarentegen de doorlatendheid van de bovengrond veel groter dan de ondergrond, dan zal de indringingsdiepte van verontreiniging in de bodem beperkt blijven tot de doorlatende bovengrond. Op de zeer lange termijn kunnen door diffusie de diepere bodemlagen worden verontreinigd. Is de doorlatendheid van de bovengrond echter zeer veel geringer dan van de ondergrond, dan kan de verontreiniging zeer diep in de bodem doordringen en zal pas na zeer lange tijd in het oppervlaktewater terecht komen. Als de bovengrond een veel betere doorlatendheid heeft dan de ondergrond, kan hier kan worden volstaan met de standaardafdeling. Als de ondergrond zeer veel beter doorlatend is dan de bovengrond kan een drainlaag onder de onderafdeling worden aangebracht om eventuele lekkage zijdelings af te voeren. Mocht blijken dat de onderafdeling faalt, dan kan hier met eenvoudige middelen (sloten) een hydrologische isolatie worden gerealiseerd.

5.6.7 Locaties in afgravingen, groeven

Als locaties in afgravingen en groeven boven het (ongestoord) grondwaterniveau liggen,

kan men ze behandelen als locaties in zandgebieden met diepe grondwaterstanden: in principe dienen ze als stort- of opslaglocatie te worden afgewezen of dienen extra voorzieningen aangebracht te worden (twee afdichtingslagen met een extra drainlaag). Lekdetectie zal hier vrijwel altijd met kunstgrepen moeten worden gerealiseerd: via pompen of putten waarop controledrains zijn aangesloten. Ook de afvoer van percolaat vereist een aangepaste oplossing: bijvoorbeeld met pompen, of een centrale percolaatopvang in een tunnelafvoer met pompen (Bolier, 1992).

Groeven of afgravingen onder het grondwater zijn in principe ongeschikt voor het storten van afval en reststoffen, omdat zonder kunstmatige ingrepen niet aan de droogleggingseis kan worden voldaan. Zou men toch besluiten tot een stort op zo'n locatie, dan is een onderbemalingsstelsel nodig om tijdens de stortfase het "opbarsten" van de onderafdeling te voorkomen. Ook is een kunstmatige voorziening nodig om percolaat af te voeren (pompen). Bestaat een gebiedsströmning, dan zal de omvang van verspreiding van stoffen uit lekken omvangrijk kunnen zijn. Komt zo'n stroming niet voor en ligt de locatie in een zeer ondoorlatende laag (bijvoorbeeld klei of leem), dan zal een eventuele verspreiding van stoffen zeer langzaam verlopen. In het geval na afsluiten en aanbrengen van een bovenafdeling en eindafwerking de onderbemaling wordt gestaakt, vindt belasting van de bodem alleen nog plaats via diffusie. Op de lange termijn zal een evenwicht ontstaan, waarbij alleen in een beperkt gebied een waarneembare bodemverontreiniging zal optreden.

5.7 Keuzetabel bodembeschermende voorzieningen

In tabel 11 is een samenvatting gegeven van bodembeschermende voorzieningen, die naast de standaardvoorzieningen getroffen kunnen worden om op elke locatie een vergelijkbaar bodembeschermingsniveau te realiseren.

In tabel 11 is van elke locatietype de geschiktheid gezien vanuit het oogpunt van bodembescherming. Een locatie is "slecht" als stoffen die in de bodem terecht komen, diep in de bodem kunnen dringen zonder te worden opgemerkt en vervolgens in het grondwatersysteem over grote afstand worden getransporteerd. Als om bepaalde redenen toch voor een "slechte" locatie wordt gekozen, zijn behalve de standaardvoorzieningen, extra voorzieningen nodig. Omdat wordt aangenomen dat op termijn de bodembescherming alleen afhangt van de kwaliteit van de bovenafdeling, zal voor elke locatietype de nazorg (fondsen, beheerseenheid) geregeld moeten worden. Immers, de bovenafdeling moet "eeuwigdurend" in stand worden gehouden.

Tabel 11 Locatiekenmerken, risico's, geschiktheid en aanbevolen extra voorzieningen

Locatietype	Locatie kenmerk	Risico	Geschiktheid	Extra voorzieningen
Zettingsgevoelig	Samendrukb. lagen op watervoerend pakket. Na consolidatie zeer geringe doorl.h.	Onvoldoende drooglegging, bezwijken afdichtingen, drainbuizen;	Ongeschikt bij grote en ongelijkmatige zetting	Voorbelasten, ophogen
Zeer diep grondw.	Goed doorl. grond, grondwater diep, beperkte gebiedsstroming, inzijging.	Diepe oncontroleerbare omvangrijke bodemverontr.	Ongeschikt	Tweevoudige onderafdichting, + kunstm. lekdetectie
Hellende zandgeb.	Goed doorl. grond ondiepe grondw. significante gebiedsstroming, inzijging.	Ondiepe oncontroleerbare verontreiniging stroomafwaarts	Matig	Specifiek lekdetectiesysteem ev. grindlaag tussen grondw. en afdichting
Vlak zandgebied	Goed doorl. grond ondiep grondw. intensieve detail ontw. geen kwel/wegzijging, geen gebiedsstroming.	Lokale oppervlaktewater-verontreiniging; onder stort relatief diep doordringende verontreiniging	Redelijk	Geen
Wegzijgingsgebied	Slecht doorl. bovengrond op watervoerend pakket, beperkte gebiedsstroming	Op zeer lange termijn verspreiding in watervoerend pakket	Redelijk	Drainlaag onder onderafdichting t.b.v. lekdetectie en hydrologische isolatie
Kwelgebied	Goed/slecht doorl. bovengrond, ondiep grondw., kwel naar intensieve detailontwatering.	Lokale oppervlaktewater-verontreiniging; beperkte drooglegging.	Goed	Geen
Groeven/afgravingen boven grondwater	Vergelijkbaar met zandgeb. met diep grondw.	Omvangrijke verspreiding; oncontroleerbaar	Slecht	Twee-voudige onderafdichting + kunstm. lekdetectie + percolaat-afvoer.
Groeven/afgravingen onder grondwater	Locatie afhankelijk	Omvangrijke verspreiding bij gebiedsstroming, anders verspreiding door diffusie	Slecht	Onderbemaling tijdens stortfase; aangepaste lekdetectie; percolaatafvoer;

LITERATUUR

ALBIKER, B., 1985. 'Basisabdichtungen von Abfalldeponien mit natürlichen Materialen'. *Wasser und Boden* 37, 9: 423-424, 427-428.

ALBIKER, B., 1986. 'Die Selbstdichtung von Schlammlagerfeldern'. *Wasser und Boden* 11: 558-563.

ANDERSON, D.C., K.W. BROWN AND J.C. THOMAS, 1985. 'Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids'. *Waste Management & Research* 3: 339-349.

BASS, J.F., 1985. 'Avoiding failure of leachate collection systems'. *Waste Management & Research*, 3, 3: 233-243.

BASS, J.F., 1986. *Avoiding failure of leachate collection and cap drainage systems*. Park Ridge, Noyes Date Corporation.

BASS, J.M, W.J. LYMAN AND J.P. TRATNYEK, 1985. *Assessment of synthetic membrane successes and failures at waste storage and disposal sites*. USEPA, EPA/600/2-85/100.

BELOUSCHEK, P. UND R. NOVOTNY, 1989. 'Zur Chemie von pulverförmigem Wasserglas und seinen Folgeprodukten: Kieselsäure und -gele in Wasser als Ausgangsmaterial für die Herstellung einer hochwertigen mineralischen Abdichtung aus bindigen Böden'. *Müll und Abfall* 12: 636-644.

BOEKELMAN, R.H. EN A.L.I. DEKKER, 1985. 'Enige overwegingen ten aanzien van de onderafdichting, Tijdelijke opslagplaatsen voor verontreinigde grond (3)'. *Milieutechniek* 4: 3-7.

BOELS, D, A.G.HENGEVELD, M.M.NASS EN P.GROENENDIJK, 1993. *Ontwerpcriterium bovenafdichting afvalstorten in relatie tot verspreiding van stoffen uit lokale bronnen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 246.

BOELS, D., 1990. 'Ontwerp en materiaalkeuze bij eindafdekking van stortplaatsen'. *Gemeentereiniging & Afvalmanagement* 81, 4: 164-168.

BOELS, D. EN R. WIEBING, 1990. *Duurzame werking van zand-bentoniet afdichtingen in eindafdekking van stortplaatsen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 115

Bogaard, E.A.J.M van den and J. Hoeks, 1989. *Assesment of environmental impacts and control measures at waste tips*. Sardinia '89 - 2nd International Landfill Symposium.

BOGUSCH, W., 1978. Neuse Verfahren zur Abdichtung von Deponieböden mittels Wasserglas. *Müll und Abfall* 10,3: 74-84.

BOLIER, D., 1992. 'Stortplaats Landgraaf krijgt gelede tunnel onder afval'. *Land + Water* 12: 70-74.

BREEN, J. EN T.A. DER KINDEREN, 1992. *Doorlatendheid van kunststoffolies voor milieutoepassingen; literatuuronderzoek*. Delft, Kunststof en Rubber Instituut TNO, TNO-rapport nr. 672/91.

BRUNE, M., H.G. RAMKE, H.J. COLLINS AND H.H. HANERT, 1991. *Incrustation processes in drainage systems of sanitary landfills*. Proceedings Sardinia '91, Third International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 14-18 October.

COLLINS, H.J., P. SPILLMANN UND B. HERMANSEN, 1988. 'Ist eine Folie auf einer mineralischen Deponieabdichtung vertretbar?' *Müll und Abfall* 20,8: 362-364.

DENSON, K.H., A. SHINDALA AND C.D. FENN, 1986. 'Permeability of Sand with Dispersed Clay Particles'. *Water Resource Research* 4,6: 1275-1277.

FINNO, R.J. AND W.R. SCHUBERT, 1986. 'Clay liner compatibility in waste disposal practices'. *Journal of Environmental Engineering* 112, 6, paper no. 21095.

GOLDMAN L.J., L.I. GREENFIELD AND A.S. DAMLE, 1990. *Clay liners for waste management facilities : design, construction and evaluation*. Noyes Data, Park Ridge.

HAXO H.E., R.S. HAXO AND N.A. NELSON, 1985. *Liner materials for hazardous and toxic wastes and municipal solid waste leachate*. Noyes Data, Park Ridge.

HELING, D. UND V. KLAPPERICH, 1987. *Die Durchlässigkeit von Sedimentgefügen für anorganische Elektolytlösungen*. Bielefeld, Erich Schmidt Verlag.

HOCKLEY D.E., H.A. VAN DER SLOOT EN J. WIJCKSTRA, 1991. 'Afdichtingen voor deponie en hergebruik van kolenreststoffen; Opsluiten van afval binnen 'natuurlijke' barrières'. *Energiespectrum*, januari: 50-55.

HOEKS, J., 1983. 'Significance of Biogas Production in Waste tips'. *Waste Management & Research* 1: 323-335.

HOEKS J., H.P. OOSTEROM EN D. BOELS, 1990. *Richtlijnen voor ontwerp en constructie van eindafdekkingen van afval- en reststofbergen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 91.

HOLZHOHNER, U., 1988. 'Das Feuchtverhalten mineralischer Schichten in der Basisabdichtung von Deponien'. *Müll und Abfall* 7: 295-302.

HUDE, N. VON DER, 1991. 'Kapillarsperren zum Abschirmen von Deponien gegen Sickerwasser'. *Wasser und Boden* 12: 754-757.

KINDEREN, T.A. DER, G. HAM EN J. MOLHOEK, 1991. *Richtlijnen voor het toepassen van geomembranen ter bescherming van het milieu*. Den Haag, Ministerie van VROM-DGM, Publikatiereeks Bodembescherming nr. 1991/5.

KLUITENBERG, G.J. AND R. HORTON, 1989. 'Pressurized layer reduces transport through compacted clay liners'. *J. Environ. Qual.* 18: 228-232.

KOMODROMOS, A. UND J.J. GÖTTNER, 1986. 'Beeinflussung von Tonen durch Chemikalien: Teil 1. Durchlässigkeit'. *Müll und Abfall* 18, 3: 102-108.

LEMA, J.M., R. MENDEZ AND R. BLAZQUEZ, 1988. 'Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review'. *Water, Air, and Soil Pollution* 40: 233-250.

MESECK, H. UND E. REUTER, 1985. *Prüfung und Bewertung der Durchlässigkeit mineralischer Dichtungsmaterialien*. Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität, Heft 18.

METZGER, B., B. YARON AND U. MINGELGRIN, 1983. 'Soil hydraulic conductivity as effected by physical and chemical properties of effluents'. *Agronomy* 3,8: 771-778.

MILLER, M.H., J.B. ROBINSON AND R.W. GILLHAM, 1985. 'Self-sealing of Earthen Liquid Manure Storage Ponds: I. A case Study'. *J. Environ. Qual.* 14,4: 553-538.

NORTH WEST DISPOSAL OFFICERS, 1991. *Leachate Management Report*. Leyland, Leyland Lane, Leyland Printing Company Ltd., PR5 3BT.

OOSTEROM, H.P., 1990. *De waterdichtheid van natuurlijke materialen in relatie met de bovenafdicthting van stortterreinen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 69.

RASMUSON, A. AND J.C. ERIKSSON, 1988. 'On the Physico-Chemical Basis for the Capillary Barrier Effect'. *Nordic Hydrology* 19: 281-292.

ROWSELL, J.G., M.H. MILLER AND P.H. GROENEVELT, 1985. 'Self-sealing of Earthen Liquid Manure Storage Ponds: II. Rate and Mechanism of Sealing'. *J. Environ. Qual.* 14,4: 539-543.

SCHEVON, G.R. AND G. DAMAST, 1986. 'Using double liners in landfill design and operation'. *Waste Management & Research* 4: 161-176.

SCHICKETANZ, R., 1991. 'Sickerwasserrohre zur Deponie-Entwässerung-Systeme und praktisches Betriebsverhalten'. *Wasser und Boden* 12: 763-766.

SCHÖNIAN, E. VON, 1991. 'Asphaltbeton - Dichtungen im Deponiebau'. *Müll und Abfall* 1: 12-20.

STEFFEN, H., 1990. 'Anforderung an die Dichtungselemente von Kombinationsdichtungen für die Deponiebasis'. *Müll und Abfall* 10: 638-648.

USTRICH, E., 1991. *Geochemische Untersuchungen zur Bewertung der Dauerbeständigkeit mineralischer Abdichtungen in Altlasten und Deponien*. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland.

VROM, 1982. *Natuurlijke afdichtingsmaterialen*. 's Gravenhage, Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiëne, Bodembescherming no. 8.

VROM, 1985. *Richtlijn gecontroleerd storten*. 's Gravenhage, Samson.

WEISS, A., 1989. 'About sealing of waste disposals by clays with special consideration of organic compounds in percolating water'. *Applied Clay Science* 4,2: 193-209.

WOHNICH, S., 1990. 'Die Flieszvorgänge in Kapillarsperrensystemen für Deponieabdichtungen'. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 141, 2: 330-338.

ZASLAVSKY, D., 1980. *Specification for sealing of earth reservoirs by non-continious plastic membranes*. Israel, Haifa, Technion, Israel Institute of Technology, Publication No. 314.

Niet-gepubliceerde bronnen

ERTEC, 1983. *Liner/location Analysis Project*. USA, New Yersey, Ertec Atlantic Inc. Sommerset.

KOENIS EN LOOVERS, 1991. *Klei als basisafdichtingsmateriaal voor vuilstortplaatsen*. Wageningen, Landbouwniversiteit, Vakgroep Ruimtelijke Planvorming.

PARKINSON, C.D., 1991. *The reliability of geomembranes as barriers to containmant migration*. Symposium Containment of pollution and redevelopment of closed landfill sites, 23-24 april 1991, Leamington Spa, Paper 3.3.