

32/ uub (91) 2^e ex

Richtlijnen voor ontwerp en konstruktie van eindafdekkingen
van afval- en reststofbergingen

J. Hoeks
H.P. Oosterom
D. Boels
J.F.M. Borsten
K. Strijbis
W. ter Hoeven

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

Rapport 91

STARING CENTRUM, Wageningen, 1990



16 OKT. 1990

ISBN = 521950 *

REFERAAT

Hoeks, J., H.P.Oosterom, D. Boels, J.F.M. Borsten, K. Strijbis en W. ter Hoeven, 1990. Richtlijnen voor ontwerp en constructie van eindafdekkingen van afval- en reststofbergingen. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 91. 172 blz.; 30 fig.; 27 tab.

Ontwerpcriteria en -methoden zijn ontwikkeld voor de eindafdekking van stortplaatsen, waarbij a) ontoelaatbare emissies van verontreinigingen naar de bodem wordt voorkomen, b) een goede standplaats wordt gecreëerd voor vegetaties, c) bepaalde gebruiksmogelijkheden na sluiten van het stort mogelijk zijn. Er is rekening gehouden met de mogelijkheid voor mechanisch onderhoud terwijl daarnaast de taluds stabiel en erosiebestendig zijn. De eindafdekking is zodanig ontworpen, dat het zijn functies ook nog vervult als het stort onregelmatige zettingen toont.

Voorbeelden van constructies van de teen, ontgassingssystemen en doorvoeren voor percolaat-drainage zijn gegeven. Aandacht is besteed aan landschappelijke inpassing en beplanting. Richtlijnen zijn ontwikkeld voor het vooronderzoek en acceptatiecriteria voor materiaal voor de opbouw van verschillende lagen. Mogelijkheden voor uitvoeringscontrole en de nazorg zijn genoemd.

Trefwoorden: bodemverontreiniging, emissiepreventie, stortplaatsen, bovenafdichting, materiaal keuze, zand-bentoniet, klelaafdichting, drainagebehoefte, erosie preventie, stabiliteit taluds, teenconstructies, landschappelijke inpassing, uitvoeringscontrole, nazorg.

ISSN 0924-3070

Copyright 1989

STARING CENTRUM Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Tel.: 08370 - 19100; telefax: 08370 - 24812; telex: 75230 VISI-NL

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

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

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

Project nr. 15514

464wn/08.90

SAMENVATTING	9	
1	INLEIDING	15
1.1	Bodembeschermingsbeleid bij lokale verontreinigingsbronnen	15
1.2	Richtlijn Gecontroleerd Storten	15
1.3	Doel van de Richtlijn Eindafdekking Afvalstort	16
2	UITGANGSPUNTEN VOOR EINDAFDEKKING VAN EEN AFVALSTORT	17
2.1	Functies van de eindafdekking	17
2.2	Argumenten voor een waterdichte eindafdekking	17
2.3	Selectie van afdichtingsmaterialen	20
2.4	Schematische opbouw van de eindafdekking	22
3	PROTOCOL VOORONDERZOEK AFDICHTINGSMATERIALEN	25
3.1	Inleiding	25
3.2	Granulair onderzoek	27
3.3	Kleimineralogisch en bodemchemisch onderzoek	32
3.4	Onderzoek naar verdichtingsmogelijkheden	37
3.4.1	Algemeen	37
3.4.2	Bepaling van verdichtingsgrootheden	37
3.4.3	Vaststellen van de maximale dichtheid	40
3.5	Onderzoek naar de plasticiteit	44
3.6	Onderzoek naar waterdichtheid	47
3.6.1	Inleiding	47
3.6.2	Principes van waterstroming in natuurlijke afdichtingsmaterialen	47
3.6.3	Methoden voor de bepaling van de waterdoorlatendheid	52
3.6.3.1	Voorbehandeling van het monster	52
3.6.3.2	De "constant head"-methode	53
3.6.3.3	De "falling head"-methode	55
3.6.3.4	Tijdsduur van het doorlatendheidsonderzoek	57
3.7	Geschiktheidsbeoordeling van natuurlijke afdichtingsmaterialen	57
4	PROTOCOL VOOR DE OPBOUW VAN DE EINDAFDEKLAAG	61
4.1	Inleiding	61
4.2	Steunlaag	61
4.3	Afdichtingslaag	62
4.4	Drainagelaag met drainagesysteem	63
4.4.1	Materiaaleisen en laagdikte	63
4.4.2	Gevaar voor afschuiving	64
4.4.3	Ontwateringscriterium	64
4.4.4	Berekening van drainafstand	65
4.4.5	Drainagestelsel	66
4.5	Afdekgrond	67
4.5.1	Materiaaleisen en laagdikte	67
4.5.2	Vochtleverend vermogen	67
4.5.3	Infiltratiecapaciteit en erosiegevoeligheid	71
4.5.4	Uitspoeling van oplosbare stoffen	75
4.6	Geschiktheidsbeoordeling	76

5	RICHTLIJN VOOR DE CONSTRUCTIE VAN DE WATER- DICHT EINDAFDEKKING ONDER VELDOMSTANDIGHEDEN	79
5.1	Inleiding	79
5.2	Randvoorwaarden, opgelegd door de lokale situatie	79
5.2.1	Type en vorm van het afvalstort	79
5.2.2	Zetting en klink van ondergrond en afval	81
5.2.3	Consequenties voor de afdichtende laag	83
5.3	Speciale constructies	85
5.3.1	Teenconstructies aan de voet van de helling	85
5.3.2	Constructies in verband met ontgassing	87
5.3.3	Constructies in verband met drainage	97
5.3.4	Doorvoerconstructies	98
5.3.5	Aansluitingen	101
5.4	Eindafwerking en landschappelijke vormgeving	105
5.4.1	Algemeen	105
5.4.2	Grasbedekking	105
5.4.3	Planttechnische mogelijkheden	106
5.4.4	Beplantingen	108
5.4.5	Landschappelijk vormgeving	112
5.4.6	Landschappelijke visies	113
5.5	Uitvoeringsmethodieken	115
5.5.1	Inleiding	115
5.5.2	Drainerende steunlaag	116
5.5.3	Ontgassingssysteem/afvoer verontreinigd water	117
5.5.4	Afdichtingslaag	118
5.5.5	Teenconstructies	120
5.5.6	Ontwateringssysteem	120
5.5.7	Drainagelaag	121
5.5.8	Bewortelingslaag	121
5.6	Uitvoeringscontrole en kwaliteitszorg	122
5.6.1	Inleiding	122
5.6.2	Kwaliteitssysteem	123
5.6.3	Parameters voor controle en frequentie van de controle	124
5.6.4	Keuring en beproeving	124
5.6.4.1	Produkt keuring	124
5.6.4.2	Kwaliteitsregistratie	126
5.6.4.3	Het beoordelen van toeleveranciers en de inkoopdocumenten	126
5.6.4.4	Keurings-, meet- en beproevingsmiddelen	127
5.6.5	Procesbeheersing	128
5.6.6	Beheersing van tekortkomingen	130
5.7	Meervoudige afdichtingen	130
5.7.1	Algemeen	130
5.7.2	Mogelijke combinaties	132
6	RICHTLIJN VOOR CONTROLE EN NAZORG	135
6.1	Inleiding	135
6.2	Controlemogelijkheden	135
6.2.1	Visuele inspectie en luchtfotografie	135
6.2.2	Waterbalansmetingen	136
6.2.3	Kwaliteit van het afgevoerde water	137
6.3	Opsporen van lekken en verstopte drains	137
6.3.1	Lekkage van stortgas	137
6.3.2	Bodemtemperatuur in de afdeklaag	138
6.3.3	Drainafvoeren en kwaliteit drainwater	138
6.4	Onderhoud en beheer	139
6.5	Reparatiemogelijkheden	139
6.5.1	Inleiding	139
6.5.2	Reparaties aan de afdichtingslaag	141
6.5.3	Uitvoeringsaspecten	142

7	RICHTLIJNEN VOOR HERINRICHTING EN GEBRUIKS- MOGELIJKHEDEN VAN AFVALSTORTTERREINEN	145
7.1	Inleiding	145
7.2	Gebruiksmogelijkheden	146
7.3	Geschiktheidsbeoordeling	147
7.4	Aanpassingen in de afdeklaag	154
LITERATUUR		157
AANHANGSEL		161
FIGUREN		
1	Waterbalanstermen afvalstort	18
2	Verloop van poriënvolume en vochtgehalte in een afvalstort	20
3	Schematische opbouw van de afdeklaag	22
4	De relatie tussen v en i volgens de wet van Darcy	25
5	Indeling gronden naar lutumgehalte	28
6	Indeling gronden naar leemgehalte	28
7	Voorbeelden korrelgrootteverdeling (veel en weinig gradatie)	31
8	Effect van gehalte aan fijne delen op de doorlaat- factor van zand-bentoniet mengsels (naar gegevens van d'Appelonia, 1980)	35
9	Doorlaatfactor ($K = v/i$) van zand-bentoniet mengsels, bestaande uit matig fijn zand en Wyoming bentoniet, gemeten bij een stijghoogtegradiënt van $i = 8$ en een zwelperiode van 2 weken	35
10	Verloop doorlaatfactor van mengsels van matig fijn zand met 5 gew. % bentoniet (geactiveerde Europese bentoniet resp. Wyoming bentoniet) bij constante stijghoogtegradiënt ($i = 30$)	36
11	Theoretisch verband tussen maximale dichtheid en vochtgehalte	41
12	Doorlaatfactor in relatie tot het vochtgehalte tijdens verdichting en de maximale verdichting (Samte e.a., 1969)	43
13	Effect van verdichting op de structuur (fig 34.6 uit Soil Mechanics)	43
14	a Consistente grenzen met betrekking tot het watergehalte	45
	b Toestel van Cassagrande	45
	c Bepaling vloeigrens van het onderzochte monster (Bolderman en Dwars, Waterbouwkunde deel I)	45
15	Relatie tussen plasticiteitsindex en lutumfractie voor verschillende gronden en kleimineralen (uit: Soil Mechanics, fig 3.8)	46
16	Schematische weergave van de relaties tussen de filtersnelheid (v) en de potentiaal gradiënt (i) voor slecht doorlatende kleimineralen	48
17	Verband tussen doorlaatfactor en gradiënt a grofzandig materiaal	49
	b fijn materiaal, zeer lage doorlaatfactor	49
18	Effect van de dikte afdichtingslaag op stijghoogte gradiënt	50
19	Ontwerpgrafiek voor de bepaling van de minerale dikte van een afdichtende laag	51
20	Meetopstelling voor de "constant head"-methode	53
21	Meetopstelling voor de "falling head"-methode	56
22	Verloop doorlaatfactor (hier berekend als v/i) van mengsels met 5% Wyoming bentoniet bij stijg- hoogtegradiënt $i = 5, 30$ en 55 (Hoeks et al. 1987)	57

23	Voorbeeld: pF-curve van zavelgrond	68
24	Diagram van Hjulström	72
25	Basismodellen van voorkomende stortterreinen	79
26	Principe oplossingen teen constructies (a t/m g)	88
27	Schetsontwerp gasbron en doorvoering door afdichting	96
28	Aansluitingsconstructies	103
29	Schematische voorstelling van de opties "verbergen", "herkennen" en accentueren"	113
30	Principe van een proefveld met 3 vakken ten behoeve van verschillende verdichtingsmethoden	131

TABELLEN

1	De jaarlijkse lekkage (mm/jaar) door een bovenafdichting (laagdikte 0,25 m) onder Nederlandse klimaatsomstandigheden (naar: Hoeks en Agelink, 1982)	26
2	Enkele kenmerken van grondsoorten waaruit de Nederlandse bodem is samengesteld	29
3	Globale waarden voor doorlaatfactor van klei- gronden in relatie tot het lutumgehalte	30
4	Globale waarden voor de doorlaatfactor van leemgronden	30
5	Doorlaatfactoren van enkele Nederlandse kleigronden (naar Oosterom, 1989)	32
6	Specifiek oppervlak en kationenadsorbtie- capaciteit (CEC) van enkele veel voorkomende kleimineralen	33
7	Zwelvermogen van enkele bentonietsoorten	35
8	Indeling en benaming naar kalkgehalte (De Bakker en Schelling, 1966)	36
9	Consistentiegrenzen van enkele grondsoorten	46
10	Ontwateringscriteria	65
11	Verhouding drainafstand en onttrekking midden tussen drains bij verschillende verhouding tussen maatgevende afvoer (S) en doorlaatfactor (K) van de drainlaag (S/K) volgens de formule van Ernst	66
12	Standaard vocht karakteristieken van 20 bodem horizonten	69
13	Omschrijving bodemhorizonten uit tabel 11	70
14	Lichte effectieve bewortelingsdiepte (cm) (naar Werkgroep HELP, 1987)	71
15	Wandoneffendheid	74
16	Maximale hoogteverschil tussen evenwijdige greppels bij gegeven kritische stroomsnelheid en maatgevende neerslagintensiteit-infiltratie- snelheid	75
17	Afname helling ten gevolge van afname hoogte van een stort	82
18	Toeslag in laagdikte (cm) en bentoniet (%) t.b.v. afdichtingslaag (toelagen cummuleren en opstellen bij ontwerp karakteristiek)	84
19	Mogelijkheden struikbeplanting	109
20	Mogelijkheden van beplanting op hellingen	110
21	Resultaten proefbehandeling	111
22	Controle op kwaliteit bij de aanleg van een afdichtingslaag	125
23	Controle, onderhoud en beheer van voorzieningen	140
24	Gebruik t.a.v. beplanting	148
25	Gebruik t.a.v. bovengrondse infrastructuur	150
26	Gebruik t.a.v. ondergrondse infrastructuur	151
27	Gebruik t.a.v. constructies	152

SAMENVATTING

In de Richtlijn Gecontroleerd Storten van 1985 wordt aanbevolen om na beëindiging van de stortactiviteiten een afdichtende eindafdekking aan te brengen. Ook voor nieuwe stortterreinen wordt deze aanbeveling gedaan, ook al hebben deze een onderafdichting. Er wordt aangenomen, dat die op den duur kunnen gaan lekken. Met een eindafdichting wil men voorkomen dat regenwater in het stort terecht komt, dit uitloogt en vervolgens de bodem en het grondwater verontreinigt.

In de huidige Richtlijn wordt slechts summier aandacht besteed aan de constructie van een afdichtende eindafdekking. Het gebruik van natuurlijke (minerale) materialen komt daarbij nauwelijks aan de orde, omdat in 1985 het onderzoek naar de bruikbaarheid ervan nog in uitvoering was. Inmiddels is gebleken dat bepaalde natuurlijke materialen geschikt zijn. Natuurlijke materialen zijn gelijkwaardig aan folies, ook al omdat van deze laatste wordt verwacht dat ze niet absoluut waterdicht zijn, zeker niet op de wat langere termijn.

Om meer duidelijkheid te brengen in ontwerpcriteria en materiaaleisen van eindafdekkingen enerzijds en nazorg en nazorgcontrole anderzijds, heeft het ministerie VROM een studie laten verrichten naar mogelijke richtlijnen hiervoor. Dit rapport is de neerslag van die studie.

Functies van de eindafdekking

In Nederland valt er jaarlijks ca. 750 mm regen. Een deel daarvan komt direct weer in de atmosfeer via verdamping door de vegetatie. Dat gebeurt voornamelijk vanaf het late voorjaar tot halverwege het najaar (ca. 150 dagen). In die periode kan de verdamping zelfs groter zijn dan de neerslag waardoor de vegetatie vocht aan de bodem onttrekt. De hoeveelheid vocht, die de vegetatie potentieel aan de bodem kan onttrekken, wordt het neerslagtekort genoemd. In een droog jaar, dat gemiddeld een keer per 10 jaar voorkomt, is dit tekort ca. 150 mm voor gras en ca. 200 mm voor de overige begroeiing. Een eindafdekking, die fungeert als standplaats voor vegetatie, moet die hoeveelheid vocht kunnen leveren.

In het najaar, winter en voorjaar (ca. 200 dagen) is de neerslag groter dan de verdamping; ca. 300-400 mm op jaarbasis. Dit overschot wordt via de bodem afgevoerd en komt uiteindelijk terecht in het oppervlaktewater. Zonder voorzieningen zou dit door het afvalstort percoleren en het uitlogen. De eindafdekking moet percolatie voorkomen en het overschot zijdelings afvoeren.

Organisch materiaal in gestort afval wordt omgezet in o.a. methaangas. Als dit gas vrijelijk door de afdeklaag zou kunnen ontsnappen, zou het terecht komen in de wortelzone van de afdeklaag. Daar kan dit gas weer biologisch worden omgezet (geoxideerd) waarvoor zuurstof nodig is, die aan de bodemlucht wordt onttrokken. In goed gestructureerde gronden, die boven-

dien niet te nat zijn, wordt deze onttrekking gemakkelijk weer aangevuld (via diffusie). Gebeurt dat niet of onvoldoende, dan ontstaat er een zuurstof-arme toestand, waarbij plantenwortels sterven. Als zo'n toestand lang duurt, kan de gehele vegetatie afsterven (te vergelijken met afsterven van bomen rond aardgaslekken). De eindafdekking moet derhalve gasdicht zijn.

Opbouw van de eindafdekking

De eindafdekking is opgebouwd uit een aantal lagen, met ieder een specifieke functie. De afzonderlijke lagen in volgorde van onderen naar boven zijn:

- het afval. In de bovenste laag afval moet geen grof vuil meer worden gestort. Onregelmatige of scherpe voorwerpen kunnen op termijn de afdichtingslaag beschadigen. In veel gevallen is het afval al afgedekt met een laag grond. Deze laag wordt de basislaag genoemd.
- steunlaag. Een laag grond van ca. 0,3 m, die enerzijds dient om stortgas op te vangen en dus poreus moet zijn, anderzijds fungeert hij als "werkvloer" waarop de afdichtingslaag wordt aangelegd. Daarbij dient hij als klankbord tijdens de verdichting van de afdichtingslaag. Als de basislaag plaatselijk slap is, kan deze worden versterkt met een geotextiel of kan de steunlaag dikker worden gemaakt.
- afdichtingslaag. De dikte van de afdichtingslaag wordt berekend aan de hand van een ontwerpcriterium. Daarbij wordt uitgegaan van een waterspanning van + 0,5 m boven de afdichtingslaag en - 0,5 m waterkolom eronder. Bij die randcondities mag er gedurende de afvoerperiode (200 dagen) niet meer dan een bepaalde hoeveelheid percoleren. Deze ontwerphoeveelheid hangt samen met de stand van de techniek en bruikbare materialen. De dikte van de laag kan worden berekend als de doorlaatfactor van het te gebruiken materiaal bekend is. De doorlaatfactor is geen constante, maar hangt samen met de waterspanningsgradiënt over de laag: relatief gering bij een geringe gradiënt en groter naarmate de gradiënt groter is. Verder wordt de doorlaatfactor gebruikt, die hoort bij de zgn. Proctor-dichtheid. Een ontwerpgrafiek is samengesteld voor de bepaling van de dikte van de afdichtingslaag, waarbij een maximaal toelaatbare percolatie gehanteerd wordt bij gegeven testcondities. Deze percolatie ligt niet vast, maar zal steeds op basis van de stand van techniek en wetenschap moeten worden vastgesteld.

Het ontwerp van de afdichtingslaag is gebaseerd op een ontwerp-percolatie. Dat wil niet zeggen, dat in werkelijkheid die percolatie ook zal optreden. In het algemeen is de gemiddelde waterstand boven de laag geringer dan die waarvan in het ontwerp wordt uitgegaan. Daarnaast kan er onder de afdichtingslaag als gevolg van geringe gasdruk, een tegendruk zijn opgebouwd, waardoor de reële percolatie nihil is.

De afdichtingslaag moet minstens 0,25 m zijn als een mengsel van zand-bentoniet wordt gebruikt en 0,3 m bij gebruik van natuurlijke kleien. Bij die diktes worden vervormingen door ongelijkmatige zettingen goed opgevangen en behoudt de laag zijn afdichtende functie. Afhankelijk van de hoeveelheid organisch materiaal in het afval en de ouderdom van het stort (i.v.m. zetting en krimp), de helling van het talud, vlakheid

steunlaag enz. wordt een dikkere afdichtingslaag gemaakt of wordt in voorkomende gevallen het percentage bentoniet verhoogt (hiervoor is een tabel beschikbaar).

- drainlaag. Door de drainlaag wordt overtollige neerslag afgevoerd. Verder voorkomt deze laag dat in de bodem levende dieren en plantenwortels de afdichtingslaag beschadigen. Ook wordt voorkomen dat er vocht aan de afdichtingslaag wordt onttrokken, waardoor de gasdichtheid zou kunnen verminderen (herbevochtiging herstelt dit euvel). De drainlaag heeft een dikte van omstreeks 0,3 m en bezit een grote doorlaatfactor. In deze laag worden op een bepaalde regelmatige afstand drainbuizen aangelegd. De onderlinge afstand wordt aan de hand van een ontwerp-criterium berekend. Dit houdt in dat de drains 10 mm per dag kunnen afvoeren, terwijl de hoogste grondwaterstand (midden tussen de drains) niet meer dan 0,3 m boven drainniveau staat. Ten behoeve van het ontwerpen van de drainafstand is een hulptabel opgesteld, die ook voor hellingen kan worden toegepast.
- afdekgrond. Deze laag grond dient volledig bewortelbaar te zijn, is daarbij niet dikker dan 0,8 à 1,0 m en kan in zeer droge jaren nog 150-200 mm vocht leveren. De (chemische) kwaliteit van de grond moet zodanig zijn, dat het drainage-water, dat door deze laag is gepercoleerd, voldoet aan lozingseisen van het zuiveringsschap.

Helling taluds en erosie preventie

De maximale helling van de taluds wordt bepaald door enerzijds de praktische mogelijkheid om de eindafdekking machinaal aan te brengen, anderzijds door de eis om onderhoud mechanisch zonder al te veel risico's te kunnen uitvoeren. In het algemeen kan worden gesteld, dat om die redenen de taluds niet steiler moeten zijn dan 1 : 3. Stabiliteitsanalyse van de taluds moet zijn gewaarborgd. Een stabiliteitsanalyse dient dan ook te worden uitgevoerd als de hellingen steiler zijn dan 1 : 5. Wordt weinig cohesief materiaal toegepast, dan is een stabiliteitsanalyse al nodig bij hellingen steiler dan 1 : 4 en in overige gevallen bij steilere hellingen dan 1 : 3. In het laatste geval wordt aanbevolen de berekeningen door deskundigen te laten uitvoeren. Speciale aandacht verdient de constructie van de teen van de helling.

Voor erosiebestrijding geldt een ander uitgangspunt. Hierbij wordt uitgegaan van een zekere, weinig frekvent voorkomende neerslagintensiteit, waarbij er oppervlakkige afstroming optreedt. Afhankelijk van het bodemmateriaal en de mate van begroeiing, zal er erosie optreden als een zekere kritische stroomsnelheid wordt overschreden. Voor onbegroeide zandbodems is deze 0,2-0,5 m/s en voor kleibodems 0,6-2,0 m/s. Bij begroeiing is de kritische snelheid 3 à 4 keer zo hoog.

Als er gevaar voor erosie bestaat, kunnen er opvanggreppels worden aangelegd, die het water afvoeren voor dat de kritische snelheid is bereikt. De greppels worden op verschillende hoogten aangelegd. Het onderlinge hoogteverschil wordt bepaald door de ontwerp-regenintensiteit, verminderd met de infiltratiecapaciteit van de bodem, de oppervlakteruwheid en de kritische snelheid. Hiervoor is een ontwerp-tabel opgesteld.

Geschiktheidsbeoordeling materialen

In de eindafdekking kunnen verschillende materialen worden verwerkt. In principe is de verantwoordelijke instantie vrij in de keuze, zolang wordt voldaan aan de ontwerpcriteria. Per laag is bepaald aan welke eisen het materiaal moet voldoen. Dit betekent, dat wanneer een eindafdekking wordt gemaakt, vooraf vast moet staan welke materialen beschikbaar zijn en in welke mate zij voldoen aan de eisen.

- de basislaag. Hieraan worden nauwelijks eisen gesteld, behalve dat deze geen grove of scherpe voorwerpen mag bevatten.
- de steunlaag. De tweeledige functie kan worden gerealiseerd als de grond een ruime gradering heeft en goed gasdoorlatend is. In het algemeen is het materiaal geschikt, als het voldoet aan de "Eisen Rijkswaterstaat, 1978" voor cunetzand. Wordt hierop een folie gelegd, dan moet de grootste korreldiameter kleiner zijn dan 3 mm. Bij een minerale afdichtingslaag mag deze groter zijn.
- de afdichtingslaag. Naast alle andere eigenschappen van het materiaal waarmee de afdichtingslaag wordt gemaakt, dient de plasticiteitsindex groter te zijn dan 35% (= vochtgehalte bij vloeigrens - vochtgehalte bij uitrolgrens). Geschikt zijn kalkarme kleien met meer dan ca. 35% lutum (deeltjes kleiner dan 2 micrometer), die verdicht kunnen worden tot omstreek 1500 kg/m^3 .

Zand-bentonietmengsels zijn eveneens geschikt. Het bentonietgehalte moet minstens 5% zijn en wordt verder bepaald aan de hand van laboratoriummetingen van de doorlaatfactor. Zand, dat in deze mengsels wordt gebruikt moet ruim gegradeerd zijn, wat wordt gekarakteriseerd door de zogenaamde uniformiteitscoëfficiënt. Zand heeft een voldoende gradatie als de uniformiteitscoëfficiënt groter is dan 10. Zand-bentonietmengsels moeten tot minstens ca. 1800 kg/m^3 kunnen worden verdicht. Klei en zand-bentoniet mengsels moeten minstens 5% zwellende kleimineralen bevatten. In zwelproeven kan dit worden vastgesteld. Leem, löss, keileem en lemige dekzanden zijn geschikt, als het leemgehalte (deeltjes kleiner dan 50 micrometer) groter is dan ca. 70%. In principe worden alle materialen in de afdichtingslaag verdicht tot de "standaard Proctordichtheid".

- de drainlaag. Elk materiaal, dat vrijwel geen organische stof bevat en waarvan de doorlaatfactor 5 à 10 m/dag ($5,79 \cdot 10^{-5} - 11,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) is, is geschikt. Het materiaal moet tot minstens 1650 kg/m^3 kunnen worden verdicht. Onder die voorwaarden is geen beworteling mogelijk. De dikte moet minstens 30 cm zijn.
- afdeklaag. Elk materiaal is geschikt, mits aan enkele voorwaarden is voldaan.
 - a) De grond mag geen verontreinigingen bevatten. Als grond wordt gebruikt, die elders bij saneringen is vrijgekomen en is gereinigd, wordt aanbevolen om via een schudproef met water de concentraties aan verontreinigende stoffen in een 1:5 extract vast te stellen. In verband met de lozingseisen is het gewenst inzicht te hebben in: pH, EGV (electrisch geleidingsvermogen), BOD, COD, Cl, NO_3 , NH_4 , olie, aromaten en eventueel andere specifieke verontreinigingen.
 - b) Het kalkgehalte dient gering te zijn omdat op de lange duur uitwisseling kan plaatsvinden van Na- tegen Ca-ionen in de afdichtingslaag door diffusie. Het zwelvermogen van kleimineralen zal daardoor afnemen en de doorlaatfactor zal

kunnen toenemen. Bij een zand-bentonietafdichting kan hiermee rekening worden gehouden door overdosering van bentoniet. Niettemin wordt het gebruik van kalkhoudende afdekgrond ontraden.

c) De infiltratiecapaciteit moet zodanig groot zijn, dat ook bij hevige regenval er nauwelijks water over het oppervlak wegstroomt. Deze eis is bedoeld om erosie op hellingen te voorkomen.

d) Het vochtbergend vermogen wordt berekend als het verschil in vochtinhoud bij een waterspanning van - 1,0 m waterkolom (~ 100 mbar) en -16,0 m (~ 16 bar). Dit moet ca. 15-20 vol.% zijn. Hieraan voldoen de meeste, humeuze zand-, zavel- en kleigronden. Gebruik van veen of venig materiaal wordt afgeraden, omdat dit materiaal relatief snel biologisch wordt afgebroken. Regelmatige aanvulling van verloren materiaal zou daarbij noodzakelijk zijn.

Speciale constructies

Gebaseerd op praktijkervaringen zijn een aantal voorbeelden van constructies gegeven. Daarbij is aandacht besteed aan de teenconstructie in verband met eventuele overdruk van het percolaat in de stort. Voorbeelden van ontgassingssystemen en doorvoeren voor teendrainages zijn gegeven.

Eindafwerking en landschappelijke vormgeving

Gebaseerd op landschappelijke visies zijn mogelijkheden voor landschappelijke vormgeving aangegeven. De toe te passen beplanting wordt bepaald enerzijds door de vormgeving, anderzijds door de planttechnische mogelijkheden en mogelijkheid tot controles. Tabellen zijn opgesteld ten behoeve van de keuze van plantmateriaal, bij gegeven standplaatscondities.

Controles

Er kunnen verschillende controlerende organisaties worden onderscheiden: de beheerder, de vergunningverlenende instantie en de aannemer. Controles vinden plaats in verschillende stadia:

- tijdens de ontwerpfase, ten behoeve van materiaalkeuze, door beheerder en eventueel door vergunningverlener (contra-expertise);
- tijdens het opstellen van bestek en besteksvoorwaarde door beheerder en eventueel door vergunningverlener (na-controle van constructie, uitvoeringsmethode, controlemethoden en criteria voor goedkeuring);
- tijdens aanleg van eindafdekking door aannemer, beheerder/ opdrachtgever en eventueel vergunningverlener;
- na aanleg, ten behoeve van het functioneren van de afdichting, door beheerder en eventueel door vergunningverlener;

De vergunningverlener kan bepalingen opnemen in de vergunning voor de verschillende controles, de te volgen methodiek en criteria voor goedkeuring. In dit stadium zijn verschillende

aanzetten gegeven voor de verschillende controles, waarbij die in het ontwerpstadium voldoende zijn uitgekristalliseerd. Mogelijkheden voor en beperkingen van controles in de nazorg fase zijn aangegeven. Geconcludeerd kan worden dat nader onderzoek op dit terrein nog nodig is.

1 INLEIDING

1.1 Bodembeschermingsbeleid bij lokale verontreinigingsbronnen

Het algemeen uitgangspunt bij het preventieve bodembeschermingsbeleid is het behoud of herstel van de multifunctionaliteit van de bodem. Het is voor het beleid ten aanzien van lokale verontreiniging vanuit lokale bronnen nader uitgewerkt in het standpunt, dat verspreiding van bodembedreigende stoffen moet worden voorkomen via het hanteren van de zogenaamde IBC-criteria (Isoleren, Beheren en Controleren). Daarnaast is het beleid brongericht, wat wil zeggen dat het primair de vermindering van de afvalstoffenstroom beoogt. Dit zal worden bereikt door zoveel mogelijk het ontstaan van afval te voorkomen en hergebruik van afval te bevorderen. De onvermijdelijke stroom zal daarnaast worden gecompriemd (verbranden, composteren) en de residuen worden gestort.

Uiteraard zal het opslaan of storten van deze reststoffen zodanig moeten plaatsvinden, dat als er emissie van stoffen optreedt naar water, bodem of lucht, er wordt voldaan aan de IBC-criteria. De aan te brengen voorzieningen dienen er voor te zorgen dat de stortplaats geïsoleerd is van zijn omgeving, dat deze situatie beheersbaar is en blijft en dat controle op het functioneren van de aangebrachte voorzieningen mogelijk is.

1.2 Richtlijn Gecontroleerd Storten

Voor nieuw in te richten stortplaatsen wordt in de Richtlijn Gecontroleerd Storten een vloeistofdichte bodemafdichting (bijvoorbeeld een kunststof- of bitumenfolie) voorgeschreven, waarbij het verontreinigde percolatiewater moet worden opgevangen en gezuiverd voor het geloosd kan worden op het oppervlaktewater. Voor oudere stortterreinen, die binnenkort zullen worden afgesloten of waar nog verdere ophoging met afval zal plaatsvinden, wordt in de richtlijn aanbevolen om na beëindiging van de stortactiviteiten een waterdichte eindafdekking aan te brengen. Ook voor nieuwe stortterreinen wordt deze aanbeveling gedaan met het doel om het ontstaan van percolatiewater te voorkomen of te beperken.

In de huidige Richtlijn Gecontroleerd Storten wordt slechts summier aandacht besteed aan de constructie van een waterdichte eindafdekking. Het gebruik van natuurlijke afdichtingsmaterialen komt daarbij nauwelijks aan de orde omdat bij het verschijnen van de Richtlijn in 1985 het onderzoek nog gaande was naar de mogelijke toepassing van deze materialen voor bovenafdichting.

Inmiddels is hierover meer bekend (Hoeks, Ryhiner en Van Dommelen, 1987) en zijn de resultaten geëvalueerd. Hieruit is gebleken dat sommige natuurlijke materialen geschikt zijn voor de constructie van afdichtingslagen op afvalstortterreinen. Uit dit onderzoek zijn tevens richtlijnen af te leiden voor de opbouw en ontwatering van de eindafdeklaag en de daarvoor te

gebruiken materialen.

1.3 Doel van Richtlijn Eindafdekking Afvalstort

Het opstellen van richtlijnen voor het aanbrengen van een eindafdekking boven stort- en opslagplaatsen van afval- en reststoffen heeft tot doel om uniformiteit te brengen in de beoordeling, keuring en acceptatie van de te gebruiken materialen. De term stort- en opslagplaatsen wordt hier gebruikt om aan te geven dat de richtlijnen niet alleen betrekking hebben op permanente stortplaatsen, maar ook op tijdelijke opslag. Immers vele tijdelijke opslagplaatsen lijken soms het karakter van een permanente te hebben. Ook al wordt er in deze richtlijnen alleen gesproken over stortplaatsen, de locaties voor (langdurige) tijdelijke opslag zijn daarbij stilzwijgend inbegrepen.

In de richtlijnen wordt aangegeven op welke wijze vooronderzoek op het laboratorium dient te worden uitgevoerd, welke ontwerpnormen gehanteerd kunnen worden bij het ontwerp van de dikte en opeenvolging van lagen in de eindafdekking, en welke controle tijdens de uitvoering en de controle en nazorg na sluiting en afwerking van de stortplaats.

De belangrijkste functie van een eindafdekking is het voorkomen van infiltratie van regenwater in het stort. Tevens dient de eindafdekking te fungeren als stand- en groeiplaats voor een beplanting. Voor het beperken van percolatie van regenwater kunnen synthetische materialen worden gebruikt (folies). Hiervoor zijn reeds voorschriften beschikbaar (Algra en Der Kinderen, 1984). Als gevolg van ongelijkmatige zettingen in het stort kunnen folies op de lange termijn plaatselijk gaan scheuren. Natuurlijke materialen of materialen die ook bij sterke vervorming hun eigenschappen behouden, verdienen de voorkeur bij de constructie van de eindafdekking van stortplaatsen.

Deze richtlijnen richten zich op het gebruik van natuurlijke materialen voor de constructie van de eindafdekking van stortplaatsen. Voor die gevallen waar een afdichting met synthetisch materiaal specifieke eisen stelt aan de constructie van de eindafdekking is dit in de richtlijnen uitdrukkelijk aangegeven.

Om de keuze van bruikbare materialen te vereenvoudigen, zijn een aantal criteria geformuleerd. Daarnaast zijn vereiste eigenschappen van het materiaal voor de afdichtingslaag gegeven. Verder zijn er richtlijnen gegeven voor de opbouw van de totale afdeklaag met het oog op de bescherming van de afdichtingslaag, de vochtvoorziening van de vegetatie, de ontwatering van de afdeklaag en de afvoer van stortgas. In de richtlijnen is aangegeven welke controles er dienen te worden uitgevoerd. Controle tijdens de uitvoering is gericht op de kwaliteit van de aangevoerde materialen, gerealiseerde laagdikten, mate van verdichting en de constructie van het drainagesysteem. Nadat de eindafdekking is aangebracht, is de controle voornamelijk gericht op het opsporen van storingen. Enkele methoden daarvoor zijn in de richtlijnen vermeld.

2 UITGANGSPUNTEN VOOR HET AANBRENGEN VAN EEN EIND- AFDEKKING

2.1 Functies van de eindafdekking

Op afvalstortplaatsen is het gebruikelijk om het afval, na beeindiging van de stortactiviteiten, af te dekken met een laag grond. Op basis van uitsluitend esthetische overwegingen zou met een minimale grondafdekking kunnen worden volstaan om wegwaaien van papier en plastic (zwerfvuil) te voorkomen. Ook om redenen van volksgezondheid is een dergelijke afdekking gewenst, zodat brandgevaarlijke situaties en stankoverlast worden voorkomen en vogels, ratten en ander ongedierte worden geweerd. De enige eis die daarbij wordt gesteld, is dat de afdeklaag zo dik moet zijn dat ook na zetting geen afval meer zichtbaar is aan het oppervlak.

Voor een aantal andere functies moeten echter specifieke eisen worden gesteld aan de opbouw van de afdeklaag. Dit betreft onder meer de volgende functies (zie ook Lutton et al, 1979):

- het bieden van een standplaats voor de vegetatie;
- het creëren van een geschikte ondergrond in verband met de herinrichting van de stortplaats;
- het beheersen en zo mogelijk voorkomen van infiltratie van regenwater in het stort;
- het beheersen van de afvoer van overtollig regenwater met behulp van een drainagesysteem op zodanige wijze dat afvoer naar het oppervlaktewater mogelijk is;
- het beheersen van de afvoer van stortgas om schade aan de vegetatie te voorkomen en eventueel winning en benutting van het stortgas mogelijk te maken.

De centrale doelstelling van het bodembeschermingsbeleid met betrekking tot stortplaatsen is het voorkomen van een ontoelaatbare verspreiding van verontreinigende stoffen naar bodem, water en lucht conform de IBC-criteria. Vanuit dit milieu-oogpunt zijn de drie laatst genoemde functies van de eindafdekking de belangrijkste.

2.2 Argumenten voor een waterdichte eindafdekking

In Nederland bedraagt de jaarlijkse neerslag ca. 750 mm. Een deel daarvan komt via verdamping door de vegetatie direct weer in de atmosfeer. Dat gebeurt voornamelijk in het voorjaar, zomer en deels in het najaar. In die periode kan de verdamping de neerslag overschrijden en wordt er vocht aan de bodem onttrokken. De onttrokken hoeveelheid wordt ook wel het neerslagtekort genoemd. In de overige periode (ca. 200 dagen) is de neerslag groter dan de verdamping. Op jaarbasis is de totale neerslag 300 - 400 mm meer dan de verdamping (neerslag overschot). Deze hoeveelheid wordt via de bodem naar ontwateringsmiddelen afgevoerd en komt uiteindelijk terecht in het oppervlakte water. Indien er geen voorzieningen zijn getroffen, dan percoleert deze hoeveelheid door het afvalstort en loogt het als het ware uit. Dit kan dan leiden tot bodem- en oppervlaktewaterverontreiniging. De afdekking van stortplaatsen met daarin een afdichting heeft tot doel:

- voorkomen van percolaatvorming en grondwaterverontreiniging,

water. Als daartoe de vrijheid bestaat kan voor deze gevallen een combinatie van afdichting en hoeveelheid te zuiveren percolaat worden bepaald, die leidt tot de geringste kosten. Door Hoeks en Agelink (1982) werd gesteld, overigens zonder een kosten-baten analyse uit te voeren, dat dan de jaarlijkse infiltratie tenminste teruggebracht moest worden tot 50 mm.jr⁻¹. Voor de regionale stortplaats Linne/Montfort, die voorzien is van een basisafdichting, is een dergelijke kosten-baten analyse wel uitgevoerd. Daaruit is gebleken dat de aanleg van een bovenafdichting aanmerkelijke economische voordelen heeft, omdat de jaarlijkse zuiveringskosten aanzienlijk afnemen (Van den bogaard en Hoeks, 1987). Bij de huidige inzichten gaat men er echter van uit dat zelfs op stortplaatsen met een basisafdichting er op de lange duur gevaar voor grondwaterverontreiniging ontstaat. Dit inzicht is verwoord in het toetsingsadvies van de Commissie voor de Milieu-Effectrapportage met betrekking tot het milieu-effect rapport Afvalberging Midden-IJssel (Commissie MER, 1987). De commissie stelt daarin dat "lekkage door de folie op korte termijn waarschijnlijk en op lange termijn zeker is". Bovendien is een lekkende basisafdichting niet of nauwelijks meer te repareren. Immers de hoeveelheid gestort afval belemmert de toegang. Een afdichtingslaag in een eindafdekking kan daarentegen wel op betrekkelijk eenvoudige wijze worden gerepareerd.

Aanleg van een afdichting in de afdeklaag is daarom ook op stortplaatsen met basisafdichting gewenst als preventie van grondwater/bodemverontreiniging. Als uitgangspunt voor de eindafdekking geldt, dat de werking van de afdichtingslaag gecontroleerd en eventueel gerepareerd moet kunnen worden.

In de Richtlijn Gecontroleerd Storten (1985) is de aantekening gemaakt dat een afdichting mogelijk een remmend effect zou kunnen hebben op de afbraakprocessen in het afvalstort, omdat verdere bevochtiging van het afval wordt tegengegaan. Het is echter zeer onwaarschijnlijk dat het afval zo droog zou blijven dat microbiologische afbraak onmogelijk zou zijn. Het initiële vochtgehalte van pas gestort afval is ca. 35 gew.% op basis van nat gewicht. Door zetting en inklinking neemt het poriënvolume in de tijd af en volgens berekening zal het poriënvolume binnen een aantal jaren zo ver zijn afgenomen dat zelfs zonder verdere toevoer van water al veldcapaciteit wordt bereikt (zie fig. 2).

Als tijdens het storten regenwater in het stort terecht komt kan zelfs een situatie ontstaan dat dit water, dat aanvankelijk wordt geborgen in het afval, op de lange duur als gevolg van de zetting weer wordt uitgeperst. Overigens duurt het meestal meerdere jaren voor een bepaald compartiment geheel is volgestort. Dit betekent dat jaarlijks nog ca. 500 mm neerslagoverschot wordt toegevoegd aan de vochtvoorraad in het stort. Stagnatie van de biologische afbraakprocessen door vochttekort lijkt daarom uitgesloten. Om deze reden moet worden aangenomen dat de productie van biogas in het afvalstort normaal doorgaat na het aanbrengen van de eindafdekking. De afdichting zorgt er voor dat het stortgas niet ongecontroleerd kan ontwijken via de afdeklaag. Schade aan de vegetatie door stortgas wordt daarmee voorkomen. Er is echter wel een ontgassingssysteem nodig om het stortgas gecontroleerd af te voeren. Eventueel kan het gas worden gebruikt voor energie-doeleinden.

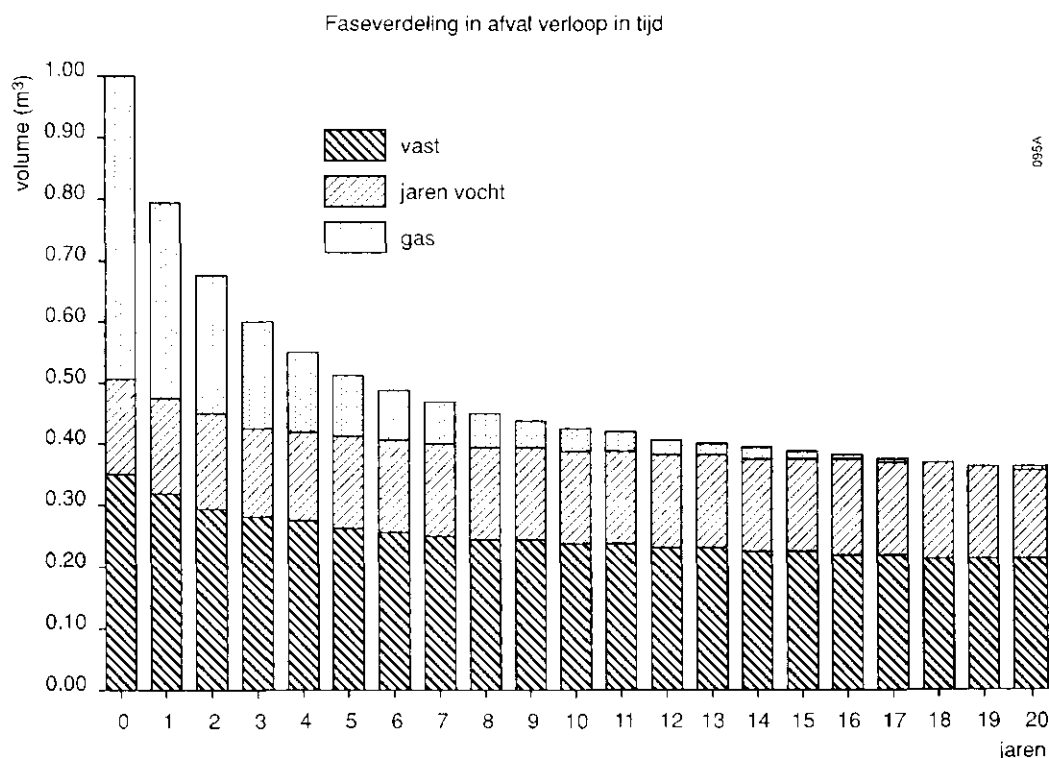


Fig. 2 Verloop van poriënvolume en vochtgehalte in een afvalstort.

2.3 Selectie van afdichtingsmaterialen

In principe komen zowel natuurlijke als synthetische materialen in aanmerking voor de constructie van afdichtingslagen op afvalstortplaatsen. Bij de selectie van een afdichtingsmateriaal moeten verschillende aspecten in beschouwing worden genomen, bijvoorbeeld:

- de specifieke omstandigheden op de locatie (ondergrond, type stort);
- de duur van de opslag (tijdelijk of semi-permanent);
- de aard van de afvalstoffen (organisch of inert materiaal);
- de wijze van constructie in het veld;
- de doorlaatfactor van het afdichtingsmateriaal;
- de fysische en chemische bestendigheid op lange termijn;
- de kosten.

De specifieke omstandigheden op de locatie betreffen vooral de bodemopbouw en het type stort. Belangrijke punten daarbij zijn het optreden van zetting en klink van stort en ondergrond (veen in ondergrond, stort verdicht met bulldozer of compactor), de steilheid van de hellingen (stort op maaiveld of in een groeve, storthoogte) en het al dan niet aanwezig zijn van een basisafdichting (in verband met de teenconstructie langs de rand van de stortplaats). De steilheid van hellingen is belangrijk in verband met de uitvoering, maar ook met de kans op afschuiving van de afdekgrond. Synthetische

afdichtingsmaterialen moeten daarom bij voorkeur een ruw oppervlak hebben om afschuiving op steile hellingen te voorkomen.

De duur van de opslag kan een belangrijk gegeven zijn in verband met de eindige levensduur van sommige afdichtingsmaterialen. In dit verband zijn van belang het tijdstip waarop het gestorte materiaal zal worden afgevoerd naar elders of zal worden behandeld of hergebruikt, als ook de termijn waarin uitloging van stoffen uit het afval plaats vindt. Hieruit kan worden de noodzakelijke levensduur van de afdichtingslaag worden afgeleid. De aard van de afvalstoffen is vooral van belang in verband met te verwachten zettingen en gasproductie. Uiteraard zullen de eisen ten aanzien van de afdichtingslaag strenger zijn en dienen extra veiligheidsmaatregelen te worden genomen naarmate de milieurisico's van het gestorte afval hoger worden ingeschat.

Een afdichtingslaag moet kunnen worden geconstrueerd. Aangezien dat met behulp van machines gebeurt in de openlucht, is de verwerkbaarheid van het materiaal van belang en mag variatie in weersgesteldheid geen al te grote invloed hebben. Als bijvoorbeeld een laag bij een bepaalde vochtgehalte moet worden verdicht, dan heeft materiaal waarbij dit vochtgehalte een ruime marge heeft de voorkeur boven materiaal met een nauwe marge. Het spreekt uiteraard voor zich, dat de constructie technisch uitvoerbaar is.

Natuurlijke materialen zijn (theoretisch gezien) niet absoluut dicht. Door bewerkingen of menging kunnen deze materialen echter nagenoeg dicht worden gemaakt. Wil echter zo'n laag kunnen voldoen aan zijn functie, dan is een zekere laagdikte nodig. Voor de bepaling van die laagdikte is kennis nodig omtrent de doorlaatfactor van het materiaal.

De fysische en chemische bestendigheid van het afdichtingsmateriaal zijn van essentiële betekenis bij de selectie. De fysische bestendigheid van het materiaal, met name ook bij hogere temperaturen, is een belangrijke factor in verband met de kans op mechanische beschadiging tengevolge van onregelmatige zettingen. Vooral bij bovenafdichtingen is dit een belangrijk aspect, omdat het onderliggende afval onderhevig kan zijn aan sterke en vaak onregelmatige zetting. Naarmate er meer organische materiaal in het afval zit, neemt de onregelmatigheid in de zetting toe. Voor synthetische materialen is in dit verband de elasticiteit bij tweezijdige belasting van belang. Voor de meeste materialen is de elasticiteit bij tweezijdige belasting aanzienlijk geringer dan bij eenzijdige belasting. Voor afdichtingslagen van natuurlijke materialen geldt, dat ze ongelijkmatig kunnen vervormen. Daarbij dient het materiaal plastisch te blijven en zijn eigenschappen te behouden. Opgemerkt zij, dat wanneer er geen zettingen behoeven te worden verwacht, noch in de ondergrond, noch in het stort zelf (b.v. vliegas), men ook folies kan toepassen.

Chemische resistentie is een belangrijk gegeven, met name voor een basisafdichting, hoewel dit aspect ook niet geheel onbelangrijk is voor een bovenafdichting. Synthetische materialen kunnen weekmakers verliezen in contact met water, percolatiewater of organische oplosmiddelen. Chemische resistentieproeven zullen daarom moeten uitwijzen of een bepaald

afdichtingsmateriaal geschikt is. Anderzijds kunnen ook bij bovenafdichting chemische veranderingen plaatsvinden in het afdichtingsmateriaal (uitloging weekmakers, uitwisseling kationen aan kleimineralen), die gevolgen hebben voor de waterdoorlatendheid. Zo is gebleken dat de waterdoorlatendheid van zand-bentoniet mengsels, waarbij de afdichting berust op zwelling van de bentoniet, toeneemt in contact met verontreinigd percolatiewater (Hoeks et al., 1987). Bij bovenafdichting mag worden verwacht dat op de zeer lange duur de kationenbezetting aan het adsorptiecomplex verandert onder invloed van het percolerende water uit de afdekgrond. De bentoniet kan daardoor een deel van de geadsorbeerde natrium ionen verliezen, waardoor het zwelvermogen afneemt. Dit is te compenseren door meer bentoniet in het mengsel te verwerken.

De kosten van de verschillende afdichtingsmaterialen spelen alleen een rol voorzover er gekozen kan worden uit overigens gelijkwaardige materialen. Primair geldt dat de constructie aan de norm moet voldoen.

2.4 Schematische opbouw van de eindafdekking

In verband met de eerder genoemde functies van de eindafdeklaag moeten de volgende lagen voorkomen in een waterdichte eindafdekking, van onder naar boven (zie fig. 3):

- steunlaag, meestal aangebracht op een zogenaamde basislaag, d.i. een laag grond of ander materiaal waarmee het stort eerder is afgewerkt;
- afdichtingslaag, die infiltratie van regenwater in het afvalstort moet verhinderen;
- drainagelaag, waarin veelal met drains de overtollige neerslag wordt afgevoerd;
- bewortelingslaag, waaruit de vegetatie via de wortels het vocht voor gewasverdamping onttrekt.

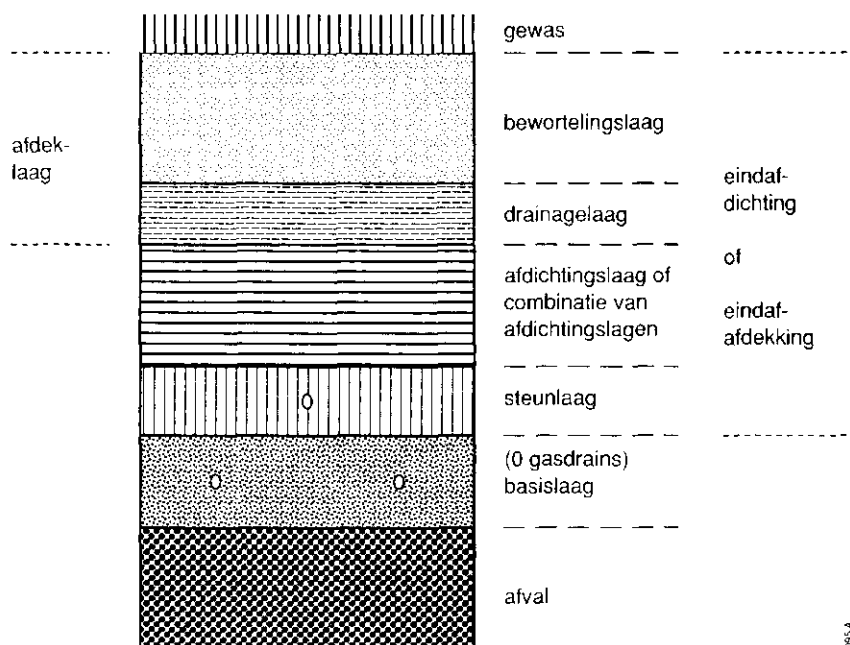


Fig.3 Schematische opbouw van de afdeklaag.

Het totaal aan lagen boven de basislaag wordt aangeduid met eindafdekking, eindafdeklaag of eenvoudig afdekking. Als het begrip afdeklaag wordt gebruikt, dan wordt het totaal aan lagen boven de afdichtingslaag bedoeld, d.w.z. de drainagelaag en de bewortelingslaag.

De primaire functie van de steunlaag (meestal ca. 30 cm) is om door egalisatie en verdichting van de opgebrachte grond een stevige fundering te krijgen voor de afdichtingslaag. Bovendien dient deze steunlaag als een soort aambeeld waarop de afdichtingslaag licht wanneer deze wordt verdicht ("klankbord"). De laag moet bovendien zo'n dikte hebben, dat ook na ongelijkmatige zetting er geen scherpe of harde voorwerpen in het afvalstort doorheen steken en de afdichtingslaag zouden kunnen beschadigen. Hiermee kan al rekening worden gehouden als de laatste meters afval wordt gestort. Bovendien moet deze laatste laag afval poreus zijn, zodat deze kan dienen als opvanglaag voor het geproduceerde stortgas. Het ontgassings-systeem wordt in deze laag aangelegd.

De afdichtingslaag moet het infiltrerende neerslagoverschot tegenhouden. De laag moet praktisch waterdicht zijn en moet ook op langere termijn bestendig zijn tegen fysische en chemische invloeden. Voor stortplaatsen geldt dat de afdichting met synthetische materialen "zeker" gaan lekken. Natuurlijke materialen zijn daarentegen niet absoluut waterdicht te krijgen. Op grond van deze overwegingen is het door VROM geaccepteerd om een toelaatbare percolatie van storten te definiëren, die overigens kan worden herzien zodra de technische ontwikkelingen daartoe aanleiding geven. Dreigt deze toelaatbare emissie te worden overschreden, dan kan de constructie aanpassing behoeven (meerdere of dikkere afdichtingslagen). Voor de keuze van materiaal voor de afdichtingslaag geldt, dat aan deze norm kan worden voldaan. De dikte, aard en samenstelling van de afdichtingslaag wordt bepaald op grond van de ontwerpcriteria en materiaaleigenschappen. Deze laatste kunnen op een laboratorium worden bepaald. Indien de percolatie geringer moet zijn, dient de constructie te worden aangepast. Dit dient ook te gebeuren als men omwille van controle op de werking van de afdichtingslaag er onder een controledrainage aanlegt. Op de afdichtingslaag moet een drainagelaag worden aangebracht met daarin drainbuizen die het overtollige water afvoeren naar het oppervlaktewater. Deze drainagelaag fungeert niet alleen als verzamellaag van neerslagoverschot, maar dient tevens de afdichtingslaag te beschermen tegen beschadiging door plantenwortels, bodemdieren en, waar het natuurlijke materiaal betreft, tegen uitdroging.

De bewortelingslaag fungeert als groei- en standplaats voor de beplanting. Deze laag moet derhalve bewortelbaar te zijn en voldoende vocht kunnen leveren aan de begroeiing. De dikte ervan dient zodanig te zijn, dat de afdichtingslaag effectief beschermd is tegen vorst. De infiltratie capaciteit dient zodanig te zijn, dat er zich geen plassen vormen tijdens regen.

3.1 Inleiding

De lekkage van water door een afdichtingslaag is afhankelijk van de fysische eigenschappen van het afdichtingsmateriaal en de gemiddelde potentiaal- of stijghoogtegradiënt. De stijghoogte is de hoogte tot waar het waterniveau stijgt in een grondwaterstandsbuis, waarvan het filter op een zekere diepte is aangebracht. De stijghoogtegradiënt kan worden opgevat als het verschil in de gemeten stijghoogte juist boven en onder de afdichtingslaag en dan nog gedeeld door de dikte van de laag.

De stroming van water door een poreus medium wordt in het algemeen beschreven met de wet van Darcy. Deze wet zegt dat de hoeveelheid water die per tijdseenheid door een doorsnede ter grootte van de oppervlakteenheid stroomt (de zogenaamde filtersnelheid of debiet), recht evenredig is met de potentiaalgradiënt volgens de vergelijking (zie fig. 4):

$$v = K * i \quad (1)$$

waarin: v = filtersnelheid (m/s)
 K = doorlaatfactor (m/s)
 i = potentiaalgradiënt (m/m)

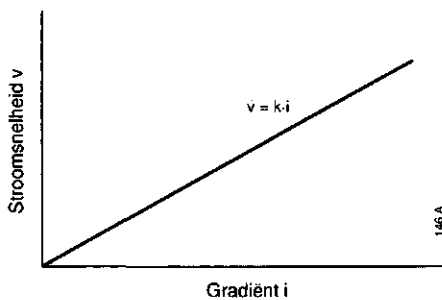


Fig. 4 De relatie tussen v en i volgens de wet van Darcy.

De evenredigheidsconstante in deze vergelijking wordt de doorlaatfactor genoemd en wordt meestal aangeduid met het symbool K . Naarmate de stromingsweerstand in de bodem groter is, is de doorlaatfactor kleiner. De grootte van de doorlaatfactor wordt bepaald door de fysische eigenschappen van de bodem, zoals:

- de granulaire samenstelling;
- de kleimineralogische samenstelling;
- de droge dichtheid (droog gewicht per volume-eenheid grond);
- het effectieve poriënvolume voor waterstroming (afhankelijk van watergehalte en structuur).

In principe kan met deze factoren worden gemanipuleerd bijvoorbeeld door verschillende grondsoorten te mengen, door kleipoeder of bentoniet bij te mengen of door de afdichtingslaag meer of minder sterk te verdichten. Het vooronderzoek op het laboratorium zal moeten uitwijzen of het aangeleverde

materiaal inderdaad voldoet als afdichtingsmateriaal. Het onderzoek moet uitgevoerd worden met representatieve monsters, die qua materiaal vergelijkbaar zijn met het afdichtingsmateriaal zoals dat in de praktijk gebruikt zal worden. De benodigde dichtheid om een bepaalde doorlaatfactor te realiseren, dient eveneens op het laboratorium te worden vastgesteld. Ook dient te worden bepaald welke dichtheid in de praktijk nog realiseerbaar is.

De Wet van Darcy is gebaseerd op een aantal aannamen, namelijk dat de stroming in de poriën laminaire is en dat de weerstand tegen stroming (doorlaatfactor) onafhankelijk is van de potentiaalgradiënt. In dat geval is de doorlaatfactor (K) een constant, die overigens in de tijd kan veranderen. Uit onderzoek aan gronden met een zeer geringe doorlaatfactor is echter gebleken, dat de Wet van Darcy niet altijd geldt. In het algemeen geldt dat de doorlaatfactor niet alleen wordt bepaald door de voornoemde factoren maar ook door:

- de potentiaalgradiënt;
- vervorming van het materiaal door onregelmatige zettingen; (afhankelijk van de plasticiteit en de zwelcapaciteit van het materiaal)
- de aan de klei geadsorbeerde kationen; (bij wijzigingen in de chemische samenstelling van het infiltrerende water wijzigt ook de samenstelling van de geadsorbeerde kationen)
- instroming en sedimentatie van stoffen;

Bij het vooronderzoek op het laboratorium zal men voor zover mogelijk rekening moeten houden met deze factoren teneinde de uiteindelijke lekkage zo betrouwbaar mogelijk te schatten. Daarnaast kan het nodig zijn om extra veiligheidsmaatregelen in te bouwen (toeslagen op dikte of bentonietgehalte) vanwege te verwachten veranderingen in de doorlaatfactor (zettingen, contact met verontreinigd water).

Uit eerder onderzoek (Hoeks en Agelink, 1982) is gebleken dat grondsoorten, die in de landbouw bekend staan vanwege hun slechte doorlatendheid, meestal niet geschikt zijn voor afdichting van stortplaatsen. Om dit te illustreren is in tabel 1 de lekkage door een afdichtingslaag van 0,25 m berekend bij verschillende doorlaatfactoren, stijghoogtegradiënten en tijdsduur van de afvoerperiode. Voor de berekening van de gradiënt is aangenomen dat er onder de afdichtingslaag een onverzadigde toestand heerst, waarin een waterdruk heerst van -0,50 m.

Tabel 1 De jaarlijkse lekkage (mm/jaar) door een bovenafdichting (laagdikte 0,25 m) onder Nederlandse klimaatsomstandigheden. (naar: Hoeks en Agelink, 1982).

Doorlaatfactor (mm/dag)	(m/s)	Stijghoogte- gradiënt (-)	Afvoerperiode (dagen/jaar)	Jaarlijkse lekkage (mm/jaar)
2,0	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1,0-1,5	150	300
1,0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1,5	180	250
0,5	$5,8 \cdot 10^{-9}$	2,0	200	200
0,2	$2,3 \cdot 10^{-9}$	3,0	200	120
0,1	$1,2 \cdot 10^{-9}$	4,0	200	80
0,05	$5,8 \cdot 10^{-10}$	5,0	200	50
0,02	$2,3 \cdot 10^{-10}$	6,0	200	25
0,01	$1,2 \cdot 10^{-10}$	6,0	200	12
0,005	$5,8 \cdot 10^{-11}$	6,0	200	6

Bovenop de afdichtingslaag staat een laag water van 0.75 m (dus 1.0 m boven de onderzijde van de afdichtingslaag). Dit wordt gezien als een extreme situatie, waarbij de drainage amper werkt. De stijghoogte gradiënt is in dit geval dus: $i = (1.0 - (-0.5))/0.25 = 6$ (zie ook par. 3.4). Als het drainage-systeem boven de afdichtingslaag wel goed functioneert, dan zal de lekkage met name bij een doorlaatfactor van minder dan 0,1 mm/dag ($1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s) geringer zijn, omdat de grondwaterstand boven de afdichtingslaag niet hoger zal komen dan 0,25 m. De maximaal optredende gradiënt is dan ca.4. Dit betekent dat de lekkages berekend in tabel 1 voor doorlaatfactoren van 0,05 mm/dag en lager respectievelijk 40, 17, 8 en 4 mm/jaar zullen bedragen.

Om de infiltratie van regenwater te beperken tot minder dan 20 mm/jaar moet de doorlaatfactor in dit voorbeeld dus kleiner zijn dan 0,02 mm/dag (ca. $2,3 \cdot 10^{-10}$ m/s). De meeste in Nederland voorkomende klei- en leemgronden voldoen hier niet aan. Eventueel kan een grond geschikt worden gemaakt voor afdichting door bijmenging van kleipoeder of bentoniet. Zo kan kalkarm matig fijn zand geschikt worden gemaakt voor afdichtingsmateriaal door het te mengen met 5 gew.% Amerikaanse bentoniet. Onderzoek, zowel in het laboratorium als op semi-praktijkschaal, heeft aangetoond dat hiermee een voldoende waterdichte afdichting gerealiseerd kan worden (zie Hoeks, Ryhiner en Van Dommelen, 1987).

3.2 Granulair onderzoek

De granulaire samenstelling van grond, ook wel textuur of korrelgrootteverdeling genoemd, hangt samen met de vindplaats en ontstaanswijze van de grond en met de geologische leeftijd in verband met het optreden van verweringsprocessen. De benaming van grondsoorten is vnl. gebaseerd op de korrelgrootteverdeling, omdat dit een van de belangrijkste en meest onveranderlijke kenmerken van de grond is. De benaming geeft om die reden meestal direkt inzicht in de karakteristieke eigenschappen van de bodem, zodat ook zonder nader onderzoek op grond van deze eigenschappen al een goede indruk verkregen wordt van de doorlaatfactor van het materiaal.

De benaming van gronden kan worden gevonden met behulp van de zogenaamde textuur- of classificatiedriehoeken. Het aandeel van de belangrijkste korrelgroottefracties is daarbij de sleutel tot de naamgeving. Hierbij worden er vier hoofdgroepen onderscheiden (De Bakker en Schelling, 1966):

- lutumfractie (< 2 μm)
- leemfractie (< 50 μm)
- siltfractie (2-50 μm)
- zandfractie (50-2000 μm)
- grindfractie (> 2000 μm)

Bij de geologische classificatie zijn de lutum- en siltfractie vaak samen gevoegd tot een klasse, de leemfractie. Indeling van gronden naar lutum- en leemgehalte is weergegeven in de figuren 5 en 6.

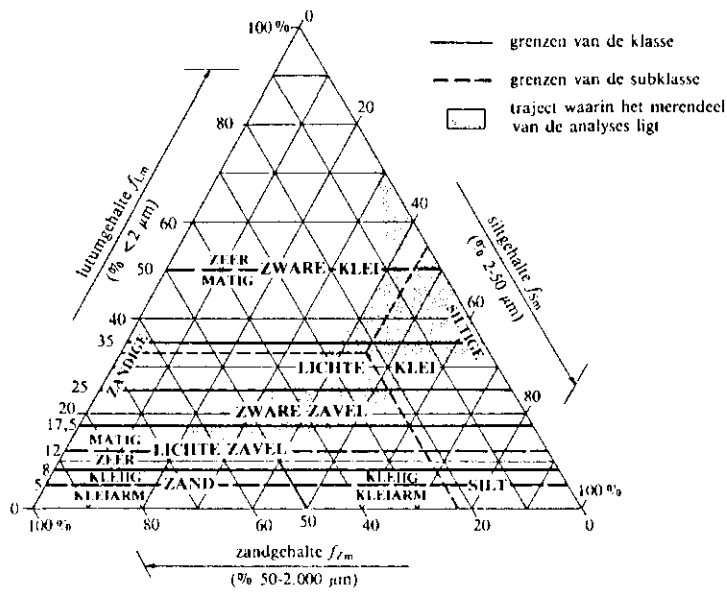


Fig. 5 Indeling gronden naar lutumgehalte.

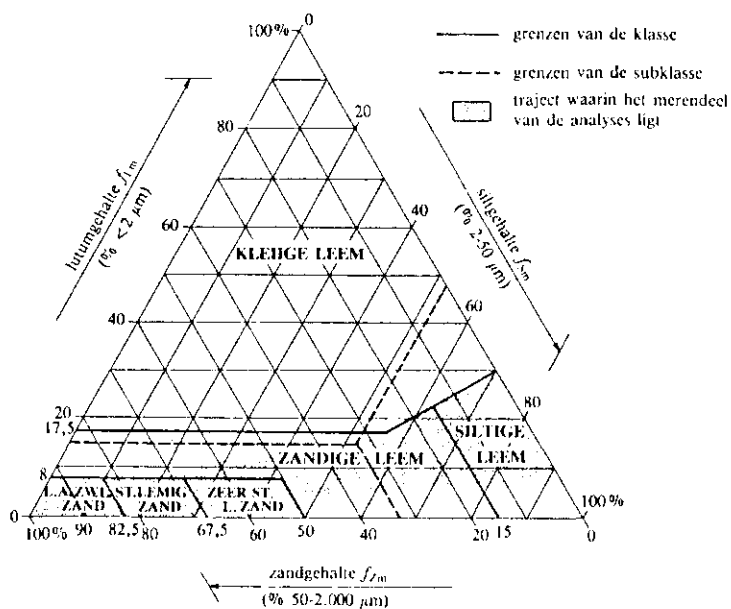


Fig. 6 Indeling gronden naar leemgehalte.

In tabel 2 zijn een aantal kenmerken van de meest voorkomende gronden in Nederland weergegeven. Uit deze tabel kan worden afgeleid, dat de wijze van afzetting een belangrijke invloed heeft gehad op de korrelgrootteverdeling. In fluviatiele (water-) en eolische (wind-) afzettingen is de variatie in stroom- of windsnelheid tijdens de afzetting bepalend geweest voor de korrelgrootteverdeling. In het algemeen is het aandeel fijne deeltjes (lutum en silt) groter naarmate de stroomsnelheid tijdens de afzetting kleiner was. In deze afzettingen is de grindfractie meestal te verwaarlozen. Materiaal, dat

Tabel 2 Enkele kenmerken van grondsoorten waaruit de Nederlandse bodem is samengesteld.

Grondsoort	Humus- gehal-	Zuur- graad	CaCO ₃ (%)	Lutum (%)	Leem (%)
Zand					
glaciaalzand	0,3	4,7	kalkloos	2	12
dekzand	2,0	4,2	"	2	8
rivierzand	0,2	8,4	2,5	0	3
zeezand	0,3	8,4	2,1	1	3
Rivierklei					
oeverwalgronden	0,6	7,7	13,9	16	78
komklei	2,4	5,9	0,3	54	99
Zeeklei					
jonge zeeklei					
- Flevopolders	6,2	7,6	9,6	31	97
- kwelderwallen ed.	0,7	7,3	9,6	19	77
- knipklei ed.	1,8	6,1	0,3	51	98
oude zeeklei					
- droogmakerijen	4,0	7,1	7,9	23	64
- kattenklei	8,8	3,4	0,1	56	99
Loessgronden					
bergbrik	0,4	5,0	kalkloos	14	92
kuilbrik	0,6	3,6	"	19	80
Tertiare klei					
Tegelse klei	0,0	5,5	0,1	52	98

N.B. Voor de beoordeling van het kalkgehalte zie tabel 8.

meegevoerd en afgezet is door het landijs, kan daarentegen wel een belangrijk hoeveelheid grind bevatten.

Het milieu, waarin het materiaal is afgezet, bepaalt tevens de chemische samenstelling, waarbij met name het kalkgehalte een grote rol speelt. Jonge zeekleigronden bevatten nog veel kalkdeeltjes, waardoor de structuur vanuit landbouwkundig oogpunt zeer gunstig is. Verslechtering van de structuur treedt op naarmate de grond meer ontkalkt raakt, zoals bij oude zeeklei het geval is.

De korrelgrootteverdeling is van direct belang voor de waterdoorlatendheid. Bij beoordeling van de geschiktheid van grondsoorten voor afdichting is uiteindelijk de doorlaatfactor van doorslaggevende betekenis. Van zandgronden (< 8% lutum) is bekend dat de doorlaatfactor zeer groot is ($> 2,3 \cdot 10^{-5}$ m/s). Deze komen dus niet in aanmerking als afdichtingsmateriaal tenzij er bijmenging met kleipoeder of bentoniet plaatsvindt.

Klei- en lössgronden bevatten veel fijne deeltjes (lutum en silt) waardoor de doorlaatfactor in vergelijking met de zandgronden erg gering is. Kleigronden zijn fluviatiele afzettingen, waarbij de zwaarste gronden worden aangetroffen op plaatsen waar de afzetting in bijna stilstaand water heeft plaats gevonden. In tabel 3 zijn globale waarden voor de doorlaatfactoren gegeven van kleigronden met uiteenlopend lutumgehalte (Reuter, 1985).

Uit deze tabel blijkt dat sommige kleien nagenoeg "waterdicht" zijn. Matig zware tot zeer zware kleien kunnen een K-waarde bereiken van minder dan $1,0 \cdot 10^{-10}$ m/s. Dit betekent dat de lekkage door een bovenafdichting onder normale omstandigheden minder dan 10 mm per jaar zal bedragen (zie tabel 1).

Tabel 3 Globale waarden voor de doorlaatfactor van kleigronden in relatie tot het lutumgehalte.

Benaming	lutumgehalte (< 2 μm) (% van min. delen)	K-waarde (m/s)
matig zware tot zeer zware klei	> 35	< 1.10^{-10}
lichte klei	28 - 35	1.10^{-10} tot 1.10^{-8}
zandige klei(zavel)	< 28	> 1.10^{-8}

Bij de lichtere kleigronden ligt de doorlaatfactor ruwweg een factor 10 hoger, terwijl bij zavel (zgn. zandige klei) de doorlatendheid nog eens een factor 10 hoger ligt ($K > 10^{-8}$ m/s). De doorlaatfactor van dergelijke gronden kan echter sterk worden verminderd door bijmenging van bentoniet of kleipoeder. Om ook onder praktijkomstandigheden een goede menging te kunnen realiseren, lijkt alleen zand en lemig of kleihoudend zand in aanmerking te komen.

Eolische afzettingen en ook glaciële afzettingen, bevatten relatief veel silt (2-50 μm). Ze worden vaak aangeduid als leemgrond en komen in Nederland voor als löss, keileem en lemige dekzand. Men kan ze, evenals kleigronden, classificeren naar korrelgrootteverdeling en doorlaatfactor (tabel 4). Leemgronden staan er om bekend dat ze moeilijk verwerkbaar zijn: of ze zijn net te nat en gaan kleven aan de werktuigen, of ze zijn net te droog en laten zich slechts moeizaam verdichten. Dit komt ook tot uitdrukking in de plasticiteits-index (zie par.3.5). Eventueel kan door bijmenging met bentoniet de doorlaatfactor worden verlaagd en de plasticiteits-index worden vergroot.

Tabel 4 Globale waarden voor de doorlaatfactor van leemgronden in relatie tot het leemgehalte.

Benaming	leemgehalte (0-50 μm) (% van min. delen)	K-waarde (m/s)
lössgronden	> 70	< 1.10^{-10}
keileem	50 - 70	1.10^{-10} tot 1.10^{-9}
lemig zand	< 50	> 1.10^{-9}

De verdeling van de korrelgrootte biedt een eerste mogelijkheid voor de keuze van bruikbaar materiaal voor het maken van een afdichting. Naarmate de korrelgrootteverdeling een "ruimere gradatie" (zie voorbeelden in fig. 7) heeft, is het materiaal in het algemeen meer geschikt. Bij zulk materiaal vult het fijner materiaal de ruimte tussen de grovere fractie. Hoe beter dit opvullen mogelijk is, hoe kleiner de doorlaatfactor in het algemeen is.

Gradering

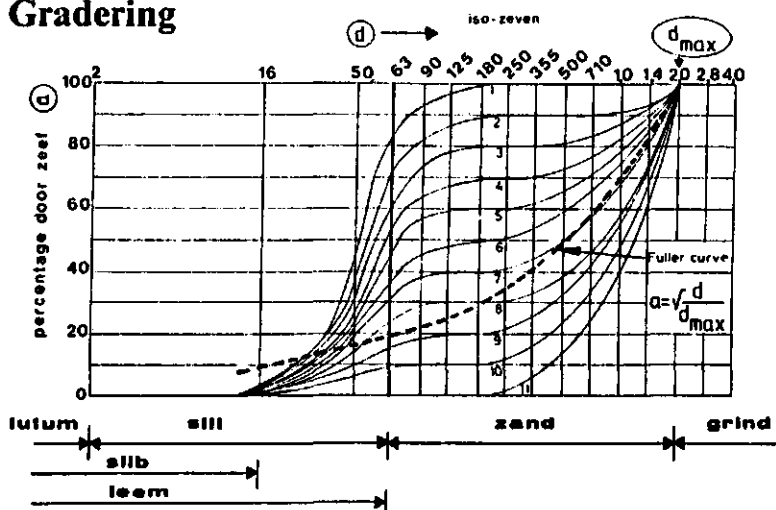


Fig. 7 Voorbeelden korrelgrootteverdelingen (veel en weinig gradatie).

De gradering kan worden gekarakteriseerd met de zogenaamde uniformiteitscoëfficiënt:

$$u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

Hierin is:

u = uniformiteitscoëfficiënt

D_{60} = diameter, waarbij geldt dat 60% van de deeltjes een korreldiameter heeft kleiner dan deze waarde

D_{10} = diameter, waarbij geldt dat 10% van de deeltjes een korreldiameter heeft kleiner dan deze waarde

Men spreekt van een ruime gradering als de uniformiteitscoëfficiënt in de orde van grootte van ca. 10 ligt. Zand met een zeer nauwe gradering, d.w.z. een uniforme korrelgrootte, heeft een uniformiteitscoëfficiënt in de orde van ca. 2. De grootste dichtheid kan men krijgen als er van elke korrelgrootteklasse juist voldoende is om de ruimten tussen de grotere korrels op te vullen. Een korrelgrootteverdeling waarbij dit theoretisch het beste lukt, kan worden beschreven met de zogenaamde Fuller-curve:

$$a = \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}} \quad (3)$$

Hierin is:

a = de fractie met een korreldiameter $< d$

d = korrel diameter

d_{\max} = maximale korreldiameter

Volgens deze benadering zou de ideale uniformiteitscoëfficiënt 36 moeten zijn. Van bruikbaar materiaal zou de korrelgrootteverdeling verregaand moeten voldoen aan de Fuller-curve. Is dat echter niet het geval, dan kan menging met ander materiaal worden overwogen. Bedacht dient echter wel te worden, dat de

korrelgrootteverdeling slechts een indicatie geeft van de te verwachten doorlaatfactor en deze altijd dient te worden gemeten.

Er is een onderzoek verricht naar de doorlaatfactor van verschillende Nederlandse kleien (Oosterom, 1989). Het lutumgehalte van de onderzochte gronden varieerde van 27,8-51,5 gew.%, het siltgehalte van 38,7-59,0 gew.% en het zandgehalte van 2,3-25,5 gew.%. De lutumfractie in de kleimonsters bestond voor 10-25 gew.% uit montmorilloniet. De belangrijkste resultaten uit dit onderzoek zijn verwerkt en opgenomen in tabel 5. Uit dit onderzoek, dat is uitgevoerd met gedestilleerd water is gebleken, dat van twee kleien (lutumgehalte >37% en leemgehalte >96%) de doorlaatfactor $5 \cdot 10^{-10}$ m/s is. Voor de overige monsters werd hogere doorlaatfactoren gevonden. Overigens is gebleken dat de verdichting niet in alle gevallen bij een optimaal vochtgehalte had plaats gevonden. In een monster gaf het in oplossing gaan van ijzer aanleiding tot een hoge doorlaatfactor.

Tabel 5 Doorlaatfactoren van enkele natuurlijke kleigronden, bij gradiënt 5 (afgeleid uit Oosterom, 1990).

Kleisoort	Lutum gehalte (gew. %)	Volume gewicht (droog) (kg/m ³)	Testvloei- stof	Doorlaatfactor (10 ⁻¹⁰ M/s)
Beekklei	33,8	1360	demi-water	> 40,5
Zware zeeklei	37,4	1690	demi-water	17,1
Zware zeeklei	37,4	1690	VAM-percolaat	8,2
Lichte zeeklei	27,8	1520	demi-water	3,7
Lichte zeeklei	27,8	1520	VAM-percolaat	2,1
Lichte zeeklei	31,5	1590	demi-water	2,3
Lichte zeeklei	31,5	1590	VAM-percolaat	0,7
Tegelse klei	51,5	1890	demi-water	1,5
Tegelse klei	51,5	1890	VAM-percolaat	0,2
Reuver klei	37,8	1480	demi-water	1,3
Zware zeeklei	37,2	1450	demi-water	0,8
Zware zeeklei	37,2	1450	VAM-percolaat	0,1

Bij het granulaire onderzoek gaat het in eerste instantie om de minerale samenstelling van de grond, namelijk de lutum-, silt-, zand- en grindfracties. Om een goede afweging tussen de aangeboden materialen mogelijk te maken is het ook van belang het organisch stofgehalte en het kalkgehalte te meten. Wanneer de grond wordt ontgraven in een groeve en daarna direkt wordt verwerkt, dient ook het vochtgehalte te worden bepaald. Dit is van belang om te kunnen vaststellen of dit vochtgehalte niet te hoog is om een maximale verdichting te realiseren (zie par. 3.4).

3.3 Kleimineralogisch en bodemchemisch onderzoek

Naast het granulaire onderzoek is ook een kleimineralogisch en bodemchemisch onderzoek gewenst. De aard van de kleimineralen is namelijk van belang in verband met het waterbindend en zwellend vermogen van de klei. Een sterke binding van water aan de kleideeltjes betekent over het algemeen een geringere doorlaatfactor. Bovendien leidt waterbinding tot zwelling van

het kleimineraal hetgeen van belang is voor het opvangen van vervorming als gevolg van onregelmatige zetting. De doorlaatfactor van gronden die sterk zwellende kleimineralen bevatten, die bovendien nog meer kunnen zwellen, hebben doorgaans een zeer geringe doorlaatfactor, die vaak minder is dan $1,0 \cdot 10^{-10}$ m/s (ca. 0,01 mm/etm). Dergelijke gronden zijn bij kleine stijghoogtegradiënten nagenoeg waterdicht.

Het zwelvermogen wordt bepaald door de aard van het kleimineraal en de grootte van de deeltjes. Naarmate de mineralen kleiner zijn, wordt het totale oppervlak, waaraan water gebonden kan worden, per gewichtseenheid (specifiek oppervlak) groter. Voor enkele veel voorkomende kleimineralen is in tabel 6 het specifieke oppervlak en de kationenadsorptiecapaciteit (Cation Exchange Capacity = CEC) weergegeven.

Tabel 6 Specifiek oppervlak en kationenadsorptiecapaciteit (CEC) van enkele veel voorkomende kleimineralen.

kleimineraal	specifiek oppervlak (m ² /g)	CEC (meq/100 g)
kaoliniet	10 - 30	5 - 15
illiet	50 - 300	20 - 50
montmorilloniet	600 - 800	80 - 120
vermiculiet	600 - 800	100 - 150

Uit deze tabel blijkt, dat montmorilloniet en vermiculiet een groot specifiek oppervlak hebben. Deze kleimineralen kunnen daarom veel water vasthouden en hebben bovendien sterk zwellende eigenschappen: water kan gebonden worden tussen de kleiplaatjes van het mineraal. Een maat voor het specifiek oppervlak is de adsorptie van methyleen blauw aan de bodemdeeltjes (Breeuwsma, 1989). De methyleenblauw waarde is daardoor indirect een maat voor de zwelcapaciteit.

Ook de kationenadsorptiecapaciteit van montmorilloniet en vermiculiet is groot. Door de negatieve lading van het kleimineraal worden kationen, vanwege hun positieve lading, aangetrokken. Anderzijds hebben de kationen de neiging om zich in de vloeistof te willen verspreiden (diffusie onder invloed van lokale verschillen in concentratie). Er ontstaat dan een evenwicht tussen aantrekkings- en diffusiekrachten, waarbij de kationenconcentratie afneemt met de afstand tot het kleimineraal. De afstand van het mineraaloppervlak tot het vlak in de oplossing waar de kationenconcentratie constant is, wordt de "diffuse dubbellaag" genoemd. Watermoleculen zijn dipolen, waardoor ze aangetrokken worden door het negatief geladen kleimineraal en daardoor worden vastgehouden in de dubbellaag. De dikte van de diffuse dubbellaag is afhankelijk van:

- de waardigheid van de kationen:
Tweewaardige kationen worden sterker aangetrokken door het negatief geladen kleioppervlak dan eenwaardige ionen. Als het kleioppervlak bezet is met Ca²⁺-ionen dan is de diffuse dubbellaag dunner dan bij een bezetting met Na⁺-ionen. Bij veel Ca²⁺-ionen is de hoeveelheid water in de diffuse dubbellaag dan ook geringer.
- de zoutconcentratie (ionsterkte) in de bodemoplossing:
Naarmate de zoutconcentratie in de bodemoplossing toeneemt

wordt de diffuse dubbellaag verder ingedrukt.

In de elektronen dubbellaag wordt de stroming van water geremd. Het netto effectieve volume dat de doorlaatfactor bepaald, is geringer naarmate deze laag uitgestrekter is. De kationenbezetting heeft met name bij sterk zwellende kleimineralen een grote invloed op het zwelvermogen. Zo kan het zwelvermogen van montmorilloniet variëren van 2 cm³ water per gram klei bij bezetting met vooral tweewaardige kationen (vnl. Ca-ionen) tot 12 cm³ per gram bij bezetting met overwegend eenwaardige kationen (vnl. Na-ionen). Het zwelvermogen van andere kleimineralen, vnl. kaoliniet en illiet, is aanzienlijk geringer. Voor kaoliniet ligt dit in de orde van 1 cm³/g. Het zwelvermogen van kleimaterialen kan worden gemeten met het ENSLIN-apparaat.

Uiteraard kan de kationenbezetting veranderen als er een uitwisseling van ionen optreedt tussen het adsorptiecomplex en de passerende vloeistof. Bij bovenafdichting wordt de kwaliteit van het percolerende water vooral bepaald door de samenstelling van het regenwater en de chemische samenstelling van de afdekgrond boven de afdichtingslaag. De doorlaatfactor, welke bijvoorbeeld in het laboratorium gemeten is met gedestilleerd water als doorstroomvloeistof, kan daarom afwijken van de doorlaatfactor onder veldomstandigheden als de doorstroomvloeistof zouten uit de bovenliggende laag heeft opgelost (Glas, 1984; Hofkamp, 1986; Oosterom, 1988). De samenstelling van de vloeistof waarmee de doorlaatfactor wordt gemeten, dient overeen te komen met de percolerende vloeistof onder veldomstandigheden. Voor bovenafdichting geniet leidingwater de voorkeur.

In principe kan elke grond slechtdoorlatend gemaakt worden doortoevoeging van kleipoeder. Bekend is in dit verband het toevoegen van zuiver montmorilloniet in poedervorm. Dit product staat bekend onder de naam "bentoniet" naar de vindplaats Fort Benton in de staat Wyoming (USA). Door menging van zand en bentoniet worden de poriën tussen de zandkorrels tendele opgevuld met bentoniet, dat na zwellen het water in deze poriën vasthoudt. Op deze wijze is het mogelijk een zeer geringe doorlaatfactor van zand te realiseren.

Uit onderzoek van d'Appolonia (1980) blijkt dat minder bentoniet nodig is naarmate de grond meer fijne deeltjes bevat, met name als het om de lutumfractie gaat (zie fig. 8 en 9). Overigens is niet elke grond geschikt voor menging met bentoniet. De grond moet bij voorkeur structuurloos zijn, een enkelvoudige korrelstructuur en een laag gehalte aan organische stof hebben. Om deze reden verdient het aanbeveling in de praktijk gebruik te maken van humusarm zand.

De doorlaatfactor van zand-bentoniet mengsels is door Hoeks et al. (1988) onderzocht voor mengsels van matig fijn zand en Wyoming bentoniet. Op grond van dit onderzoek kan worden vastgesteld dat matig fijn zand met een bentonietgehalte van 5 gew.% zodanig waterdicht is dat er een afdichtingslaag mee kan worden geconstrueerd, waarvan de lekkage minder is dan 20 mm/jaar. De soort bentoniet is van belang vanwege verschillen in waterbindend vermogen (zie tabel 7).

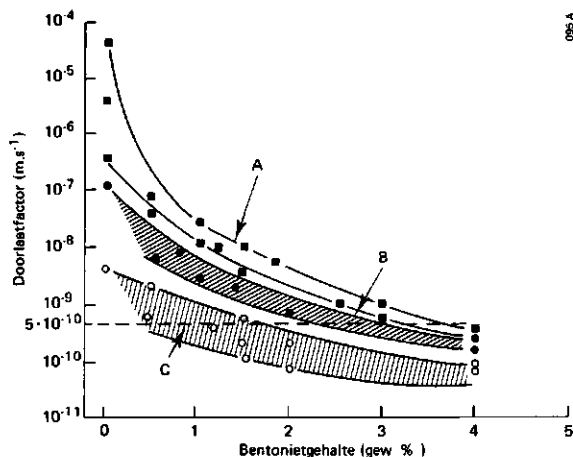


Fig. 8 Effect van het gehalte aan fijne delen op de doorlaatfactor van zand-bentoniet mengsels (naar gegevens van D'Appelonia, 1980; geciteerd door Epa, 1984). A) coarse sand, B: siltig sand, C: clayey silty sand.

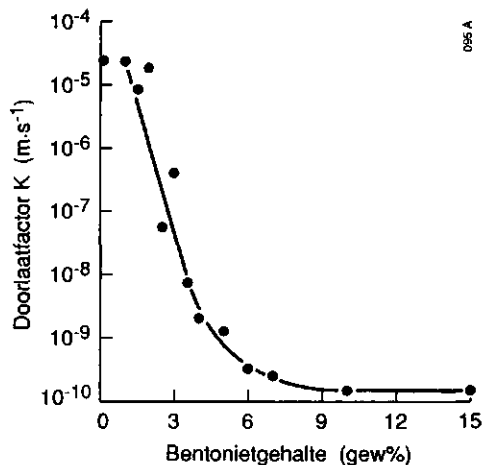


Fig. 9 Doorlaatfactor ($K=v/i$) van zand-bentonietmengsels, bestaande uit matig fijn zand en Wyoming bentoniet, gemeten bij een stijghoogtegradiënt van $i=8$ en een zwelperiode van 2 weken.

Amerikaanse bentoniet (Wyoming bentoniet met een hoge Na^+ -bezetting) heeft een groot waterbindend vermogen.

Tabel 7 Zwelvermogen van enkele bentonietsoorten

Bentonietsoort	Zwelvermogen ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}$ per gram)
Wyoming bentoniet	9 - 12
Geactiveerde bentoniet (met Na^+ behandeld)	6 - 9
Europese bentoniet	2 - 4

Europese bentoniet daarentegen bevat meer Ca^{2+} aan het adsorptiecomplex en het waterbindend vermogen is daardoor aanzienlijk kleiner. Zelfs na activering met natrium is het

waterbindend vermogen nog steeds kleiner dan van de Amerikaanse bentoniet. Fig. 10 toont de gemeten doorlaatfactoren van deze twee bentonietsoorten gemengd met matig fijn zand.

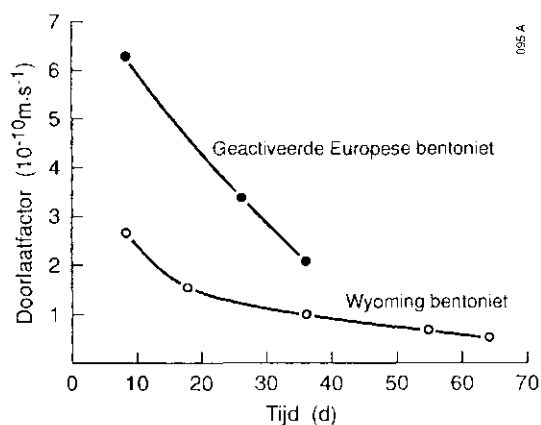


Fig. 10 Verloop doorlaatfactor van mengsels van matig fijn zand met 5 gew.% bentoniet (geactiveerde Europese bentoniet resp. Wyoming bentoniet), bij constante stijghoogtegradiënt ($i=30$).

Het bentonietgehalte van de mengsels bedroeg 5 gew.%. Doordat de metingen verricht zijn over een periode van 1 à 2 maanden komt ook het tijdseffect duidelijk tot uiting. De doorlaatfactor met geactiveerde Europese bentoniet is ongeveer twee keer zo groot als met Wyoming bentoniet, maar op de lange duur blijken de verschillen gering te worden omdat de doorlaatfactor sterk afneemt in de tijd. Gezien de te verwachten uitwisseling op lange termijn doet het er waarschijnlijk niet zoveel toe welke bentonietsoort men in eerste instantie gebruikt. Men zal echter wel kritisch moeten zijn op het gebruik van kalkhoudend zand in combinatie met bentoniet. Door de aanwezigheid van vrije kalk (bijvoorbeeld schelpen) is gedurende een zeer lange tijd een overmaat aan Ca-ionen aanwezig, waardoor de doorlaatfactor van het mengsel toe zal nemen. Indien er echter alleen kalkhoudend zand beschikbaar is, is het aan te bevelen om dan ook Ca-bentoniet als bijmenging te gebruiken. Immers door de uitspoeling van kalk kan de doorlaatfactor alleen maar afnemen. De aanwezigheid van kalk kan op eenvoudige wijze aangetoond worden door een grond te overgieten met verdund zoutzuur (zie tabel 8).

Tabel 8 Indeling en benaming naar kalkgehalte (De Bakker en Schelling, 1966)

Opbruisen met verdund zoutzuur	Naam	Kalkgehalte (% CaCO ₃)	Zuurgraad (pH-KCl)
Niet	kalkloos	0 - 0,5	<4,5
Alleen hoorbaar	kalkarm	0,5 - 1,5	4,5-6,5
Ook zichtbaar	kalkrijk	>1,5	>6,5

De mengverhouding zand-bentoniet moet vooraf in het laboratorium worden vastgesteld. Daartoe worden een aantal monsters met uiteenlopend bentoniet gehalte samengesteld en wordt daarvan de doorlaatfactor bepaald bij de maximale dichtheid.

De mengintensiteit moet overeenkomen met die welke in de praktijk kan worden gerealiseerd.

Het kleimineralogisch onderzoek kan worden uitgevoerd op een mineralogisch en/of geologisch laboratorium met behulp van röntgendiffractie, volgens de methode zoals deze bijvoorbeeld toegepast wordt bij de vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouw Universiteit Wageningen. Het bodemchemisch onderzoek met betrekking tot de kationenbezetting van het adsorptie-complex kan worden uitgevoerd op het Bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewasonderzoek in Oosterbeek.

3.4 Onderzoek naar verdichtingsmogelijkheden

3.4.1 Algemeen

Naarmate grond sterker verdicht wordt neemt het poriënvolume af, wordt de gemiddelde poriëndiameter kleiner en zal de doorlaatfactor afnemen. Bij gebruik van zand-bentoniet mengsels is bovendien minder bentoniet nodig naarmate het zand meer verdicht kan worden, omdat minder poriënvolume overblijft tussen de zandkorrels. Het verkleinen van het volume gaat niet alleen ten koste van het poriënvolume, maar ook ten koste van de structuur van de grond.

In losgestorte grond raken de korrels elkaar slechts in enkele punten. Het poriënvolume is dan vrij groot, vooral in kleigrond met grote structurelementen. Tijdens het verdichtingsproces moeten de minerale delen weer zodanig in elkaar schuiven, dat de porieruimte tussen de korrels minimaal wordt. Dit gaat gemakkelijker naarmate de grond ruimer gesorteerd is qua korrelgrootteverdeling en voldoende vochtig en plastisch is. Tijdens het verdichten van grond zal lucht en/of water uit de poriën moeten worden verdreven om het volume kleiner te maken, alleen dan kan de dichtheid van de grond toenemen. Bij snelle verdichtingen wordt er alleen lucht uit de poriën verdreven. Het zal daarom duidelijk zijn, dat het vochtgehalte van een te verdichten grond altijd geringer moet zijn dan het vochtgehalte van een met waterverzadigde grond die een dichtheid heeft die men wilde realiseren. Bij een snel uitgevoerde verdichting wordt er lucht uit de poriën verdreven. Zodra alle lucht is verdwenen is verdere verdichting alleen mogelijk als er ook water wordt uitgeperst. Dit laatste is echter een relatief langzaam proces. In gronden met een fijnkorrelige structuur (kleigronden) is uittreding van water vrijwel onmogelijk vanwege de grote weerstand. Ook de uittreding van lucht ondervindt hier veel weerstand waardoor zelden een verzadigingsgraad van 100% wordt bereikt. Daarnaast is de bereikte mate van verdichting ook afhankelijk van de laagdikte en verwerkbaarheid van het aan te brengen materiaal en de stevigheid van de ondergrond.

3.4.2 Bepaling van verdichtingsgrootheden

Bij verdichting van grond zullen een aantal grootheden gemeten

moeten worden om vast te kunnen stellen in welke mate verdichting mogelijk is en of de gewenste dichtheid is bereikt.

Het betreft de volgende gegevens:

- natte dichtheid ρ_n van de grond
- droge dichtheid $\rho(d)$ van de grond
- watergehalte als massafractie (w)
- porositeit, poriëngehalte of poriënfractione (n)
- watergehalte als volumefractie (θ)
- luchtgehalte als volumefractie (θ (a))
- verzadigingsgraad

De dichtheid van een grond kan worden vastgesteld door ongestoorde monsters te steken met ringen, waarvan het volume bekend is (bijv. 100 cm³). Het gewicht wordt door weging vastgesteld, waarna het natte gewicht van de grond wordt gevonden na aftrek van het gewicht van de ring. De dichtheid wordt dan weergegeven als natte dichtheid of nat volumegewicht $\rho(v)$ en wordt als volgt berekend:

$$\rho_n = \frac{M(n)}{V} \quad (4)$$

waarin:

- ρ_n = natte dichtheid (kg.m⁻³)
- M(n) = massa van de natte grond, bestaande uit bodemdeeltjes en water waarmee de poriën geheel of gedeeltelijk gevuld zijn (kg)
- V = volume van het grondmonster (m³)

Deze natte dichtheid varieert dus met het vochtgehalte en geeft als zodanig geen indruk van de werkelijke dichtheid en het poriënvolume van de grond. Om een indruk te krijgen van de werkelijke verdichting moet de droge dichtheid worden vastgesteld. De droge dichtheid kan op directe en indirecte wijze worden bepaald:

- 1) Door meting, d.w.z. door een gestoken ringmonster te drogen bij 105 °C en vervolgens het gewicht te bepalen;
- 2) Door berekening uit de natte dichtheid en het watergehalte.

Een ringmonster met vochtige grond wordt gedroogd bij 105 °C en vervolgens gewogen. De massa van de droge grond wordt vastgesteld na aftrek van het gewicht van de ring. De droge dichtheid ρ_d wordt dan als volgt berekend:

$$\rho_d = \frac{M(d)}{V} \quad (5)$$

waarin:

- ρ_d = droge dichtheid (kg.m⁻³)
- M(d) = massa van de grond nadat het water daaruit verwijderd is door droging bij 105 °C (kg)
- V = oorspronkelijke volume van het grondmonster (m³).

Met de nu beschikbare gegevens is tevens het vochtgehalte van de grond te berekenen:

$$w = \frac{M(n) - M(d)}{M(d)} \quad (6)$$

waarin:

w = watergehalte van de grond, dat is de massa water die door droging bij 105 °C uit de grond verdwijnt, gedeeld door de massa van de gedroogde grond.

M(n) = massa van de natte grond, waarin zich de minerale delen, water en eventueel lucht bevinden (kg)

M(d) = massa van de droge grond nadat het water daaruit verwijderd is door droging bij 105 °C (kg)

Het watergehalte kan ook weergegeven worden als percentage door vermenigvuldiging met 100 %.

Behalve met ongestoorde monsters in ringen kan het watergehalte ook worden vastgesteld door in het veld monsters losse grond te nemen. De grond moet wel zodanig verpakt worden dat tijdens het transport geen vochtverlies kan optreden. In het laboratorium worden de monsters natte grond gewogen en vervolgens gedroogd bij 105 °C. Na droging wordt opnieuw het gewicht bepaald. Het watergehalte wordt berekend als het gewichtverlies gedeeld door het gewicht van de droge grond (zie vgl. 3). Eventueel kan de droge dichtheid $p(d)$ ook worden berekend uit de natte dichtheid $p(v)$ als het watergehalte bekend is:

$$p_d = \frac{p_n}{1 + w} \quad (7)$$

Het totale poriënvolume (n) kan worden berekend uit het droge volumegewicht door aan te nemen dat de dichtheid van de vaste gronddeeltjes 2650 kg/m³ bedraagt:

$$n = 1 - \frac{p_d}{2650} \quad (8)$$

waarin:

n = porositeit, poriëngehalte of poriënfraction, dat is het volume van de poriën gedeeld door het totale volume van de grond (bodemdeeltjes en poriën)

p_d = droog volumegewicht bepaald volgens (2) of (4) (kg/m³)

2650 = massa van de mineralen delen (kg/m³)

Het watergehalte kan ook als volumefractie (m³/m³ grond) worden berekend op de volgende wijze:

$$\theta = w * p_d \quad (9)$$

Wanneer het monster volledig met water verzadigd is, zijn alle poriën met water gevuld en is θ gelijk aan n . Als de grond niet verzadigd is, dan kan het luchtgehalte ($\theta(a)$), dat is de volumefractie met lucht gevulde poriën, als volgt worden berekend:

$$\theta_a = n - \theta \quad \text{of} \quad 1 - \frac{\rho_d}{2650} - w * \rho_d \quad (10)$$

waarin:

- θ = watergehalte als volumefractie, dat is het volume water, dat door droging bij 105 °C uit de grond verdwijnt, gedeeld door het oorspronkelijke volume van de grond (= vaste stof + water + lucht)
- θ_a = luchtgehalte van de grond, dat is het volume aan lucht in de poriën gedeeld door het totale volume grond (bodemdeeltjes en poriën)
- w = watergehalte berekend volgens (3)
- ρ_d = droog volumegewicht bepaald volgens (2) of (4)

De verzadigingsgraad (S) van het monster met water is:

$$S = \frac{\theta}{n} \quad (11)$$

waarin:

- S = verzadigingsgraad, d.i. vochtgehalte als volumefractie (vgl. 9) gedeeld door het poriënvolume (vgl. 8)

De hier genoemde grootheden: natte en droge dichtheid, vochtgehalte, luchtgehalte, poriënvolume en verzadigingsgraad, zijn van belang bij het vooronderzoek op het laboratorium en bij het uitvoeren van controlemetingen tijdens de aanleg in het veld. Het is uiteraard van groot belang dat men representatieve monsters neemt. Meerdere monsters zijn nodig om een betrouwbaar gemiddelde te krijgen. Opgemerkt zij, dat er nog geen richtlijnen zijn voor de maximaal toelaatbare standaard deviatie in de resultaten en het minimaal aantal herhalingen van deze metingen.

3.4.3 Vaststellen van de maximale dichtheid

Indien de poriën geheel gevuld zijn met water is verdere verdichting nauwelijks mogelijk. De maximale verdichting van vochtige grond wordt dus bereikt als alle lucht uit het monster verdreven is. Op dat moment zijn de poriën geheel gevuld met water. In theorie varieert de droge dichtheid tussen 2650 kg/m³ (geen poriën aanwezig tussen de vaste deeltjes: 0 vol.% water) tot 0 kg/m³ (geen vaste deeltjes aanwezig: 100 vol.% water). De maximale waarde voor de droge dichtheid als functie van het vochtgehalte wordt begrensd door de verzadigingslijn in fig. 11. Het vochtgehalte, waarbij de grond wordt verdicht, speelt dus een belangrijke rol bij de

uiteindelijk te bereiken dichtheid.

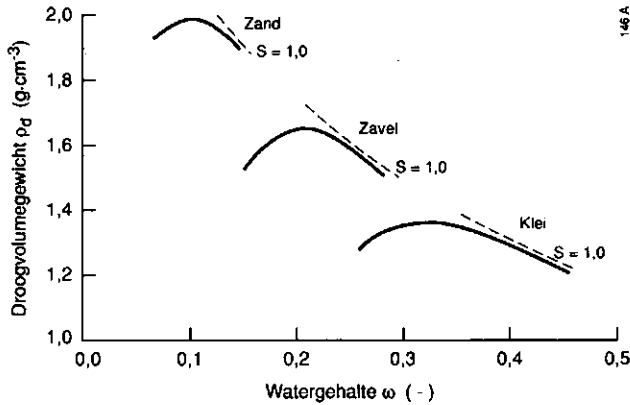


Fig. 11 Theoretisch verband tussen maximale dichtheid en vochtgehalte.

Bij toepassing van een bepaalde verdichtingsenergie (bijv. 25 slagen of stoten) bestaat er voor iedere grondsoort een zgn. optimaal vochtgehalte voor maximale verdichting. Bij hogere verdichtingsenergie, door het aantal slagen op te voeren, kan de pakking echter nog dichter worden waardoor de droge dichtheid verder toeneemt. Uiteindelijk is een toestand bereikt, waarbij het luchtgehalte zover is afgenomen dat door meer stoten of slagen geen merkbaar verdere verdichting meer optreedt. De mogelijkheden voor verdichting van afdichtingsmaterialen moeten tijdens het vooronderzoek op het laboratorium worden getest. Dit gebeurt aan de hand van zogenaamde Proctor-proeven, waarbij wordt vastgesteld bij welk vochtgehalte bij een standaardhoeveelheid energie de maximale verdichting wordt bereikt (Rijkswaterstaat, Standaard RAW bepalingen 1985, uitgave van de stichting rationalisatie en automatisering grond-, water- en wegenbouw). In 1933 werd door Proctor een methode ontwikkeld, die moest dienen als basis voor de verdichting van aarden wallen. Deze methode, de Standaard Proctorproef, wordt gebruikt voor het vaststellen van een referentiedichtheid (verdichten van grondmonsters in een standaardvorm) en het bepalen van het optimale vochtgehalte waarbij, met een gegeven verdichtingsenergie, deze dichtheid (de Proctordichtheid) wordt bereikt. De proctorproef wordt uitgevoerd met de volgende apparatuur (zie ook "Eisen van Rijkswaterstaat", 1978):

proctorcilinder :	diameter 0,1016 m (+ of - 0,4 mm)
	hoogte 0,1164 m (+ of - 0,6 mm)
opzetstuk :	diameter 0,1016 m
	hoogte 0,060 m
standaardstamper:	diameter 0,0508 m
	gewicht 2,5 kg (+ of -0,01 kg)

Na droging van de te onderzoeken grond volgt afzeving op korrels, groter dan 20 mm, die door een gelijke hoeveelheid grond van 5-20 mm worden vervangen. Na toevoeging van water tot een vochtgehalte van ongeveer 5% beneden het vermoedelijke optimale vochtgehalte, vindt verdichting plaats in de proctorvorm in 3 lagen van ongeveer 4 cm dikte, met 25 slagen per laag (gelijkmatig over het oppervlak verdeeld) en een valhoogte van 0,305 m (+ of - 1 mm). Voor elke volgende meting wordt het materiaal uit de vorm verwijderd en wordt het

watergehalte vervolgens met 1 à 2 % verhoogd. Wanneer men verwacht, dat door herhaalde bewerking van dezelfde hoeveelheid grond een grotere maximumproctordichtheid wordt gevonden, dan is het aan te bevelen om telkens een nieuwe hoeveelheid zand te nemen. De gevonden relatie tussen het droog volumegewicht en het vochtgehalte wordt in een figuur uitgezet. Behalve deze standaard Proctorproef bestaat ook nog een verzwaarde Proctorproef. De werkwijze voor het bepalen van deze "verzwaarde proctordichtheid" is dezelfde als bij de standaardproef, met dien verstande, dat de massa van de stamper 4,54 kg (+ of -0,01 kg) bedraagt en de valhoogte 0,457 cm (+ of -1 mm), en dat de verdichting plaatsvindt in 5 ongeveer gelijke lagen van 0,025 cm dikte. Wanneer zou blijken dat bij gebruik van meer verdichtingsenergie beduidend hogere dichtheden worden bereikt en aanmerkelijk minder lekkage optreedt, dan zal men in de praktijk hiernaar moeten streven.

De proctorkurve levert voor iedere grondsoort een ander beeld op (zie fig. 11). De maximale droge dichtheid wordt bereikt bij een voor iedere grond karakteristiek optimaal vochtgehalte. Het gedeelte links van het maximum wordt de "droge tak" en het gedeelte rechts wordt de "natte tak" van de proctorkurve genoemd. Het optimaal watergehalte voor verdichting loopt sterk uiteen voor de verschillende gronden, nl. van ca. 12 % voor zand tot ca. 35 % bij zware klei. De verdichtingsmogelijkheden hangen, behalve met het vochtgehalte, ook samen met de korrelgrootteverdeling van de grond. Naarmate de grond meer lutum bevat, wordt het moeilijker om een hoge droge dichtheid te bereiken, omdat het uitdrijven van lucht hier veel weerstand ondervindt en omdat de kleimineralen veel water absorberen. Met zand kan veelal een veel hogere proctordichtheid bereikt worden (tot 2000 kg/m³) dan met klei (1500 kg/m³). Onderzoek aan Tegelse klei heeft aangetoond dat verdichting van veldvochtig materiaal mogelijk is tot 1600 a 1700 kg/m³. In principe is de maximaal bereikbare droge dichtheid af te leiden uit het vochtgehalte (w) van het materiaal, aangenomen dat alle lucht juist is verdreven:

$$P_d = \frac{2650}{1 + 2650 * w} \quad (12)$$

In de praktijk neemt na vergraven van de grond het poriënvolume toe (uitleveringscoëfficiënt van de grond), maar dit blijft beperkt tot grote holle ruimten tussen de kluiten, terwijl de kluit zelf zijn oorspronkelijke poriënvolume behoudt. Door bevriezing is het wel mogelijk dat ook de kluiten uiteenvallen en een groter poriënvolume krijgen. Voorkomen moet worden dat de door het afgraven ontstane luchtholten gevuld worden met regenwater, omdat dan geen optimale verdichting meer mogelijk is. De grond moet na vergraving direct worden verwerkt om bevochtiging tijdens regenachtig weer of uitdroging aan de lucht zoveel mogelijk te voorkomen.

Volgens Reuter (1985) moet de verdichting plaatsvinden bij een vochtgehalte dat iets boven het optimale vochtgehalte ligt (verdichting aan de "natte kant" van de Proctorkurve), omdat dan de de geringste doorlaatfactor te realiseren is (zie fig. 12). Bij verdichting onder suboptimale vochtomstandigheden,

ontstaat een onregelmatige vlokkenstructuur (zie A en E in fig. 13), terwijl bij verdichting bij iets natere omstandigheden dan de optimale, er een gerangschikte disperse structuur ontstaat (fig. 13 C en D).

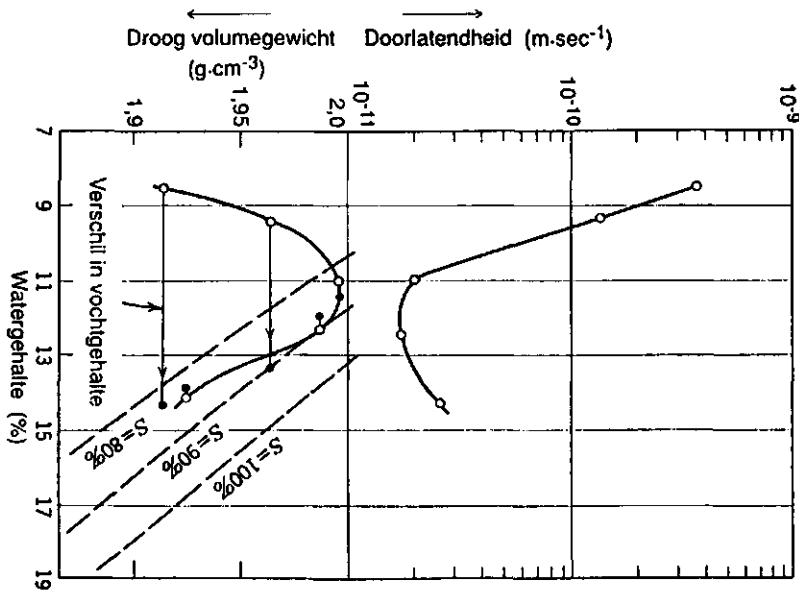


Fig. 12 Doorlaatfactor in relatie tot het vochtgehalte tijdens verdichting en de maximale verdichting (Lambe e.a., 1969).

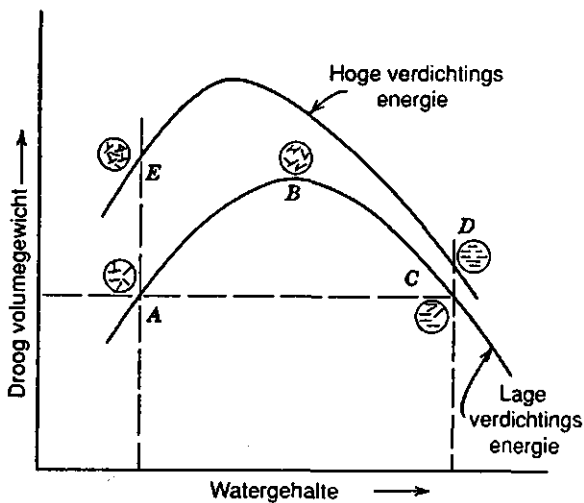


Fig. 13 Effect van verdichting op de structuur (fig. 34.6 uit Soil Mechanics).

In het laatste geval wordt de bodem intensief verkneeld en versmeerd. Het contactoppervlak tussen de bodemdeeltjes wordt daarmee vergroot, hetgeen leidt tot een toename van de wrijvings- of schuifweerstand en een afname van de doorlaatfactor (Kezdi, 1969). In de grondmechanica kent men het verschijnsel dat een stijve grondmassa door trillen vloeibaar wordt en weer opstijft zodra het trillen wordt gestaakt. Men

spreekt dan van tixotropie. Dit verschijnsel kan zich voordoen bij sommige kleisoorten en leidt dan tot verkneiding van de grond.

De gegevens van de Proctorproef leveren een standaarddichtheid op, die in de praktijk zonder omslachtige verdichtingsmethoden op economische wijze gerealiseerd kan worden.

3.5 Onderzoek naar de plasticiteit

Bij grond kunnen, afhankelijk van de korrelgrootteverdeling en het watergehalte, drie aggregatietoestanden worden onderscheiden, namelijk:

- de vaste toestand;
- de plastische toestand;
- de vloeibare toestand.

Uit deze indeling blijkt al, dat deze aggregatietoestanden alleen voorkomen bij gronden waarvan de korrels bij wisselend watergehalte een zekere samenhang of aggregatie vertonen. Zand en grind vallen hier dus niet onder. De grenzen tussen deze drie gebieden, ook wel consistentiegrenzen genoemd (fig. 14a), gaan geleidelijk in elkaar over en zijn daarom arbitrair. De consistentie grenzen kunnen belangrijke aanwijzingen geven hoe het materiaal zich tijdens de verwerking zal gedragen. Bovendien geven ze een indicatie van de mate waarin het materiaal plastische vervormingen kan ondergaan (geen breukvlakken bij vervorming).

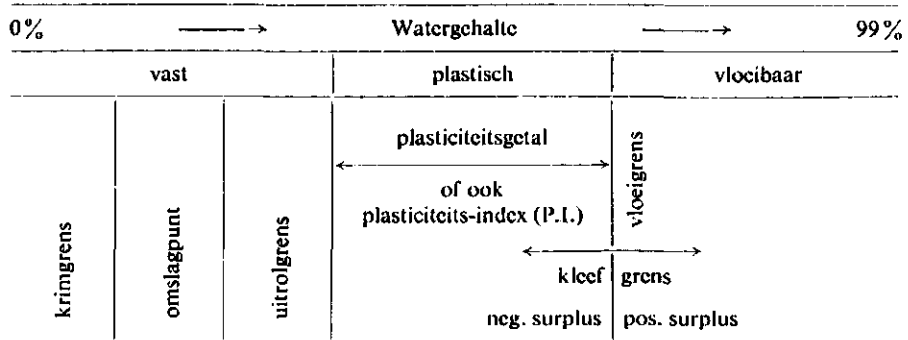
De vloeigrens vormt de overgang van de plastische naar de vloeibare toestand. De vloeigrens wordt bepaald met het toestel van Cassagrande. Dit is een bolvormig bakje, gevuld met grond, waarin met een V-vormige spatel een groef wordt getrokken. Dit bakje laat men 25-maal van een hoogte van 0,01 m vallen (fig. 14b). Het watergehalte van de grond, waarbij de groef in het bakje, zich juist sluit, noemt men de vloeigrens. Gebleken is dat er een lineair verband bestaat tussen het watergehalte en de logaritme van het aantal slagen voor het bereiken van de vloeigrens. Deze relatie kan worden bepaald door van enkele monsters met uiteenlopend watergehalte het aantal slagen te tellen waarbij de de groef juist dichtvloeit (fig. 14c).

De uitrolgrens vormt de overgang van de plastische naar de vaste toestand. Zodra blijkt dat het niet meer mogelijk is om de grond uit te rollen tot 3 mm dikke rolletjes, geeft dat het watergehalte aan dat bij deze grens hoort. Bij de uitrolgrens is de grond nog nagenoeg met water verzadigd. Bij verder uitdrogen zal op een gegeven moment de kleur van het monster veranderen, omdat de korrels aan de oppervlakte droog worden. Op dit moment is het omslagpunt bereikt. Door nog verder te drogen neemt het volume van de massa af en trekt het water zich in de poriën terug en treedt lucht naar binnen. De vochttoestand waarbij geen verdere krimp meer optreedt, wordt krimp grens genoemd (fig. 14a).

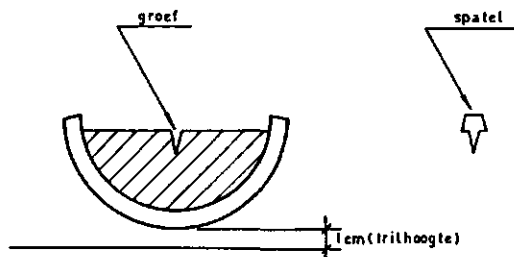
Een ander belangrijk gegeven, met name bij grondverzet, is de kleefgrens. Dit is een vochttoestand waarbij de adhesie van de grond zo gering is, dat een spatel schoon blijft als deze door de grondmassa wordt getrokken. De kleefgrens kan zowel

boven de vloeigrens ("positief surplus") als daar beneden liggen ("negatief surplus").

a



b



c

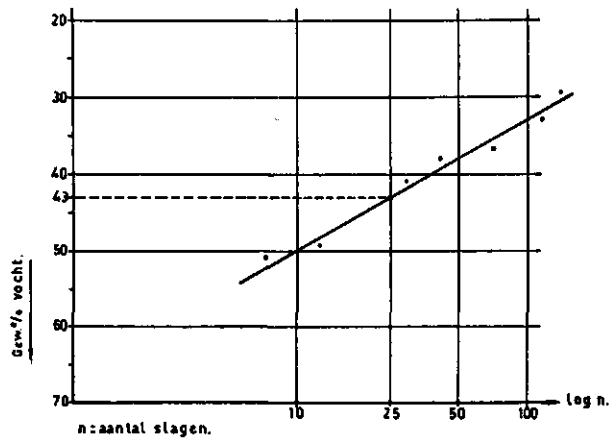


Fig. 14a Consistentiegrenzen met betrekking tot het watergehalte
 b Toestel van Cassagrande
 c Bepaling vloeigrens van het onderzochte monster (Bolderman en Dwars, Waterbouwkunde deel I).

De grond heeft plastische eigenschappen in een vochtgehalte traject dat ligt tussen tussen de uitrolgrens en de vloeigrens. Het vochtgehalte verschil bij deze consistentie grenzen wordt de plasticiteitsindex (P.I.) genoemd. Naarmate het getal groter is biedt het materiaal meer praktische mogelijkheden voor verwerking. Een grond met een kleine P.I. zal bij vergroting van het watergehalte snel overgaan van de vaste naar de

vloeibare toestand. Gronden waarvan het vochtgehalte dicht bij de vloeigrens ligt, zijn in het algemeen weinig stabiel. In hoeverre een laag onregelmatige zettingen van de ondergrond kan volgen is afhankelijk van de plasticiteit. Bij vervormingen kan er rek in het materiaal ontstaan, waardoor de dichtheid kan afnemen. Dit gebeurt echter minder naarmate de plasticiteit groter is. Mocht er echter toch enige afname van de dichtheid optreden, dan is het zaak dat de kleimineralen nog verder kunnen zwellen waardoor de ruimten weer worden opgevuld. Kleien met een groot aandeel actief zwellende mineralen, zoals montmorilloniet, hebben een groter plastisch bereik dan kleien met overwegend illiet en kaolonië (zie fig. 15). De plasticiteit neemt af naarmate de siltfractie groter wordt.

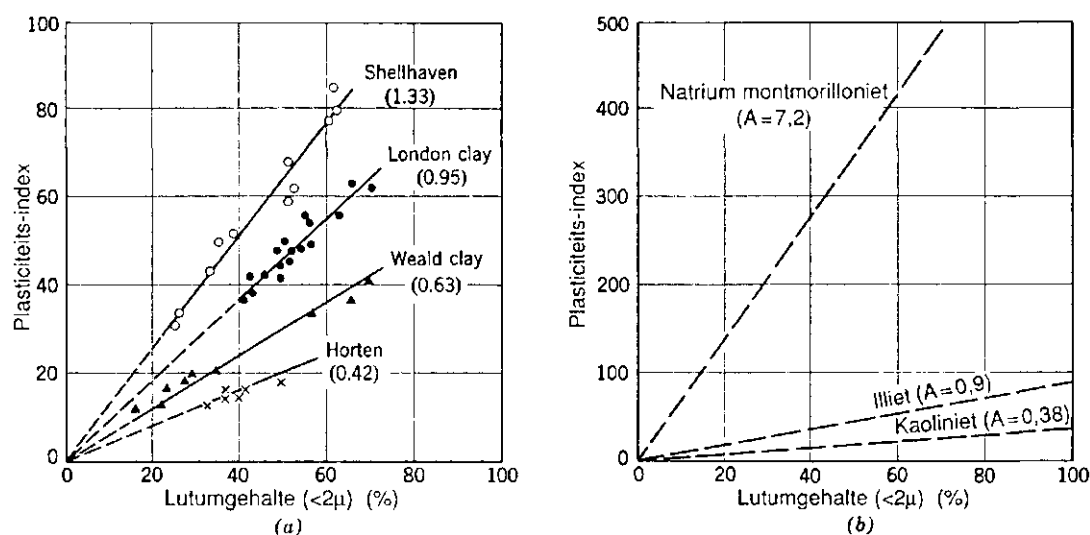


Fig. 15 Relatie tussen plasticiteitsindex en lutumfractie voor verschillende gronden en kleimineralen (fig. 3.5 uit Soil Mechanics).

In tabel 9 staan de consistentiegrenzen aangegeven van enkele grondsoorten. De grenzen zijn bepaald aan geroerde monsters.

Tabel 9 Consistentie grenzen van enkele grondsoorten.

Grondsoort	Watergehalte vloeigrens	(in gew.%) bij uitrolgrens	Plasticiteits-index (P.I.)
zand	16	15	1
leem	59	24	35
gele klei	35	28	7
bruine klei	43	23	20
donker grijze klei	137	51	86
klei met veen	196	102	94
veen	404	40	364

De fysische bestendigheid van het materiaal is belangrijk in verband met onregelmatige zettingen van het onderliggende afval en de kans op breuk en scheurvorming in de afdichtingslaag. Natuurlijke afdichtingsmaterialen zijn naar verwachting beter bestand tegen mechanische vervormingen dan synthetische materialen, zeker als de afdichtingslaag vrij dik is en het

materiaal gunstige plastische eigenschappen heeft en zwellende kleimineralen bevat. Dankzij het zwelvermogen van sommige kleisoorten kunnen zelfs scheuren in een afdichting gedicht worden (zelfherstellend vermogen, Reuter, 1985). In verband met de mogelijkheden tot verkneding en vervorming onder invloed van zettingen dient het afdichtingsmateriaal een plasticiteitsindex te hebben van minimaal 35%. Gezien de te verwachten zettingen zal de laagdikte minimaal 0,25 m moeten zijn. Naarmate de laag dikker is, heeft men meer garantie dat het afdichtend karakter van de laag ook na grote zettingsverschillen bewaard blijft.

3.6. Onderzoek naar de waterdichtheid

3.6.1 Inleiding

Uit het onderzoek naar de granulaire en kleimineralogische samenstelling, de verdichtingsmogelijkheden en de plasticiteit kan blijken, dat het onderzocht materiaal mogelijk geschikt is als afdichtingsmateriaal. Voor de definitieve vaststelling daarvan dient dan nog een laboratorium onderzoek plaats te vinden naar de mate van waterdichtheid. Dit laatste onderzoek is het meest essentiële onderdeel in de beoordeling van het afdichtingsmateriaal. In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de meet- en interpretatie- methoden.

In het voorgaande is reeds duidelijk gemaakt dat de grootte van de doorlaatfactor (K) niet als maat geldt voor de omvang van de lekkage door de afdichtingslaag. Deze immers hangt samen met de stijghoogtegradiënt. De doorlaatfactor is ook geen constante grootte, maar kan nog varanderen onder invloed van de stijghoogte gradiënt en de chemische samenstelling van het doorgeleide water, de mate van verdichting van het monster en de mate waarin de aanwezige kleimineralen zwellen.

In de volgende paragrafen zal worden ingegaan op de principes van waterstroming in grond en zullen twee methoden worden toegelicht waarmee de doorlaatfactor kan worden gemeten. Tot slot wordt aangegeven hoe de maximaal te verwachten lekkage door de afdichtingslaag dient te worden berekend. Eveneens wordt aangegeven hoe de benodigde dikte van de afdichtingslaag berekend wordt als de doorlaatfactor bekend is.

3.6.2 Principes van waterstroming in natuurlijke afdichtingsmaterialen

In kleimaterialen met een geringe doorlaatfactor (veelal minder dan $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) is het poriewater meer of minder sterk gebonden aan de negatief geladen kleideeltjes. Dit is vooral het geval als sterk zwellende kleimineralen aanwezig zijn. In dat geval zijn de watermoleculen zo sterk gebonden dat bij een geringe potentiaalgradiënt slechts een deel van de watermoleculen vrij kan bewegen. Bij hogere gradiënten komen ook de overige watermoleculen in beweging. Pas wanneer alle

watermoleculen vrij kunnen bewegen, voldoet de waterstroming in zwellende kleigronden aan een lineaire relatie, zoals de Wet van Darcy aangeeft (zie hfd. 2, fig. 4) (zie fig. 16). Vooral zware kleien vertonen dit niet-Darcy gedrag. De doorlaatfactor is dan afhankelijk van de stijghoogtegradiënt (Godecke, 1980; Gabener, 1984; Hoeks, 1984; Hoeks et al, 1986; Ryhiner en Hoeks, 1986). Bij sterke verdichting waar de poriën erg klein zijn, is het denkbaar dat de ruimte tussen de vaste delen vrijwel geheel wordt ingenomen door de diffuse dubbel-lagen. Dit zou tot gevolg kunnen hebben dat er beneden een minimale gradiënt (drempelwaarde) geen stroming optreedt. Het bestaan van zo'n gradiënt is echter tot op heden niet aangetoond (Gabener, 1983).

Volgens Godecke (1980) en Gabener (1983) kan de waterstroming in slecht doorlatende gronden worden beschreven met de volgende vergelijkingen (fig. 16):

$$v = a_m i^m \quad \text{voor } i < i_G \quad (13 a)$$

$$v = K (i - i_0) \quad \text{voor } i_G < i < i_D \quad (13 b)$$

waarin:

- v = filtersnelheid ($m \cdot s^{-1}$)
- i = potentiaal- of stijghoogte-gradiënt ($m \text{ H}_2\text{O} \cdot m^{-1}$)
- a_m = filtersnelheid bij $i=1$ ($m \cdot s^{-1}$)
- m = exponent (-)
- k = doorlaatfactor in het lineaire bereik ($m \cdot s^{-1}$)
- i_0 = aanvangsgradiënt voor het lineaire bereik (-)
- i_G, i_D = overgangsgradiënten, waartussen de filtersnelheid lineair samenhangt met de gradiënt (-)

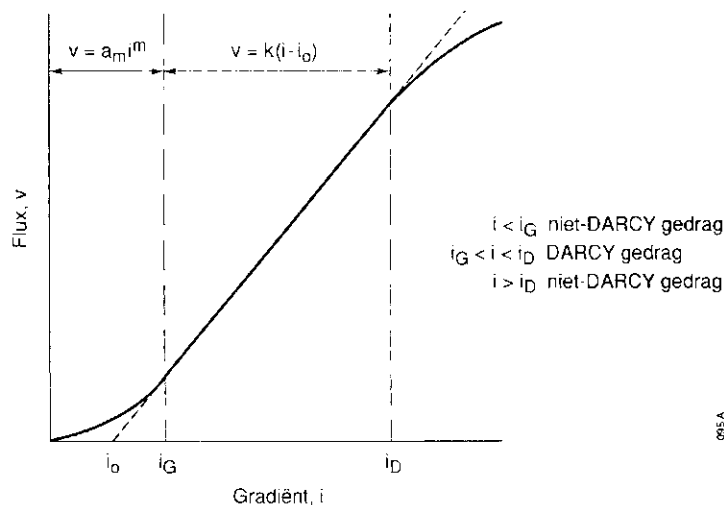


Fig. 16 Schematische weergave van de relatie tussen de filtersnelheid (v) en de potentiaalgradiënt (i) voor slecht doorlatende kleimaterialen.
 $i < i_G$ niet-lineaire stroming ten gevolge van bindingskrachten
 $i_G < i < i_D$ lineaire stroming volgens de Wet van Darcy
 $i > i_D$ niet-lineaire stroming ten gevolge van turbulentie.

Uit figuur 16 en 17 blijkt dat de traditionele doorlaatfactor, volgens Darcy berekend als v/i , geen constante is in kleigronden vanwege de niet-lineaire relatie bij lage gradiënten.

Het is daarom niet zonder meer mogelijk om op grond van een in het laboratorium gemeten doorlaatfactor, meestal gemeten bij een relatief hoge gradiënt, de lekkage onder veldomstandigheden te berekenen. Het volgende rekenvoorbeeld kan dit verduidelijken:

Stel, de K-factor is in het laboratorium gemeten bij $i=50$ en het blijkt dat $k=5 \cdot 10^{-10}$ m/s. In het veld bedraagt de gradiënt in geval van bovenafdichting maximaal 6. Als lineair wordt geëxtrapoleerd betekent dit, dat de jaarlijkse lekkage wordt berekend als 52 mm/jaar (afvoerperiode 200 dagen per jaar) en dus zou het materiaal niet voldoen. Nu blijkt echter, dat bij een gradiënt van $i=5$, de K-waarde $1 \cdot 10^{-10}$ m/sec bedraagt. Bij deze doorlaatfactor is de berekend lekkage nog slechts 10 mm/jaar. In dit geval voldoet het materiaal dus wel.

Voor de praktische toepassing van natuurlijke afdichtingsmaterialen betekent dit, dat de doorlaatfactor in het laboratorium moet worden gemeten bij verschillende potentiaalgradiënten in het traject waarin ook de in het veld voorkomende gradiënten liggen. Eventueel kan men de meting wel bij een enkele potentiaalgradiënt uitvoeren, mits uitgegaan wordt van de maximaal in het veld optredende gradiënt (bijv. $i=20$).

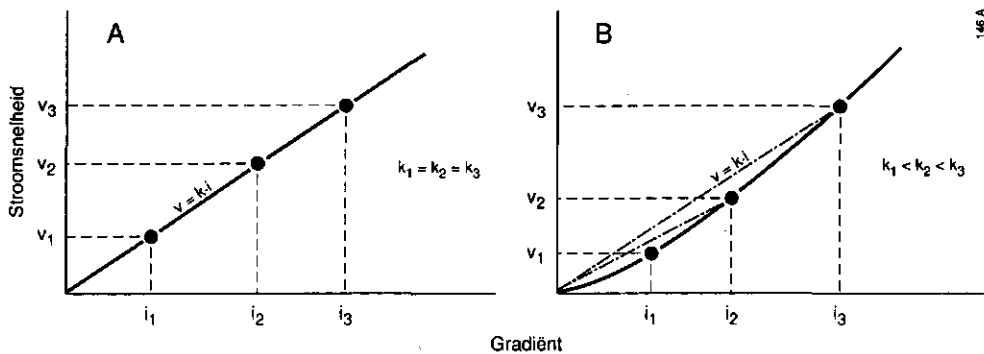


Fig. 17 Verband tussen doorlaatfactor en gradiënt
a grofzandig materiaal
b fijn materiaal, zeer lage doorlaatfactor.

Voor de stroming van water in grond wordt de potentiaal meestal opgegeven als stijghoogte (m waterkolom). De stijghoogte (h) is opgebouwd uit twee componenten, namelijk de drukhoogte (hd) en de plaatshoogte hp . Wat de plaatshoogte betreft wordt een referentieniveau aangehouden, in dit geval (zie fig. 18) bijvoorbeeld de onderkant van het monster. De stijghoogte ($h1$) aan de bovenzijde van het monster is dus gelijk aan de drukhoogte ($hd =$ hoogte waterkolom) plus de plaatshoogte ten opzichte van het referentieniveau ($hp = dz$). Dus, $h1 = hd1 + dz$. De stijghoogte ($h2$) aan de onderzijde van de kolom is gelijk aan de drukhoogte ($hd2$), immers de plaatshoogte is daar per definitie 0, omdat de onderzijde dient als referentie-hoogte.

De stijghoogtegradiënt i bedraagt dan (zie ook fig. 18):

$$i = \frac{h1 - h2}{dz} \text{ of } \frac{hd1 - hd2}{dz} + 1 \quad (14)$$

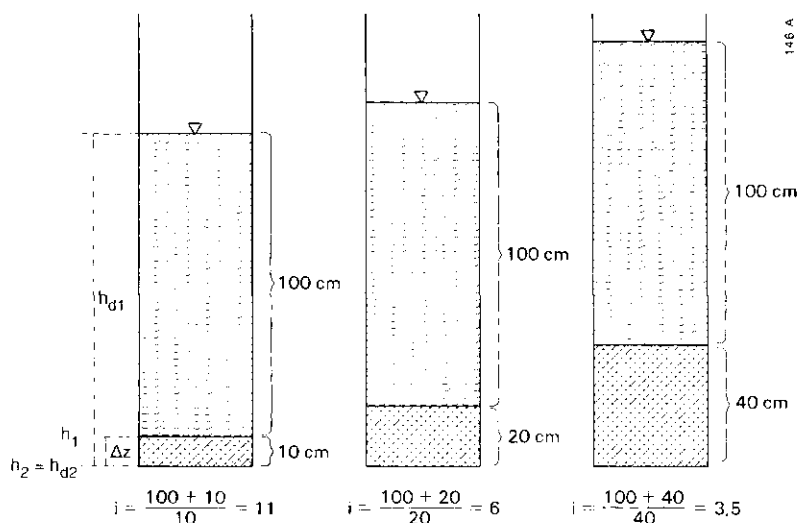


Fig. 18 Effect van de dikte van de afdichtingslaag op de stijghoogtegradiënt (zie tekst voor betekenis symbolen).

De gradiënt neemt dus af met toenemende dikte (dz) van de afdichtingslaag en afnemende hoogte van de waterkolom. Echter, al zou $hd = 0$ zijn, dan blijft de gradiënt $i = 1$, zodat nog steeds lekkage mogelijk is. Vanwege het niet constant zijn van de doorlaatfactor verdient het aanbeveling om op het laboratorium de relatie tussen flux en gradiënt experimenteel te meten.

Op grond van het voorgaande wordt aanbevolen de mate van afdichting van een kleiafdichtingsmateriaal op te geven als de jaarlijks te verwachten lekkage (in mm/jr) onder veldomstandigheden, bijvoorbeeld minder dan $q \text{ mm.jr}^{-1}$ bij zekere randvoorwaarden (gradiënt). Uiteraard is dit alleen mogelijk als in het laboratorium de relatie tussen v en i experimenteel is vastgesteld in een gradiënt-traject, dat is afgestemd op de in de praktijk optredende waterstanden boven de afdichtingslaag en de dikte van deze laag. Voor de berekening van de gradiënt voor ontwerpdoeleinden kan worden uitgegaan van een drukhoogte boven de afdichtingslaag van 0.50 m en -0.50 m er onder. Als de doorlaatfactor gemeten is, kan de minimale dikte van de afdichtingslaag (D) worden berekend uit:

$$D > \frac{1,0}{5,787037 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{q}{K} - 1} \quad (15)$$

Hierin is de doorlaatfactor opgegeven in m/s en de maximale lekkage is gesteld op $q \text{ mm/jaar}$. Opgemerkt zij, dat als uit deze berekeningen blijkt, dat er slechts een laag van beperkte dikte nodig is ($< 0.25 \text{ m}$), toch tot een grotere dikte besloten moeten worden om nadelige effecten van een verschilzettingen op de doorlaatfactor te kunnen opvangen. Als de laagdikte is berekend, moet nog worden gecontroleerd of de gebruikte doorlaatfactor gelijk is aan de factor die hoort bij de uiteindelijke gradiënt. Voor dit doel is een ontwerpgrafiek

ontwikkeld waarin de gebruiker de relatie tussen gradiënt en doorlaatfactor moet tekenen (zie fig. 19).

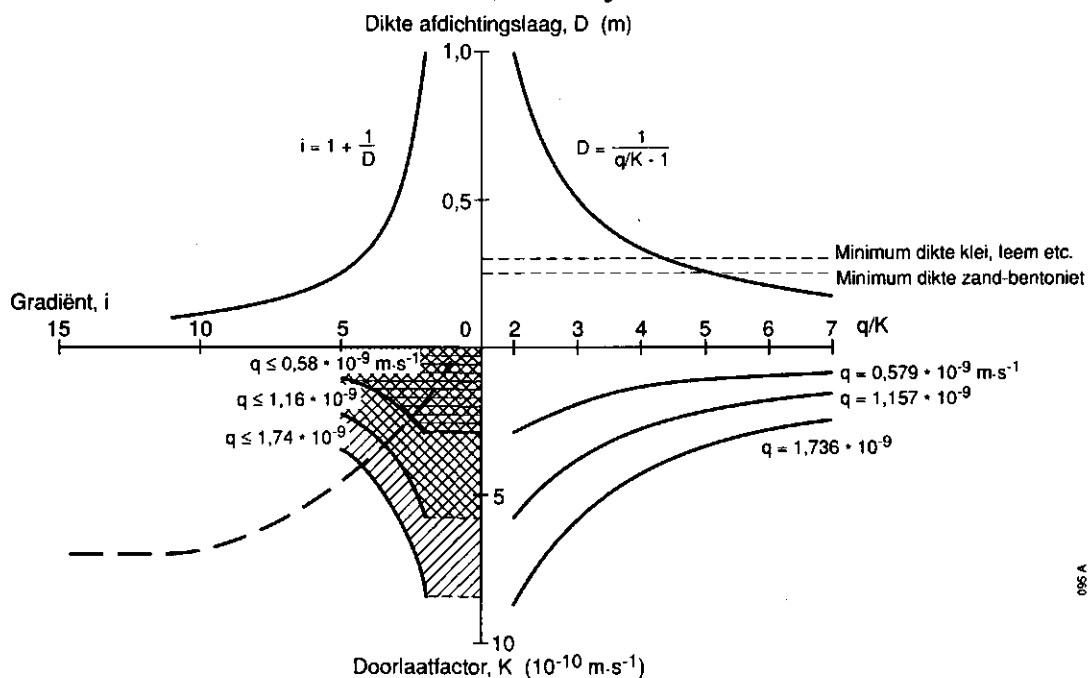


Fig. 19 Ontwerpgrafiek voor de bepaling van de minimale dikte van een afdichtende laag.

De ontwerpgrafiek wordt als volgt gebruikt:

- begin met een aanname van de te verwachten gradiënt, bv. 5;
- zoek de daarbij behorende doorlaatfactor op;
- stel vast welke ontwerppercolatie mag worden gebruikt ;
- trek een horizontale lijn door de plaats van de doorlaatfactor op de verticale as tot deze in de rechteronder figuur de te hanteren "q curve" snijdt;
- trek vanuit dit snijpunt een lijn verticaal omhoog tot deze de curve rechtsboven snijdt;
- trek vandaaruit een horizontale lijn naar links, tot deze de verticale as snijdt en lees de minimale laagdikte van de afdichtingslaag af;
- vervolg tenslotte de lijn tot deze de curve links boven snijdt;
- trek een verticale lijn door dit punt in verticale, neerwaartse richting, tot deze horizontale ,gradiënt as snijdt;
- controleer of de gevonden gradiënt overeenkomt met de geschatte gradiënt;
- als deze vrijwel gelijk zijn, is de minimale dikte van de afdichtingslaag gevonden. Is dit niet het geval, dan wordt de procedure met een betere schatting van de gradiënt uitgevoerd.

085 A

3.6.3 Methoden voor de bepaling van de doorlaatfactor

3.6.3.1 Voorbehandeling van het monster

Een belangrijk aspect bij de bepaling van de doorlaatfactor van het aangeboden afdichtingsmateriaal betreft de voorbehandeling. Het monster zal doorgaans worden aangeleverd als los materiaal met een zeker vochtgehalte. Het zal vervolgens overgebracht moeten worden in een ring of bus voor de meting van de doorlaatfactor en zal in de ring of bus bij het optimale vochtgehalte op voorgeschreven dichtheid moeten worden gebracht. Vochtgehalte en dichtheid zijn dan al in een Proctorproef is vastgesteld.

Bij gebruik van klei, die elders afgegraven moet worden en na afgraving direct gebruikt zal worden op de stortplaats, is het vochtgehalte meestal een gegeven waar weinig aan veranderd kan worden. Uitdroging of bevochtiging van dergelijke klei is vrijwel niet mogelijk. Bij de meting van de doorlaatfactor zal dan ook uitgegaan moeten worden van veldvochtige, pas uitgegraven klei. De daarmee te bereiken dichtheid is af te leiden uit de Proctorproef. Volgens Reuter (1985) zou de verdichting moeten plaatsvinden bij een vochtgehalte dat iets (bijvoorbeeld 2-3%) boven het optimale vochtgehalte ligt. Dit heeft echter alleen zin als het afdichtingsmateriaal homogeen kan uitdrogen of bevochtigen.

Na verdichting zal het monster eerst verzadigd moeten worden met leidingwater. Bij voorkeur zou het poriewater volledig vervangen moeten worden door leidingwater, maar dit duurt dermate lang (ca. 2-3 maanden bij een monsterdikte van 2,5 cm en een gradiënt $i=20$) dat dit in de praktijk niet haalbaar is. De doorlooptijd kan versneld worden door het oorspronkelijke monster te schudden met een hoeveelheid water, waarmee de laag in de praktijk duurzaam in contact zal komen. Deze hoeveelheid zal gelijk moeten zijn aan het droog gewicht van het monster. Na droging kan men het monster verdichten bij gewenst vochtgehalte. Aanbevolen wordt om na uitstroming van het eerste water de verzadigingsprocedure nog 1 week voort te zetten alvorens te beginnen met de metingen. De verzadigingsprocedure wordt vanwege de lage doorlaatfactor vaak bij een hoge gradiënt uitgevoerd. Vanwege eventuele interne erosie in het monster (uitspoeling van lutum/bentoniet-deeltjes) bij zeer hoge gradiënten wordt echter aanbevolen de gradiënt niet hoger te kiezen dan ca. 20.

Een ander belangrijk aspect bij de metingen van de doorlaatfactor betreft de aan te leggen stijghoogtegradiënt, omdat de filtersnelheid niet altijd een lineaire relatie vertoont met de stijghoogtegradiënt. In feite zou de doorlatendheid moeten worden gemeten bij de in het veld voorkomende gradiënten, die bij goed functionerende drainage in de orde van 1 tot 5 liggen en bij volledig verstopte drains kunnen oplopen tot 5 à 8. Voor de meting van de doorlaatfactor zijn er twee methoden beschikbaar:

- "constant head"-methode (meting bij constante gradiënt);
- "falling head"-methode (meting begint met hoge gradiënt, die gaande weg afneemt). Beide methoden worden in de volgende paragrafen uitvoerig besproken.

3.6.3.2 De "constant head"-methode

Bij de "constant head"-methode wordt de stijghoogtegradiënt constant gehouden tijdens de meting door een constant water-niveau boven het monster te handhaven. Dit wordt gerealiseerd door continue water toe te voeren en de overmaat aan water te laten wegstromen via een overloop waarvan de uitstroombuigte constant blijft (fig. 20). Bij deze methode dient de gradiënt ongeveer van de zelfde orde van grootte te zijn als wordt verwacht in op de stortplaats ($i \leq 10$). Uiteraard kan de meting ook bij verschillende gradiënten worden bepaald aan het zelfde monster (Hoeks et al., 1987).

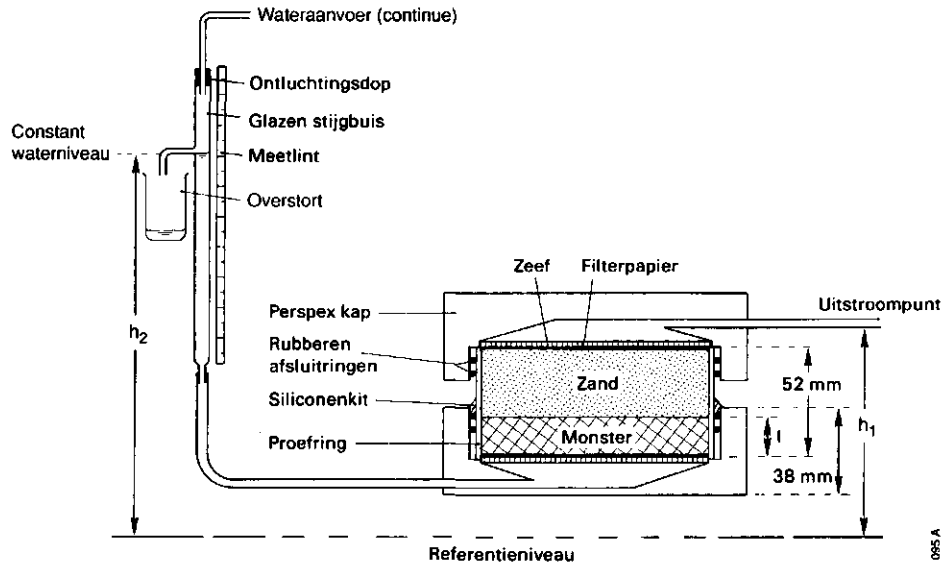


Fig. 20 De meetopstelling voor de "constant head"-methode.

Het te onderzoeken afdichtingsmateriaal wordt in een ring gebracht en verdicht. De dikte van het monster (d) in de ring moet nauwkeurig worden vastgesteld (in mm's nauwkeurig) en moet tenminste 0,025 m bedragen. De ring moet bij voorkeur geheel gevuld zijn met monster. Wanneer dit niet het geval is moet de ring verder worden opgevuld met vochtig goed doorlatend zand. Het ringmonster wordt ingeklemd tussen twee perspexkappen. De kappen worden met een beugel op elkaar geklemd om volumetoename door zwelling van het monster te voorkomen. Tussen de kappen en de ring bevinden zich vier rubberringen om lekkage langs de buitenkant van de ring te voorkomen. Voor alle zekerheid wordt de ruimte tussen de ring en de onderste perspex kap nog afgekit met siliconenkit. In de twee (identieke) kappen bevinden zich een zeefje en een opening.

Op de onderste kap is de stijgbuis aangesloten en deze dient dus als instroomopening. Het monster wordt van onder naar boven doorstroomd om daarmee zoveel mogelijk luchtinsluiting te beperken. De opening aan de bovenste kap fungeert als afvoer. Hier wordt het uitstromende water opgevangen. Op het niveau waar vrije uitstroming aan de lucht plaatsvindt is de drukhoogte gelijk aan 0. Dit niveau wordt meestal ook gekozen als referentieniveau voor de plaatshoogte, zodat ook de

stijghoogte $h(2)$ aan de uitstroomzijde 0 is. De stijghoogte aan de instroomzijde $h(1)$ wordt bepaald door het waterniveau in de stijgbuis af te lezen. De stijghoogte is gelijk aan de afgelezen waarde van het waterniveau t.o.v. het referentieniveau. Verdamping uit de stijgbuis moet zoveel mogelijk worden voorkomen.

Na verzadiging van het monster wordt het door het monster stromende water aan de uitstroomzijde opgevangen en wordt het volume door weging vastgesteld. Vanwege de zeer geringe doorlaatfactor moet verdamping van water aan de uitstroomzijde worden voorkomen, omdat anders een te lage doorlaatfactor wordt berekend. Verdampingsverliezen kunnen worden voorkomen door het opvangkolfje (niet luchtdicht!) af te dekken (bijvoorbeeld met een wattenprop). Hoewel het voorkomen van verdamping niet onmogelijk is, is dit toch vaak lastig te realiseren. Om deze reden wordt de "constant head"-methode minder geschikt geacht voor bepaling van de doorlaatfactor van afdichtingsmaterialen, tenzij door vergroting van het monsteroppervlak het uitgestroomde volume zo groot is dat verdampingsverliezen een ondergeschikte rol spelen (zie meetopstelling, zoals beschreven door Hoeks et al., 1987). Voor de berekening van de doorlaatfactor wordt gebruik gemaakt van de wet van Darcy:

$$v = -k \frac{dh}{dx} \quad (16)$$

waarin:

v = de filtersnelheid (m/s)

k = de doorlaatfactor van de grond bij verzadiging (m/s)

dh = de stijghoogteverandering over een afstand dx in de grond (m)

dx = de afstand in de stromingsrichting (m)

Naast al genoemde factoren, heeft de viscositeit van het water invloed op de doorlaatfactor. De viscositeit, ook wel de "taaiïvloeibaarheid" genoemd, wordt naast de concentratie van opgeloste stoffen, overwegend bepaald door de temperatuur. De meting van de doorlaatfactor dient daarom bij een bepaalde temperatuur en een goed gedefinieerde vloeïstof te worden uitgevoerd. Aanbevolen wordt om de meting uit te voeren bij 20 °C met leidingwater. De doorlaatfactor dient te worden omgerekend naar de doorlatendheid bij 10 °C. Deze omrekening volgt uit:

$$K_{10} = 0,77 K_{20} \quad (17)$$

Uit het opgevangen volume water (V), dat in het tijdsinterval (t) door het monster met een bekend oppervlak (A) stroomt, is de stroomsnelheid door het monster te berekenen:

$$v = \frac{V}{A \cdot t} \quad (18)$$

De stijghoogte-gradiënt (i), die de drijvende kracht is voor de stroming van water in het monster, is gelijk aan dh/dx en wordt afgeleid uit de stijghoogten aan in- en uitstroomzijde van het monster en de dikte van het monster:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{d} \quad (19)$$

Met de aldus berekende gradiënt is de doorlaatfactor te berekenen:

$$K = \frac{V}{i} \quad (20)$$

De jaarlijkse lekkage kan berekend voor de ontwerpcondities en de gevonden K -waarde. Hierbij dient er rekening mee te worden gehouden, dat als gevolg van de neerslag- en verdampingsverdeling er hooguit gedurende 200 dagen per jaar percolatie kan optreden. Tevens dient hierbij te worden aangetekend, dat de berekende percolatie in werkelijkheid niet hoeft op te treden. Bij een normaal functionerende drainage zal de gradiënt geringer zijn dan volgens de ontwerpnormen. Bovendien zal er zich in de meeste gevallen stortgas ontwikkelen, die onder een geringe overdruk (enkele tientallen millibars) ontsnapt. Daarbij is dan ook de potentiaal onder de afdichtingslaag al gauw enkele tientallen millibars. In die gevallen zal de werkelijke gradiënt nagenoeg nul zijn. De werkelijke percolatie is dan ook nagenoeg nihil.

3.6.3.3 De "falling head"-methode

Eerder is reeds aangegeven dat bij de "constant head"-methode de meting van het uitstromend volume niet erg nauwkeurig is als de doorlaatfactor gering is. Bij de "falling head"-methode wordt het instromend volume gemeten, dat met de gegeven opstelling (fig. 21) erg nauwkeurig kan worden gedaan, terwijl verdampingsverliezen beter uit te sluiten zijn (overigens leiden verdampingsverliezen bij deze methode tot een overschatting van de doorlaatfactor). Het probleem van verdamping speelt hier trouwens nauwelijks een rol omdat het stijgbuisje waarin het waterniveau zich bevindt een zeer kleine diameter heeft. Door het monsteroppervlak relatief groot te kiezen treedt ook bij zeer lage doorlatendheden nog een duidelijk meetbare daling van het waterniveau in de stijgbuis op. Bovendien kan het buisje nog worden afgesloten met een wattenprop om verdamping tegen te gaan. De "falling head"-methode verdient vanwege deze grotere nauwkeurigheid de voorkeur boven de "constant head"-methode.

Bij de "falling head"-methode neemt de stijghoogtegradiënt voortdurend af doordat er water uit de stijgbuis in het monster stroomt. Bij deze methode wordt de doorlaatfactor afgeleid uit de daling van het waterniveau in de stijgbuis.

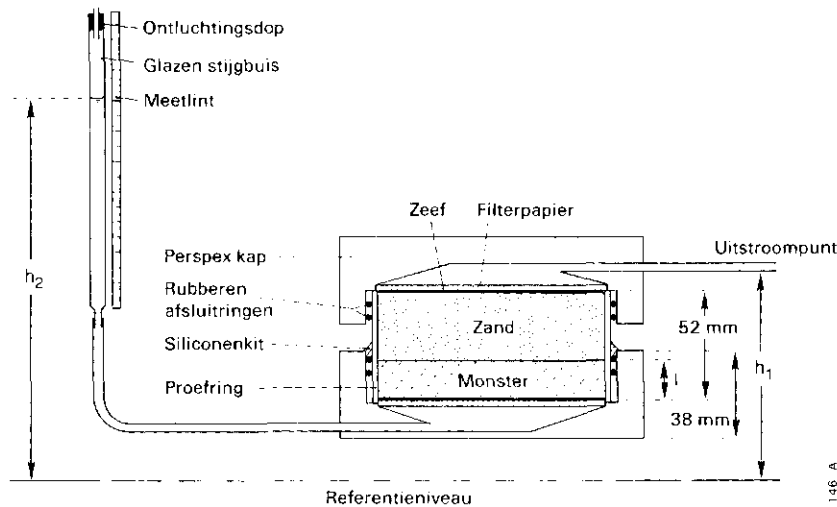


Fig. 21 Meetopstelling voor de "falling head"-methode.

Bij aanvang van de meting dient de gradiënt minimaal 20 te zijn. De metingen worden voortgezet tot een gradiënt van 5 of lager is bereikt. Eventueel kan de proef herhaald worden door de gradiënt opnieuw te verhogen en vervolgens weer te laten afnemen tot beneden 5. Het zal in veel gevallen blijken, dat de doorlaatfactor in de tweede meting geringer is dan in de eerste (zie par. 3.6.3.4).

Het voordeel van de "falling head"-methode is dat uit de metingen direct de relatie tussen v en i kan worden vastgesteld (Ryhiner en Hoeks, 1986), zodat ook ingeval van een niet lineaire relatie direct bij elke willekeurige gradiënt de daarbij behorende lekkage kan worden berekend. Het te onderzoeken monster wordt in een ring gebracht op dezelfde manier als bij de "constant head". De diameter van de stijgbuis bij de "falling head"-methode wordt zo klein mogelijk gehouden om ook bij een geringe doorlaatfactor een duidelijke daling van het waterniveau in de stijgbuis te kunnen meten. De stijghoogte wordt regelmatig afgelezen, zodat aan de hand van de opeenvolgende aflezingen er een voldoende aantal representatieve metingen beschikbaar komen, waaruit een betrouwbare relatie van v en i kan worden bepaald. Het tijdsinterval zal langer worden, naarmate het waterniveau minder snel daalt. De doorlaatfactor wordt berekend met de volgende formule:

$$K = \frac{a \cdot d}{A \cdot dt} \ln \left(\frac{h(1)}{h(2)} \right) \quad (21)$$

waarin:

- a = dwarsdoorsnede van het stijgbuisje (m^2)
- $h(1)$ = stijghoogte boven de uitstroomopening op tijdstip $t(1)$ (m)
- $h(2)$ = stijghoogte boven de uitstroomopening op tijdstip $t(2)$ (m)
- dt = duur van het tijdsinterval (= $t(2) - t(1)$) (s)
- d = dikte van het monster (m)
- A = dwarsdoorsnede van het monster (m^2)

De gradiënt is gedurende het interval dt niet constant. Er kan echter een gemiddelde gradiënt worden berekend uit de metingen:

$$i = \frac{\frac{(h_1 - h_2)}{d}}{\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)} \quad (22)$$

Met de formules (21) en (22) worden voor elk tijdsinterval de waarden K en i berekend.

3.6.3.4 Tijdsduur meting van de doorlaatfactor

Uit onderzoek van Hoeks et al. (1987) is gebleken dat de doorlaatfactor van zand-bentoniet mengsels (Wyoming bentoniet) na verloop van tijd geringer wordt. Pas na twee tot drie maanden bleek de doorlaatfactor niet meer te veranderen (figuur 22). Een mogelijke verklaring voor dit verschijnsel is dat het zwellingsproces nog een tijd na bevochtiging doorgaat.

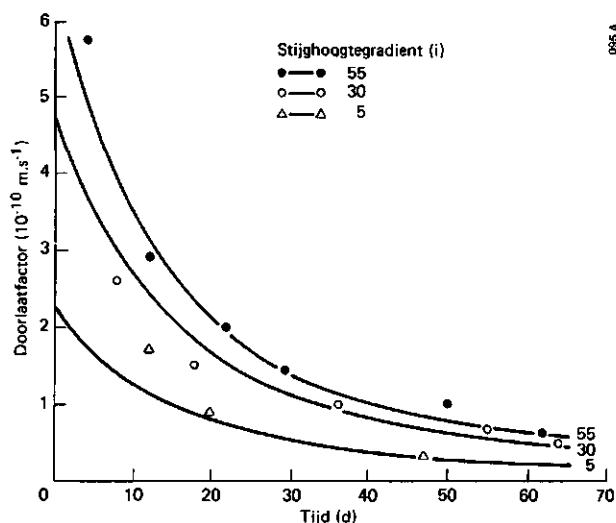


Fig. 22 Verloop doorlaatfactor (hier berekend als v/i) van mengsel met 5% Wyoming bentoniet bij stijghoogte-gradiënten $i=5, 30$ en 55 (Hoeks et al., 1987).

Het is echter ook niet uitgesloten, dat als gevolg van interne erosie, er bentonietdeeltjes worden verplaatst die verschillende poriën verstoppen. Op grond van deze ervaringen dient de meting gedurende minstens drie weken te worden voortgezet.

3.7 Geschiktheidsbeoordeling van natuurlijke afdichtingsmaterialen

De geschiktheid van het beschikbaar materiaal voor afdichting wordt bepaald op grond van de resultaten van het laboratorium-onderzoek. Van dit onderzoek dient een rapport te worden samengesteld, waarin is opgenomen:

- a Beschrijving van grondsoort
Benaming van grondsoorten en de plaats van herkomst. De oorspronkelijke ligging t.o.v. maaiveld, het grondgebruik zowel het huidige als dat in het verleden, de duur van opslag in een depot, indien dat tenminste aan de orde is, en de opslag omstandigheden.
- b Granulaire samenstelling
De korrelgrootte van het materiaal wordt beschreven en er wordt aangegeven of het met bentoniet gemengd moet worden. Geen bijmenging is nodig als het materiaal bestaat uit:
- kleigronden met een lutumgehalte (deeltjes <2 um) >35%
- leemgronden met een leemgehalte (deeltjes <50 um) >70%
Als er moet worden bijgemengd, dient de gradatie voldoende ruim te zijn ($D_{60}/D_{10} \sim 10$). Het gemakkelijkst te verwerken zijn zand en leem- of kleihoudend zand met bijmenging van bentoniet.
- c Kleimineralogisch onderzoek
De lutumfractie van kleigronden moet voor tenminste 20% bestaan uit zwellende kleimineralen, ook wel smectieten genoemd (meestal hoofdzakelijk montmorilloniet). Dit is nodig om een voldoende plastisch materiaal te hebben, zodat bij verdichting een disperse en slechtdoorlatende structuur ontstaat. Bovendien is deze plasticiteit nodig voor het opvangen van vervormingen. Dit laatste wordt gerealiseerd, als er in het mengsel van zand en klei- of bentonietpoeder minstens 5% montmorilloniet wordt aangetroffen.
- d Bodemchemisch onderzoek
Het afdichtingsmateriaal dient bij voorkeur kalkarm (<0.5% kalk) en humusarm (<0,5% organische stof) te zijn, omdat deze stoffen op de lange duur verweren en in oplossing gaan waardoor zowel het porievolume en als de doorlaatfactor toeneemt. Voor menging met klei- of bentonietpoeder moet de grond eveneens bij voorkeur kalkloos en humusarm zijn. Met name kalk heeft een nadelig effect op het zwelvermogen van montmorillonietklei. Overigens kan dit wel gecompenseerd worden door meer bentoniet toe te voegen of ingeval van kleigrond uit te gaan van materiaal met meer montmorilloniet.
- e Verdichtingsonderzoek
Het afdichtingsmateriaal zonder toeslag moet verdicht kunnen worden tot een droog volumegewicht van minstens 1500 kg/m^3 , omdat anders het porievolume en de gemiddelde poriediameter te groot zijn. Het optimale vochtgehalte voor verdichting wordt vastgesteld bij het Proctor-onderzoek (bij klei aan de "natte zijde" van de Proctorcurve). Ook wordt vastgesteld welke dichtheid te bereiken is als het vochtgehalte onder en boven het optimum ligt. De doorlaatfactor die dan wordt gerealiseerd, dient eveneens te worden bepaald. Uit de variatie in het vochtgehalte waarbij nog een acceptabele doorlaatfactor wordt verkregen, worden de toleranties voor het vochtgehalte van het te verwerken materiaal afgeleid. Aangegeven zal moeten worden met welk vochtgehalte het materiaal op het werk aangevoerd zal worden en hoe het optimale vochtgehalte kan worden gerealiseerd. Grond die gemengd wordt met bentoniet of kleipoeder moet tenminste verdicht kunnen worden tot een droog volumegewicht van 1700 kg/m^3 .
- f Plasticiteitsonderzoek
De plasticiteitsindex van het afdichtingsmateriaal moet minstens 35% bedragen om goede verkneding van het materiaal bij verdichting aan de "natte zijde" van de Proctorcurve

mogelijk te maken. Bij zand-bentoniet mengsels kan deze plasticiteitsindex worden bereikt als minimaal 5% bentoniet in het mengsel aanwezig is. De plasticiteitsindex is, behalve voor de verknedingsmogelijkheden bij verdichting, ook belangrijk in verband met de bestendigheid van het materiaal tegen onregelmatige zettingen.

g Meting van de doorlaatfactor

De doorlaatfactor dient te worden bepaald aan monsters, die zijn verdicht bij zowel het optimum vochtgehalte als bij lagere en hogere. Het aantal bepalingen moet voldoende groot zijn om een statistisch betrouwbaar gemiddelde te bepalen. De meting dient te zijn uitgevoerd met schoon water. Voor die gevallen waarin in de praktijk een andere samenstelling van het water wordt verwacht, dient de doorlaatfactor bij een overeenkomstige samenstelling te worden bepaald. Een berekening wordt gemaakt van de dikte van de afdichtingslaag. Deze dikte dient te worden opgegeven voor een uiteenlopende mate van afdichting. Ook dient in dit rapport al te worden aangegeven, welke dikte de afdichtingslaag zou moeten hebben, indien alle factoren, inclusief de toeslagen (tabel 17) zijn verdisconteerd.

h Aanleg Proefveld

De omstandigheden waaronder bepalingen op het laboratorium zijn uitgevoerd zijn niet altijd onder veldomstandigheden te realiseren. Bovendien zal de wijze van uitvoeren invloed hebben op het resultaat. Een proefveld dient te worden aangelegd, om vast te stellen of met de voorgestane uitvoeringsmethode kan worden voldaan aan de eisen en bovendien om na te gaan waar in de uitvoering problemen kunnen ontstaan die een negatief effect hebben op het uiteindelijk resultaat. Onder resultaat wordt verstaan de gerealiseerde laagdiktes, de mengverhoudingen, de doorlaatfactoren van monsters die op uiteenlopende plaatsen zijn gestoken en de gemiddelde percolatie in het gehele proefveld gedurende minstens een jaar. Daarbij dienen de randcondities volgens het ontwerpcriterium te worden ingesteld. Inzicht wordt hiermee verkregen tussen enerzijds resultaten van laboratorium-resultaten en in de praktijk haalbare resultaten. Van de uitvoeringswijze en resultaten dient een rapport te worden opgesteld. Hiermee wordt bevorderd, dat opgedane ervaring elders nuttig kan worden gebruikt. Bovendien wordt hiermee de mogelijkheid geopend om eventueel de intensiteit van controle op de daadwerkelijke uitvoering te herzien.

4.1 Inleiding

De laagopbouw van de eindafdekking is afgestemd op de functies, die hieraan worden toegekend. In hoofdstuk 2 is reeds vermeld, dat de eindafdeklaag een geschikte groeiplaats moet zijn voor de vegetatie, infiltratie van regenwater in het afval moet verhinderen of beperken en uittreding van stortgas moet voorkomen. Deze functies zijn alleen te realiseren als er speciale eisen worden gesteld aan de laagopbouw en de gebruikte materialen (zie ook Lutton et al., 1979; Lutton, 1982).

Daarnaast kan ook de uiteindelijke bestemming van de stortplaats nog specifieke eisen stellen. Aan zulke eisen kan echter alleen tegemoet worden gekomen als daardoor de andere functies niet worden verstoord. In feite zou er al bij de opzet en inrichting van het stortterrein rekening moeten worden gehouden met de uiteindelijke bestemming.

In hoofdstuk 2 is reeds schematisch aangegeven hoe de eindafdeklaag moet zijn opgebouwd. Deze opbouw is afgestemd op de eis dat de eindafdekking waterdicht moet zijn. De andere lagen zijn nodig om de afdichtingslaag tijdens de aanleg goed te kunnen verdichten of daarna te beschermen tegen mechanische beschadiging, indringing van plantewortels of gravende bodemdieren, of uitdroging. Boven de afdichtingslaag moet een drainagesysteem aanwezig zijn dat het neerslagoverschot zijdelings afvoert. Indien zulks nodig is, dient er onder de afdichtingslaag een ontgassingssysteem te worden aangelegd om het gas gecontroleerd af te voeren, waarbij er geen schade wordt toegebracht aan de vegetatie.

Het afval zal nadat het is gestort, nog geruime tijd zetting en klink vertonen. Dit gebeurt niet op elke plek op het stort in dezelfde mate. Afdichtingslagen, die in een te vroeg stadium zijn aangebracht worden blootgesteld aan grote vervormingen waardoor hun functie deels verloren kan gaan en herstelwerkzaamheden uitgevoerd moeten worden. Vanuit dat oogpunt bezien, is het raadzaam om pas de eindafdekking aan te brengen wanneer de verwachte (verschil)zettingen niet al te groot meer zijn.

4.2 Steunlaag

Bij het opbrengen van de laatste 1 à 2 meter afval dient er al rekening te worden gehouden met constructie van de eindafdekking. In deze laag mag geen grof vuil meer worden verwerkt. In verband met de afvoer van stortgas onder de afdichtingslaag is het zeer aan te bevelen om in deze afval-laag goed doorlatend materiaal te verwerken. Als praktische maat voor een maximale dikte van de laatste stortlaag kan 2 meter worden aanbevolen. Meestal is ook reeds een afdeklaag (grond of inert afval) aanwezig op het stort, welke is aangebracht na het storten van de laatste laag afval om de

zettingssnelheid te bevorderen. Deze laag wordt hier beschouwd als de basislaag waarop de eindafdekking wordt aangebracht.

Op de basislaag moet een laag grond worden aangebracht om een egaal vlakke ondergrond te krijgen, waarop de afdichtingslaag kan worden aangelegd. Deze steunlaag moet zo dik zijn dat er geen scherpe voorwerpen doorheen kunnen dringen, die mogelijk de afdichtingslaag zouden kunnen beschadigen. Daarnaast fungeert de steunlaag als "werkvloer" waarop het afdichtingsmateriaal verdicht moet worden. Deze laag, ook wel funderingslaag of egalisatielaag genoemd, vormt in feite het klankbord tussen de relatief slappe en klinkgevoelige afvalberg en de te verdichten afdichtingslaag. Deze laag dient om die reden minstens een dikte van 0,3 m te hebben. Indien de ondergrond erg nat of slap blijkt te zijn, zal deze laag dikker moeten zijn.

Als de ondergrond slechts hier en daar te slap is, kan toepassing van een geotextiel uitkomst bieden. Dit materiaal wordt alzijdig vastgelegd door de bovenbelasting en verdeelt op deze manier de krachten dankzij de zeer geringe rek. De bovenbelasting wordt in dat geval nog maar ten dele naar de zwakke plek overgebracht en voor het grootste deel opgenomen door wrijvingskrachten aan de randen. De steunlaag heeft tevens een functie bij het afvoeren van stortgas, tenzij een ontgassingsstelsel is aangelegd in de laatste afval laag of de basislaag. De steunlaag moet goed gasdoorlatend zijn zodat het gas via deze laag kan worden afgevoerd naar de gasonttrekkingspunten (zie paragraaf 5.8).

De beide functies, klankbord voor verdichting van de afdichtingslaag en doorlaatmedium voor de afvoer van stortgas, leiden tot tegenstrijdige eisen. Voor het verkrijgen van een stevige legvloer zou een ruim gegradeerd mengsel gewenst zijn, terwijl voor het verkrijgen van een goed gasdoorlatende laag juist een nauwe gradering gewenst is. Er kan aan beide eisen worden voldaan als cunetzand wordt gebruikt, dat voldoet aan de "Eisen", Rijkswaterstaat 1978.

Als kunststoffolies worden toegepast, moet de steunlaag bij voorkeur geen cohesief materiaal bevatten. Daarmee wordt dan voorkomen dat de folie vuil wordt, wat bij het lassen problematisch kan zijn. Ook mag de steunlaag geen grove en scherpe voorwerpen bevatten. Deze zouden de folie kunnen beschadigen. Daarom wordt het in dat geval aanbevolen materiaal te gebruiken waarvan de diameter van de grootste korrels kleiner is dan 3 mm. Deze grootste diameter mag echter groter zijn als klei, leem of zand-bentinit voor de afdichting wordt gebruikt.

4.3 Afdichtingslaag

De eisen die aan de te gebruiken materialen worden gesteld, zijn reeds uitvoerig besproken in hoofdstuk 3. Ten aanzien van laagdikte en homogeniteit van het materiaal kunnen hier nog de volgende opmerkingen worden gemaakt. De afdichtingslaag moet minimaal 25 cm dik zijn als natuurlijk afdichtingsmateriaal wordt gebruikt. De dikte is vooral van belang in verband met het opvangen van vervormingen door zetting van het onder-

liggende afval. Klei, die in een groeve wordt afgegraven, heeft meestal een geringere zwelcapaciteit dan zand-bentoniet mengsels. Daarom is dit laatste mengsel beter geschikt om vervormingen op te vangen. Bij gebruik van klei moet om die reden dan ook een dikkere laag worden toegepast dan bij zand-bentoniet mengsels. Dit kan betekenen, dat deze laag niet in een keer kan worden aangebracht, maar in meerdere lagen, die dan elk tot de vastgestelde Proctor waarde worden verdicht met daartoe geeigende machines of werktuigen.

Bij gebruik van bentoniet als afdichtingsmateriaal is een goede menging van grond en bentoniet uiteraard van essentieel belang. De menging kan vooraf plaatsvinden in een dwangmenger, bijvoorbeeld in een betonmixer of een asfaltmenginstallatie (mixed in plant). Ook kunnen de componenten worden gemengd, nadat ze afzonderlijk zijn uitgereden. Om in zo'n geval een homogene menging te krijgen dient zeer zorgvuldig en soms veelvuldig te worden gewerkt. Met eventueel nog te ontwikkelen speciale werktuigen, kan mogelijk een zelfde homogeniteit worden bereikt als in een dwangmenger. De bentonietdosering is sterk afhankelijk van de korrelgrootteverdeling van het gebruikte zand en de bentonietsoort (Glas, 1985; Epa, 1984) en dient te worden vastgesteld aan de hand van laboratorium onderzoek (hoofdstuk 3). De minimum dosering moet minstens 5 % te zijn om ook bij onregelmatige zettingen nog verder te kunnen zwellen.

Verdichting van een zand-bentoniet laag tot een droog volumegewicht van 1800 kg.m^{-3} is goed te realiseren als wordt uitgegaan van zand met een ruime gradering. Het optimale vochtgehalte voor verdichting ligt bij zandgrond in de orde van 10-15 gew. % vocht. Naarmate de grond meer afslibbare delen bevat is het optimale vochtgehalte voor verdichting groter en is de maximaal te bereiken dichtheid geringer (zie ook Lundgren, 1981; Lutton, 1982). Er blijft meer zwelcapaciteit van de bentoniet over, naarmate de aanvankelijke dichtheid groter is. Dit is van belang voor het opvullen van eventuele scheuren in de laag, die kunnen ontstaan door onregelmatige zetting. Dit verschijnsel wordt het "zelf herstellend vermogen" genoemd.

4.4 Drainagelaag met drainagesysteem

4.4.1 Materiaaleisen en laagdikte

Zoals reeds in hoofdstuk 2 is vermeld moet de afdichtingslaag worden afgedekt met bij voorkeur humusarm zand om deze te beschermen tegen graafoctiviteiten van bodemdieren en knaagdieren, indringing van plantenwortels en tegen uitdroging. Indringing van plantenwortels wordt voorkomen als de drainagelaag een porositeit van minder dan 40 % (zand, met droog volumegewicht $> 1600 \text{ kg/m}^3$) heeft. De indringingsweerstand, gemeten met een penetrometer, is daarbij groter dan 3 Mpa (Mega Pascal) als een conus wordt gebruikt met een tophoek van 60° en een oppervlak van 1 cm^2 .

Daarnaast dient deze laag als drainagelaag voor het afvoeren van neerslagoverschot naar de drains. Te hoge grondwaterstanden moeten daarbij worden vermeden, vooral op de hellingen, waar dit afschuiving zou kunnen inluiden. De drainageweerstand dient derhalve gering te zijn. De drainage weerstand is per definitie de verhouding tussen de grondwaterstand midden tussen de drains ten opzicht van de draindiepte en de drainafvoer per oppervlakte- en tijdseenheid. De drainageweerstand is samengesteld uit een horizontale weerstand (stroming door de drainagelaag), een radiale weerstand (stroming naar de drain) en een intreeweerstand (instroming in de drains). De horizontale weerstand is geringer naarmate de drainagelaag een grotere doorlaatfactor bezit, dikker is en de afstand tussen de drainreeksen geringer is. De radiale weerstand wordt bepaald door de doorlaatfactor van de drainagelaag en de diameter van de drainbuis. De radiale weerstand is bij een buis met grote diameter kleiner dan bij een kleine diameter en groter bij een buis met voluminieuze omhulling dan bij een buis zonder omhulling.

Met het oog op de ontwateringsfunctie moet de drainagelaag dus ook een zekere dikte hebben, welke samenhangt met de doorlaatfactor van het materiaal, de af te voeren hoeveelheid water (maatgevende afvoer), de maximale hoogte van de grondwaterstand en de toegepaste drainafstand.

4.4.2 Gevaar voor afschuiving

Op hellingen bestaat in principe het gevaar dat de grondlagen kunnen afschuiven onder invloed van de zwaartekracht. De weerstand tegen afschuiven neemt af naarmate de grondlagen boven de afdichtingslaag natter zijn. Ook om deze reden is het dus belangrijk dat het neerslagoverschot zo snel mogelijk wordt afgevoerd. De eerder gedane aanbeveling om cohesieloos zand te gebruiken verhoogt overigens het risico van afschuiving. Grondmechanische berekeningen moeten worden uitgevoerd om vast te stellen of dat voor de taluds te verwachten is (zie Aanhangsel).

Het is raadzaam dergelijke specialistische berekeningen te laten uitvoeren door ervaren deskundigen. Dit is ook van belang als uit de voorgaande analyse blijkt, dat er geen stabiele toestand verwacht mag worden en er gezocht moet worden naar alternatieve oplossingen. Als praktische maat voor de taludhelling wordt maximaal een helling van 1:3 aanbevolen. Steilere hellingen leiden al snel tot problemen bij aanleg en onderhoud. Veel werktuigen kunnen niet tegen steilere hellingen oprijden.

4.4.3 Ontwateringscriterium

Bij het ontwerpen van een drainagesysteem dient men uit te gaan van de zogenaamde maatgevende afvoer. Zo'n afvoer komt slechts met een bepaalde (lage) frekwentie voor. Het drainage systeem wordt echter geacht ook dan voldoende te functioneren. Als echter die afvoer wordt gerealiseerd, vaak ook nog worden voldaan aan andere criteria. In veel gevallen wordt dan ook

nog geeist, dat de grondwaterspiegel een zekere stand niet mag overschrijden. De combinatie van een maatgevende afvoer en een maximale hoogte van de grondwaterspiegel, wordt het ontwerp- of ontwateringscriterium genoemd. De maximale hoogte van de grondwaterstand wordt door het bodemgebruik bepaald. Het criterium wordt zwaarder naarmate de schade bij overschrijding ervan toeneemt. Ook is vaak in het criterium een veiligheidsfactor verwerkt. Als een drainage niet volgens het ontwerp-criterium werkt, wil dit nog niet zeggen, dat het systeem dan ook niet deugt. Enkele veel gebruikte ontwateringscriteria zijn gegeven in tabel 10. Gezien de eindbestemming van afge- werkte stortplaatsen ligt het voor de hand om hier het ontwateringscriterium voor grasland aan te houden.

Tabel 10 Ontwateringscriteria.

Grondgebruik	Maatgevende afvoer (mm/dag)	Grondwaterstand (m - maaiveld)
grasland	7 (10)	0,30 (0,20)
bouwland	7 (10)	0,50 (0,30)
vollegrondstuinbouw	7 (10)	0,50 (0,30)
bloembollen op klei	7	0,50
bloembollen op zand	10	0,30
fruitteelt	7 (10)	0,70 (0,60)
bos	5-7	0,50 - 0,30
militair oefen terrein	7	0,70
sportvelden, kampeerterreinen, speel- en ligweiden	15	0,50
bouwterrein	10	0,50
woongebied (50% verhard)	5	0,70
industrie terreinen	7	0,50

(..) gebruikt door Rijksdienst IJsselmeer Polders.

Gelet echter op de noodzaak om percolatie van enige omvang te voorkomen, dient het ontwerp-criterium voor stortplaatsen anders te worden gedefinieerd: een drainafvoer van 10 mm/dag bij een opbolling van de grondwaterspiegel van 0,3 m midden tussen de drainbuizen. Er wordt daarbij verondersteld, dat wanneer er een drainreeks onvoldoende functioneert, de andere, naastgelegen reeksen de uitgevallen reeks vervangen.

4.4.4 Berekening van drainafstand

De drainafstand in hellende terreinen kan worden berekend met een door Ernst (1978) afgeleide formule:

$$L^2 = \frac{4Kh^2}{S} \left[\cos^2 a + \frac{K}{4S} \sin^2 a \right] \quad (24)$$

waarin:

L = drainafstand (m)

K = doorlaatfactor (m/dag)

h = maximale opbolling van de grondwaterspiegel tussen de drains, gemeten als hoogte boven de ondoorlatende laag (m)

S = ontwateringscriterium (m/dag)

a = hellingshoek (graden)

Uit deze formule blijkt dat de drainafstand afhankelijk is van het gekozen ontwateringscriterium met de daarbij behorende opbolling van de grondwaterspiegel en van de doorlatendheid van de drainagelaag en de bovenliggende teelaardelaag.

Onderstaande tabel kan worden gebruikt om bij een bekende doorlaatfactor van de drainlaag (K) en gegeven maatgevende afvoer (S) de drainafstand te bepalen bij uiteenlopende hellingen. De verhouding S/K wordt berekend en de bijbehorende verhouding L/h wordt afgelezen. Voor h kan men dan de dikte van de drainlaag (ca. 0,3 m) invullen en de drainafstand, (L), wordt dan gevonden. De drainafstand op een helling van 1:3 (tg a = 0,3) in een drainlaag met een doorlaatfactor van 10 m/d ($1,157 \cdot 10^{-4}$ m/s) en een maatgevende afvoer van 0,01 m/d ($1,157 \cdot 10^{-7}$ m/s) is: $S/K = 0,001$, tg a = 0,3, dus $L/h = 293$ of $L = 293 \cdot h = 293 \cdot 0,3 = 88$ m. Op het vlakke terreingedeelte (tg a = 0) is voor de zelfde situatie $L/h = 63$ en dus is de drainafstand daar 19 m (= $63 \cdot 0,3$).

Tabel 11 Verhouding drainafstand en opbolling midden tussen drains (L/h) bij verschillende verhouding tussen maatgevende afvoer (S) en doorlaatfactor (K) van de drainlaag (S/K) volgens formule van Ernst.

S/K (S=0,01 m/etm)	1	0,1	0,01	0,001	0,0001 *)
helling (tg a)	L/h (m/m)				
0,0	2	6	20	63	200
0,1	1	6	22	117	1014
0,2	1	6	27	205	1970
0,3	1	6	34	293	2879
0,4	1	6	41	376	3718
0,5	1	6	48	450	4475
0,6	1	7	54	517	5147
0,7	1	7	59	575	5736

Uit tabel 11 blijkt, dat grondsoorten met een beperkte doorlaatfactor niet geschikt zijn voor de constructie van de drainagelaag. De benodigde drainafstand zou dan te gering worden. Bovendien komen op zulke gronden vaak hoge grondwaterstanden voor, die zeker op taluds vermeden moeten worden.

4.4.5 Drainagestelsel

Op hellingen moeten de drains globaal evenwijdig worden gelegd aan de hoogtelijnen. De onderste 30 à 40 cm van de drainsleuf moet worden opgevuld met humusarm, matig grof zand (in principe hetzelfde zand als gebruikt voor de drainagelaag). De drains kunnen bestaan uit normale landbouwdrain (200 meter lang, diameter ca 65 mm) met een omhulling van polypropyleen, polystyreenkorrels of van geotextiel (Stuyt, 1989). In grofzandig materiaal kan desnoods de omhulling achterwege blijven.

Het drainagestelsel moet zodanig worden ontworpen dat, bij verstopping van een drain, de lager gelegen drain de afvoerfunctie kan overnemen. Hiermee is reeds rekening gehouden met de keuze van het drainage ontwerp criterium. Met name in de

beginfase, wanneer er nog geen begroeiing is, heeft de overdimensionering voordelen omdat de kans op situaties waarin taluds instabiel worden, aanmerkelijk wordt verkleind.

4.5 Afdekgrond

4.5.1 Materiaaleisen en laagdikte

Op de drainagelaag wordt een laag grond aangebracht ter dikte van minstens 0,8 m. De laagdikte hangt samen met de waterbehoefte en de worteldiepte van de vegetatie en de hoeveelheid beschikbaar vocht in de wortelzone. De eisen, die aan het te gebruiken materiaal moeten worden gesteld, hangen samen met de vochtvoorziening van de vegetatie (zie par. 4.5.2) en de risico's van erosie door oppervlakte-afvoer (par. 4.5.3). Ook de chemische kwaliteit van het materiaal is van belang met het oog op de kwaliteit van het drainwater en de waterdichtheid van de afdichtingslaag (par. 4.5.4).

De grond moet zo droog mogelijk worden verwerkt om sterke verdichting bij het aanbrengen van de laag te vermijden. Alleen als blijkt, dat de grond te sterk is verdicht, moet deze weer worden losgemaakt. Voor er gras wordt ingezaaid is een normale grondbewerking toereikend. Deze grondbewerking kan worden uitgevoerd met een ploeg, cultivator of triltandcultivator. Als direct na de bewerking gezaaid wordt, is het aan te bevelen om de losse grond tijdens de grondbewerking aan te rollen (cambridge rol o.i.d). Op hellingen moet deze bewerking evenwijdig aan de hoogtelijnen worden uitgevoerd. Daarmee wordt voorkomen dat er in de lengterichting van de helling erosiegeulen ontstaan door oppervlakkig afstromend water. Als de helling te steil is voor trekkers of bulldozers, kan de grondbewerking worden uitgevoerd met kleinere werktuigen (b.v. met een tuinbouwtrekker) of zelfs in handkracht.

4.5.2 Vochtleverend vermogen

Onder het vochtleverend vermogen van de grond wordt verstaan de hoeveelheid vocht die de plantewortels in een groeiseizoen van 150 dagen (1 april tot 1 september) maximaal aan de grond kunnen onttrekken. De hoeveelheid vocht, die door de vegetatie aan de grond wordt onttrokken, varieert met de klimatologische omstandigheden en neemt toe naarmate het verdampingsoverschot tijdens het groeiseizoen groter is. In een zogenaamd 10% droog jaar (gemiddeld 1 keer per 10 jaar) bedraagt de maximale verdamping ruim 200 mm meer dan de regenval in het groeiseizoen. De gegevens zijn ontleend aan het KNMI-station De Bilt en gelden voor een fictief gewas, dat bij benadering overeenkomt met gras. Het vochtleverend vermogen van de grond wordt bepaald door:

- de vocht karakteristiek van de grond;
 - de dikte van de bewortelingszone;
 - vochtlevering via capillair transport vanuit de ondergrond.
- Alleen de vochtlevering vanuit de afdeklaag boven de drainage-laag wordt hier in beschouwing genomen. Onttrekking uit de

afdichtingslaag (klei, zand-bentoniet) moet worden voorkomen, omdat dat deze laag zou doen krimpen, waardoor de doorlaatfactor drastisch zou toenemen.

De vocht karakteristiek van de grond (pF-curve) geeft het verband weer tussen drukhoogte en vochtgehalte voor een bepaalde grond. De pF-waarde is gelijk aan de logaritme van de negatieve drukhoogte (= zuigspanning, in cm H₂O). In fig. 23 is een voorbeeld van een pF-curve gegeven. De relatie tussen (omgerekende) drukhoogte en vochtgehalte kan, afhankelijk van een aantal factoren, sterk verschillen.

Bij zand en veenkoloniale gronden zijn met name het organische stofgehalte, het leemgehalte, de grofheid van het zand (M50-cijfer) en de dichtheid van de grond van belang. Bij de zee- en rivierkleigronden zijn vooral het organische stofgehalte, het lutumgehalte en de dichtheid van de grond belangrijke factoren. De hoeveelheid beschikbaar vocht wordt uit de pF-curve afgeleid door enkele karakteristieke vochtgehalten te definiëren. Zo is de veldcapaciteit gedefinieerd als het vochtgehalte dat achterblijft in de grond na het uitzakken van een overvloedige regenbui. Dit vochtgehalte komt ruwweg overeen met een pF-waarde van 2,0. Het bijbehorende vochtgehalte kan sterk verschillen voor verschillende grondsoorten. Duinzand kan bijvoorbeeld erg slecht water vasthouden. Na uitlekken bedraagt het vochtgehalte niet meer dan 9 vol.%. Zware klei daarentegen kan na uitlekken nog wel 50 vol.% vocht bevatten.

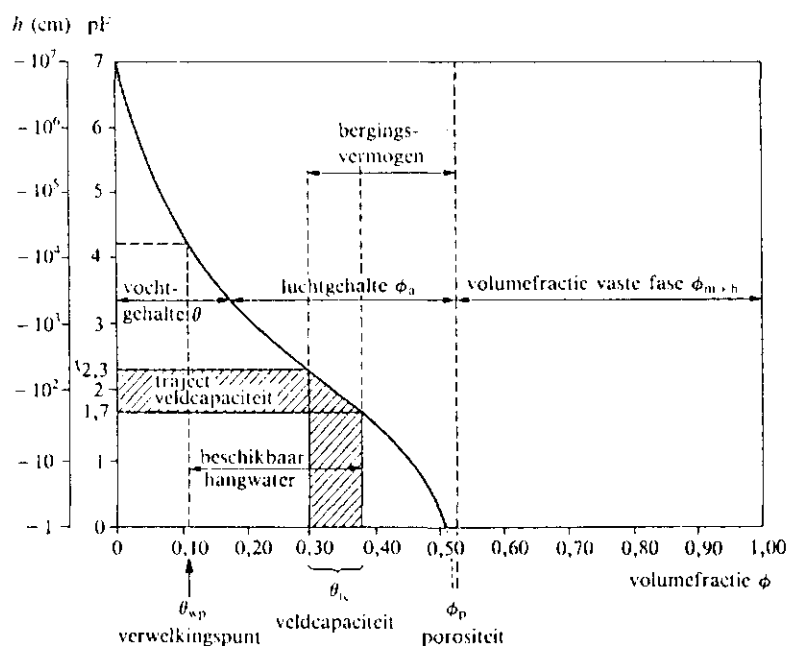


Fig. 23 Voorbeeld: pF-curve van zavelgrond.

Wanneer planten door verdamping water aan de grond onttrekken neemt de drukhoogte in het bodemvocht af. Bij een drukhoogte van ongeveer -16.000 cm (pF = 4,2) kunnen planten geen water meer aan de grond onttrekken en gaan ze verwelken. Het daarbij behorende vochtgehalte noemt men het permanent verwelkings-

punt. In droogteperioden in het groeiseizoen zullen de planten vocht aan de bodem onttrekken om de verdamping (afkoeling van de plant) op peil te houden. Indien echter de bodemvochtvoorraad of de toestroming naar de wortels ontoereikend is, ontstaat er het gevaar voor uitdroging en afsterving van de plant. Deze reageert hierop door de huidmondjes geheel of gedeeltelijk te sluiten, waardoor er minder of geen waterdamp naar de atmosfeer kan diffunderen. Duurt de periode van vochttekort echter te lang, dan kunnen de planten alsnog dood gaan. Dit laatste kan worden voorkomen door te zorgen dat de afdeklaag voldoende vocht kan leveren. Als richtlijn voor de noodzakelijke hoeveelheid beschikbaar vocht geldt dat deze in een 10% droog jaar, minstens ca 150 mm is voor gras en 200 mm voor dieper wortelende vegetatie. De hoeveelheid beschikbaar vocht, B, in een zekere laag wordt berekend als het verschil in vochtinhoud bij veldcapaciteit en verwelkingspunt:

$$B = \frac{FC-WP}{100} * d \quad (25)$$

waarin:

B = beschikbaar vocht (mm)

FC = vochtgehalte bij veldcapaciteit (vol.%)

WP = vochtgehalte bij verwelkingspunt (vol.%)

d = laagdikte (mm)

Uit de vele pF-curven, die in de loop der tijd zijn samengesteld, zijn zogenaamde standaard-vocht karakteristieken afgeleid. Deze bieden de mogelijkheid om snel en eenvoudig de beschikbare hoeveelheden vocht van de afdeklaag te schatten op basis van een aantal gegevens over samenstelling en oorsprong van de grond (tabel 12 en 13).

Tabel 12 Standaard vocht karakteristieken van 20 bodemhorizonten en de hoeveelheid beschikbaar water per laag van 1 meter (beschrijving grondsoorten in tabel 12).

Nr.	O.s (%)	Leem (%)	Lutum (%)	Dr.vol.gw. (kg/m ³)	Volume % water bij pF						Vocht leverend verm. (mm/1,0m)
					1,0	1,5	2,0	2,7	3,0	4,2	
1	0,5	6	-	1630	34	31	14	6	4	2	120
2	1,0	6	-	1550	36	32	14	7	6	3	110
3	2,1	6	-	1440	39	35	18	11	7	3	150
4	4,0	6	-	1330	41	38	22	14	11	4	180
5	6,0	6	-	1270	44	40	27	18	13	6	210
6	9,5	6	-	1160	48	45	35	25	19	10	250
7	27,5	6	-	750	63	61	53	37	31	18	350
8	85,0	-	-	175	87	82	75	62	47	21	540
9	0,4	13,5	-	1700	35	33	19	9	7	3	160
10	0,4	23,5	-	1700	34	32	23	11	9	4	190
11	0,5	40	-	1650	35	33	29	17	13	6	230
12	0,5	60	-	1650	36	34	32	23	18	9	230
13	0,3	6	-	1600	38	38	30	8	7	4	260
14	0,3	6	-	1650	31	23	10	6	5	2	80
15	1,0	-	10	1500	41	39	35	24	21	11	240
16	1,0	-	10	1400	44	42	39	27	23	11	280
17	1,0	-	10	1300	47	45	41	31	26	11	300
18	1,0	-	22	1400	45	43	40	32	30	19	210
19	1,0	-	30	1400	45	43	41	36	34	25	160
20	1,0	-	40	1400	46	44	43	40	38	31	120

Tabel 13 Omschrijving van de bodemhorizonten uit tabel 12.

Nr.	Organische-stofklasse textuurnaam	Horizont	Gronden
1	uiterst humusarm, matig fijn, leemarm zand	C	Hn, cHn
2	zeer humusarm, matig fijn, leemarm zand	B3	Hn, cHn
3	matig humusarm, matig fijn, leemarm zand	A12/Aan2	Hn, cHn, zEZ
4	matig humeus, matig fijn, leemarm zand	Ap/Aanp	Hn, cHn, zEZ
5	zeer humeus, matig fijn, leemarm zand	Ap/Aanp	Hn, cHn, zEZ
6	humusrijk, matig fijn, leemarm zand	Ap/Aanp	Hn, cHn, zEZ
7	zandig veen	A	veenkoloniale grond
8	veen	C/D/G	moerasbosveen
9	uiterst humusarm, matig tot zeer fijn, zwak lemig zand	C	Hn, cHn, pZn, pZg
10	uiterst humusarm, zeer fijn, zwak lemig zand	C	Hn, cHn, pZn, pZg
11	uiterst humusarm, zeer fijn, sterk lemig zand	C	Hn, pZn, pZg
12	uiterst humusarm, zandig leem	C	Hn, pZn, pZg
13	uiterst humusarm, uiterst fijn, leemarm zand	C/D/G	diverse
14	uiterst humusarm, matig grof, leemarm zand	C/D/G	diverse
15	zeer humusarme, lichte zavel	C	ondergr. zeeklei ZH
16	zeer humusarme, lichte zavel	C	ondergr. zeeklei ZH
17	zeer humusarme, lichte zavel	C	ondergr. zeeklei ZH
18	zeer humusarme, zware zavel	C	ondergr. zeeklei ZH
19	zeer humusarme, lichte klei	C	ondergr. zeeklei ZH
20	zeer humusarme, zware klei	C	ondergr. zeeklei ZH

Hn = veldpodzolgronden; cHn = laarpodzolgronden;
 zEZ = zwarte enkeerdgronden; pZ n= gooreerdgronden;
 pZg = beekeerdgronden; ZH = Zuid-Holland

Uit deze tabel blijkt dat bij zandgronden de hoeveelheid beschikbaar vocht toeneemt met oplopend organisch stofgehalte (nummers 1 tot 8) en afnemende korreldiameter (nummers 9-13). Bij kleigronden blijkt het lutumgehalte (nummers 15-20) een grote rol te spelen. De werkelijke hoeveelheid beschikbaar vocht is echter afhankelijk van de dikte van de wortelzone en de capillaire transportcapaciteit. Hoewel niet alle vegetatiesoorten even diep wortelen wordt bij de berekening van de totale hoeveelheid beschikbaar vocht in de afdeklaag uitgegaan van de maximaal toelaatbare bewortelingsdiepte, dat is de totale dikte van de bewortelingslaag tot aan de drainagelaag. Uit deze laag moet de vegetatie ook in een droog jaar voldoende vocht kunnen onttrekken. De bewortelingsdiepte wordt bepaald door meerdere factoren:

- de fysiologische eigenschappen van het gewas;
- de dichtheid van de bodemlagen (mechanische weerstand);
- de zuurgraad;
- de aeratie.

Bij een ondiep wortelend gewas als gras komt 70 tot 80 % van de totale wortelmassa voor in de laag van 0 tot 20 cm, ook bij een goed doorwortelbaar profiel (Hoogerkamp, 1976). Diep wortelende gewassen zoals granen, bieten en lucerne dringen met hun wortels veel dieper door (tot 80 à 90 cm). Boomwortels kunnen onder gunstige omstandigheden nog dieper doordringen in het bodemprofiel. In de meeste gevallen neemt de intensiteit van de beworteling af met de diepte. Bij een geringe wortelintensiteit wordt het beschikbare bodemvocht niet meer volledig benut. Men spreekt in dit verband van een effectieve bewortelingsdiepte, waaronder de bodemlaag wordt verstaan waarin 80 tot 90 % van de totale wortelmassa voorkomt (tabel 14).

Tabel 14 Dikte effectieve bewortelingsdiepte (cm) (Naar Werkgroep HELP, 1987).

Bodentype	gras	graan	mais	aard- appel	suiker- biet
Veengronden	20-30	25-30	25-30	20-25	25-30
Moerige gronden	20-25	25-35	25-35	20-30	25-35
veenkoloniale gronden					
- niet verbeterd	20	25	25	20	25
- verbeterd	30-35	30-50	30-50	30-40	30-50
Kleigronden	25-35	35-70	35-80	30-40	35-70
Zandgronden					
eerd- en vaaggronden					
- dun dek	20	25	25	25	25
- matig dik dek	30	40	40	30	40
- dik dek	50	60-80	60-80	50	40-80
- met kleidek	25	30	30	25	30
podzolgronden					
- dun dek	25	25-30	25-30	25	25-30
- matig dik dek	35	40	40	35	40
Brikgronden	40-50	60-80	60-80	40-60	60-80

Sterk verdichte gronden met een poriënvolume kleiner dan 40 vol.% (droog volumegewicht $>1.60 \text{ g/cm}^3$) zijn niet doorwortelbaar vanwege een te hoge indringingsweerstand. Voor een goede wortelgroei is bij humus- en slibarmzand een poriënvolume van ten minste 43 vol.% vereist (Hidding, 1963). Verdichting van de drainagelaag is dus aan te bevelen om indringing van wortels te voorkomen. De zuurgraad van de bodem kan zo laag worden dat wortelgroei niet meer mogelijk is. In het algemeen is dit pas het geval bij pH-waarden beneden pH 3,5. Dit geldt zowel voor akkerbouwgewassen als voor gras op klei-, zand- en veengronden (Wind, 1967).

Een goede aeratie is onontbeerlijk voor de wortelgroei. Aanvoer van zuurstof is nodig voor de wortelademhaling, terwijl het daarbij geproduceerde koolzuurgas moet worden afgevoerd naar de atmosfeer. Zuurstofgebrek treedt op als de zuurstofconcentratie in de bodemlucht daalt tot 5 à 10 vol. %, afhankelijk van vochtgehalte en bodemtemperatuur. Een slechte aeratie is meestal het gevolg van een te hoog vochtgehalte of een slechte structuur van de grond. In de afdeklaag op een afvalstort is het ook mogelijk dat het zuurstofgehalte te laag is als gevolg van ontwijkend stortgas. Dit wijst dan op lekkage van gas door de afdichtingslaag. Als afdekgrond komen in aanmerking humeuze tot humusrijke zandgronden, zavel- en kleigronden. Venige grond wordt ontraden, omdat onder condities als op een stortterrein, het veen snel kan worden afgebroken, en men na enige tijd de afdeklaag weer zal moeten aanvullen.

4.5.3 Infiltratiecapaciteit en erosiegevoeligheid

De infiltratiecapaciteit van de afdekgrond is een belangrijk gegeven in verband met de kans op oppervlakte-afvoer en erosie. Bij de afwerking van stortterreinen, waar het afval op het maaiveld is gestort, ontstaan onvermijdelijk tamelijk steile hellingen. Deze hellingen zullen uit het oogpunt van beschikbaar stortvolume zo steil mogelijk worden gehouden. Met het oog op de constructie van een waterdichte eindafdekking zijn er echter grenzen aan de steilheid van hellingen. Dit

betreft zowel veiligheidsaspecten en technische mogelijkheden bij de aanleg, als ook risico's van afschuiving en erosie. Ook de uiteindelijke bestemming van het stortterrein kan eisen stellen aan de toelaatbare steilheid van hellingen.

Erosie is het proces waarbij grond van de helling wordt afgespoeld door over het oppervlak stromend water. Dit gebeurt als de neerslagintensiteit groter is dan de indringingscapaciteit (infiltratie capaciteit) van de bodem. Deze laatste is gedefinieerd als de infiltratiesnelheid die wordt waargenomen als plasvorming juist begint. De infiltratiecapaciteit is onder meer afhankelijk van het poriënvolume, de poriëngrootteverdeling, de grondwaterstand en de mate waarin de grond gescheurd is. Gezien de in Nederland voorkomende neerslagintensiteiten tijdens regenbuien moet de infiltratiecapaciteit minimaal 18 mm/uur bedragen om de kans op oppervlakte-afvoer en erosie te minimaliseren. Op gronden met een geringe infiltratiecapaciteit kan begreppeling worden toegepast voor afvoer van oppervlakkig afstromend water. De greppels moeten zodanig worden aangelegd, dat als ze water afvoeren de stroomsnelheid niet zo groot wordt, dat daar erosie optreedt.

De infiltratiecapaciteit kan in de tijd sterk veranderen. Tijdens regenbuien kan de grond dichtslaan waardoor de infiltratiecapaciteit sterk afneemt. Door beworteling wordt een goede structuur in stand gehouden en blijft de infiltratiecapaciteit hoog of kan zelfs nog toenemen. Op begroeide oppervlakken treedt daardoor veel minder oppervlakte-afvoer op en de kans op erosie is dan gering. Om de kans op erosie zo klein mogelijk te houden moeten eisen worden gesteld aan de aard van de afdekgrond en de mate van begroeiing. De gevoeligheid voor erosie verschilt per grondsoort. Zo vertonen kleideeltjes een veel grotere onderlinge samenhang (cohesie) dan zandkorrels.

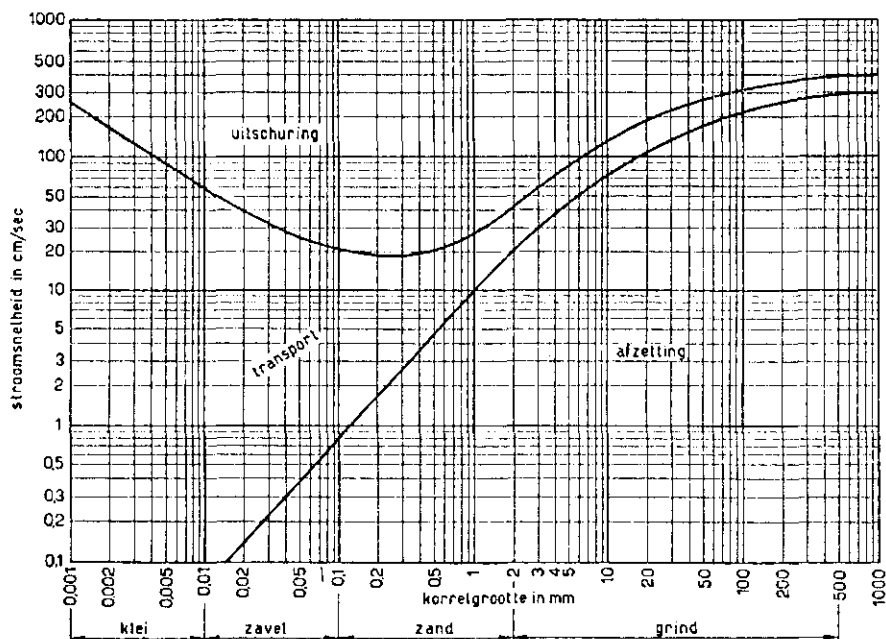


Fig. 1. 21 Diagram van Hjulström

Fig. 24 Diagram van Hjulström.

Een compacte kleibodem biedt daarom veel meer weerstand tegen erosie dan een zandbodem. De kritische stroomsnelheid, waarbij erosie gaat optreden, ligt voor klei in de buurt van 0,5 m/sec, terwijl deze voor zand rond 0,2 m/sec ligt (zie diagram van Hjulstrom, fig. 24).

De weerstand tegen erosie kan op natuurlijke of kunstmatige wijze worden verhoogd, bijvoorbeeld door toevoeging van organische stof (compost) aan de toplaag en door zo spoedig mogelijk na aanbrengen van de afdekgrond de taluds in te zaaien met een bodembedekkend gewas. Een dichte grasmat voorkomt erosie vrijwel geheel.

De kans op erosie kan dus worden bepaald door de te verwachten stroomsnelheden te berekenen als er oppervlakkige afstroming optreedt. Er wordt daarbij uitgegaan van een regelmatig hellend vlak waar het water in een dunne film overheen stroomt. De stroomsnelheid daarin kan worden beschreven met de vergelijking van Chezy:

$$v = C \cdot (R \cdot S)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

waarin:

v = gemiddelde snelheid (m/s)

C = coëfficiënt van de Chezy ($m^{1/2}/s$)

R = hydraulische straal, d.i. natte oppervlak/natte omtrek (m)

S = verhang energie lijn ($\sim \text{tg } a$, waarin a = hellingshoek)

De coëfficiënt van de Chezy is een maat voor de ruwheid van het oppervlak, die met behulp van de volgende formule berekend kan worden:

$$C = 18 \log \left(12 \frac{R}{k} \right) \quad (27)$$

waarin:

k = hoogte van de oneffenheid (m)

Tabel 15 geeft enkele waarden van de wandoneffenheid k. De grootte van C ligt volgens ruwe schattingen tussen de 25 en $100m^{1/2}/s$.

Hoe groter de wandoneffenheid, des te kleiner is de waarde voor C en des te kleiner ook de stroomsnelheid. Op het storttalud zal het gras meestal een zodanige lengte hebben, dat het steeds boven de waterlaag uitkomt. In dat geval is het aanvaardbaar de oneffenheid gelijk te stellen aan de dikte van de waterlaag (d). De hydraulische straal is eveneens gelijk aan d, omdat er sprake is van een zeer breed wateroppervlak t.o.v. de diepte. Uit vergelijking (27) volgt dan dat:

$$C = 18 \log 12 = 19,4 \frac{m^{\frac{1}{2}}}{s} \quad (28)$$

Tabel 15 Wandoneffenheid k.

Materiaal	k	Materiaal	k
Beton:		Hout	
- oud, slecht	1 - 2 cm	- oud	1 - 2 mm
- onafgewerkt	2 - 5 mm	- ongeschaafd	0,5 - 1 mm
- gepleisterd	0,5 mm	- geschaafd	0,2 - 0,5 mm
- zeer glad	0,2 mm	Grond	
- gecentrifugeerd	0,1 mm	- terrein met hindernissen	0,2 - 0,5 m
Staal		- waterlopen, begroeiing	0,1 - 0,2 m
- sterk geroest	1 - 2 mm	- zand in beweging	0,01 - 0,1 m
- geklonken	0,5 - 2 mm	- glad	
- verzonken kop	0,2 - 0,5 mm	Steen	
- gelast	0,1 mm	- grind	1 - 5 cm
- geasfalteerd	0,02 - 0,05 mm	- gezette steen	0,5 - 2 cm
Glas	0,02 - 0,05 mm	- slecht metselwerk	0,5 cm
		- breuksteen	0,2 - 0,5 cm
		- goed metselwerk	0,5 - 2 mm
		- draineerbuizen	0,2 - 0,5 mm

Invulling van de nu bekende waarden in vergelijking (26) geeft

$$v = 19,4 \cdot (d.S)^{\frac{1}{2}} \cdot d \quad (29)$$

Het debiet door een zekere doorsnede wordt berekend volgens:

$$Q = v \cdot A = 19,4 \cdot (d.S)^{\frac{1}{2}} \cdot d \quad (30)$$

waarin:

Q = debiet van 1 meter brede hellingstrook (m³/s)

A = natte doorsnede van de waterfilm op een 1 meter brede hellingstrook (m²)

Als deze doorsnede H m lager ligt dan het hoogste punt van de helling dan geldt ook:

$$Q = \frac{H \cdot N}{\text{tg } a} \quad (31)$$

waarin: H = hoogteverschil (m)

N = neerslagintensiteit (m/s)

Door combinatie van de vergelijkingen (29), (30) en (31) is de stroomsnelheid in de waterfilm af te leiden:

$$v = C^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \cdot H^{\frac{1}{3}} \quad (32)$$

Uit deze vergelijking blijkt dat de stroomsnelheid uitsluitend afhangt van het hoogteverschil (H) en de neerslagintensiteit

(in feite het verschil tussen neerslag en infiltratie snelheid). De infiltratiecapaciteit is een zeer dynamische grootheid, die in belangrijke mate wordt bepaald door de vochtinhoud en -verdeling in de bodem. Indien er onvoldoende kennis is van de te verwachten infiltratiecapaciteit, dan kunnen daarvan met behulp van simulaties schattingen worden gemaakt. Daartoe dient dan van het te gebruiken materiaal de pF-curven en het (hydraulisch) capillair geleidingsvermogen worden bepaald. Hiervoor kan de hulp van specialisten worden ingeroepen. Bij een gegeven toelaatbare stroomsnelheid en maatgevende neerslag(overschot) intensiteit, kan het maximaal toelaatbare hoogteverschil worden berekend. Enkele resultaten zijn in tabel 16 weergegeven.

Tabel 16 Maximale hoogtverschil tussen evenwijdige greppels bij gegeven kritische stroomsnelheid en maatgevende neerslagintensiteit-infiltratiesnelheid.

Kritische stroomsnelheid (m/s)	Neerslag - infiltratie (mm/uur)						
	1,0	2,5	10	20	40	80	120
0,20	75	30	7	4	2	1	<1
0,30	>100	100	25	13	6	3	2
0,40	-	-	61	31	15	7	5
0,50	-	-	120	60	30	15	10
0,60	-	-	-	103	52	25	17
0,70	-	-	-	-	100	41	27
0,80	-	-	-	-	-	61	40
0,90	-	-	-	-	-	87	58
1,00	-	-	-	-	-	-	80

Als blijkt, dat onder bepaalde omstandigheden het toelaatbaar hoogte verschil kleiner is dan de storthoogte, dan is aanleg van greppels nodig om oppervlakkig afstromend water op te vangen en af te voeren. Omgekeerd kan er bij een gegeven storthoogte en maatgevende neerslag-overschot, materiaal worden gekozen, dat pas erosie verschijnselen toont bij een hogere dan de vereiste kritische snelheid. In het algemeen zal er bij een begroeiing niet zo gauw erosie optreden. De kritische snelheid is dan 3 à 4 keer zo hoog als bij onbegroeide grond.

4.5.4 Uitspoeling van oplosbare stoffen

De chemische kwaliteit van de afdekgrond is om meerdere redenen van belang. In de eerste plaats moet het neerslagoverschot, dat boven de afdichtingslaag in de drains wordt opgevangen, van zodanige kwaliteit zijn, dat dit direct (zonder behandeling) geloosd kan worden op het oppervlaktewater. Dit betekent dat de kwaliteit moet voldoen aan de lozingseisen van het zuiveringsschap. Om deze reden zal men bij voorkeur schone afdekgrond moeten gebruiken. Wil men daarentegen toch grond gebruiken, die elders bij saneringen is vrijgekomen en die vervolgens is gereinigd, dan wordt aanbevolen om via een schudproef met water de concentraties aan verontreinigende stoffen in een 1 : 5 extract vast te stellen. In verband met de lozingseisen lijkt het gewenst een indruk te krijgen van de volgende parameters: pH, EGV (electrisch geleidingsvermogen), BOD, COD, Cl, NO₃, NH₄, olie, aromaten en eventueel andere

specifieke verontreinigingen die in de grond aanwezig kunnen zijn.

Een tweede aspect betreft de uitspoeling van kationen, omdat dit effect kan hebben op de waterdichtheid van de onderliggende afdichtingslaag. Ook al is deze laag praktisch waterdicht dan nog kan er op de lange duur uitwisseling van ionen plaatsvinden door diffusie. Voor het goed functioneren van de afdichtingslaag, dient het adsorptiecomplex bij voorkeur bezet te zijn met eenwaardige kationen (bijv. Na). Bij gebruik van kalkhoudende afdekgrond zal er op de lange duur uitwisseling van Na tegen Ca plaatsvinden. Het zwelvermogen van kleimineralen zal daardoor afnemen en wordt de doorlaatfactor groter. Bij een zand-bentoniet afdichting kan hiermee rekening door overdosering van bentoniet. Niettemin moet het gebruik van kalkhoudende afdekgrond ontraden.

4.6 Geschiktheidsbeoordeling

De eindafdekking op een afvalstort moet van onder naar boven bestaan uit de volgende lagen (zie ook fig. 3 in hoofdstuk 2):

- steunlaag;
- afdichtingslaag;
- drainagelaag met drainagesysteem;
- bewortelingslaag (afdekgrond).

In hoofdstuk 4 zijn per laag de eisen geformuleerd ten aanzien van te gebruiken materialen en de benodigde laagdikte. Deze eisen kunnen als volgt worden samengevat in richtlijnen:

a Steunlaag

- Materiaal : grond met ruime gradering, goed gasdoorlatend, geen scherpe delen, geringe cohesie (bijv. cunetzand)
- Verdichting : maximaal verdichten om een goede legvloer te krijgen
- Laagdikte : minimaal 0,30 m, eventueel dikker bij slappe ondergrond of geotextiel gebruiken

b Afdichtingslaag (zie ook hfd.st. 3.7)

- Materiaal : klei, zand-bentoniet of folie (zie hoofdstuk 3)
- Verdichting : maximaal volgens Proctor-curve, tot minimaal 1500 kg/m³, klei, en 1800 kg/m³, zand-bentoniet;
- Laagdikte : minimaal 0,25 m voor zand-bentoniet, minimaal 0,30 m voor klei. Berekenen volgens ontwerp-criteria en toeslagen voor uitvoeringsomstandigheden (tabel 18).

c Drainagelaag met drainagesysteem

- Materiaal : humusarm, kalk arm cohesieloos zand, grote doorlaatfactor (drainagezand);
- Verdichting : maximaal een poriënvolume van 40% (d.i. ca. 1600 kg/m³) om indringing van plantewortels te voorkomen
- Laagdikte : minimaal 0,25 m

Drains : normale landbouwdrains met omhulling;
Drainafstand: behorend bij ontwaterings criterium: 0,01 m/d
afvoer bij opbolling van < 0,3 m midden tussen
drains;
Helling : stabiliteits berekeningen uitvoeren en toe-
laatbare helling berekenen, meestal niet
steiler dan 1 : 3;

d Bewortelingslaag (afdekgrond)

Materiaal : humeus zand, zavel of lichte klei, vrij van
schadelijke stoffen, infiltratiecapaciteit >50
cm/dag;
Verdichting : geen verdichting, na aanbrengen grondbewerking
evenwijdig aan de hoogtelijnen en inzaaien met
gras;
Laagdikte : minimaal 0,8 m (gras) of 1,0 m (diepwortelende
gewassen, hoeveelheid beschikbaar vocht in de
laag minimaal 150 mm (gras) of 200 mm (dieper
wortelende gewassen)
Helling : erosie gevaar beperken door na zekere hoogte-
verval greppels aan te leggen en door beplan-
ting met of inzaai van permanente bodem-
bedekkers.

5.1 Inleiding

In het voorafgaande is het ontwerp van de afdeklaag steeds los gezien van plaatselijke omstandigheden en zijn daaruit voortvloeiende ontwerpparameters niet aan de orde gekomen. Bij de keuze voor een specifieke lokatie komen gelijktijdig een groot aantal gegevens naar voren, die van invloed zijn op de uiteindelijke dimensionering van het afvalstort. Dit kan zowel de vormgeving, de detaillering als het materiaalgebruik betreffen. Alleen al de grote hoeveelheid grond en zandtransport ten behoeve van de afdekking (voor een stort van ca. 10 ha zo'n $1,5 \text{ à } 2,5 \times 10^5 \text{ m}^3$) zal aanleiding kunnen zijn tot het aanbieden van lokaal aanwezig grond aan het laboratorium. Landschappelijke omstandigheden, gebruikerseisen, beschikbaar grondoppervlak, aanwezigheid van onderafdichting etc. zullen mede bepalend zijn voor vorm en type van de afdekking, de keuze van detailoplossingen, uitvoeringsmethodieken, overige uitvoeringsbepalingen en controle tijdens de uitvoering.

5.2 Randvoorwaarden opgelegd door de locale situatie

5.2.1 Type en vorm van het afvalstort

De te beschouwen afvalstorten zijn geheel of nagenoeg geheel boven maaiveld gelegen met een bovenafdekking van natuurlijke materialen. Op plaatsen waar de grondgesteldheid en grondwaterspiegel dit mogelijk maken kunnen afvalstorten gedeeltelijk beneden maaiveld liggen (zie fig. 25). Hierbij valt te denken aan lokaties waar teelaarde opzij gezet wordt voor de eindafdekking, zand gewonnen wordt voor andere doeleinden, of slappe grond verwijderd wordt om grote zettingen te vermijden.

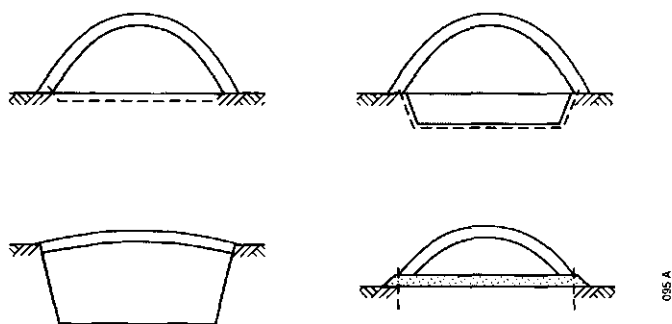


Fig. 25 Basismodellen van voorkomende stortterreinen.

Een verder onderscheid kan gemaakt worden door ook de onderafdichting in de beschouwing op te nemen.

- onderafdichting van natuurlijk materiaal
- onderafdichting van kunststoffolie

- geen onderafdichting, maar
- * ringdrainage
- * verticale schermen.

De verschillende typen zullen met name van invloed zijn op het ontwerp van de teenconstructie aan de voet van storthellingen.

De visuele aanwezigheid van een afvalstort wordt bepaald door de vorm en de inrichting tegen de achtergrond van het landschap. De gebruiksvormen en de technische kenmerken van de afdeklaag bepalen de inrichting (Hoofdstuk 7) resp. geven de mogelijkheden voor inrichting.

De vorm wordt bepaald door een aantal vormkenmerken (oppervlakte, hoogte, omtrek, model, hellingshoek etc.) die op hun beurt weer beïnvloed worden door eisen en wensen van inrichters en beheerders van afvalstortterreinen, resp. gebruiksvormen. Door een veelheid van vaak tegenstrijdige belangen zal de vorm van een stort in veel gevallen een compromis zijn, waarbij eisen en wensen van de stortende instantie, de landschapsarchitect, de toekomstige gebruiker(s) afgewogen moeten worden in samenhang met de financiële speelruimte en de technische-constructieve en juridisch-planologische mogelijkheden.

Uit economische overwegingen valt de voorkeur te geven aan het bergen van zoveel mogelijk afval op een zo gering mogelijk oppervlak. Dit leidt tot grote storthoogten en steile hellingen (functionele vormgeving). Beperkingen hieraan zijn hoofdzakelijk van landschappelijke- en constructieve aard (o.a. stabiliteit). Hellingen steiler dan 1 : 2 à 3 zijn uit landschappelijk, constructief en beheersmatig oogpunt minder gewenst. Hier staat tegenover dat een meer compacte stortvorm relatief weinig grondoppervlak heeft, waardoor het totale volume aan percolatiewater geringer is. Tijdens de stortfase zal er behoefte zijn aan een strakke vormgeving. Dit resulteert voor de vorm in strakke belijningen en vlakverdelingen voor hellingen, omtrekslijnen, hoogtelijnen, zijvlakken en bovenvlakken. In de afdekfase zal echter veelal nog gemodelleerd worden. Landschappelijke vormgevingsaspecten worden nader beschreven in par. 5.4.

Ten aanzien van de toepassing van bovenafdichtingen met natuurlijke materialen zijn uit constructief oogpunt hoofdzakelijk beperkingen voor de vormgeving te verwachten, die voortvloeien uit het gekozen systeem voor ontwatering. Indien afgeweken wordt van gelijkmatig verlopende hellingen, zal hiermee bij het ontwerp van een drainagesysteem rekening gehouden moeten worden. Verhogingen, hele en halve insluitingen e.d., behoeven speciale aandacht. Enige praktische beperkingen vloeien voort uit de mogelijkheden en eisen voor het realiseren van een bovenafdichting. Dit geldt met name de steilheid van taluds. Steile hellingen (1 : 2) vragen bij aanleg zowel van machines als mensen een grote inspanning. Dit is van invloed op de aanlegssnelheid en de kwaliteit van het werk. Verdichten van afval, steunlaag en afdichtingslaag is minder goed mogelijk bij hellingen steiler dan 1 : 3. Het gevaar voor erosie en afschuiven (instabiliteit), zowel tijdens de uitvoering als erna blijft aanwezig.

In de beheerfase geldt dat een goed onderhoud van de grasmat en technische voorzieningen bij hellingen steiler dan 1 : 2

grote problemen met zich meebrengt. Een talud steiler dan 1 : 2,5 kan eigenlijk al niet meer met de gangbare machines worden gemaaid.

5.2.2 Zetting van ondergrond en klink van afval

Onderscheiden kunnen worden: zettingen van de ondergrond, klink van het stortmateriaal en klink van de afdeklagen.

De zetting van de ondergrond is een gevolg van de aangebrachte bovenbelasting. Als in de ondergrond geen dikke, slecht doorlatende en samendrukbare klei- en veenpakketten voorkomen, zal een groot gedeelte van de zetting al opgetreden zijn tijdens de opbouw van het stort. In andere gevallen zal dit proces langer duren, omdat spanningswater in slecht doorlatende lagen maar langzaam weg kan vloeien. De maximaal te verwachten zettingen en zettingsverschillen kunnen worden bepaald door grondmechanisch onderzoek en berekeningen. In het algemeen zal bij een afvalstort dat reeds enige jaren op eindhoogte is, de restzetting gering zijn.

Bij inklinken van het gestorte materiaal zal een veelheid aan processen optreden, te onderscheiden in fysische, chemische en biologische processen. Als gevolg van de belastingen en tijdsafhankelijke processen zullen materialen vervormen en zal het stort als geheel een grotere dichtheid verkrijgen. Een belangrijk gedeelte van de verdichting wordt al bereikt tijdens de opbouw van het stort, de periode direct daarna en tijdens het aanbrengen van de bovenafdichting.

Als gevolg van chemische en biologische processen zullen materialen van hoedanigheid veranderen. Een aanvankelijke spanningsafdracht via relatief stijve delen kan door deze chemische reacties of uitloging weer verzwakt worden, waardoor nog niet eerder belaste delen onder druk komen te staan en vervormen, en er een grotere dichtheid van het afval ontstaat. Door methaangasonttrekking en uittredend percolaat verdwijnt (in relatief geringe hoeveelheden) materie en water.

De mate van klink van het afvalstort is afhankelijk van:

- de aard en samenstelling van het materiaal;
Bouw- en sloopafval, vliegias, slib en grond zijn weinig samendrukbaar. In het algemeen neemt de samendrukbaarheid van afval toe met het gehalte aan organische materialen.
- de wijze van storten;
Wanneer het afval is gestort in relatief dunne lagen onder sterke verdichting is de samendrukbaarheid nadien gering. Deze neemt toe bij toepassing van dikkere lagen en geringere verdichting.
- de voorbereiding van afval;
Verkleining van het afval vermindert in het algemeen de samendrukbaarheid sterk. Dit geldt zeker wanneer het afval voor het storten in blokken wordt geperst. Door deze voorbereiding ontstaat reeds bij het storten een hoge dichtheid.

De klink van het stort is een langdurig proces, dat met grote zakkingen gepaard gaat. Uit praktijkgegevens is bekend dat afhankelijk van het stortmateriaal en bij een matige verdich-

ting bij het aanbrengen, de klink 15 à 40% van de aanvanke-
lijke storthoogte kan bedragen over een periode van 30 jaar.

Verdichting komt naast de hiervoor genoemde processen tot stand door uittreden van lucht of water. Goed doorlatend materiaal, zoals puin of zand, zal gemakkelijker verdicht kunnen worden dan organisch afval of leem. Door middel van een statische voorbelasting (overhoogte) is het mogelijk tijdsafhankelijke fysische processen (wateruitpersing, kruip, etc.) te versnellen.

Voorbelasten is in de tijd gezien minder effectief, maar brengt minder kosten met zich mee. De klink van de opgebrachte afdeklaagen is sterk afhankelijk van de opgebrachte grondsoorten en de wijze van verdichten. Aangezien afdekgrond geschikt moet zijn voor doorworteling zal niet meer dan een matige verdichting mogen worden toegepast ("aandrukken") en zal daarna nog circa 10%-15% klink van de dikte van de afdeklaag mogelijk. De zettingen van de ondergrond en de klink zijn van invloed op de hoogte van het stort, de helling van de taluds en de hoogteligging ten opzichte van de omgeving van het stortterrein. De invloed van de klink op de taludhelling is weergegeven in tabel 17.

Tabel 17 Afname helling ten gevolge van afname hoogte van een stort.

Initiële helling (1 : n)	Helling na 10%	relatieve hoogte 20%	25%	afname 30%	35%	40%
2	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3
3	3,3	3,8	4	4,4	4,6	5,0
4	4,4	5,7	5,5	5,3	6,2	6,7
5	5,5	7,1	6,3	6,7	7,7	8,3
10	11,1	12,5	13,3	14,3	15,4	16,7
15	16,6	18,8	20	21,4	23,1	25,0
20	22,2	25,0	26,7	28,6	30,8	33,3

Voorts zijn ten aanzien van het functioneren van de afdichtingslaag met name klinkverschillen van belang. Indien door een onregelmatige stortopbouw klinkverschillen optreden kan dit leiden tot ontoelaatbare vervormingen. Kleine verschillen kunnen nog opgenomen worden door de bentoniet in de afdichtingslaag, die door middel van zwelling van de bentonietmineralen de onstane ruimten in het korrelskelet zal willen dichten. Eventueel kan extra bentoniet toegevoegd worden om het zwelvermogen te vergroten.

Als gevolg van zettingen en klink zal de afdichtingslaag in alle richtingen onderhevig zijn aan vervorming. Dit kan zowel leiden tot oppervlaktevergrotingen als tot oppervlakteverkleiningen. In het geval van een gelijkmatige hoogtedaling van het hele stort zal er sprake kunnen zijn van het verminderen van oppervlak van taluds. In het geval van een plaatselijke ongelijkmatige zetting kan er sprake zijn van een oppervlaktevergroting. Naarmate voor de afdichtingslaag een materiaal gekozen wordt dat een grotere plasticiteitsindex heeft (bijvoorbeeld zand-bentoniet) of een grote elasticiteit (bijvoorbeeld folie), kunnen vormveranderingen gemakkelijker opgenomen worden zonder dat dit de waterdichtheid in gevaar hoeft te brengen. Bij plaatselijk grote oppervlakteverkleiningen

bestaat bij folie de mogelijkheid dat door het plooiën plaatselijk scherpe vouwen kunnen ontstaan, die bij sommige folies enige porositeit kunnen veroorzaken.

Door de bovenafdichting pas aan te brengen nadat het grootste gedeelte van de klink in het afval opgetreden is, kunnen vervormingen van de afdichtingslaag beperkt blijven. Naast de verdichting en laagsgewijze opbouw zal het gewenst zijn het stort na het bereiken van de eindhoogte enige tijd afgedekt te laten liggen, dan wel klink te forceren (voorbelasting). De keuze van het gewenste moment voor afdichten is mede afhankelijk van de samenstelling van het stortmateriaal en de daarvan afhankelijke parameters.

Machinaal naverdichten van een bestaand stort zal maar een zeer beperkt resultaat hebben aangezien bij dergelijke storten alleen de bovenste 2 à 3 meter afval bereikt kan worden. De daaronder gelegen lagen afval zullen nauwelijks bereikt worden. Bij het (na het ontgraven van een aanwezige afdeklaag) profileren en verdichten van afval dient een (zware) compactor te worden ingezet. Dit is enerzijds om praktische redenen noodzakelijk vanwege het hoge vochtgehalte van het afval, anderzijds dient een klankbodem te worden verkregen voor de op te brengen afdichtingsconstructie en de daarbij toe te passen verdichtingswerkzaamheden.

5.2.3 Consequenties voor de afdichtende laag

Het vooronderzoek in het laboratorium wordt uitgevoerd op representatieve monsters die qua materiaal en verdichting vergelijkbaar zijn met de afdichtingslaag die in de praktijk wordt aangelegd. Hierin zijn niet begrepen lokale omstandigheden die van invloed kunnen zijn op het gedrag van de afdichtingslaag. Zo zal als gevolg van ongelijkmatige klink van de onderliggende lagen het zelfherstellend vermogen door zwelling van de bentoniet aangesproken worden. Naarmate de te verwachten ongelijkmatigheid groter is, zal meer reserve aanwezig moeten zijn. De mogelijkheden voor aanvullend verdichten zullen niet altijd optimaal zijn, bijv. in geval van steile taluds of het ontbreken van voldoende klankbord in de steunlaag. De wijze van uitvoering is eveneens van invloed op de dikte van de afdichtingslaag onder veldomstandigheden. In de praktijk is het niet mogelijk de steunlaag respectievelijk de afdichtingslaag volkomen vlak aan te leggen. Dit probleem zal zich in verhoogde mate voordoen indien op steile hellingen gewerkt moet worden, of bij ongelijkmatige verdichting van de steunlaag. Een ander aspect geldt de tijdsspanne die gelegen is tussen het gereedkomen van de afdichtingslaag en het aanbrengen van de grondlagen die hier bovenop liggen. Deze dient zo kort mogelijk te zijn waarbij de afdichtingslaag direct na aanbrengen verdicht dient te worden. Afwijkingen van deze aanpak beïnvloeden het vochtgehalte. Bevochtigen bij droge weersomstandigheden gaat uitdrogen enige mate tegen, doch daarbij zal een zeer glad, nauwelijks betreedbaar oppervlak ontstaan. Indien grotere intervallen verwacht worden, dienen compenserende maatregelen getroffen te worden. Indien een vooraf gekozen mengmethode onvoldoende zekerheid geeft over een in alle richtingen homogene menging van bentoniet met

zand, zal een extra laagdikte gedeeltelijk een oplossing kunnen bieden.

Bovenstaande factoren kunnen leiden tot het toekennen van toeslagen aan de in het laboratorium bepaalde dikte van de afdichtingslaag. Deze toeslagen richten zich op het overall bereiken van de vooraf vastgestelde maximaal toelaatbare doorlatendheid. Een nadere uitwerking hiervan is weergegeven in tabel 18. Door toetsen van de veldomstandigheden in elk concreet geval aan de tabel kan de toeslag worden bepaald.

Tabel 18 Toeslag in laagdikte (cm) en bentoniet (%) t.b.v. de afdichtingslaag (toeslagen cumuleren en optellen bij ontwerp grootheden).

Ouderdom afvalstort in jaren	2	5	10	15	25
A Toeslagen in cm:					
M.b.t. klink					
1 Samenstelling afval					
1.1 50% organisch/50% inert	4	3	2	1	0
1.2 80% organisch/20% inert	6	5	4	3	1
1.3 20% organisch/80% inert	2	1	1	0	0
2 Oorspronkelijke verdichting					
2.1 compactor	0	0	0	0	0
2.2 bulldozer	2	2	2	1	0
2.3 Wiellaadschop	4	3	2	1	0
3 Verdichting vóór afdichting					
3.1 compactor	0	0	0	0	0
3.2 bulldozer	2	2	2	2	2
M.b.t. verdichten afdichtingslaag					
4 Hellingen					
4.1 steiler dan 1:3	6	6	6	5	4
4.2 1:3 - 1:5	3	3	3	2	2
4.3 flauwer dan 1:5	0	0	0	0	0
5 Dikte steunlaag (klankbord)					
5.1 30 cm	3	2	1	0	0
5.2 40 cm	0	0	0	0	0
M.b.t. uitvoering					
6 Vlakheid steunlaag + + afdichtingslaag	3	2	2	2	2
7 mengmethode	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.
8 niet direct afdekken	2	2	2	2	2
B Toeslagen in % bentoniet					
1 Werken op hellingen	1	1	1	1	1
2 Niet direct afdekken	1	1	1	1	1
3 Mengmethode	p.m	p.m	p.m	p.m	p.m

Naast het vergroten van de laagdikte van de afdichtingslaag, is het ook mogelijk voor bepaalde veldomstandigheden het bentonietgehalte te verhogen. Hierbij spelen met name de zettings- en klinkgevoeligheid en de verdichtingsmogelijkheden een rol. Op plaatsen waar mogelijk ongelijkmatige klink te verwachten is, wordt het zelfherstellend vermogen van de zand-bentonietlaag aangesproken. De hierdoor mogelijke afname van de dichtheid van de zand-bentonietlaag moet in die gevallen gecompenseerd worden door het toevoegen van extra zwelvermogen door middel van verhogen van het bentonietgehalte. Ook in situaties waarin de zand-bentonietlaag minder goed verdicht kan worden, bijv. door het werken op een helling of het ontbreken van voldoende klankbord in de steunlaag, kan extra bentoniet toegevoegd worden, eventueel samen met een

toeslag op de laagdikte. Het effect van toevoegen van extra bentoniet op de doorlaatfactor neemt boven 5% snel af.

Als de keuze van de mengmethode aanleiding is te verwachten dat onvoldoende homogeniteit bereikt kan worden, zal verhoging van het bentonietgehalte naast een grotere laagdikte eveneens overwogen moeten worden. Dit geldt tevens indien de afdekgrond een hoog kalkgehalte heeft. Het in hoofdstuk 3 genoemde bentonietgehalte van 5% moet als ondergrens worden beschouwd.

Bij het toepassen van een laag klei als afdichtingslaag zal in principe alleen compensatie door vergroten van de dikte van de laag kunnen plaatsvinden. Gezien de natuurlijke samenhang in een homogeen aangetroffen kleipakket zal de noodzaak tot compenseren geringer zijn dan bij een zandbentonietmengsel. Vooralsnog kan als uitgangspunt worden genomen dat waar tabel 17 voor een bepaald geval tot een forse toename van een zandbentonietlaag zou leiden (meer dan 50%), de dikte toeslag voor een kleilaag ca. 10% zou moeten bedragen.

Een zandbentoniet- en een kleilaag zullen zich bij aanbrengen vrijwel identiek gedragen ten opzichte van invloeden als verdichten, weersomstandigheden, e.d. Daarom zal in het navolgende een kleilaag alleen dan in het bijzonder worden genoemd wanneer vanuit constructief oogpunt een duidelijk afwijkende oplossing noodzakelijk is.

5.3 Speciale constructies

5.3.1 Teenconstructies aan de voet van de helling

De aanzet van het talud op het maaiveld is in meerdere opzichten een knooppunt. Afdichtingslagen, maaiveld, drainage-systemen (vuil en schoon), rioleringsystemen, nutsleidingen etc. komen hier samen, sluiten onderling aan, of vinden hun afvoer naar de omgeving.

Van essentieel belang bij bovendichting is de scheiding van schoon drainwater en vuil percolatiewater uit het stort. Vooral op stortplaatsen met een wat grotere storthoogte kan zijdelings percolatiewater uittreden. Ook na volledige afdichting aan de bovenzijde kan dit uittreden van percolatiewater nog lange tijd doorgaan gezien de soms hoge waterspiegels in het stort. Op stortplaatsen zonder basisafdichting zal het percolatiewater volledig moeten worden opgevangen in een ringsloot of ondergronds riool rond het stortterrein. Een probleem bij de aanleg van deze "teenconstructie" is dat de werkomstandigheden vaak verre van ideaal zijn als gevolg van het uittredende percolatiewater. Het maken van waterdichte verbindingen wordt daardoor bemoeilijkt. Bij het VAM-bedrijf in Wijster is reeds de nodige ervaring opgedaan met dergelijke "teenconstructies". Hierbij geldt tevens dat het resultaat beter is en het systeem gemakkelijker is te onderhouden naarmate de constructie eenvoudiger van opzet is.

Primaire functies van de teenconstructie

- 1 gescheiden opvang en afvoer van schoon water en percolaat;
- 2 voorkomen van waterspanningen onder de afdichting en het uittreden van percolaat;
- 3 steunen van de afdichtingslagen.

De werking van deze hoofdfuncties moet controleerbaar en beheersbaar zijn. Het vrij uittreden van percolaat moet vermeden worden, omdat de waterdoorlatendheid van zand-bentonietmengsels toeneemt in contact met verontreinigd percolaat (Hoeks et al., 1987).

Secundaire functies van de teenconstructie

- standplaats voor vegetatie
 - gecontroleerd doorvoeren van percolaat-afvoersystemen.
- Ten behoeve van de afvoer van percolatiewater is het noodzakelijk een aantal doorvoeren door de afdichtende constructie te maken. Ten behoeve van controleerbaarheid en onderhoudswerkzaamheden zijn eveneens doorvoeren noodzakelijk. Een algemene regel zal zijn het aantal doorvoeringen door de afdichtingslaag tot een minimum te beperken aangezien hier in principe een kans op lekkage ontstaat. Bij het ontwerpen van teenconstructies zijn in principe een drietal situaties te onderscheiden:

- 1 bestaande afvalstorten zonder onderafdichting;
- 2 bestaande afvalstorten met onderafdichting en (te) steil opgezette taluds;
- 3 overige afvalstorten met onderafdichting.

Ten aanzien van de onderafdichting is een nader onderscheid mogelijk naar onderafdichtingen van natuurlijke materialen of folie.

Ad. 1

Het ontbreken van een onderafdichting sluit de mogelijkheid tot het koppelen van de boven- met de onderafdichting uit. Bij deze groep gaat het er vooral om te voorkomen dat regenwater infiltreert in het afvalstort en horizontaal verplaatsend percolaat op te vangen.

Ad. 2

In principe zal getracht moeten worden de bovenafdichting aan te sluiten op de onderafdichting. Als het stort te steil is opgezet en geen rekening is gehouden met de aan te sluiten bovenafdichting, zal het bloot leggen van de onderafdichting gepaard kunnen gaan met instabiliteit van de taluds. Dit betekent dat hiervoor extra voorzieningen getroffen moeten worden. Gezien het risico van instabiliteit op langere termijn zal dit vaak betekenen dat eerst een herprofilering van het afvalstort zal moeten plaatsvinden.

Ad. 3

Deze groep bevat de bestaande afvalstorten waarvan de onderafdichting vrij gemaakt kan worden en de nieuwe afvalstorten, waarbij aan aanvang aan rekening is gehouden met het in een later stadium aansluiten van boven- en onderafdichting. Indien verticale schermen langs de teen in de bodem zijn geplaatst zal bij elke teenconstructie hierbij aansluiting moeten worden gezocht.

Bij het opbouwen van een afvalstort zal steeds gezorgd worden voor zijdelingse steun voor de op te zetten taluds. Dit kan meestal plaatsvinden doordat in eniger mate ontgroning is toegepast voor de eerste stortlaag of door het opzetten van een benn of kade. Deze grondmassa maakt deel uit van de teenconstructie en mag in principe niet vergraven worden. De eventueel aanwezige onderafdichting en drainlaag met drains zal meestal tegen de kades opgezet zijn of worden.

Bij het opbouwen van de afdichtingsconstructie komen een aantal verschillende lagen en afvoersystemen samen bij de teen. Hierbij gelden de volgende uitgangspunten:

- de bovenste teelaardelaag moet vloeiend aangesloten worden op het maaiveld of de kade;
- de drainlaag boven de afdichting mag stoppen als het talud beïndigd is;
- de bovenafdichting moet aansluiten op een aanwezige onderafdichting. Dit geldt met name ter voorkoming van zijdelings uittredend percolaat of gas, of het aanzuigen van valse lucht bij geforceerde ontgassing; het regenwater uit de schoonwater-drains moet afgevoerd worden naar het oppervlaktewater;
- een ontwateringssysteem onder de bovenafdichting en aanwezige drains boven een onderafdichting dienen aangesloten te zijn op een percolaatafvoersysteem.

De afvoersystemen voor schoon water, percolaat en controle-drainage onder de bodemafdichting mogen uiteraard onderling niet gekoppeld worden. Indien schoon water loost op de afvoer van percolaat, zal de aan de zuiveringsinstallatie aan te bieden hoeveelheid verontreinigd water aanzienlijk toenemen.

Indien de controledrainage loost op de afvoer van percolaat, wordt controle onmogelijk en bestaat de kans dat percolaat via de controledrains naar de ondergrond en het grondwater wegstroomt.

In de figuren 26 a t/m g zijn een aantal principe-oplossingen voor teenconstructies nader uitgewerkt.

5.3.2 Constructies in verband met ontgassing

In praktisch elk afvalstort wordt gas gevormd en ook na aanbrenge van een bovenafdichting zal de produktie van stortgas doorgaan. Het stortgas, in hoofdzaak geproduceerd tengevolge van microbiologische omzetting van het organisch deel van het gestorte materiaal, dient op gecontroleerde wijze te worden afgevoerd om een gasdruk onder de afdichting te voorkomen. De gasdruk zal een negatief effect op de afdichting kunnen hebben en mogelijk plaatselijk doorlekken veroorzaken, waardoor het stortgas ongecontroleerd kan vrijkomen. Ook terplaatse van de teen zal gas ontsnappen, waardoor overlast en problemen met beplanting kunnen ontstaan.

De gasdruk kan oplopen als het gas niet wordt onttrokken. Onder de afdichtingslaag moet daarom een onttrekkingssysteem worden aangelegd, bestaande uit een goed doorlatende laag met bij voorkeur puin- of grindbanen of een gasdrainagesysteem.

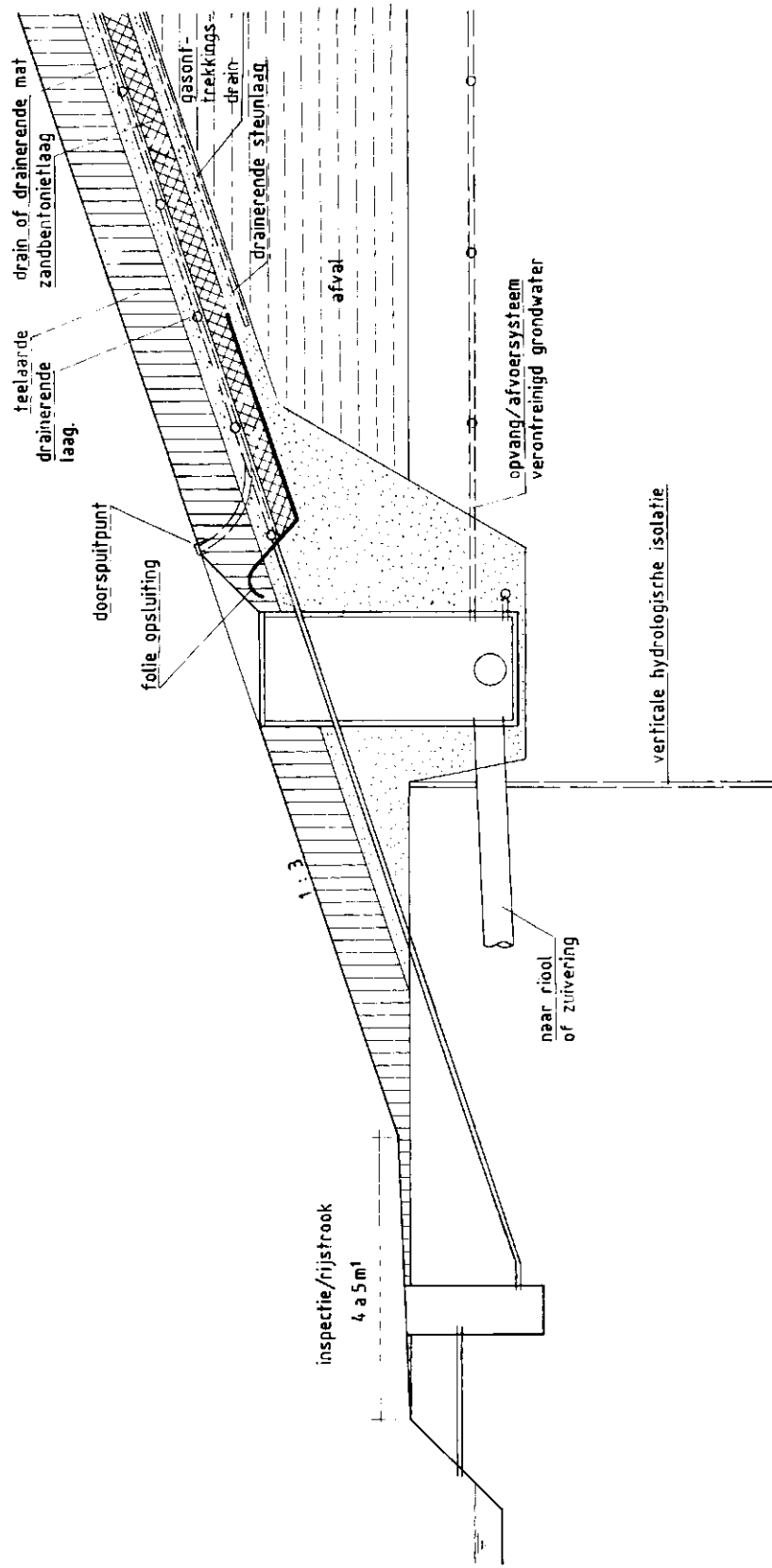


Fig. 26a Voorbeeld van een teenconstructie met bovenafdichting bij een bestaand afvalstort zonder onderafdichting.

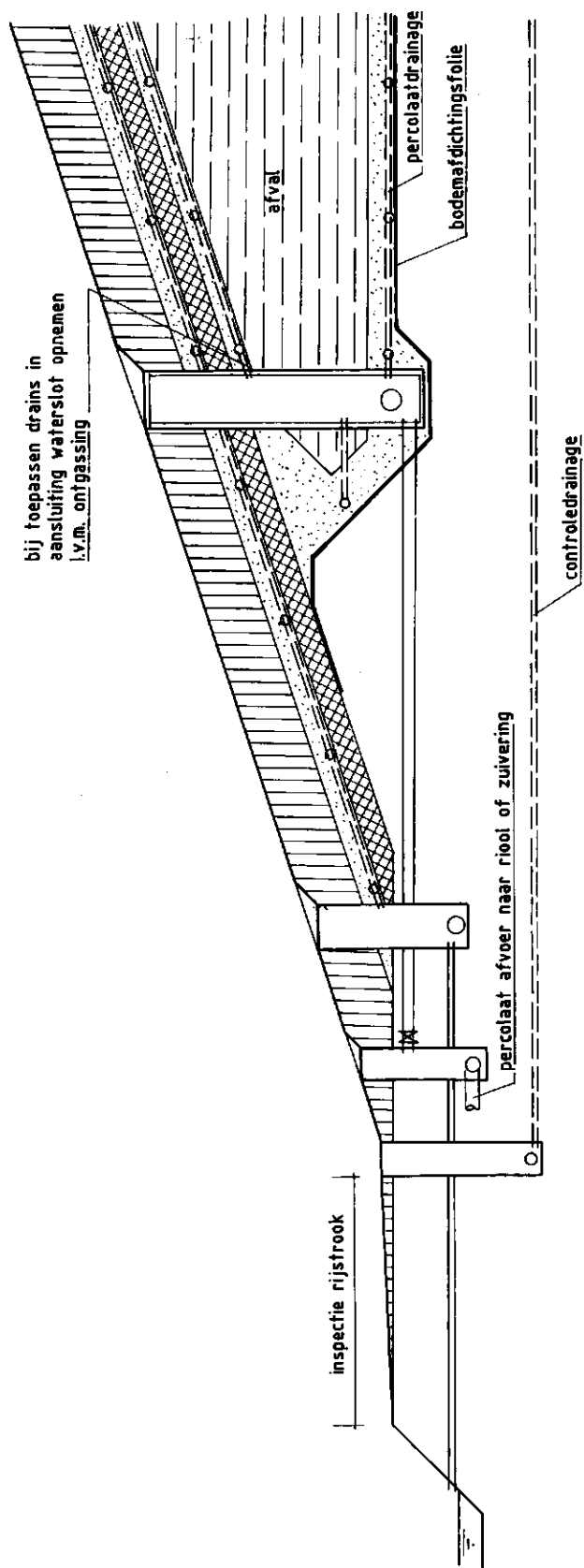


Fig. 26b Voorbeeld voor een teenconstructie met bovenafdichting bij een bestaand afvalstort met een onderafdichting van folie.

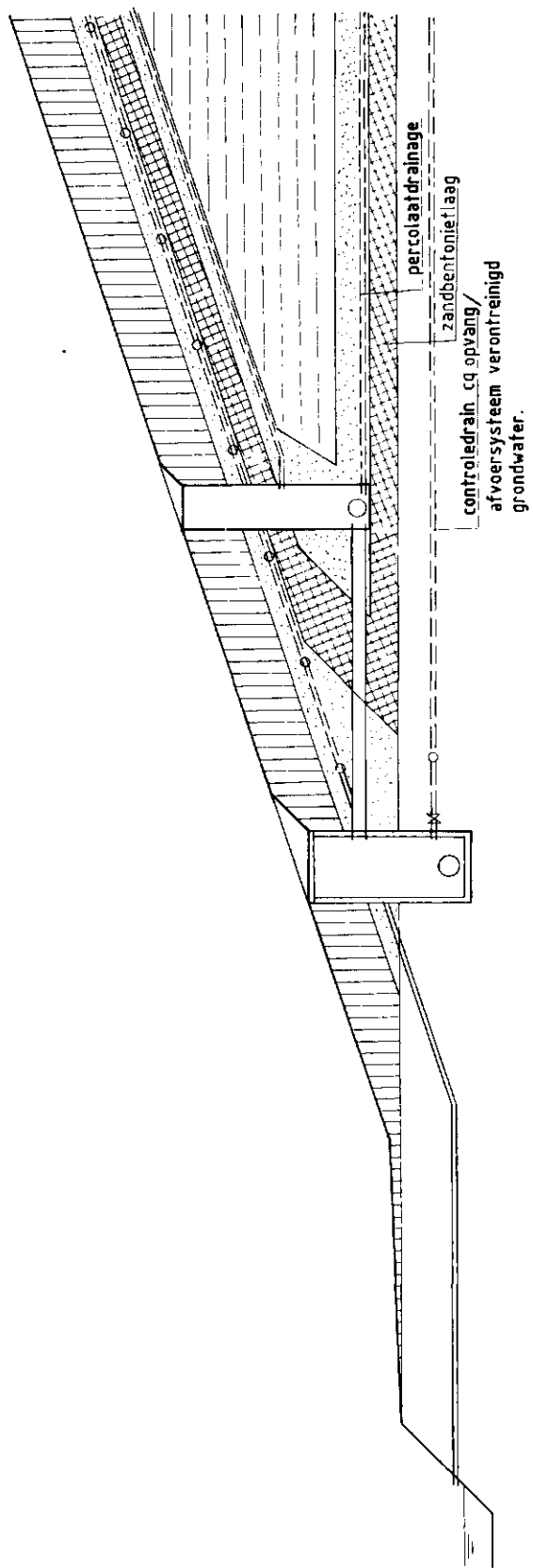


Fig. 26c Voorbeeld voor een teenconstructie met bovenafdichting bij een bestaand afvalstort met een onderafdichting van zandbentoniet.

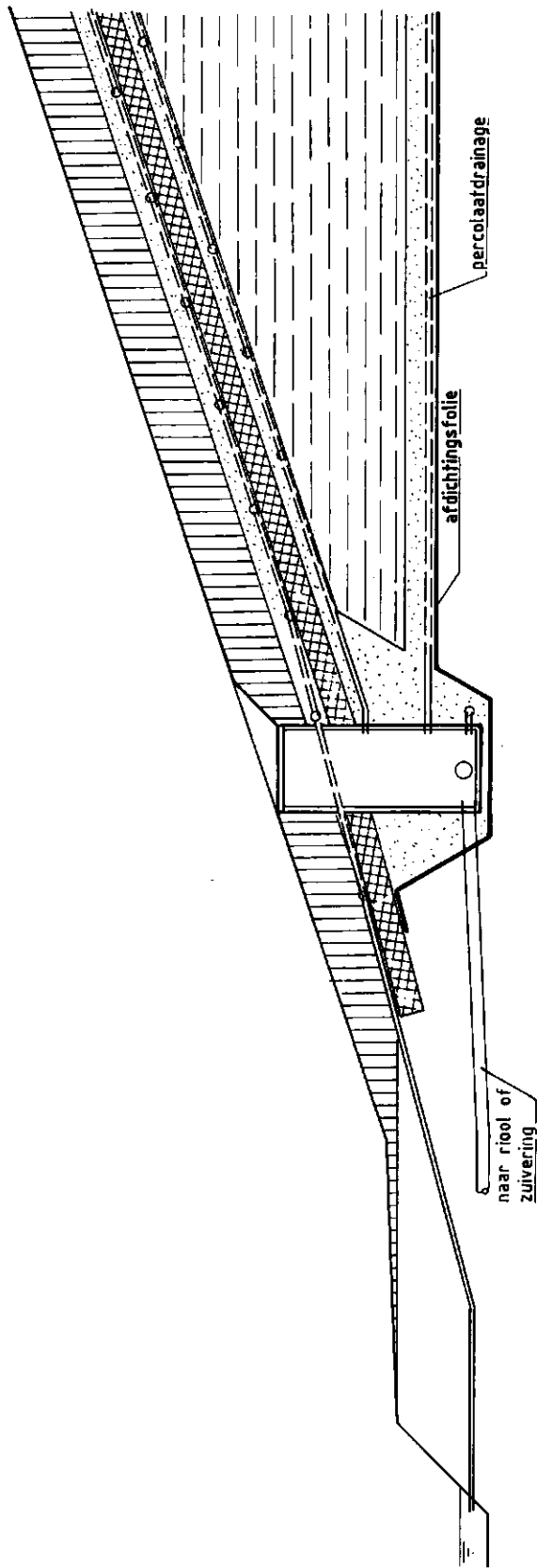


Fig. 26d Voorbeeld voor een teenconstructie met bovenafdichting bij een afvalstort met onderafdichting van folie.

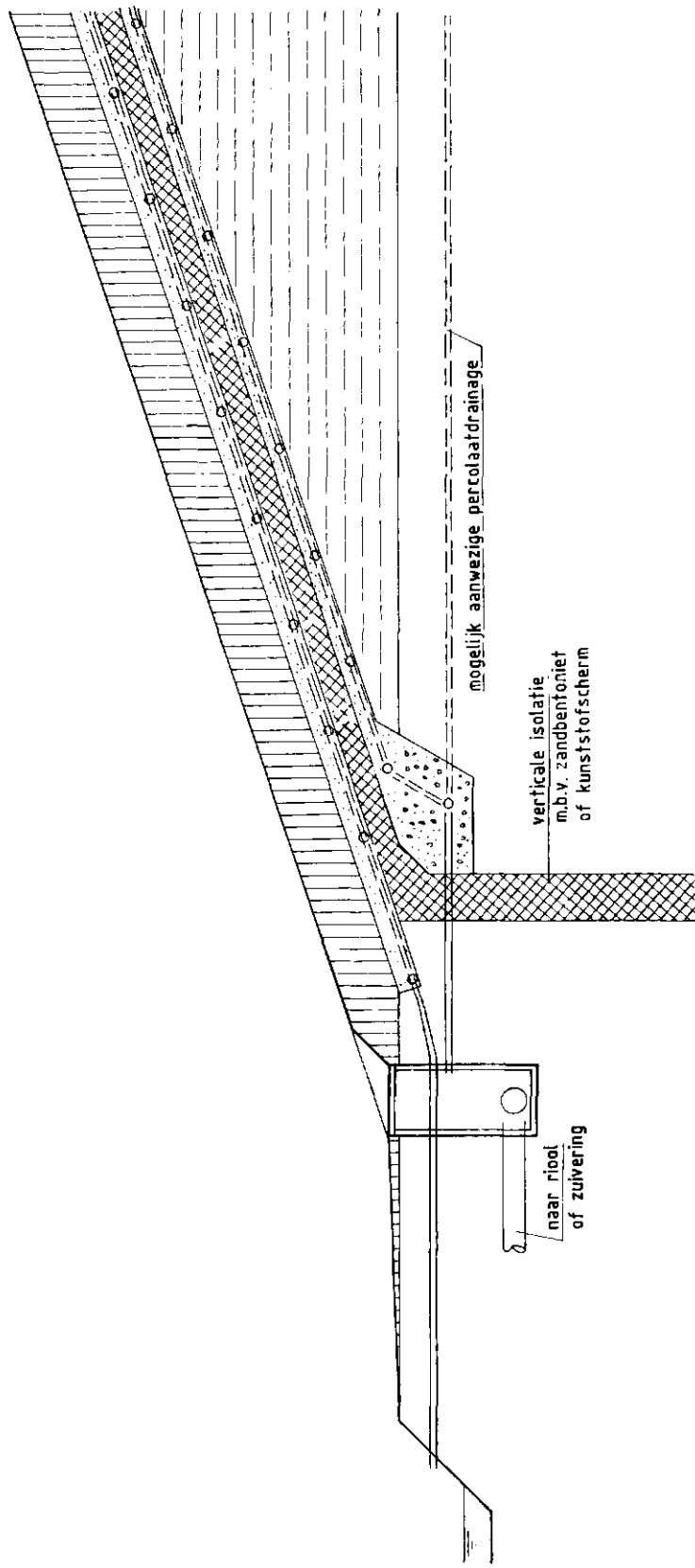


Fig. 26e Voorbeeld voor een teenconstructie met bovenafdichting bij een afvalstort zonder onderafdichting, maar met een verticaal bentoniet-scher姆.

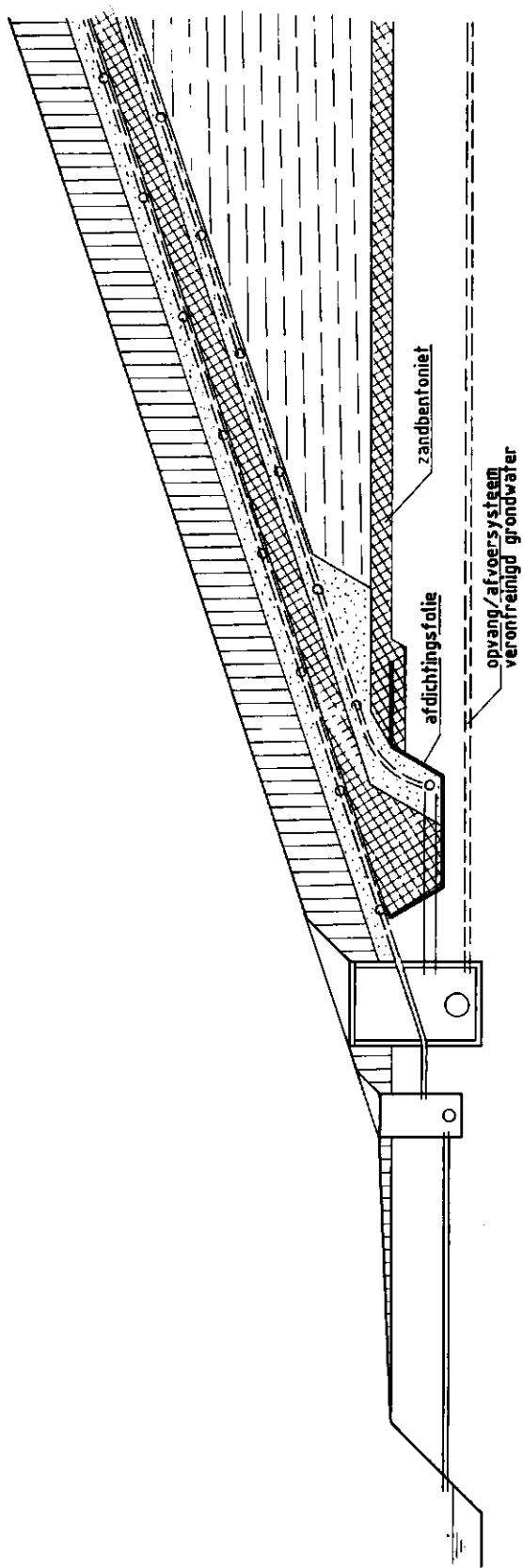


Fig. 26f Variant op figuur 26a.

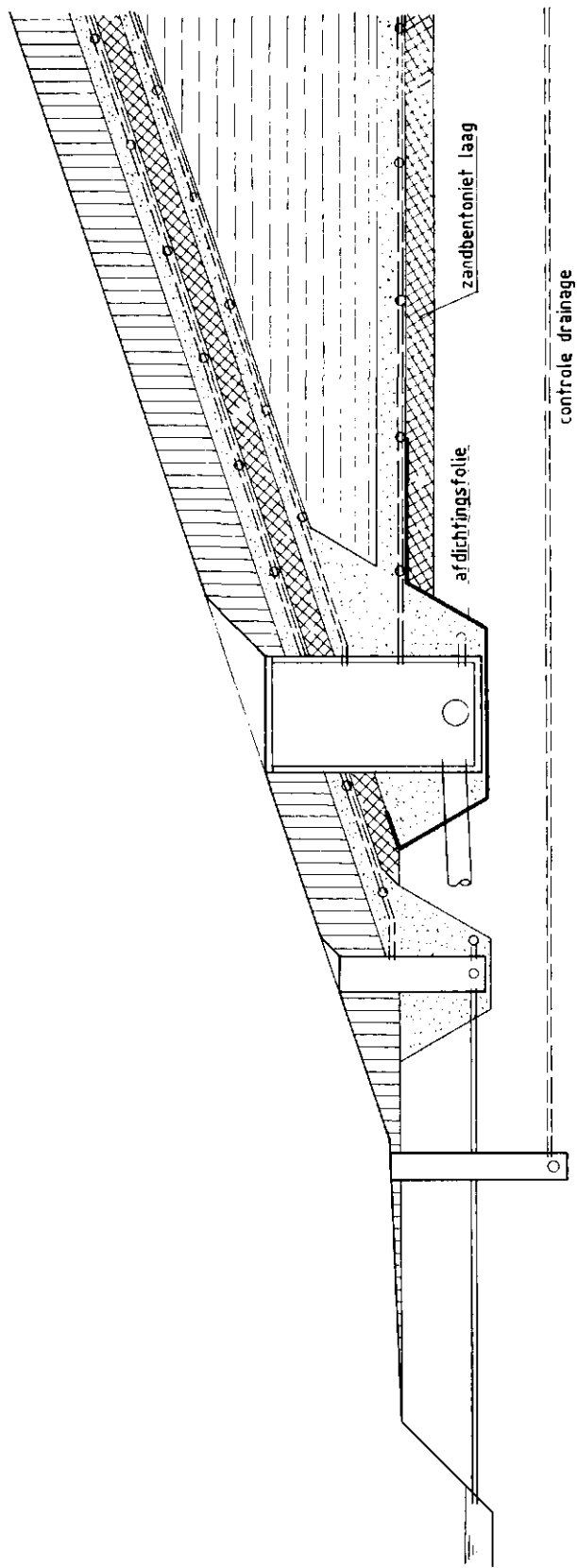


Fig. 26g Variant op figuur 26b en 26c.

De drains worden schuin op de helling gelegd, zodat ook eventueel zijdelings uittredend percolaat kan worden opgevangen. Vooral op grotere stortplaatsen kunnen deze ontgassingsdrains worden aangesloten op het aanwezige afzuig-systeem van in het afvallichaam geplaatste gasfilters en kan het gewonnen gas worden gebruikt voor verwarming van gebouwen, voor aandrijving van motoren en opwekking van electriciteit (zie ook Hoeks en Oosthoek, 1981).

Indien in een bestaand stortterrein geen onttrekkingsinstallatie aanwezig is en aannemelijk of aantoonbaar is dat de gasproductie nog jaren zal voortgaan, zal vóór het afdichten alsnog een onttrekkingsstelsel moeten worden aangebracht. Daarbij kunnen de onttrekkingsfilters zodanig geplaatst te worden dat het intrekgebied van de buitenste filters gedeeltelijk het buitentalud raakt. Op die wijze zullen de talud-drains eveneens worden aangezogen, waardoor koppelen met het afzuigstelsel niet nodig is.

Indien de aard van de talud- en teenconstructie tot gevolg heeft dat teveel buitenlucht zal worden aangezogen, dient de taludontgassing niet geforceerd te worden. In die gevallen dient overwogen te worden op de gasdrains onder de hellingen een geringere mate van afzuigen toe te passen dan op de verticale gasbronnen. Anderzijds kan overwogen worden de drains niet lager dan ca. 5 m boven maaiveld aan te brengen en te voorzien van een eindkap. Indien een functie voor uittredend percolaat een rol speelt, kan de laatste 5 m met dichte buis worden uitgevoerd en met een waterslot worden aangesloten op een ringdrain of schacht binnen de dichte laag in de teenconstructie.

Het afzuigstelsel is opgebouwd uit putten, leidingen, afzuiger en affakkelininstallatie. De putten worden verticaal in het afval aangebracht. De onderzijde van de putten bevindt zich enige meters boven de onderkant van het afval. Het principe van de put is in fig. 27 aangegeven. Een put kan opgebouwd worden uit een met grof, open materiaal gevulde schacht met diameter 0,30-0,60 m, een geperforeerde zuigbuis diameter 80-150 mm tot 2,50 m beneden de afdichting, een dichte zuigbuis met drukregelaar en afvoer naar het leidingennet boven de afdichting, en een afsluitbare beschermkap.

Iedere put wordt door middel van een afvoerleiding aangesloten op de hoofdleiding. Een afzuiger aan het eind van de hoofdleiding zorgt voor de nodige onderdruk in het onttrekkingsstelsel, en drijft het stortgas naar de fakkelininstallatie of behandelingsinrichting. Het aanbrengen van gasonttrekkingsvoorzieningen zal veelal door of in samenwerking met het regionaal gasdistributiebedrijf worden uitgevoerd. Indien nog slechts geringe gasproductie in een afvalstort wordt verwacht kan wellicht worden volstaan met ontgassingsdrains in taluds en kruin (onder de afdichtende laag), met als afvoervoorziening plaatselijk een verticale buis door de afdichting. Hierbij zal langs de opening van de buizen strijkende wind voor enige "onderdruk" in het drain-systeem kunnen zorgen. In deze gevallen dient evenwel overwogen te worden toch enige eenvoudige gasfilters in het afvallichaam aan te brengen voordat de afdichting wordt aangebracht. Wanneer de gasproductie groter zou zijn dan verwacht, kan zonder grote ingrepen enige tijd in een geforceerde onttrekking worden voorzien.

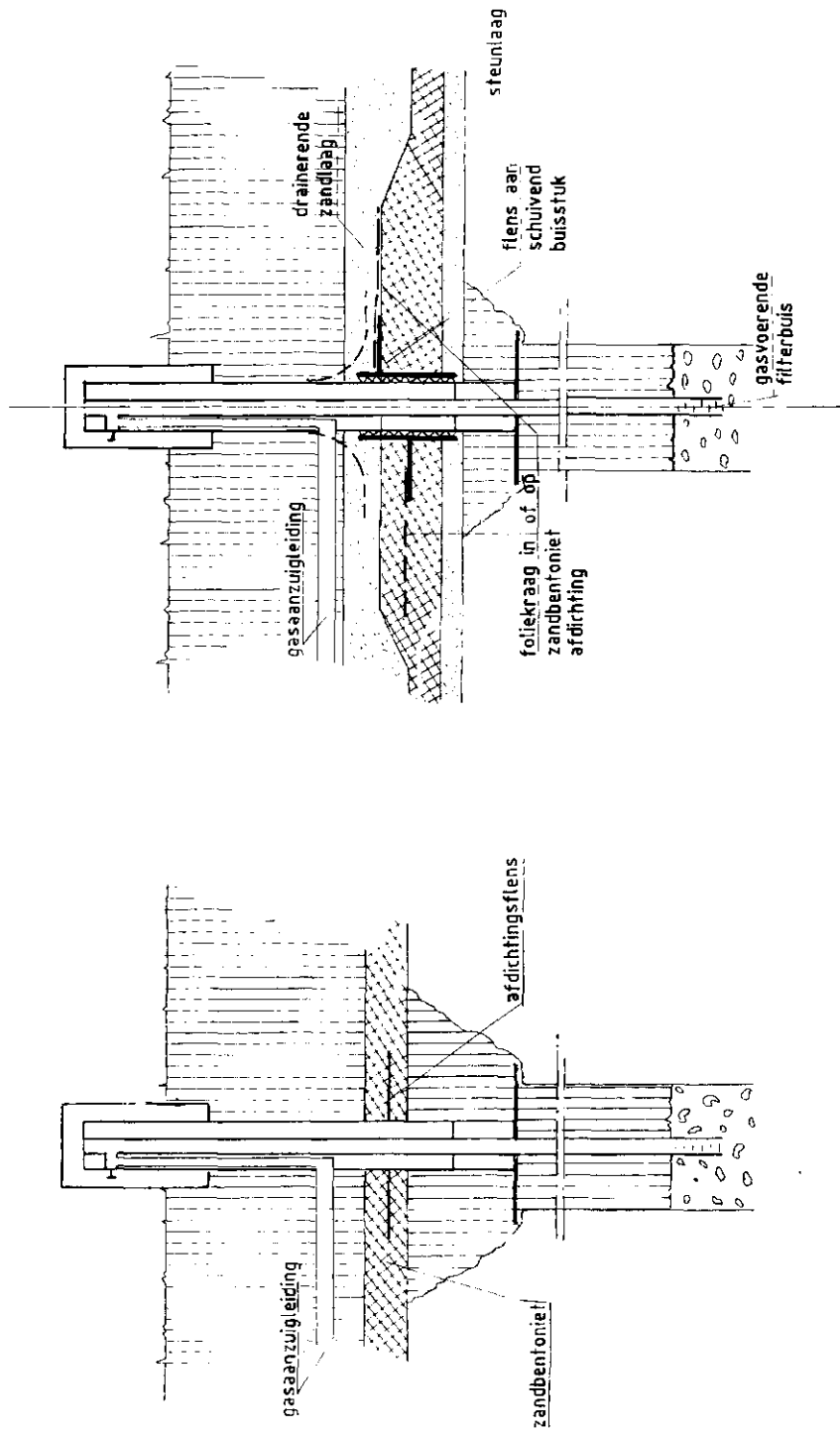


Fig. 27 Schetsontwerp gasbron en doorvoeringen door afdichtingen.

Het ontstaan van gasdruk in een afvalstort is een langzaam proces, terwijl toch de druk aanzienlijk kan zijn. Bij een reeds uitgevoerd bovenafdichtingsproject voor een "ondergronds" gelegen stort (in een voormalige ontzandingsput), waarbij de afdichtende laag bestond uit 1,mm hdpe-folie, is de ervaring opgedaan dat de gasdruk in staat was de folie met een daarop gelegen zandlaag dik 0,30 meter ongeveer 0,50 meter omhoog te brengen. Op dit moment was circa 70% van het oppervlak voorzien van een afdichting. De geforceerde gasonttrekking was reeds circa 3 maanden stilgezet t.b.v. herprofileren en afdichten, waarbij ook het stelsel van gasafvoerbuizen ten gevolge van de afdichtingswerkzaamheden moest worden aangepast. Het is daarom raadzaam bestaande gasbronnen zo kort mogelijk buiten gebruik te stellen en, zonodig met een tijdelijk buizenstelsel, tijdens werkzaamheden en direkt na het ter plaatse aanbrengen van de afdichting de onttrekking weer voort te zetten.

5.3.3 Constructies in verband met drainage

Bij een afvalstort kunnen vier drainagesystemen voorkomen, te weten:

- de bovendrainage voor schoon water;
- de gecombineerde gas/percolaatdrainage onder een bovenafdichting;
- de percolaatdrainage op de eventueel aanwezige onderafdichting;
- de controledrainage onder de bodemafdichting.

De functie van de drainage boven de bovenafdichting (kruin, taluds) is het afvoeren van door de afdekkingen geïnfiltreerd regenwater; daardoor kan dit niet meer door de afdichtingslaag infiltreren, zal de stijghoogtegradiënt over de afdichtingslaag afnemen en zal de stabiliteit van de taluds toenemen.

De functie van de gasdrainage is in het voorafgaande besproken. De onderzijde van deze drainage dient ten behoeve van de dubbelfunctie als percolaatopvang (door middel van een waterslot) aangesloten te worden op een percolaatopvang- en afvoerleiding.

Voor de beide overige drainagesystemen geldt dat indien deze bij een afvalstort voorkomen aan de systemen zelf weinig aandacht behoeft te worden besteed. Wel kunnen de afvoersystemen (koppelleidingen, inspektieschachten, afvoerleidingen) een rol spelen in de keuze van de teenconstructie aangezien deze voorzieningen meestal dicht bij de bestaande voet van hellingen zijn gesitueerd. Het opnemen in de teenconstructie wordt in par. 5.3.4 nader toegelicht en in figuur 26 weergegeven.

In verband met de functies van drainage-systemen in hellingen moeten hieraan de navolgende eisen gesteld worden:

- het drainagesysteem moet zoveel mogelijk uit enkelvoudige drains bestaan, omdat dit het onderhoud (doorspuiten) vergemakkelijkt;
- op steile hellingen kunnen de drains ongeveer evenwijdig aan de hoogtelijnen worden gelegd, danwel onder een hoek van 30° - 45° met het maaiveld;

- ten behoeve van controle op het functioneren van de drainage en de afdichting is het gewenst de bovendrainage door middel van schachten op de uitmondingen te kunnen inspecteren;
- de onderlinge drainafstand kan worden berekend met een door Ernst (1978) ontwikkelde formule, waarbij rekening wordt gehouden met de doorlatendheid van de grond, het ontwateringscriterium en de steilheid van de helling (zie par. 4.4) ;
- gezien het belang van een goede ontwatering is het noodzakelijk alleen hoogwaardige materialen te gebruiken voor filtermateriaal en buizen;
- een drainagesysteem dient zodanig ontworpen te worden dat met zo weinig mogelijk doorvoeren door de afdichtingslaag kan worden volstaan;
- overwogen kan worden in de steunlaag in plaats van een buizenstelsel een drainagemat te installeren over het totale oppervlak van de af te dichten afvalstort. Het blijft daarbij noodzakelijk minimaal 0,30 m zand aan te brengen om uitdroging van de zandbentonietlaag te voorkomen. Dit alternatief is ook boven de afdichtende laag denkbaar, waarbij eveneens een drainerende zandlaag dik 0,30 m noodzakelijk is.

Voor de drains onder de afdichting geldt dat de onderste 30-40 cm van de drainsleuf moet worden opgevuld met humusarm, matig grof zand (zelfde zand als gebruikt wordt voor de drainerende laag boven de afdichting). Aangezien onder de afdichting ten gevolge van percolaat en stortgas een agressief milieu heerst, dient voor de drainage en afvoerleidingen te worden gekozen voor resistente materialen als bijvoorbeeld polypropyleen (p.p.) en hard polyethyleen (h.p.e.) met een omhulling van polypropyleen vezels. De drains boven de afdichting kunnen bestaan uit de gebruikelijke p.v.c.-landbouwdrains met omhulling.

De berekende intensiteit van de drainage zal bij voorkeur zodanig worden aangepast dat de functie van een uitgevallen drain enigermate door een volgende drain kan worden overgenomen. Met name in de beginfase, wanneer de afdekkingen nog onvoldoende cohesie opgebouwd hebben, is het goed functioneren van de schoonwaterdrainage boven de afdichting van belang voor de stabiliteit van het talud. Het ontwerp van het gehele regenwater-drainagesysteem voor een stortplaats van vele hectares verdient bijzondere aandacht. Het drainagesysteem kan eventueel gecombineerd worden met een systeem van greppels en sloten in de afdekking. Belangrijk is in ieder geval dat het systeem eenvoudig is van opzet, zodat het gemakkelijk te onderhouden is. De schoonwaterdrainage kan in principe worden geloosd op het oppervlaktewater.

5.3.4 Doorvoerconstructies

De dichte eindafdekking van een afvalstort wordt gekenmerkt door een laagsgewijze opbouw van diverse materialen. De afdichtingslaag vervult hierin uit milieu-hygiënisch oogpunt de belangrijkste functie. Uitgangspunt hierbij is het tegenhouden van infiltrerend regenwater. Het stort "produceert" echter na afdichting vaak nog geruime tijd percolaat en gas. Het gas moet afgevoerd kunnen worden om grote overdrukken

onder de afdichtingslaag te voorkomen. Een geringe overdruk is daarbij geen bezwaar, temeer omdat daardoor de stijghoogte-gradiënt over de afdichtingslaag in gunstige zin wordt beïnvloed. Het percolaat moet afgevoerd worden om zijdelings uittreden aan de teen te voorkomen, wat naast milieu-hygiënische bezwaren ook nadelig kan zijn voor de stabiliteit van de taluds en de ondoorlatendheid van de afdichtingslaag.

Het maken van doorvoeren voor gasonttrekkingsvoorzieningen en afvoerleidingen voor percolaat, nodig en noodzakelijk voor het blijvend functioneren van een afvalstort en de controle op de werking van de voorzieningen, kan bij onzorgvuldig ontwerp/uitvoering juist aanleiding zijn tot lekkage. Het aantal doorvoeren dient tot een minimum te worden beperkt. De navolgende doorvoeren kunnen onderscheiden worden:

- gasonttrekkingsbuizen door de afdichtingslaag;
- vuilwaterleidingen door de afdichtingslaag;
- schachten door de afdichtingslaag.

Als kern van de afdichtingslaag wordt hierna uitgegaan van een natuurlijk materiaal (volgens hoofdstuk 3 en 4) of van een folie.

Gasonttrekking door zandbentoniet-afdichtingslaag

De gasbron bestaat uit een verticale filterbuis die naar beneden reikt tot enige meters boven de onderkant van het stort. Hiermee is een betrekkelijk star element geïntroduceerd in een zakkende omgeving. Zonder voorzieningen die het verschil in zakking op kunnen vangen, zal de afdichtingslaag gaan glijden langs de gasbron, waardoor deze steeds verder boven de kruin van het stort uit zal gaan steken. De gasafvoerleidingen zullen gaan hangen aan de bron, waardoor breuk zal ontstaan. Ter plaatse van de afdichtingslaag zal langs de buis enig gas ontsnappen.

Ter plaatse van de doorvoering zal voorzien moeten worden in een schuivende verbinding, waardoor het schuivende gedeelte, dat vast verbonden wordt met de afdeklagen, kan schuiven langs de verticale afvoerbuis. Bij de gebruikelijke gasbronconstructie (zie fig. 27) is het dichte buisgedeelte op de bron veelal reeds als schuifconstructie uitgevoerd. Als extra voorziening dient om dit dichte buisgedeelte een schuivende constructie te worden aangebracht zodat ook grotere zakkingen kunnen worden opgevangen.

Het schuivende buisgedeelte dat in de afdichtingslaag wordt opgenomen, moet voorzien zijn van een voldoende brede en stijve hpe-flens, waaraan een strook van hdpe-folie wordt gelast om ontsnappend gas langs de buitenzijde van dit schuivende buisgedeelte te voorkomen. Het aanbrengen van een kraag van folie dient ter aanvulling op het zelfherstellend vermogen van de zandbentonietlaag, en ter verankering in of op deze laag. Tevens is deze kraag noodzakelijk om gronddruk over te brengen op het schuivend buisdeel. In de ruimte tussen vaste buis en schuivend buisstuk kan een plastisch blijvend vulmiddel worden gebracht of een ronde (rollende) goed passende ring worden geplaatst.

Een andere, minstens zo goede oplossing kan zijn aan het in de afdichtingslaag opgenomen schuivende buisstuk een kraag te bevestigen uit vrij soepele folie op een niveau direkt onder de afdichtende laag. Deze kraag dient te bestaan uit een

folie-gedeelte met een diameter van tenminste 3 meter. Indien het schuiven zou stagneren en de beweging van het afval niet voldoende wordt gevolgd, heeft een dergelijke kraag voldoende afmeting om lekkage te voorkomen. Het verdient aanbeveling om de zandbentonietlaag ter plaatse van deze kraag minimaal 0,10 meter dikker uit te voeren.

De veelal op de kruin van het stort geplaatste verticale gasbuizen moeten beschermd worden tegen beschadigingen die zich voort kunnen zetten naar de afdichtingslaag. Hierbij valt bijv. te denken aan aanrijdingen. Aangezien de gasonttrekking veelal wordt uitgevoerd door het regionale gasdistributiebedrijf, zullen deze aanvullende voorzieningen in overleg met deze bedrijven kunnen worden vastgesteld. De gasdrainage is alleen te controleren door vele controle-doorvoeren in de afdichting aan te brengen. De bezwaren die dit geeft door grotere kans op lekken wegen dermate zwaar, dat het waarschijnlijk beter is af te zien van controleen onderhoudspunten voor de gasdrainage.

Gasonttrekking door folie-afdichting

Het doorvoeren van h.p.e.-buizen door een h.d.p.e.-folie is in principe eenvoudiger dan bij de zandbentonietafdichting. Van belang bij deze constructie is dat de stijve "flens" aan het schuivende buisstuk voldoende groot is. Hierbij dient een minimale diameter van 1 meter te worden toegepast om voldoende druk van het bovenliggende zanden grondpakket te waarborgen en zo stagneren van de schuivende beweging te voorkomen. De afdichtende folie kan op deze flens worden vastgelast. Ongelijkmatigheid in zakking ter plaatse van de gasbron eer grootte van 0,25 m over 1 m lengte zullen nauwelijks spanningen in de folie teweegbrengen. Ongelijkmatigheid groter dan 0,50 m zal waarschijnlijk wel tot rek van de folie leiden. Als dit optreedt zal de terreinbeheerder een inspectie moeten uitvoeren en de constructie eventueel opnieuw moeien installeren.

Doorvoeren aan de teen

Bij een goed werkende percolaatdrainage en -afvoer aan de voet van de helling zal het percolaat niet uit kunnen treden. Dit betekent dat slechts beschermende maatregelen genomen zullen hoeven te worden tegen infiltrerend regenwater c.q. afstromend oppervlaktewater. Aangezien de doorvoeren in de teenconstructies veelal buiten de begrenzing van het afval liggen, zal geïnfiltrerd regenwater niet percoleren door het afval, maar hooguit eventueel reeds aanwezig percolaat in de teen verdunnen.

Percolaatafvoeren door de zandbentonietlaag

Het doorvoeren van vuilwaterleidingen door de zandbentonietlaag heeft geen problemen met zich mee te brengen, vanwege het zelfherstellend vermogen van de afdichtingslaag en de flexibiliteit bij keuze van bijvoorbeeld een dichte polypropyleen-ribbelbuis of gelijkwaardig flexibel buismateriaal. Het aanbrengen van folie als kraag in de afdichtingslaag wordt bij flexibele buizen niet noodzakelijk geacht.

Bij toepassen van een relatief stijve buis, bijvoorbeeld een h.p.e.-buis, als afvoerleiding door de afdichting is een kraag van folie wel noodzakelijk. Aangezien folie moeilijk aan de buis gelast kan worden zal als overgang een circa 0,20 meter brede h.p.e.-flens aan de buis gelast worden, waarop de folie

kan worden gehecht. De diameter van de afdichtende kraag zal bij voorkeur 1,5 à 2 meter bedragen. De kraag dient in de zandbentoniet-laag te worden opgenomen, waarbij de laagdikte met circa 0,10 meter dient te worden verhoogd.

Percolaatafvoeren door folie

Bij toepassen van flexibel buismateriaal zal het aanbrengen van een manchets met kraag gewenst zijn, waarbij de afdichtingsfolie aan de kraag kan worden gehecht. Aangezien zakkings hier zeer gering zullen zijn, kan met een eenvoudige constructie worden volstaan. De ruimte tussen buitenzijde flexibele buis en binnenzijde manchets kan gevuld worden met een plastisch vulmiddel, bijvoorbeeld op bitumineuze basis. Bij het doorvoeren van starre buizen door de afdichtingsfolie kan de oplossing worden toegepast zoals hiervoor beschreven voor de zandbentonietlaag, waarbij de folie op de h.p.e.-flens wordt gehecht.

Bij gebruik van starre buizen anders dan uit h.p.e. kan de manchetsoplossing worden toegepast zoals genoemd voor het toepassing van flexibel buismateriaal.

Schachten door de zandbentoniet-afdichtingslaag

Om infiltratie van regenwater door de afdichtingslaag langs de schachtwand te voorkomen kan een circa 5 mm dikke h.p.e.-beplating met hete bitumen aangebracht worden tegen de schachtwand. Door hierop uit hetzelfde materiaal een "flens" te lassen, kan daarop een kraag van folie worden gehecht en worden verwerkt in de zandbentoniet-afdichtingslaag.

Aangezien schachten in hoofdzaak in de teenconstructie voorkomen zijn door de ter plaatse geringe zakkings nauwelijks bijzondere (ongelijkmatige) belastingen te verwachten. Bij schachten uit h.p.e. kan de "flens" aan de schachtwand worden gelast.

Schachten door een afdichting van folie

In principe kan hier dezelfde constructie worden toegepast als beschreven voor de zandbentoniet-afdichting. Indien een schacht uit h.p.e. bestaat, zal de constructie eenvoudiger kunnen worden uitgevoerd. Voor schachten anders dan rond of rechthoekig zal incidenteel aanvullend afdichtingsmateriaal nodig kunnen zijn.

5.3.5 Aansluitingen

Onder aansluitingen wordt verstaan het tot stand brengen van aansluitingen tussen afdichtingslagen onderling. Deze zijn te onderkennen als naden. De navolgende gevallen zijn te onderscheiden:

- a vlakke aansluiting tussen een bestaande en een nieuw aan te leggen zandbentonietlaag;
- b loodrechte aansluiting tussen een bestaande en een nieuw aan te leggen zandbentonietlaag;
- c vlakke aansluiting tussen folie en een zandbentonietlaag;
- d aansluiting tussen zandbentonietlagen van een onder- en een boven- afdichting;
- e aansluiting tussen bestaande folie afdichting (onder of boven) en een nieuw te leggen bovenafdichting uit folie.

a Vlakke aansluiting zandbentoniet

Deze aansluiting zal kunnen voorkomen op taluds of kruin van een stortterrein met een lange looptijd, waarbij de bovenafdichting gefaseerd wordt aangebracht. Het verdient aanbeveling om ter plaatse van de aansluiting de bestaande laag over een breedte van tenminste 0,5 meter te verwijderen. Daarmee wordt bereikt dat zandbentoniet die mogelijk enigszins vervuild is, een niet optimale verdichting heeft, of waarin door scheuren reeds een optimale zwelling heeft plaatsgevonden, uit de constructie wordt verwijderd.

Voor de zekerheid kan overwogen worden het nieuw aan te brengen materiaal naast de overgang te kiezen met een verhoogd bentonietgehalte. De breedte waarover zandbentoniet moet worden verwijderd zal voorts afhankelijk zijn van de wijze waarop de onderliggende drainage/steunlagen, alsmede de gas-/percolaatdrainage zijn aangebracht. Aangezien het gefaseerd aanbrengen van gasdrainage niet goed mogelijk is (geen goede afvoer mogelijk), betekent dit in feite dat een eerste fase van bovenafdichting op een afvalstort naast talud ook een gedeelte kruin zal moeten omvatten. Deze aansluitingen zullen daarom veelal van beneden naar boven in de taluds voorkomen.

b Loodrechte aansluiting zandbentoniet

De loodrechte aansluiting zal kunnen voorkomen bij niveauverschillen in de afdichtingslaag. Aangezien in de afdichtingslaag geïnfiltreerd regenwater zich naar het laagst gelegen niveau in de laag zal verplaatsen, kan hier als extra maatregel worden overwogen de laagst gelegen laag over een breedte van circa 5 meter 5 à 10 cm dikker uit te voeren. Bij niveauverschillen tot circa 1,0 meter kan de aansluiting nog steil worden gerealiseerd door "stapelen" van afdichtingsmateriaal in een voldoende veilige breedte. Bij grotere niveauverschillen zal de overgang moeten worden gerealiseerd met verticale overgangsbogen en hellingen die voor verdichtingsmachines haalbaar zijn. In het algemeen zal een helling 1 : 4 of flauwer vereist zijn. Bij stapelen van lagen zandbentoniet dient de bovenzijde van lager gelegen lagen te worden opgeruwd.

c Vlakke aansluiting folie- zandbentoniet

Bij aansluiten van folie op een zandbentonietlaag (of omgekeerd) zal het niveau bovenkant folie moeten liggen op het niveau van de bovenkant zandbentonietlaag teneinde de regenwaterafvoer in de bovenliggende draineerlaag niet te verstoren. Dit leidt tot twee mogelijke situaties:

c.1 watertransport van hoger gelegen folieniveau naar lager gelegen zandbentonietniveau; in dit geval zal kunnen worden volstaan met het aanbrengen van de folie over het oppervlak van de zandbentoniet-laag met een overlap van tenminste 3 meter. Aannemelijk is dat de gronddruk van de bovenliggende zand- en grondlagen watertransport tussen de lagen zal voorkomen.

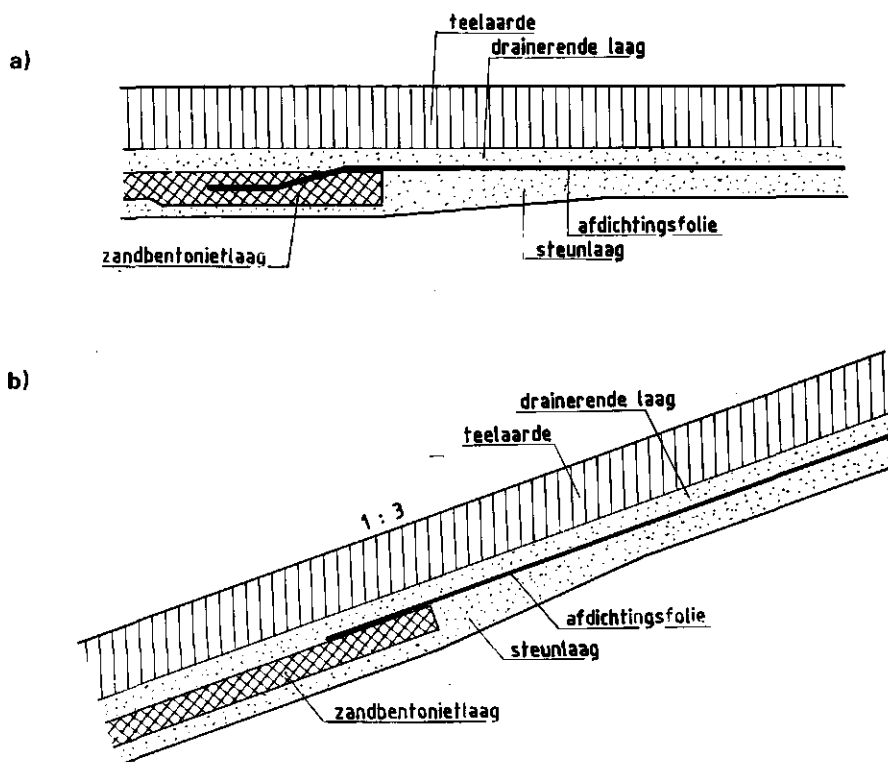


Fig. 28 Aansluitconstructies.
 a) folie geïntegreerd in zandbentonietlaag
 b) overlap

c.2 regenwatertransport van hoger gelegen zandbentoniet naar lager gelegen folie; deze situatie dwingt tot het opnemen van een zekere breedte folie in de zandbentonietlaag om doorlekken op de aansluiting te voorkomen. De zandbentonietlaag dient hierbij minimaal 0,10 meter dikker te worden uitgevoerd. In onderstaande schets is een mogelijke oplossing aangegeven, waarbij de folie over een breedte van ruim 1 meter in de zandbentoniet is opgenomen.

c.3 Overgang in een als vlak aan te nemen situatie; indien de uiteindelijke niveau's van folie en zandbentoniet niet voorstelbaar zijn, zal de oplossing zoals onder c.2 beschreven de beste veiligheid bieden. Indien in de in te brengen folie lasnaden voorkomen, dient de overlap in de foliebaan, zoals die voorkomt direct naast lasnaden, te worden verwijderd of met bituminen te worden gevuld om lekkage te voorkomen. De extra dikte van de zandbentonietlaag dient bij voorkeur minimaal 0,15 meter te zijn. Het situeren van een ontwateringsdrain dichtbij de plaats van de aansluiting zal de

stijghoogtegradiënt ter plaatse verlagen en daarmee de kans op eventuele lekkage verder verminderen.

d Aansluiting zandbentonietlagen van onder- en bovenafdicthting

In principe zal, gezien de toepassing van zandbentoniet tot nu toe, een dergelijke aansluiting in Nederland nauwelijks voorkomen. Zou een dergelijke aansluiting wel gevraagd worden, dan zullen primair de aard en plaats van de teenconstructie en de situering van bestaande leidingen voorwaarden stellen aan de oplossing voor de aansluiting. De argumenten zoals genoemd onder a. hiervoor zullen ook hier gelden: weghalen vervuilde zandbentoniet, zandbentoniet met slechte verdichting of scheuren tengevolge van eerdere instabiliteit e.d., en waar nodig het weggehaalde materiaal aanvullen of vervangen. De "stapeling" van zandbentoniet dient zoveel mogelijk homogeen te zijn. Bij stapelen dient de onderliggende laag te worden opgeruwd.

In bijzondere gevallen kan overwogen worden aan de binnenzijde van de aansluiting eerst een foliebaan aan te brengen die mogelijk percolaat remt en naar een percolaatdrain geleidt. De zandbentoniet van onder- en bovenafdicthting dient volledig tegen deze folie aan te sluiten (zie ook de reeks figuren 26 c, e, f en g).

e Aansluiting folie op folie

De folie op folie-aansluiting zal voorkomen bij de teen van een helling waar zowel boven- als onderafdicthting bestaan uit folie, en binnen de bovenafdicthting bij gefaseerde uitvoering van een dicthting uit folie. In principe zal een folie op folie-aansluiting door laswerk tot stand komen. Belangrijkste element daarbij zal zijn het voldoende schoon en droog maken van reeds aanwezige folie. Bij een bovenafdicthtingsaansluiting zullen verder geen bijzondere maatregelen nodig zijn.

De teenaansluiting kan meer werkzaamheden vragen. Uit het ontwerp voor een teenconstructie zal de gewenste plaats blijken voor de hechting bovenafdicthting op onderafdicthting. Aangezien een teenconstructie met een dichte bovenafdicthting bij veel terreinen niet tijdens het ontwerp van de onderafdicthting zal zijn voorzien, kan dit leiden tot het aanpassen van de onderafdicthting. In veel gevallen zal aan de bestaande foliebeëindiging eerst een strook van 1 à 3 meter breed moeten worden gehecht, om vervolgens daarop de opgaande foliebanen voor de bovenafdicthting te hechten. In oudere ontwerpen van stortterreinen, waarbij de foliebeëindiging in het dwarsprofiel onvoldoende "naar buiten" is geprojecteerd, kan dit leiden tot flinke ontgravingen aan de teen met een mogelijk tijdelijke instabiel zijn van bovenliggende taludvlakken. Aangezien zich juist binnen deze teenaansluiting van de afdicthtingen percolaat zal kunnen verzamelen, is een goede waterdichte hechting hier van groot belang en zal het meerdere grondwerk geaccepteerd moeten worden.

5.4 Eindafwerking en landschappelijke inpassing

5.4.1 Algemeen

Naast landschappelijke redenen is het ten behoeve van het tegengaan van oppervlakte-erosie en het bevorderen van verdamping noodzakelijk dat een afvalstort wordt afgewerkt door het inzaaien van gras, en in mindere mate het planten van bomen en struiken. Direct na het opbrengen is de afdeklaag erg gevoelig voor erosie. Het is daarom noodzakelijk zo snel mogelijk gras in te zaaien om erosie te voorkomen. Op plaatsen waar beplanting moet komen, kan in plaats van gras rogge gezaaid worden, dat later uitgemaaid wordt, of kunnen houtsnippers gestrooid worden die licht ingewerkt worden.

De houtsnippers zullen dakpansgewijs over elkaar gaan liggen en de tussenliggende grond over een dergelijk beperkt oppervlak voldoende erosiebestendig vastleggen.

De keuze grasbedekking of beplanting zal veelal ingegeven worden door landschappelijke overwegingen, en het toekomstig gebruik. Zowel voor grasbedekking als voor beplanting verdient het uit landschappelijk oogpunt aanbeveling om de afdeklaag te maken met grond, die overeenkomt met die in de omgeving. Ten aanzien van beplanting dient terughoudend te worden gehandeld. Naast het risico dat wortels in de afdichting doordringen, kan ook door omwaaien mechanische beschadiging ontstaan. Grote oppervlakken beplanten moet voorlopig afgeraden worden, temeer omdat bij het vervangen of verbeteren van een bovenafdichting op lange termijn de houtopstand immers weer verwijderd dient te worden (zie ook par. 5.4.3).

5.4.2 Grasbedekking

De grasmat is vooral van betekenis voor de bescherming tegen erosie. In de eerste plaats wordt bij erosie gedacht aan afspoeling tijdens regenval. Het grasgewas verhoogt de infiltratiecapaciteit van de grond zodat minder afstroming langs de oppervlakte voorkomt, en bevordert de verdamping. Bovendien staat de grond niet direct bloot aan de werking van de vallende druppels en houden stengels en wortels de grond vast, zodat er weinig kans op verplaatsing van de grond is. Als gevolg van de gevoeligheid voor weersinvloeden bij het aanbrengen van de afdeklagen, is het van groot belang dat het afvalstort ruim voor de herfstperiode afgewerkt is. In principe dienen de werkzaamheden voor de maand augustus te zijn voltooid. Het inzaaien moet voor 1 september hebben plaatsgevonden om van de gunstige kiemen groeiperiode gebruik te kunnen maken. Bij inzaaien na dit tijdstip neemt het risico van een onbegroeide, dus erosie-gevoelige afdekking toe. Dit geldt in verhoogde mate bij lange hellingen waarbij aan de voet grote waterhoeveelheden c.q. snelheden kunnen ontstaan. Door bijmenging met rogge in het grasmengsel kan een aanzienlijke beperking van dit risico worden bereikt.

De keuze van het grasmengsel wordt bepaald door de gebruikseisen. Het mengsel moet snel opkomen en een snelle grond-

bedekking geven. Om veelvuldig maaien te voorkomen moet de grasproductie zo gering mogelijk zijn. De grasmat moet weinig onderhoud vergen. In geval van beweiding zal een hogere grasproductie minder bezwaarlijk zijn. Een mengsel dat goed aan deze eisen voldoet is BTK 1100. Dit bestaat uit 10% gewoon struisgras, 50% uitlopervormend roodzwenkgras, 15% veldbeemdgras en 15% Westerwolds raaigras. Westerwolds raaigras komt zeer snel op en produceert veel massa, maar is niet standvastig en ook niet zo wintervast, waardoor deze grassoort na enkele jaren uit het bestand verdwenen kan zijn. De toe te passen hoeveelheid grasmengsel op hellingen ligt in orde van grootte van 100 - 125 kg/ha. Voor een aantrekkelijk landschapsbeeld of ter verhoging van de recreatieve waarde, kan het graszaad bijgemengd worden met een kruidenmengsel. Met name waar op grond van specifieke gebruikseisen een ander mengsel gewenst is (bijvoorbeeld voor sport- of recreatievelden) kunnen andere mengsels toegepast worden.

Graszaad eist voor een goede opkomst een fijn, vrij stevig zaaibed. Door een passende bewerking, bestaande uit eggen en rollen moet het zaaibed worden klaargemaakt. Voor en na het zaaien is licht eggen gewenst om het graszaad goed bedekt te krijgen, waarna door het rollen het zaad kan worden aangedrukt ter bevordering van het kiemen. Er moet voor worden gezorgd, dat het graszaad zeer ondiep komt te liggen. Met name bij steile hellingen en zandige taluds bestaat de kans dat graszaad bij een forse regenbui onvoldoende blijft liggen. Het graszaadmengsel kan daartoe bijgemengd worden met aardappelmeel of Hygromull. De cellulose uit het aardappelmeel bindt het graszaad aan de bodem. Hygromull is een organisch bodemverbeterend middel, een schuimkunststof op basis van ureumformaldehyde. Voor een goede en snelle opkomst zal in de meeste gevallen het strooien van kunstmest noodzakelijk zijn. Aan de hand van grondmonsteranalyses door het bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewasonderzoek te Oosterbeek, kan een passend bemestingsadvies verkregen worden.

Voor goede ontwikkeling van de grasmat is ook de expositie van belang. De grasontwikkeling op steile hellingen op het zuiden is geringer ten gevolge van vochtgebrek. De steile hellingen op het noorden, die weinig of geen direct zonbestraling ontvangen, zullen over het algemeen niet zo'n sterke uitdroging ondergaan met als gevolg een tragere, maar betere grasgroei. Bij flauwere taluds is het anders. Hier is juist de tendens aanwezig dat de ligging op het zuiden een steviger graszode tot gevolg heeft. Een talud op het noorden kan bij niet te grote steilheid te vochtig zijn. Dit kan leiden tot mosgroei. Ook bij een reeds volgroeide grasmat op hellingen kan afhankelijk van de seizoenen en variatie in regenval, zowel droogteschade als risico van erosie optreden.

5.4.3 Planttechnische mogelijkheden

Bij het vaststellen van het beplantingsassortiment voor een afvalstortplaats moet naast een benadering vanuit het landschap ook een technische benadering plaatsvinden. De planttechnische mogelijkheden worden bepaald door de opbouw en afwerking van het terrein. Wil een beplanting kans van slagen hebben, dan zal de aan te brengen afdekgrond voldoende dik

moeten zijn (80 - 100 cm) en uit vochthoudend materiaal moeten bestaan. De samenstelling van de teelaardelaag kan deels bepaald zijn door hergebruik van de afgegraven grond die vrijkomt ter plaatse van de fundering voor de stortheuvels. De rest zal worden aangevoerd van elders uit de omgeving. Desondanks is er vaak een belangrijk verschil tussen de oude terreinsituatie en de nieuwe bodemsituatie op de stortheuvels. Door de afsluiting met bentoniet en/of folie is de levering van vocht uit de ondergrond namelijk verwaarloosbaar. Hierdoor zal er alleen sprake zijn van een hangwaterprofiel. Dit betekent dus dat de beplanting extreme klimaatomstandigheden (met name langdurige droogte) moet kunnen opvangen. Hierbij geldt dat zuidhellingen gevoeliger zullen zijn dan noordhellingen. Een ander klimatologisch aspect dat bij de bepaling van het assortiment van belang zal zijn is de wind. Vooral de eerste jaren na aanleg kan deze invloed groot zijn. Daarnaast kunnen op termijn de beperkte (wortel-) verankeringsmogelijkheden een rol spelen.

Om het assortiment te kunnen bepalen moet eerst worden gekeken naar de samenstelling en de kwaliteit van de teelaardelaag. De eisen die in verband met beplanting aan deze laag moeten worden gesteld zijn:

1 Een voldoende vochtleverend vermogen

Voor acceptabele groei van beplanting op een afvalstort zal de afdeklaag zoveel vocht moeten kunnen leveren, dat een tijdelijk tekort aan neerslag kan worden overbrugd. Wordt uitgegaan van de gemiddelde hoeveelheid neerslag gedurende het groeiseizoen (350 mm) en de verdamping bij een optimaal vocht aanbod van een bos (500 mm), dan moet de bodem 150 à 200 mm kunnen leveren. De samenstelling van de afdeklaag wordt veelal grotendeels bepaald door de afgegraven bovenlaag van het terrein ter plekke van de op te richten stortheuvels. Grondonderzoek is hierbij van belang (zie ook par. 4.5). Verder zal op noordhellingen de potentiële verdamping 10 à 15% lager zijn dan die van zuidhellingen en kan de teelaardelaag theoretisch evenredig dunner zijn. Ditzelfde onderscheid geldt in principe voor plaatsen waar alleen gras danwel ook beplanting wordt voorzien.

2 Een goede toplaag

De toplaag dient een goede structuur te hebben en bij voorkeur te bestaan uit humeus, leemarm zand. Zodra de grond bedekt raakt met een grasvegetatie neemt de kans op erosie snel af. De grasmat zorgt ervoor dat de grond niet dicht slegt en zijn goede structuur behoudt.

3 Een goede doorwortelbaarheid

In verband met het daadwerkelijk kunnen gebruiken van het beschikbare vocht in de afdeklaag is een diepe beworteling gewenst. Ook ten aanzien van de verankering is een goede beworteling wenselijk. Het is dan ook van groot belang dat er geen abrupte overgangen in korrelgrootte en vaste lagen voorkomen, die de doorwortelbaarheid belemmeren. Dit betekent dat het afdek materiaal met de bulldozer moet worden aangebracht; rijsporen van auto's nabehandelen, overig oppervlak niet. Overigens alleen nabehandelingen indien ernstige verdichting is opgetreden.

Bij het streven naar een zo gunstig mogelijk bodemprofiel met de beschikbare grond zal het zandige materiaal vanwege de drainerende werking zoveel mogelijk in de onderste lagen moeten worden verwerkt. Ten behoeve van een goede groei van de beplanting dient de afdeklaag voldoende voedselrijk te zijn.

4 Verankeringsmogelijkheid

Belangrijk is dat bomen ook tijdens storm niet omwaaien. De verankering komt tot stand doordat door de wortels een hoeveelheid grond wordt vastgehouden. Het gewicht van de grond en de wrijving van deze grond met de grond in de omgeving en met de wortels zelf voorkomt omwaaien van de bomen. Wanneer de beworteling tot 50 cm diep mogelijk is en ook de beworteling in horizontale richting voldoende is, is het risico van omwaaien gering. Om dit te bereiken is het van belang dat in het ondiepe bodemprofiel geen slecht doorwortelbare lagen voorkomen.

5 Overige aspecten

Voor het planten van loofhout is het voorts belangrijk dat de pH en de voedingsstoffenvoorziening overeenstemmen met de gemiddelde eisen van de diverse loofboomsoorten (pH-KCl van 4 à 5). Is de afdeklaag humusarm en leemarm dan komen voornamelijk naaldboomsoorten, vooral grove den, in aanmerking. De pH van de grond dient in dit geval lager te zijn dan 4,5. Voor niet opgaande struiksoorten is een afdeklaag van minimaal 50 à 60 cm dikte voldoende om goede groei mogelijk te maken. Met betrekking tot het gebruik van struiken kan tabel 18 worden gebruikt. Om de beschikbare hoeveelheid teelaarde zo goed mogelijk te benutten zou overwogen kunnen worden de dikte van de laag te varieren. Zo zou voor de bebossingen en solitaire bomen 120 cm moeten worden aangehouden en voor gras en struiken 80 cm. Dezelfde hoeveelheid afdekgrond zou zo beter verdeeld worden. Ook het verschil tussen de koude, vochtige noordhellingen en de warmere, drogere zuidhellingen is bij de beplantingsbepalingen van belang. Door rekening te houden met klimaat en de soorten hierop af te stemmen kan er een duurzame gezonde groei plaatsvinden. In tabel 20 en 21 worden enige resultaten van proeven over dit aspect aangegeven.

Tot slot moet worden gewezen op enige onzekerheden met betrekking tot de bewortelingsdiepten van beplantingen. Met name bomen wortelen in volle grond dieper dan de aanwezige meter afdeklaag. De vraag is voorts hoe bomen zich op oudere leeftijd op deze laag zullen gedragen. Het onderzoek naar deze problematiek bevindt zich nog in een te pril stadium om hierop antwoord te kunnen geven.

5.4.4 Beplantingen

Om te kunnen bepalen welke beplantingen geschikt zijn op de afdekklagen kan ondermeer gebruik worden gemaakt van de resultaten van proeven uitgevoerd door instituut "De Dorschkamp" te Wageningen. Op grond van het percentage planten dat de eerste twee jaar overleefde en van de bladontwikkeling gedurende de eerste 6 à 10 jaar zijn de verschillende boom- en struiksoorten gewaardeerd. Hoewel de waardering is gebaseerd op een relatief korte periode is toch een goed algemeen beeld verkregen van de ontwikkeling van verschillende soorten op

diverse groeiplaatsen. Bij de beplantingsproeven is voorts aan de hand van het uitvalpercentage, de jaarlijkse vitaliteit en de hoogtegroei, voor een aantal soorten en voor afdekkingen met een verschillende samenstelling een geschiktheidswaardering opgesteld (tabel 21). De vitaliteit is gewaardeerd aan de hand van bladbezetting, bladkleur en bladgrootte, de gemiddelde lengtegroei van de bovenkroon en de gezondheid. Op grond van de ervaringen tot nu toe kan worden gesteld dat voor stortterreinen een aantal soorten geschikt zijn. Op de wat langere termijn is een goede ontwikkeling te verwachten van populier, iep, esdoorn, kers, acacia, eik, berk en waarschijnlijk ook beuk en es.

Naast het reserveren van gebiedsdelen voor beplantingen (bomen en struiken) is het ook mogelijk om natuurbouw te plegen. Dit kan plaatsvinden door het aanbrengen van verschillende samengestelde afdekkingen in combinatie met een gericht beheer. Door afwisseling in bodemtypen zoals klei-, leem-, zand-, veen-, kalkrijke of kalkarme gronden, zijn op kleine schaal verschillende vegetaties te verwachten. Ten aanzien van de zandbentonetlaag geldt overigens dat kalkrijke grond moet worden afgewezen, aangezien de ondoorlatendheid daardoor zal afnemen.

Tabel 19 Mogelijkheden struikbeplanting.

	Standplaats eis/tolerantie ten aanzien van:		Ook structuurloze bodem
	waterhuishouding	zuurgraad bodem	
Crataegus monogyna	d-v	B	ZL, L, K
Cragaegus laevigata	v	z-B	ZL, L
Corylus avellana	x	x	PL, ZL, ZK
Cornus mas	x	B	PL, L
Cornus sanguinea	x	B	ZK, K, L
Euonymus europaeus	n	zZ-B	ZL, ZK, L, K
Ligustrum vulgare	x	B	ZL, K
Lonicera xylosteum	n	zZ-B	ZL, L, K
Prunus padus	v-n	x	L, K, ZL, ZK
Prunus spinosa	x	x	PL, L
Rosa canina	d-v	x	ZL, L
Rosa rubiginosa	d-v	B	z, PL
Rhamnus frangula	n"	Z	ZL, L, K
Salix purpurea	n"	zB	Z
Salix cinerea	n"	zZ	z, K
Salix caprea	n	zZ-B	ZL, L
Sambucus nicra	n	x	
Samoucus racemosa	v-n	zZ	L, PL
Sorbus aucuparia	x	x	PL, ZL, L
Viburnum opulus	v-n	zZ-B	ZL, L, K

d = droog	Z = zuur	Z = zand
v = vochtig	B = basisch	L = leem
n = nat	zZ = zwak	K = klei
n" = verdraagt wisselend grondwater	zB = zwak basisch	P = puin/steen
x = indiffferent	x = indiffferent	ZL = zandige leem
		?L = analoog ZL

Daarnaast bieden verschillen in de vochthuishouding in principe ook mogelijkheden voor de ontwikkeling van diverse vegetaties. Dit laatste is echter op stortheuvels zeer beperkt mogelijk omdat een hoog vochtgehalte of verzadiging direct boven de bovenafdichting ongewenst is. Hiervoor zal dan ook moeten worden uitgeweken naar de randen van het stortterrein.

Tabel 20 Mogelijkheden van beplanting op hellingen.

Elke standplaats	
Acer campestre	Populus tremula
Cornus sanguinea	Prunus spinosa
Crataegus monogyna	Sambucus nigra
Euonymus europaeus	Salix caprea
Elke standplaats, minder eisen stellende aan bodem e.d.	
Alnus glutinosa	Fraxinus excelsior
Crataegus laevigata	Sorbus aucuparia
Rhamnus frangula	Quercus robur
Minder geschikt voor west-zijden	
Corylus avellana	
Lonicera Periclymenum	
Minder geschikt voor winderige west-zijden	
Alnus glutinosa	Rubus fruticosus
Betula pendula	
Zeer geschikt voor west-zijden	
Crataegus laevigata	Rosa canina
Crataegus monogyna	Viburnum opulus
Prunus spinosa	Quercus robur
Zeer geschikt voor west-zijden, minder eisen stellende aan bodem e.d. dan vorige groep	
Acer campestre	
Cornus sanguinea	
Zeer geschikt voor oost-zijden	
Corylus avellana	
Fraxinus excelsior	
Lonicera periclymenum	
Rubus fruticosus	
Zeer geschikt voor noord-zijden	
Corylus avellana	Lonicera periclymenum
Crataegus laevigata	Salix aurita
Rhamnus frangula	Salix cinerea
Ilex aquifolium	
Minder geschikt voor noord-zijden	
Quercus robur	
Rosa canina	
Rubus fruticosus	
Zeer geschikt voor zuid-zijden	
Betula pendula	
Quercus robur	
Rosa canina	
Rubus fruticosus	
Viburnum opulus	
Minder geschikt voor zuid-zijden	
De planten die genoemd zijn in de kolom Zeer geschikt voor noord-zijden	

Voor het welslagen van de beplantingen is een goede verzorging in de eerste twee drie jaren van groot belang. Is de beplanting eenmaal goed aangeslagen en op groeitempo, dan zal alleen door tijdig genomen maatregelen zoals vrijstellen, dunnen, snoeien en verjongen een evenwichtige en gezonde ontwikkeling mogelijk blijven.

Aannemelijk is dat op langere termijn (mogelijk iedere 50 à 100 jaar) de bovenafdichting moet worden vernieuwd. Dat betekent, mede gezien vanuit een eventuele later ingevoegde recreatieve bestemming, dat het aanbrengen van beplanting met name op plateaus zeer selectief moet gebeuren. Daarnaast zal

Tabel 21 Resultaten proefbeplanting

	Kleiige afdeklaag slaging				vitaliteit				geschiktheid				Zandige afdeklaag slaging				vitaliteit				geschiktheid			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Populus "Robusta"	+	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Populus "Oxford"	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	++	++	++	0	+	+	+
Populus "Zeeland"																	++	++	++	++	0	+	+	+
Populus "Dorschkamp"																	++	++	++	++	0	+	+	+
Salix alba	+	+	++	++	-	0	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+								
Ulmus carpinifolia	-	0	+	++	-	0	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	++	++	++	++	0	0	+	+
Betula pendula/ pubescens																	++	++	++	++	0	+	+	+
Alnus glutinosa	-	0	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	++	++	++	++	0	0	0	0
Fraxinus excelsior*	-	+	+	0	0	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+	+	++	++	++	++	-	0	0	0
Acer pseudoplatanus	0	+	+	++	+	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	++	++	++	++
Quercus Robur	-	-	0	0	0	+	+	+	-	-	-	-	0	+	+	+	++	++	++	++	0	+	+	+
Robinia pseudoacacia																	++	++			0	0		
Prunus avium																	++	++			0	+	+	+
Crataegus monogyna																	++	++	++	++	0	+	+	+

I = afdeklaag tot 30 cm dik
 II = afdeklaag van 30 tot 50 cm dik
 III = afdeklaag van 50 tot 75 cm dik
 IV = afdeklaag van 75 tot 100 cm dik

* = resultaat op kleiige afdeklaag ongunstig beïnvloed door andere dan standplaatsfactoren (o.a. mechanische beschadiging).

het zicht vanuit het landschap zich meer concentreren op de hellingen van het stort dan op de hoger gelegen plateaus, hetgeen ook vanuit deze invalshoek het aanbrengen van beplantingen op vlakke gedeelten een lagere prioriteit geeft.

5.4.5 Landschappelijke vormgeving

Algemeen

Aangezien de bovenafdichting en teenconstructie eisen stellen aan talud- hellingen en ruimtebeslag op maaiveldniveau, kan het aanbrengen van bovenafdichting leiden tot het gedeeltelijk aanpassen en/of verplaatsen van bestaande taluds en talud- hellingen. Bij reeds uitgevoerde afdichtingsprojecten voor oude stortterreinen heeft dit ook geleid tot het verplaatsen van afval. Aangezien bij veel stortterreinen het landschappelijk "eindplaatje" is vastgelegd in het bestemmingsplan en de verleende afvalstoffenwet-vergunningen, zal nagegaan moeten worden waar het uit taluds vrijkomend materiaal kan worden verwerkt. Het is niet aannemelijk dat de relatief geringe hoeveelheden vrijkomend materiaal bij verwerken tot aanzienlijke afwijkingen van het "eindmodel" zullen leiden. Waar dit wel het geval zou zijn kan met de navolgende korte bundeling van ruimtelijke inrichtingsaspecten mogelijk een nadere afweging en keuze worden gedaan.

Het landschap

Het landschap, zoals dat wordt waargenomen, kan worden opgevat als het resultaat van de wisselwerking tussen natuurlijke factoren en het menselijk handelen. Het landschap kan hierbij niet los worden gezien van het functioneren ervan en de ruimtevormende elementen die binnen dat landschap zijn gelegen. Ruimtevormende elementen zijn elementen als wegen, gebouwen, beplantingen, dijklichamen, maar zeker ook afvalstortplaatsen. Het complex van deze elementen in samenhang met de hieruit resulterende ruimten wordt een patroon genoemd. Diverse patronen bepalen gezamenlijk de uiterlijke verschijningsvorm van het landschap. In relatie tot afvalstortterreinen kunnen een tweetal patronen worden onderscheiden:

- kleinschalige patronen; dit zijn patronen die van een lagere rangorde zijn dan een stortplaats. Dit zijn bijvoorbeeld bomenrijen, houtwallen, paden, locale wegen, watergangen etc. ;
- grootschalige patronen; dit zijn patronen die van eenzelfde rangorde zijn als een stortplaats. Hiermee wordt bedoeld op elementen en patronen die net als een stortplaats regionale betekenis hebben. Voorbeelden daarvan zijn: hoofdwegen, kanalen, spoorlijnen etc.

De grootschalige patronen zijn samen te vatten in de (hoofd) structuur. De structuur is in belangrijke mate bepaald door de natuurlijke ontstaanswijze en de wijze waarop de mens het gebied heeft ingericht. In de eerste plaats is de structuur van het landschap de functionele drager, de grote lijn waarlangs de functioneel-ruimtelijke ordening plaatsvindt. In deze betekenis is de structuur de meest constante factor in het landschap, waarbinnen een invulling plaatsvindt die in de tijd variabel is. In de tweede plaats is de structuur de beelddrager van het landschap, de lijn waarlangs de visueel-ruimtelijke ordening plaatsvindt. Als zodanig speelt de

structuur een belangrijke rol bij de beleving van het landschap.

Beleving

Ten aanzien van de beleving is het gewenst de herkenbaarheid van de ruimtelijke eenheden in visueel-ruimtelijk opzicht te vergroten. Aspecten die hierbij aan de orde komen zijn de identiteit van het landschap (= datgene waardoor een ruimtelijke eenheid onderscheiden kan worden van een andere) en de oriëntatie binnen het landschap (= de mate van duidelijkheid in de ordening van het landschap). De ordening vindt hierbij plaats op basis van de historische structuur of op basis van de functionele (hedendaagse) structuur. Daarnaast is binnen de oriëntatie het niveau van belang. Deze niveaus zijn:

- regionaal niveau: ordening van grote landschapseenheden;
- lokaal niveau: ordening direct vanaf de route, het zogenaamde recreanten niveau.

Vanuit de betekenis van het landschap en de daarmee samenhangende beleving is het van belang op welke wijze de landschappelijke inpassing gestalte krijgt via de eindafwerking van het stortterrein. De eindafwerking behelst enerzijds de afwerking van het stort (wel of niet ingeplant en waarmee ingeplant) en anderzijds de vorm van het stort (de dimensionering, vormgeving in oppervlakte, hoogte en taluds).

5.4.6 Landschappelijke visies

Voor de vormgeving van afvalstortplaatsen in het landschap kunnen verschillende invalshoeken worden gekozen. In het rapport "Afvalstortplaatsen in het landschap" (studie van Heidemij Adviesbureau BV in opdracht van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1982)

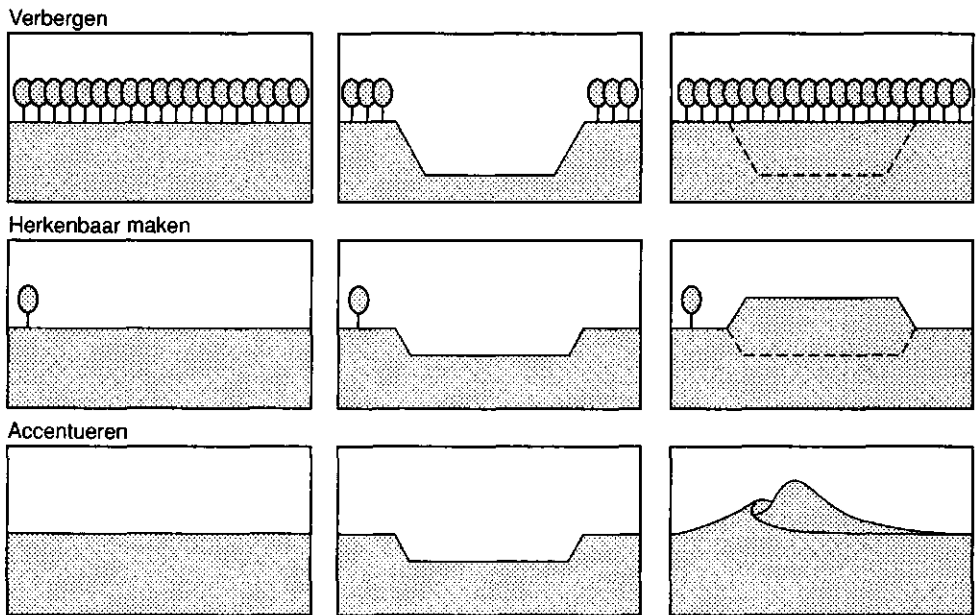


Fig. 29 Schematische voorstelling van de opties "verbergen", "herkennen" en "accentueren".

zijn een drietal visies voor de vormgeving van afvalstortplaatsen in het landschap gegeven (zie figuur 29).

a Verbergen (afschermen)

Bij deze visie wordt gestreefd naar een landschappelijke inpassing van het stort door dit te laten aansluiten in vorm en maat op gedetailleerde patronen in het landschap. Het doel is een vorm die een sterke dominantie en een hard contrast met de vonngeving uitdrukkelijk vermijdt. Bij "verbergen" wordt een stortplaats in beginsel beschouwd als een element dat eigenlijk niet in het landschap thuis hoort. Dominantie en contrast met de omgeving wordt vermeden waarbij beplanting dient om het stort onzichtbaar te maken. Het stort wordt als herkenbaar element afgewezen en "schijnrelaties" tussen stort en omgeving worden positief gewaardeerd. Er wordt ingegaan op gedetailleerde patronen, die van een lagere rangorde zijn dan het stort. In de periode waarin het storten sterk gespreid plaatsvond, kon het grote aantal kleinere storten gemakkelijk worden verborgen. Met de regionalisering van de afvalverwijdering en procesmatige verwerking is de omvang van stortplaatsen sterk toegenomen en is verbergen veel moeilijker geworden.

b Herkennen (identificatie)

In deze visie wordt een stort als herkenbaar element aanvaard. Met "herkenbaar" wordt bedoeld: zichtbaar als onderdeel van het systeem van afvalverwijdering in een situering en vormgeving met een eigen identiteit. Een zekere verzelfstandiging ten opzichte van andere elementen en patronen in het landschap kan bewust worden nagestreefd, waarbij het stort als informatiedrager herkenbaar wordt. Bij "herkennen" wordt het landschap opgevat als het resultaat van de wisselwerking tussen natuurlijke factoren en het menselijk handelen. Aangezien zowel de natuur als het menselijk handelen voortdurend aan veranderingen onderhevig zijn, zijn veranderingen in het landschap onvermijdelijk. Het landschap is als het ware een momentopname van een continu veranderingsproces en vormt de uitdrukking van de wijze waarop de mens zijn omgeving gebruikt en vorm geeft. Vanuit deze optiek worden stortplaatsen gezien als een eigentijds patroon dat bij de huidige maatschappij hoort en als zodanig ook in het landschap herkend mag worden. In plaats van het onderscheid met het bestaande landschap te verdoezelen, wordt gezocht naar een evenwicht in contrasterende vormen: nieuw naast oud. Dit betekent het bewust situeren en vormgeven van stortplaatsen in relatie met elementen en patronen in het landschap van eenzelfde belangrijkheid/ karakter en/of functionele venaantschap. Vanwege de aard van stortplaatsen leidt dit tot contrast met kleinschalige patronen in het landschap.

Reageren op elementen en patronen in het landschap heeft volgens deze visie met name zin als:

- functionele relaties bestaan met deze elementen en patronen (bijvoorbeeld nabij woongebied);
- deze elementen en patronen van een vergelijkbare rangorde zijn als de stortplaats (bijvoorbeeld hoofdweg).

Een schijnrelatie ontstaat wanneer het stort bijvoorbeeld qua afmetingen overeenkomt met de maten in het landschap of wanneer het stort op de elementen/patronen in het landschap is afgestemd, terwijl deze niet van een vergelijkbare rangorde

zijn. Voorbeeld van zo'n schijnrelatie is het bewust volgen van een kronkelige sloot, bomenrij of klein bosje.

c Accentueren (verbijzonderen)

Bij de visie "accentueren" wordt het stort gezien als een eigentijds object, contrasterend met de omgeving. De hierdoor optredende identiteit en zeggingskracht komt meer voort uit de functie en uiterlijke verschijningsvorm van het object dan uit de omgeving. Regels en voorwaarden vanuit de omgeving dienen echter wel in acht genomen te worden. Het accepteren van een eigen karakter biedt mogelijkheden tot het uitbouwen van specifieke kenmerken. Raakvlakken met de omgevingskunst kunnen bij deze visie een rol gaan spelen waarbij gedacht wordt aan een amorfe geprononceerde vormgeving. De visie "accentueren" komt vooral in aanmerking in combinatie met specifieke, veelal intensieve vormen van hergebruik na beëindiging van de stortactiviteiten, nabij stedelijk gebied, in vlakke gebieden, of in rationale, eigentijdse landschappen zoals Zuidelijk Flevoland. Beperkingen in de vormgeving die voortkomen uit het toepassen van een bovenafdichting, hebben betrekking op het volgende: afhankelijk van de hoogte dienen de taluds (enkele keren) door middel van een tussenberm (minimaal 5 m breed als beheerspad) onderbroken te worden; - afhankelijk van de hoogte bedraagt de maximale helling 1:3 à 1:2,5.

Een ander uitgangspunt bij de optie van "accentueren" is het benadrukken van het kunstmatige van een afvalstort en een geconcentreerde stortvorm, dat wil zeggen: hoog, en grote hoeveelheden afval op een geringe oppervlakte. De visie kan zo bijdragen aan een milieuverantwoorde, geconcentreerde stortvorm, regionaal zichtbaar en met een duidelijk afleesbare symboliek in de vormgeving op grond van de eigenschappen van het storten en van het gestorte materiaal.

Teneinde de landschappelijke aspecten van de inpassing van stortplaatsen in het landschap optimaal te kunnen inbrengen in een planningsproces, is het nodig dat op alle bestuurlijke niveaus een landschapsdeskundige/landschapsarchitect in het planningsteam meedoet en dat tot het laagste bestuurlijke niveau de drie keuzemogelijkheden open gehouden worden.

5.5 Uitvoeringsmethodieken

5.5.1 Inleiding

De kwaliteit van de aan te brengen bovenafdichting is behalve van de keuze van de afdichtingsmaterialen, de ontwerpeisen en de detailleringen, voor een groot deel afhankelijk van de kwaliteit van de uitvoering. Hierbij spelen een rol de inzet van materieel, behandeling van afdek materiaal, wijze van aanbrengen, jaargetijde van aanbrengen, snelheid in de opeenvolging van de diverse aan te brengen lagen, gevoeligheid voor weersinvloeden, etc. De kwaliteit zal tijdens het uitvoeringsproces door middel van geëigende controlemethodieken in het oog gehouden moeten worden door alle bij het bouwproces betrokken partners. Hierop wordt in par. 5.6 ingegaan.

Uitgaande van de centrale doelstelling, het voorkomen van infiltratie van regenwater naar het afval, zal de aandacht zich in eerste instantie concentreren op de afdichtingslaag. Voor een goed functioneren van deze afdichtingslaag, zullen evenwel ook eisen gesteld moeten worden aan de uitvoeringsmethodiek voor alle overige lagen die deel uitmaken van de afdichtingsconstructie. Uitvoeringsmethoden en uitvoeringsaspecten voor alle aan te brengen lagen zullen in deze paragraaf behandeld worden.

5.5.2 Steunlaag

Het voorkomen van onregelmatige zettingen in de afdeklaag begint al bij het opbouwen van het afvalstort. Hierbij moet nagestreefd worden onregelmatige klink te venniiden, onder andere door zorg te besteden aan de verdichting van het afval en de basislaag voor de afdichtende constructie (de bovenste 2 meter). Het afval moet daartoe laagsgewijs opgebouwd worden met een bulldozer/compactor en vervolgens extra verdicht worden met een compactor.

In de basislaag mogen geen scherpe en uitstekende delen voorkomen die tot in de steunlaag kunnen doordringen. Voor een goede waterkerende functie van de afdichtingslaag is het noodzakelijk dat deze goed verdicht kan worden. Dit betekent dat de steunlaag voldoende drukvastheid moet bezitten om een klankbodem te kunnen vormen bij verdichten van de bovenliggende afdichtingslaag. Het verkrijgen van een stevige steunlaag is weer afhankelijk van de stevigheid van de bovenste afvallagen. Indien de bovenste afvallagen veel slap, slecht doorlatend, weinig draagkrachtig of onvoldoende verdicht materiaal bevatten zal de steunlaag onvoldoende verdicht kunnen worden. De ervaringen tot nu toe laten zien dat naverdichten van het afvaloppervlak (na ontgraven van de tijdelijke afdeklaag) met een compactor noodzakelijk is. Bij het aanbrengen van de steunlaag en het verdichten ervan, kan door het waarnemen van het gedrag van deze laag (veren, schudden, golven, natte plekken) een goede indruk verkregen worden waar zich zwakke plekken zouden kunnen bevinden. Op deze plekken zal de steunlaag een grotere dikte behoeven om voor voldoende verdichting en klankbodem te kunnen zorgen. Na verdichten van de steunlaag moet de vastheid gecontroleerd worden. Dit kan gebeuren met een handsondeerapparaat dat bij bepaling van de conusweerstand minstens 1,5 mPa aan moet geven. Bij steilere hellingen zal meer dan 1,0 mPa moeilijk haalbaar zijn. Zoals in tabel 18 aangegeven moet een dikte van 0,30 meter als een minimum worden beschouwd. Indien een vochtige basislaag wordt aangetroffen zal tijdens de uitvoering moeten worden besloten de dikte van de steunlaag zeker 0,10 meter te vergroten. Extra maatregelen, zoals het vergroten van de steunlaagdikte op taluds steiler dan 1 : 2,5 à 3, zullen nodig kunnen zijn. Indien structureel onvoldoende conusweerstand bereikt kan worden, zullen extra zekerheden gevonden moeten worden in verhoging van het bentonietgehalte, vergroting van de dikte van de zandbentonietlaag, al of niet gecombineerd met het aanbrengen van een geotextiel tussen de afdichtingslaag en de steunlaag.

Naast de drukvastheid zijn ook klink en vlakheid belangrijk. Door het stort niet direkt na bereiken van de eindhoogte af te dichten, maar dit enige jaren te laten rusten, kan reeds een groot deel van de klink van het afval optreden. Eventuele onregelmatige klink kan aan het einde van de periode van overliggen uitgevlakt worden. Voldoende vlakheid is nodig omdat de afdichtingslaag met voldoende nauwkeurigheid de vereiste dikte moet kunnen halen. Onregelmatigheden in de vlakheid van de steunlaag leiden onherroepelijk tot een grotere spreiding in laagdikten van de afdichtingslaag en hienee mogelijk tot onvoldoende afdichting. Dit geldt met name voor die plaatsen waar als gevolg van een slappe ondergrond de steunlaag met extra dikte aangebracht is. Deze extra dikte zal daarom in principe aan de onderzijde van de steunlaag gesitueerd moeten zijn. De afwijking van de werkelijke bovenzijde van de aangebrachte steunlaag ten opzichte van de theoretisch bepaalde onderzijde van de afdichtingslaag, mag niet meer dan 2 cm bedragen (zie ook tabel 18).

Nadat de steunlaag aangebracht, verdicht, en vlak afgewerkt is, moeten opvolgende lagen snel aangebracht worden om erosie (met name op de taluds) en onwerkbare situaties te voorkomen. Bij het maken van uitvoerings-plannen voor afdichtingen dienen hierover tijdsbepalingen te worden opgenomen om mislukkingen te voorkomen. Uitgangspunt kan hierbij zijn per werkdag eenzelfde aantal m^2 oppervlak te voorzien van zowel afdichtingslaag, drainerende laag met drainage en ook afdeklaag. Een hoeveelheid van 600 à 1000 m^2 moet daarbij haalbaar worden verondersteld. Bij een gedeeltelijke overlap binnen een werkdag zal aan het eind van een werkdag niet meer dan 300 à 600 m^2 van elke laag vrij liggen (zie ook par. 5.5.7).

5.5.3 Ontgassingssysteem/afvoer verontreinigd water

De drains voor het eventueel gecombineerde ontgassings/percolaatafvoersysteem kunnen het beste pas na het aanbrengen van de steunlaag aangelegd worden om zodoende verzekerd te zijn van een rechte ligging en onbeschadigde buis. Bij een tweeledig functionerend drainagesysteem zal de aansluiting in de teen op afvoersystemen met dichte buis en waterslot moeten worden uitgevoerd om het aanzuigen van lucht te voorkomen.

Bij het aanbrengen van de drains dient men er van doordrongen te zijn, dat deze, na het aanbrengen van de afdichtingslaag, pas na ingrijpende maatregelen weer bereikbaar gemaakt kunnen worden. De keuze voor degelijke materialen en een kwalitatief hoogwaardige uitvoering zijn daarom van groot belang. Indien ten behoeve van het afvoeren van door de afdichting ingedrongen water en horizontaal uittredend percolaat wordt gekozen voor een drainagemat, dient aanbrengen daarom uiteraard op de basislaag plaats te vinden. Door een sterkte-eis te stellen aan de opsluitende geotextielen kan van de mat tevens een drukspreidende werking worden verwacht.

5.5.4 Afdichtingslaag

Voor de afdichting van een afvalstort is met name de uiteindelijke mate van waterdichtheid van belang. Wanneer voor een afdichting met natuurlijke materialen wordt gekozen, zal de wijze van uitvoeren zodanig moeten zijn dat de goede eigenschappen ten volle benut worden. Dit geldt temeer, daar met behulp van natuurlijke materialen bij de huidige stand van techniek en kennis geen volledig ondoorlatende afdichting kan worden verkregen.

Bij het in een laag aanbrengen van zandbentoniet of klei moet worden gezorgd voor:

- homogene samenstelling en gelijkmatige dikte
- optimaal vochtgehalte
- optimale verdichting
- vermijden van uitdroging, vochtverzadiging en beschadiging
- goede aansluiting op naastliggende vakken, taluds en eventueel drainagesysteem.

Voor het aanbrengen van de afdichtingslaag van zand/bentoniet bestaan twee methoden: de mixed-in-place-methode en de mixed-in-plant-methode.

Mixed-in-place

Het zand dat gebruikt wordt voor het zandbentonietmengsel wordt vooraf aangebracht op de steunlaag in de berekende dikte. Het bentoniet, dat aangevoerd kan worden in bulkwagens of containerbakken, wordt over het oppervlak verdeeld, waarna een freesmachine de bentoniet in het zand verwerkt. Voor een goede menging is noodzakelijk de menging in een aantal gangen te doen plaatsvinden. Na de vermenging wordt het zandbentonietmengsel met een waterwagen bevochtigd om een maximale proctordichtheid te kunnen verkrijgen. Hierna wordt de afdichtingslaag verdicht met een trilwals of schapenpootwals en daarna met een bandenwals.

Als bezwaren van de mix-in-place methode kunnen worden genoemd:

- homogeniteit van mengsel en menging zijn moeilijk te garanderen;
- moeilijk toepasbaar op hellingen; niet vrij van risico;
- menging wordt bemoeilijkt door slechte weersomstandigheden;
- voor dikkere zandbentonietlagen zijn meerdere procesgangen nodig, hetgeen de kosten doet toenemen en een lange werkperiode vraagt.

Gezien de noodzakelijke intensieve controle en de risico's voor kwaliteit en uitvoerend personeel bij toepassing op taluds, moet deze methode als minder gewenst worden beschouwd.

Mixed-in-plant

De menging van zand met bentoniet vooraf kan plaatsvinden in een menginstallatie. Voor menging in een omgebouwde asfaltinstallatie kunnen de zandzeven uit de zeefkast verwijderd worden, omdat afwegen van de fracties op de korrelgrootte niet nodig is. De bentoniet kan op dezelfde wijze toegevoegd worden als de vulstof bij de fabricage van asfalt. Door verhitting van de trommel moet eerst het zand gedroogd worden bij ca. 100 °C. Omdat droog zand en poedervormige bentoniet zich

moeilijk laten mengen moet tijdens het mengen weer water ingespoten worden in de menger.

Door middel van een pomp met tijdschakelaar kan het via de bitumenpijp ingespoten water automatisch worden gedoseerd. Op deze wijze kan de gewenste mengverhouding vrij precies geregeld worden. (ICW rapport 21, Hoeks et al). Bij het mengproces kunnen monsters van het gereede materiaal worden genomen en onderzocht op gehalte aan bentoniet en de vochtigheidsgraad, zodat controle in het veld minder omvangrijk zal zijn.

Het bentoniet-zandmengsel kan met vrachtwagens aangevoerd worden. De meest praktische, en constructief meest gewenste methode, is het mengsel vanaf de teen de helling op te werken. Dit kan met behulp van een bulldozer of een hydraulische kraan. Op deze wijze blijft de stabiliteit tijdens de uitvoering het best gehandhaafd en sluiten opeenvolgende vrachten goed op elkaar aan. Tevens wordt de grootste verdichting bereikt waar deze constructief gezien het meest gewenst is: aan de onderzijde van het talud. Verdichten van de afdichtingslaag zal in eerste instantie plaatsvinden door veelvuldig heen en weer rijden van een bulldozer of kraan (spreidmachine). Bij steile hellingen zal bij de keuze van de machine de ligging van het zwaartepunt in de overweging meegenomen moeten worden om kantelen te voorkomen. Het berijden door de machines geschiedt primair loodrecht op de helling omdat anders het gewicht van de machine zich ongelijkmatig verdeelt over de beide sporen. Tijdens het berijden van de helling door rupsmachines moet ernstige spoorvorming vermeden worden. Het gebruik van banden met hoge tanden of kammen is ongunstig voor een vlakke afwerking. In tweede instantie zal de afdichtingslaag met speciale verdichtingsmachines verdicht moeten worden. Hiervoor kunnen in aanmerking komen de trilwals, de trilrol en de bandenwals. Bij het bepalen van de zwaarte van de trilmachines moet de stijfheid van de steunlaag mede in beschouwing genomen worden. De voorkeur zal hierbij uitgaan naar voorverdichten/egaliseren met een stalen rol en naverdichten met een bandenwals.

Te zware trilmachines zullen hun trillingsenergie afgeven aan het afval waar dit plaatselijk aanleiding kan zijn tot wateroverspanningen en instabiliteit, of via een in alle richtingen verende vervonnende ondergrond naar de omgeving van de trilmachine. Het is vooraf moeilijk aan te geven welke trillingenergie het stort kan hebben. Tijdens en na het aanbrengen van de afdichtingslaag moet de dikte regelmatig gecontroleerd worden door middel van boren.

Weersomstandigheden

Beide methoden zijn in hoge mate gevoelig voor beïnvloeding door het weer. Bij de mixed-in-place-methode is het niet mogelijk tot een homogene verdeling van de bentoniet te komen als tijdens het strooien een harde wind staat. Voor beide methoden geldt dat regenval na het aanbrengen van de afdichtingslaag voor het bentoniet aanleiding zal zijn tot zwellen, waardoor het oppervlak glibberig en onbegaanbaar wordt. Dit verhindert weer het aanbrengen van opvolgende lagen. Bovendien neemt met name bij harde regenval en lange hellingen de kans op erosie en uitspoeling van lutumdeeltjes toe. Om deze redenen moet elke dagproductie zandbentoniet voor het einde

van de werkdag geheel zijn afgedekt met een van de opvolgende lagen. Deze argumenten gelden uiteraard ook voor een afdichtende laag van klei.

5.5.5 Teenconstructies

Een probleem bij de aanleg van de teenconstructie kan zijn de toevloed van verontreinigd percolaat, dat op deze plaats uit wil treden. Voor een kwalitatief goede uitvoering is het noodzakelijk dat het waterbezwaar zo gering mogelijk is, waardoor schoon gewerkt kan worden. Hiervoor is met name een goed gekozen werkvolgorde nodig. In het geval van een afvalstort met een onderafdichting zal percolaatdrainage op de bodem aanwezig zijn om langs de randen van de onderafdichting uittredend percolaat op te vangen. In de gewenste uitvoeringsperiode (voorjaar) zal het waterbezwaar vrij groot kunnen zijn.

Aangezien de goede werking van deze percolaatdrainage uiteraard op lange termijn niet volledig kan worden gegarandeerd, en bovendien de drains in de steunlaag aangesloten moeten worden op een afvoersysteem, is het noodzakelijk een percolaatverzameldrain aan te brengen langs de gehele teenlengte van het stort. Bij een stort met een onderafdichting dient deze drain bij uiteraard te worden aangebracht onder het niveau van de folierand in de stortkade. Zowel bij stortterreinen met als stortterreinen zonder onderafdichting voorkomt deze ringdrain het ontstaan van een hoge (schijn-) waterstand in de teenconstructie. Hiermee is in hoofdlijn de werkvolgorde voor de constructie van de teen bepaald:

- 1 voorbereiden aansluiting boven- op onderafdichting
- 2 plaatsen eventuele putten en aanleg ringdrain met afvoeren
- 3 aansluiten ringdrainage/riolering op hoofdafvoeren voor percolaat
- 4 aanbrengen percolaat/gasdrains of drainagemat in de teen
- 5 aansluiten taludpercolaat-drains op ringdrains
- 6 aanbrengen aanzet van steunlaag en installeren doorvoeringen
- 7 aanbrengen steunlaag c.a. over het stort
- 8 aanbrengen afdichtingsconstructies nabij de teen

5.5.6 Ontwateringssysteem (boven de afdichting)

In het algemeen zal het niet mogelijk zijn om met draineermachines op het stort te werken. Wel kan men met kleinere machines sleuven graven, waarna de drains met de hand worden gelegd. Het is ook mogelijk om de drains uit te leggen op de afdichtingslaag voordat men de drainlaag opbrengt. Daarmee wordt vermeden dat later nog een drainsleuf moet worden gegraven met kans op beschadiging van de afdichtingslaag. Uiteraard moet bij het opbrengen van de drainagelaag en de afdekgrond de nodige voorzichtigheid in acht worden genomen om de gelegde drains niet te beschadigen. De eerstgenoemde methode blijkt in de praktijk beter te voldoen. Als alternatief voor deze bovendrainage kan het toepassen van een

drainagemat overwogen worden, waardoor wellicht de dikte van de drainagelaag (zie 5.5.7) kan worden beperkt tot 0,30 m.

5.5.7 Drainagelaag

Het aanbrengen van de drainagelaag moet met de nodige voorzichtigheid geschieden. De afdichtingslaag mag niet beschadigd worden. Ook hier spelen de weersomstandigheden een belangrijke rol. Bij regenval kan de zand/bentonietlaag glibberig worden, wat gevolgen kan hebben voor het transport en gevaar kan opleveren van afschuiven van het zandpakket. Rekening houdend met de zeer slecht doorlatende afdichtingslaag en de keuze voor niet-cohesief materiaal voor de drainlaag, bestaat de mogelijkheid voor micro-instabiliteit en erosie bij langdurige resp. hevige regenval. Het ontwerp van het drainagestelsel gaat uit van een maximale opbolling die ongeveer gelijk is aan de laagdikte van de drainlaag, waardoor er onvoldoende veiligheid aanwezig is in situaties van hevige of langdurige regenval.

Het is daarom noodzakelijk om zo snel mogelijk na het aanbrengen van de drainlaag de afdeklaag van grond aan te brengen, die een groter waterbergend vermogen heeft en een grotere weerstand tegen instabiliteit. In uitvoeringsplannen kan worden opgenomen dat de drainagelaag niet langer dan 1 à 2 etmalen onafgedekt mag blijven. Een kortere periode zal bij toepassen van een ontwateringssysteem van buizen niet haalbaar zijn. Indien een drainagesysteem van buizen wordt toegepast moet een laagdikte van 0,30 meter voor de drainagelaag als minimum worden beschouwd. Bij het verdichten van de drainagelaag dient op hellingen een conusweerstand bij het sondeerapparaat van 1,5 mPa bereikt te worden en op vlakke gedeelten tenminste 1,8 mPa.

5.5.8 Bewortelingslaag

Om een geleidelijke overgang tot stand te brengen tussen de drainlaag en de teelaarde, wordt geadviseerd eerst 0,25 m teelaarde op te brengen en deze met een cultivator te woelen met max. 0,10 m van het onderliggende drainzand. Daardoor ontstaat er een overgangslaag die een verstoring van de verticale waterbeweging en het ontstaan van schijnwaterpiegels bij opbolling tussen de drains voorkomt.

De afdekgrond moet zo droog mogelijk worden verwerkt om sterke verdichting bij het aanbrengen van de laag te vermijden. Het aanbrengen van de overige afdekgrond mag niet plaatsvinden bij regenachtig weer, omdat dit gevaar in kan houden voor blijvende verslechtering van de structuur. Dit leidt voorts tot een slechte doorlatendheid en kan aanleiding geven tot oppervlakte-erosie. Dit zal betekenen dat de opgebrachte afdekgrond na aanbrengen moet worden losgewoeld om de verdichting als gevolg van de gebruikte voertuigen op te heffen.

Oppervlakte-erosie kan verminderd worden door na het op dikte brengen van de bovenlaag deze met een ploeg, cultivator of triltandcultivator met de hoogtelijnen mee los te maken om te

voorkomen dat er in de lengterichting van de helling geulen ontstaan, waarlangs oppervlakkig afstromend water naar beneden kan spoelen. Bij het frezen kan eventueel compost mee ingewerkt worden. Ter voorkoming van oppervlakte-erosie kan ook oven@ogen worden voor de bovenste laag heidecompost te gebruiken, dat een grote mate van erosiebestendigheid heeft. Overige mogelijkheden ter voorkoming van erosie zijn in par. 5.4 aangegeven. Zoals eerder aangegeven, is de meest effectieve manier om in dit stadium erosie te voorkomen gelegen in het zorgdragen voor het gereedkomen van de bovenafdichting tegen het eind van de zomer. Het stort kan dan groen de winter in.

Als gevolg van het inklinken van de teelaardelaag moet deze met enige overhoogte (ca. 10%) aangelegd worden. Voor de vormgeving van de taluds in zettingsgevoelige gebieden is het te overwegen om hierbij op 2/3 van de hoogte enige zeeg aan te brengen, om te voorkomen dat als gevolg van zakkings een hol talud ontstaat.

Het ontbreken van samenhang in de teelaardelaag kort na aanbrengen en de geringe cohesie van de drainlaag, noodzaken tot een goed functionerende ontwatering om erosie en afschuiving in de beginfase (eerste 1 à 2 jaar) te vermijden.

5.6 Kwaliteitszorg

5.6.1 Kwaliteitszorg

Onder kwaliteitszorg wordt in dit verband verstaan het proces om het eindprodukt in de vereiste kwaliteit te leveren. De volledige kwaliteitszorg omvat de kwaliteitssystemen zowel voor het ontwerpen/ontwikkelen als het vervaardigen, controleren, beoordelen en de nazorg. De beoordelingscriteria voor de afdichtingslaag en voor de opbouw van de eindafdeklaag zijn reeds vermeld in par 3.6 en 4.6. In het rapport "Vooronderzoek", zoals beschreven in hoofdstuk 2 en 3, is opgenomen het laboratoriumonderzoek en de wijze van beoordeling van de toepasbaarheid van aangeboden materialen. Dit vooronderzoek stelt de opdrachtgever in staat zich vooraf een oordeel te vormen over de bereikbare kwaliteit met de beschikbare materialen, waaruit een globaal ontwerp voor de afdichtingslaag kan worden gemaakt. In overleg met de uitvoerder zal de opdrachtgever op basis van bestaande ervaring en rekening houdend met recente ontwikkelingen tot een plan van uitvoering komen en aansluitend daaraan tot contractvorming.

In het contract zal het kwaliteitssysteem moeten zijn vastgelegd voor het vervaardigen, controleren, beoordelen en de nazorg. In dit kwaliteitssysteem, waarvoor als richtlijn de NEN-150-9000 serie (9000-9004) kan worden gehanteerd, dienen de volgende aspecten te worden geformuleerd:

- 1 verantwoordelijke partijen en de taak van elk der partijen in het kwaliteitssysteem.
- 2 de parameters waarop moet worden gecontroleerd en de frequentie daarvan.
- 3 de wijze waarop beproevingen en keuringen plaatshebben.

- 4 de wijze waarop de eindkeuring en beproeving zal plaatshebben.
- 5 kwaliteitsregistratie.
- 6 het beoordelen van toeleveranciers en de inkoopdocumenten.
- 7 identificatie en naspeurbaarheid van produkten.
- 8 keurings-, meet- en beproevingsmiddelen.
- 9 Procesbeheersing, vast te stellen aan de hand van een proefvak.
- 10 Beheersing van produkten met tekortkomingen.
- 11 Corrigerende maatregelen.

De kwaliteitszorg moet gericht zijn op het verzamelen van voldoende documenten en gegevens, zodat in de verre toekomst kan worden beoordeeld in hoeverre de kwaliteit in stand blijft of zonodig verbeterd kan worden.

5.6.2 Kwaliteitssysteem

Hieronder is een beschreven hoe het (door de opdrachtgever op te stellen) kwaliteitssysteem in de uitvoeringsfase kan worden gehanteerd. Bij de totstandkoming van een werk zijn in hoofdzaak twee partijen betrokken, te weten de opdrachtgever en de uitvoerder (aannemer of leverancier). In de grond-, weg- en waterbouwsector wordt de opdrachtgever meestal vertegenwoordigd door een bouwdirectie die namens hem optreedt. In de situatie van afdekking van stortterreinen speelt ook de vergunningverlenende instantie een belangrijke rol, doch contractueel alleen via de opdrachtgever. In het navolgende wordt er daarom vanuitgegaan dat de vergunningverlenende instantie het beleid samen met de opdrachtgever bepaalt en de opdrachtgever op basis van het eindrapport van de kwaliteitszorg de eindkeuring heeft. Hij is tevens verantwoordelijk voor de instandhouding van het afgeleverde werk.

Het kwaliteitssysteem dient in de uitvoeringsplannen nader door de uitvoerder te worden uitgewerkt. De opdrachtgever geeft voor aanvang van het werk aan, welke personen de controles en keuringen die door de uitvoerder moeten worden verricht, zullen verifiëren, dan wel zelf controles zullen uitvoeren. Deze personen zijn daarin vertegenwoordigers en adviseurs van de opdrachtgever. De uitvoerder is de partij die het werk tot stand moet brengen inclusief het grootste deel van de daadwerkelijke kwaliteitszorg, en is daarmee in hoge mate verantwoordelijk voor de kwaliteit van het afgeleverde werk. De opdrachtgever (de directievoerende personen) verifieert de procedure van de uitvoerder met name ten aanzien van het proces van controle en keuring.

De verantwoordelijkheden van de partijen zijn in de G.W.W.-sector juridisch goed vastgelegd wanneer in het contract de Uniforme Administratieve voorwaarden (U.A.V.) 1989 van toepassing worden verklaard.

5.6.3 De parameters voor kwaliteitscontrole en de frequentie van de controle

De opdrachtgever bepaalt aan de hand van het vooronderzoek en de te bereiken resultaten de parameters waarop, en de frequentie waarin (monster-)onderzoek moet plaats hebben en de eisen waaraan de resultaten van het (monster)onderzoek moeten voldoen. Bij het bepalen van de frequentie dient een afweging te worden gemaakt tussen de risico's die statistisch worden genomen en de kosten die met de diverse (monster-)onderzoeken zijn gemoeid. Aangezien een langdurige afsluiting van het stort vereist is, dient de risico-factor laag gehouden te worden.

Vooraf dient door inventarisatie te worden bepaald welke informatie, te verkrijgen uit controle en onderzoek, voor de diverse betrokkenen van belang is. De controle zal tevens een betrouwbaar beeld moeten geven van het feitelijke productieproces, waarbij het om de volgende aandachtsgebieden gaat:

- Zijn de verwachtingen en berekeningen waarvan bij ontwerp uit is gegaan achteraf juist gebleken?
- Is op het juiste moment gehandeld en maken de verschillende werkzaamheden voldoende voortgang?
- Voldoen de verwerkte of vervaardigde materialen aan de vooraf gestelde kwaliteitseisen en worden deze op de vereiste wijze verwerkt?
- Zijn de in het bestek en door het beleid gestelde normen juist?

In tabel 22 is een voorstel weergegeven van de uit te voeren controle en keuringen op kwaliteit en de frequentie van de diverse proeven/metingen. Tevens is de controle- of beproevingsmethode aangegeven.

Ervaringen met hierna beschreven proefvelden en met toepassingen in de praktijk zullen mogelijk aanleiding geven tot uitbreiding of aanpassing van het overzicht in de tabel.

5.6.4 Keuring en beproeving

De uitvoerder stelt aan de hand van het in het contract door de opdrachtgever omschreven kwaliteitssysteem een kwaliteitsplan op, waarin hij de procedures die hij zal hanteren om aan de eisen en voorschriften, waarbij inbegrepen de keuring en beproeving, te kunnen voldoen, nauwkeurig omschrijft.

5.6.4.1 Produkt keuring

A Ingangskeuring en beproeving

- 1 De uitvoerder moet bewerkstelligen dat ontvangen producten niet worden gebruikt of verwerkt (tenzij onder omstandigheden zoals omschreven onder a 2), voordat door keuring of op andere wijze is vastgesteld dat deze producten voldoen aan de gestelde eisen. Deze verificatie moet overeenkomen met het kwaliteitsplan.

Tabel 22 Controle op kwaliteit bij de aanleg van een afdichtingslaag.

Beoordeling van: (Parameter)	Kontrole methode	Kwaliteit	Frequentie
1 Granulaire samenstelling van steunlaag en drainagelaag	- BUGO - oogtoezicht - indirect	1)	per 2500 m ³
2 Watergehalte	- watergehaltebepaling	2)	per 500 m ³
3 Verdichting	- droogvolumegegewicht - conusweerstand - isotopen meting?	3)	per 500 m ³
4 Bentonietgehalte	- m.b.v. bak of zeil - permanente meting in installatie		elke 1000 m ²
5 Granulaire samenstelling van afdichtingsmateriaal	- BUGO	1)	per 1000m ³
6 Laagdikte van de diverse lagen	- waterpassing vooraf en achteraf - indirect - meting op geotextiel	nvt.	per 100m ²
7 Doorlatendheids-test	"falling head" in het veld	1)	per 2000 m ²

1) Kwaliteitseisen zijn vastgelegd in het vooronderzoek

2) Zie 1), Norm: $w > w(\text{optimaal})$

N.B. Indien het watergehalte door weersomstandigheden te hoog is, dan is het toevoegen van bentoniet noodzakelijk.

3) Norm afdichtingslaag: $p > 97 \% p(\text{proctor})$

Norm steunlaag: $p > 95 \% p(\text{proctor})$

2 Indien om dwingende produktietechnische redenen ontvangen produkten zonder keuring worden vrijgegeven, moeten deze produkten goed onderscheiden en geregistreerd worden. Dit laatste is noodzakelijk ten einde deze produkten onmiddelijk te kunnen terugroepen en vervangen, indien later blijkt dat deze niet voldoen aan de gestelde eisen.

3 Bij de bepaling van de omvang en de aard van de ingangskeuring behoort rekening te worden gehouden met de mate van beheersing bij de toeleverancier en met het bewijsmateriaal waannee wordt aangetoond dat de geëiste kwaliteit bereikt is.

B Tussentijdse keuring en beproeving

1 De uitvoerder moet in samenwerking met de opdrachtgever het produkt keuren, beproeven en identificeren zoals is vereist volgens het kwaliteitsplan.

2 Door procesbewaking en methoden van beheersing vaststellen of het produkt voldoet aan de gestelde eisen.

3 Produkten die niet aan de gestelde eisen voldoen identificeren, of direct afvoeren/vernietigen.

C Eindkeuring en -beproeving

1 In het kwaliteitsplan voor de eindkeuring en -beproeving moet de eis staan dat alle voorgeschreven keuringen en beproevingen zijn uitgevoerd en dat de resultaten overeen-

- komen met de gestelde eisen. Dit omvat ook de ingangskeuringen en de tussentijdse keuringen en beproevingen.
- 2 De uitvoerder moet alle eindkeuringen en beproevingen uitvoeren volgens het kwaliteitsplan om het volledige bewijs te kunnen leveren dat het gerede produkt inderdaad aan de gestelde eisen voldoet.
 - 3 Het werk zal niet worden opgeleverd voordat alle handelingen vermeld in het kwaliteitsplan naar behoren zijn voltooid en alle bijbehorende gegevens en documentatie beschikbaar en door de opdrachtgever zijn goedgekeurd.

D Registratie van keuringen en beproevingen

- 1 De uitvoerder moet over een registratie beschikken en deze op peil houden om hiennede het bewijs te leveren dat de desbetreffende produkten zijn gekeurd en/of beproefd volgens de omschreven aanvaardingscriteria. Zie ook "Kwaliteitsregistratie"

5.6.4.2 Kwaliteitsregistratie

De uitvoerder moet over procedures beschikken en deze op peil houden voor het kenmerken, het verzamelen, het indexeren, de archivering, het bewaren, het op peil houden van alle kwaliteitsgegevens gedurende de werkperiode en de gegevens daarna overdragen aan de opdrachtgever. De kwaliteitsregistratie moet vervolgens worden bijgehouden door de opdrachtgever zodat kan worden aangetoond dat de voorgeschreven kwaliteit is bereikt en het kwaliteitssysteem in de praktijk doeltreffend werkt. De van toepassing zijnde kwaliteitsgegevens van toeleveranciers moeten deel uitmaken van deze registratie.

Alle kwaliteitsgegevens moeten goed leesbaar zijn en het moet duidelijk zijn bij welk produkt deze behoren. Kwaliteitsgegevens moeten zodanig bewaard worden dat deze gemakkelijk terug te vinden zijn. Voor de ruimten waarin deze gegevens zich bevinden, moeten zodanige maatregelen worden getroffen dat achteruitgang of beschadiging tot een minimum wordt beperkt en het verloren raken wordt voorkomen. De kwaliteitsgegevens moeten voor beoordeling door de daartoe bevoegde instanties ter beschikking zijn.

5.6.4.3 Het beoordelen van toeleveranciers en de inkoopdocumenten

A Het beoordelen van toeleveranciers

De uitvoerder moet toeleveranciers kiezen op basis van hun vermogen tot het kunnen voldoen aan de contractuele voorwaarden betreffende het toe te leveren produkt, met inbegrip van de kwaliteitseisen. De uitvoerder moet aanvaardbare toeleveranciers registreren en deze registratie op peil houden.

De keuze van toeleveranciers, alsmede de aard en mate van het door de leverancier uitgevoerde toezicht, wordt bepaald door

het soort produkt en voorzover van toepassing door gegevens betreffende zijn voorheen getoond vermogen en prestaties. De uitvoerder moet bewerkstelligen dat de beheersing van het kwaliteitssysteem van de toeleverancier doeltreffend is.

B Inkoopgegevens

Inkoopdocumenten moeten de bestelgegevens van de te leveren produkten volledig en ondubbelzinnig omschrijven, waarbij indien van toepassing worden vermeld:

- 1 het type, de klasse, de uitvoering, de soort of een andere nauwkeurig omschreven aanduiding;
- 2 de titel of andere vormen van aanduiding en de van toepassing zijnde versie en verdere van belang zijnde technische gegevens. Hiertoe behoren ook eisen die gesteld worden aan de goedkeuring of de kwalificatie van het desbetreffende produkt.
- 3 de titel, het nummer en de geldige versie van de van toepassing zijnde norm van het kwaliteitssysteem voor het onderhavige produkt.

Voordat inkoopdocumenten voor gebruik worden vrijgegeven, moet de uitvoerder de geschiktheid op basis van de hieraan gestelde eisen beoordelen en goedkeuren.

C Verificatie van ingekochte produkten

De opdrachtgever of zijn vertegenwoordiger moet het recht hebben bij de toeleverancier of bij ontvangst te verifiëren of de ingekochte produkten aan de gestelde eisen voldoen. De door de opdrachtgever uitgevoerde verificatie ontslaat de leverancier niet van de verantwoordelijkheid voor het leveren van produkten die aan de eisen voldoen, noch sluit het latere afkeur uit. Verificatie door opdrachtgever (of zijn vertegenwoordiger) bij de toeleverancier, mag door de uitvoerder niet worden gebruikt als een bewijs van een doeltreffende beheersing van de kwaliteit bij de toeleverancier.

D Identificatie en naspeurbaarheid van produkten

De uitvoerder moet, waar nodig, over procedures beschikken en deze op peil houden voor de identificatie van produkten op basis van tekeningen of andere documenten. Deze identificatie van produkten moet gedurende alle stadia van het werk mogelijk zijn. Binnen de begrenzingen van de eis tot naspeurbaarheid dienen de afzonderlijke produkten of partijen te worden voorzien van een eigen identificatie. Deze identificatie moet worden geregistreerd.

5.6.4.4 Keurings-, meet- en beproevingsmiddelen

De uitvoerder of het in te schakelen laboratorium moet zorgen voor de beheersing, de kalibratie en het onderhoud van keurings-, meet- en beproevingsmiddelen. Deze middelen moeten zodanig worden gebruikt dat de meetonzekerheid bekend is en zodanig worden gekozen dat de nauwkeurigheid van deze middelen afgestemd is op het meetdoel. De uitvoerder moet:

a aan de hand van de contractgegevens vaststellen welke metingen moeten worden verricht, met welke nauwkeurigheid en

de daarbij passende keurings-, meet- en beproevingsmiddelen kiezen;

b de geldigheid van eerder uitgevoerde keuringen en beproevingen nagaan en dit schriftelijk vastleggen indien geconstateerd wordt dat keurings-, meet- en geproevingsmiddelen niet meer voldoen aan de gestelde eisen ten aanzien van kalibratie;

c bewerkstelligen dat de omgevingsomstandigheden geschikt zijn voor het juist kunnen uitvoeren van de desbetreffende kalibraties, in(af)-stellingen, keuringen, metingen en beproevingen;

d bewerkstelligen dat voor het behandelen, het beschermen en het bewaren van de verschillende keurings-, meet- en beproevingsmiddelen zodanige maatregelen zijn getroffen dat de vereiste nauwkeurigheid en bruikbaarheid van deze middelen op peil blijft;

e keurings-, meet- en beproevingsvoorzieningen beveiligen tegen veranderingen waardoor hun juiste instelling teniet wordt gedaan, zowel wat de middelen zelf, als de programmatuur betreft.

5.6.5 Procesbeheersing

Algemeen

De uitvoerder moet de processen van vervaardiging vaststellen en plannen die direct invloed hebben op de kwaliteit, en moet bewerkstelligen dat deze processen onder beheerste omstandigheden plaatsvinden. Beheerste omstandigheden moeten de volgende elementen inhouden:

- 1 op schrift gestelde werkvoorschriften die de wijze van vervaardiging van het produkt beschrijven, indien het ontbreken hiervan een nadelige invloed zou kunnen hebben op:
 - de kwaliteit;
 - het gebruik van passende fabricagemiddelen;
 - de werkomstandigheden;
 - het voldoen aan bepaalde normen of voorschriften;
 - het voldoen aan bepaalde kwaliteitsplannen;
- 2 de bewaking en beheersing van daartoe in aanmerking komende proces- en produktkenmerken gedurende de vervaardiging;
- 3 de goedkeuring van processen en de gebruikte middelen of uitrusting;
- 4 eisen voor goed vakmanschap door middel van op schrift gestelde criteria of door representatieve werken, voorzover dit praktisch haalbaar is.

De controle tijdens de uitvoering moet zich met name richten op de volgende onderdelen:

- materiaaleisen

Nagegaan moet worden of de aangevoerde materialen voldoen aan de eisen met betrekking tot samenstelling en homogeniteiten, en vergelijkbaar zijn met de materialen, die tijdens het vooronderzoek zijn onderzocht. De controle met betrekking tot de samenstelling kan plaatsvinden door enkele steekproeven te nemen. De genomen monsters moeten worden gestoken onder toezicht van de analyserende deskundige functionaris, waarbij het onderzoek gericht moet zijn op granulaire samenstelling, organische stofgehalte en kalkgehalte.

- watergehalte en de mate van verdichting van natuurlijke materialen Het watergehalte evenals de verdichting dient steekproefsgewijs te worden onderzocht door ringmonsters (met bekend volume, bijvoorbeeld 100 cm³) te nemen, deze te drogen bij 105 °C, en vervolgens te wegen voor vaststelling van het droog volumegewicht. Uiteraard zullen de gaten in de laag, ontstaan als gevolg van de bemonstering, weer zorgvuldig opgevuld en afgedicht moeten worden. Waarschijnlijk zal het in de toekomst mogelijk worden de dichtheid in het veld te controleren met speciale apparatuur zonder dat de monsters uit de laag hoeven te worden genomen. Momenteel is de betrouwbaarheid van deze metingen echter nog onvoldoende. Methoden, waarbij de afdichtingslaag intact blijft genieten de voorkeur, mits niets afgedaan wordt aan de betrouwbaarheid van de gegevens. De wijze waarop de verdichting plaatsvindt, zal vastgelegd moeten zijn in de besteksvoorwaarden, zodat de kwaliteit van de werkzaamheden door zelfcontrole gewaarborgd is. In verband met de lange tijdsduur van waterdoorlatendheidsproeven wordt in deze protocollen voorgesteld de mate van controle van de afdichtingslaag af te laten hangen van de vraag of men geïnteresseerd is in een toetsing van de werkelijkheid aan de te stellen lekkagenorm (bijvoorbeeld 20 mm/jaar). Indirect kan men uit de voorgaande kwaliteitsnormcontroles, en de resultaten van het doorlatendheidsonderzoek, een controle uitvoeren op de waterdichtheid.

Proefveld

Aangezien de bovenafdichtingsconstructie voorshands tot een z.g. bijzonder proces moet worden gerekend, wordt geadviseerd aan deze werken de aanleg van een proefveld vooraf te laten gaan. Hiermee wordt praktijkervaring opgedaan die deels nog ontbreekt. Geschat wordt dat er de komende 5 à 10 jaar proefvelden voor uiteenlopende situaties nodig zijn. Onder een bijzonder proces wordt in dit verband verstaan een proces (aanlegproces) waarvan de uitkomst door het keuren of beproeven van materialen niet volledig is te verifiëren en vooraf niet als volledig beheersbaar kan worden aangemerkt. Gebreken of onvolkomenheden kunnen hierbij pas in de praktijk blijken, eventueel zelfs na verloop van tijd.

Aan de hand van een proefveld moet worden aangetoond dat de materiaalkeuze en het proces van aanleg geschikt zijn om redelijkerwijs het gestelde doel te kunnen bereiken. Zo zal in het veld moeten worden getoetst of de door het vooronderzoek in het laboratorium aangegeven randvoorwaarden haalbaar zijn. De proefvelden zullen met name uitsluitel moeten geven over de toe te passen procedure op taluds van stortplaatsen. Bij grote variatie van taluds zullen derhalve meer proefvelden nodig kunnen zijn. De breedte van het proefveld moet minstens het viervoudige van de breedte van de verdichtingsmachines bedragen en een voldoende lengte hebben om de toe te passen optimale verdichtingssnelheid te kunnen bepalen. Gedacht wordt aan afmetingen van ca 20 x 40 m. Op het proefveld dient een beproevingsprocedure te worden gevolgd overeenkomstige tabel 21, met dien verstande dat de frequentie wordt bepaald door het tijdens de uitvoering van het proefvak toegepaste aantal processen.

Na beproeving in het veld moet duidelijkheid ontstaan over de navolgende punten:

- beschrijving van de verdichtingsmethode;

- inzet van verdichtingsmaterieel;
- aantal verdichtingsgangen;
- bedrijfssnelheid van het verdichtingsmaterieel;
- dikte van de verdichte/onverdichte laag;
- mengmethode;
- weersomstandigheden;
- aantal aan te brengen lagen.

Mede aan de hand van de beproeving ten aanzien van de doorlatendheid, watergehalte en proctordichtheid, en metingen aan gestoken monsters, kunnen dan bindende criteria (bestek) opgesteld worden voor het aanbrengen van de afdichtingslaag c.q. steunlaag.

Een voorbeeld van een op te zetten proefvak op een helling is weergegeven in fig. 30.

5.6.6 Beheersing van tekortkomingen

Algemeen

De beoordeling en afhandeling van gedeelten met tekortkomingen moet worden vastgelegd. De beoordeling dient door de opdrachtgever of zijn plaatsvervanger plaats te vinden waarbij wordt vastgesteld of de tekortkomingen:

- worden hersteld of onder speciale voorwaarden worden aanvaard;
- leiden tot afkeuring en vernieuwing noodzakelijk is.

Eventueel verrichte herstellingen moeten opnieuw worden gekeurd en de gevolgde procedure dient volledig te worden beschreven en geregistreerd. Voor de vernieuwing van afgekeurde vakken dienen eventueel aanvullende eisen te worden geformuleerd, zoals met betrekking tot aansluitingen op goedgekeurde vakken. Dit dient reeds zoveel mogelijk plaats te hebben na uitvoering van het (de) proefveld(en).

Corrigerende maatregelen

De uitvoerder moet over op schrift gestelde procedures beschikken en deze op peil houden voor:

- a het onderzoeken van de oorzaak van tekortkomingen, alsmede voor het treffen van corrigerende maatregelen om te voorkomen dat deze tekortkomingen zich herhalen;
- b het treffen van voorzorgsmaatregelen voor de behandeling van problemen, afgestemd op de desbetreffende risico's;
- c het invoeren en de registratie van wijzigingen van bestaande procedures als gevolg van de getroffen corrigerende maatregelen.

5.7 Meervoudige afdichtingen

5.7.1 Inleiding

In het voorgaande is uitgegaan van het toepassen van natuurlijke materialen ten behoeve van bovenafdichtingen. Daarbij is naar voren gekomen dat een zekere mate van doorlatendheid (ca. 20 mm/jaar) eigen is aan de onderzochte materialen. Door

veldomstandigheden (knaagdieren, worteldoorgroei, verzakkingen ed.) kan de doorlatendheid plaatselijk toenemen.

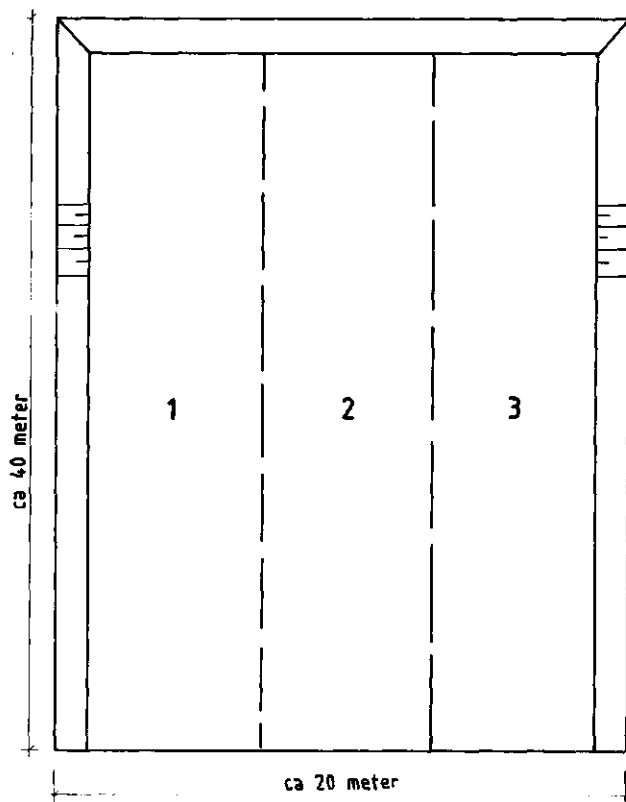
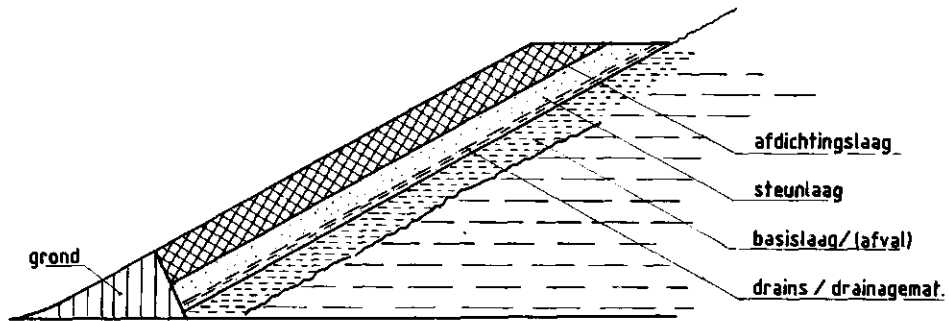


Fig. 30 Principe van een proefveld met 3 vakken ten behoeve van verschillende verdichtingsmethoden.

Als algemeen bezwaar van het toepassen van een enkelvoudige afdichting van natuurlijke materialen kan bovendien worden

opgemerkt dat de mogelijkheden tot controle van het gedrag van de afdichting op langere termijn beperkt zijn. Een deel van het door de afdichting geïnfiltreerd regenwater zal door de steunlaag naar de teen van een helling worden gevoerd of in het afval dringen. Wanneer niet het gehele bergend vermogen van het afval was benut, zal dit water mogelijk niet meer als percolaat uittreden. Indien deze verzadiging tot veldcapaciteit wel aanwezig was zal het deels horizontaal uittreden, deels verticaal naar het grondwater worden afgevoerd. In deze gevallen zal aan de teen van de hellingen minder water worden gemeten dan werkelijk door de afdichting is gepasseerd.

Anderszins kan, wanneer nagenoeg alle door de afdichting ingetreden regenwater wel de teen bereikt en bovendien het afval nog percolaat nalevert, de aan de teen gemeten hoeveelheid groter zijn dan de werkelijk ingedrongen hoeveelheid regenwater. Aangezien daarnaast moeilijk vast te stellen is hoeveel water in een bepaald jaar ingetreden is (zie ook par. 6.2.2 waterbalansmetingen) mag gesteld worden dat controle op lekkages niet goed mogelijk is. Indien water dat door de eerste afdichtingslaag van natuurlijk materiaal infiltreert (ca. 20 mm/jaar), op een tweede afdichtingslaag naar de teen wordt afgevoerd en daar gemeten wordt, ontstaat een veel beter beeld van de werkelijke lekkage van de bovenste afdichtingslaag. De tweede laag kan ook lekken hebben, zodat de opgevangen hoeveelheid water geringer kan zijn dan de lekkage door de eerste afdichtingslaag. Een meervoudige afdichting verruimt de controle op het functioneren van de eerste afdichtende laag en vermindert mogelijk de percolatie van neerslag naar het stort.

5.7.2 Combinaties van afdichtingslagen

Gezien de beperkte ervaringen met afdichtingsconstructies zal de beschrijving van mogelijke combinaties van afdichtingen worden beperkt tot het toepassen van twee afdichtingslagen. Daarbij kan worden aangevoerd dat gezien de hoge mate van afdichting die kan worden bereikt door een zandbentoniet-afdichting en een verdere afdichting door een tweede laag, het zeer onwaarschijnlijk is dat een derde laag nodig zou zijn. In principe kunnen dan worden toegepast:

- een combinatie van twee lagen van natuurlijk materiaal;
- een laag van natuurlijk materiaal samen met een kunststof-afdichting;
- een combinatie van twee kunststof afdichtingen.

De beschrijving van twee kunststof afdichtingen valt buiten het kader van deze richtlijn. Constructief gezien zal een tweede afdichtende laag gesitueerd dienen te worden tussen de steunlaag en de eerste afdichtende laag. De ontwateringsvoorzieningen, de dikte van de steunlaag en de drainerende laag boven de eerste afdichting zullen, aangezien de functies daarvan niet wijzigen, op identieke wijze worden gedimensioneerd als beschreven is voor een enkele afdichting. Zoals eerder aangegeven wordt de dikte van de afdeklaag bepaald door het vochtleverend vermogen en de voorziene begroeiing van gras of beplanting. Het toepassen van dubbele of andersoortige afdichtingslagen heeft daarop geen invloed. Bij een folie als bovenste afdichtingslaag kan afdekking met een geotextiel

zonder zand- of grondlagen worden overwogen. De bereikbaarheid voor reparaties e.d. is optimaal, en de kosten daarvan zullen zeer laag zijn. Een dergelijke oplossing zal evenwel niet in elk landschap inpasbaar zijn, terwijl daarop vrijwel geen enkele nuttige gebruiksvorm denkbaar is. Waar deze oplossing haalbaar wordt geacht zal een nadere inventarisatie nodig zijn omtrent het gedrag van folie bij blootstelling aan licht en lucht op langere termijn.

Afdichtingscombinatie van natuurlijke materialen

In hoofdstuk 4 is het toepassen van meer dan een laag zandbentoniet en het effect van een aanzienlijk dikkere laag beschreven. Daaruit blijkt dat de ondoorlatendheid enigszins verbetert, doch dat geen structurele verbetering kan worden bereikt. Op basis van praktische en financiële overwegingen kan worden gesteld dat het laagsgewijs aanbrengen van een zandof zandbentonietlaag dient plaats te vinden in een dikte van tenminste 0,10 m. Daarnaast geldt dat bij toepassen van een drainagesysteem van buizen in een zandlaag, voor deze laag een minimale dikte geldt van 0,30 meter om beschadiging door rupsvoertuigen te voorkomen. Bij toepassen van een drainagemat in een scheidende zandlaag kan de laag dunner zijn; voorgesteld wordt dan uit te gaan van een dikte van 0,15 meter. Gezien de geringe infiltratie door de eerste afdichtende laag behoeft in een zandlaag tussen twee afdichtingslagen of in de steunlaag geen draineerzand te worden toegepast, maar kan met cunetzand volgens "Eisen", 1978 worden volstaan. Bij toepassen van een dubbele zandbentonietafdichting kan de samenstelling van de beide afdichtingslagen in principe gelijk zijn. De toeslagen op het bentonietgehalte volgens tabel 17 zullen voor beide lagen blijven gelden. Ten aanzien van de diktetoeslagen kan gedeeltelijk een verdeling plaatsvinden, waarbij de toeslag ten gevolge van te verwachten "klink" (nr. 1.1 t/m 3.2) en volgens punt 5 (dikte steunlaag) alleen gelden voor de tweede dichtende laag. De toeslagen met betrekking tot "verdichten" (4.1 t/m 4.3), "uitvoering" (nr. 6 t/m 8) zullen voor beide lagen van toepassing zijn.

Afdichtingscombinatie van kunststoffolie met een laag van natuurlijk materiaal

Bij een combinatie van folie met een zandbentonietlaag zal, zolang de folie dicht is, beter aan het uitgangspunt ten aanzien van absolute dichtheid worden voldaan dan bij twee lagen zandbentoniet. Hoewel aannemelijk is, dat een folie in een bovenafdichting een langere levensduur zal hebben dan in een onderafdichting, moet worden gesteld dat hierover geen zekerheid is te geven. Als indicatie zou voorlopig gehanteerd kunnen worden een 1,5 à 2 maal zo lange levensduur als bij toepassing in een onderafdichting, waarvoor veelal een periode van ca. 40 jaar wordt aangenomen. Bij deze afdichtingscombinatie zal de keuze gemaakt moeten worden de folie boven danwel onder de zandbentonietlaag aan te brengen. Bij een h.d.p.e.-folie in een dikte van tenminste 1,5 mm pleiten eigenschappen als bestendigheid tegen knaagdieren en wortel-doorgroei voor toepassing boven een zandbentonietlaag. Nadeel daarvan kan zijn dat de zandbentonietlaag zal uitdrogen. Verder zal stortgas, voor zover dat door de zandbentonietlaag trekt, tussen beide lagen opgesloten raken, zodat hier een extra onttrekkingsvoorziening noodzakelijk is. Ten aanzien van het controleren van de doorlatendheid/lekkage in de bovenste laag zal een grotere betrouwbaarheid bereikt worden wanneer de

folie onder de zandbentonietlaag is aangebracht. Indien direct contact zou ontstaan tussen horizontaal uittredend percolaat en de tweede afdichtingslaag, zal een h.d.p.e.-folie hiertegen beter bestand zijn dan een zandbentonietlaag. Op basis van deze afwegingen gaat de voorkeur uit naar aanbrengen van de zandbentonietlaag boven de folie.

Het toepassen van een kunststoffolie brengt met zich mee dat aan zand, wat in contact komt met folie, de extra eis moet worden gesteld dat daarin geen stenen mogen voorkomen groter dan 3 mm. Overigens zal de opbouw van de constructie niet afwijken van de hiervoor beschreven combinatie van 2 zandbentonietlagen.

Als minimale dikte van een zandlaag op de folie dient 0,20 meter te worden gehanteerd om beschadiging van de folie bij aanbrengen van het zand te voorkomen. Indien op de folie een geotextiel of een drainagemat wordt aangebracht kan deze eis worden verlaagd tot 0,15 meter. Gezien de te verwachten problemen bij de uitvoering moet het toepassen van folie bij lange hellingen steiler dan 1:3 worden ontraden. Voorgesteld wordt de toelagen volgens tabel 18 volledig toe te passen op de zandbentonietlaag.

6.1 Inleiding

Na het beëindigen van de stortactiviteiten en het aanbrengen van de waterdichte eindafdekking zal het stortterrein, afhankelijk van de eindbestemming, doorgaans in gebruik worden genomen als recreatieterrein, natuurterrein of landbouwgrond. Veelal zal ook de eigendom en het beheer van het terrein op dat moment worden overgedragen aan een andere instantie. Het is daarbij van groot belang dat een goede regeling wordt getroffen met betrekking tot de organisatie en financiering van de nazorg op het stortterrein. Nazorg en controle op de werking van de aangebrachte milieutechnische voorzieningen is noodzakelijk om ook op lange termijn ongewenste emissie van stoffen in het milieu te voorkomen. Deze controle betreft vooral het waterdicht blijven van de eindafdeklaag en het functioneren van het drainagesysteem. Voor een goede werking van de aangebrachte voorzieningen is regelmatige inspectie en onderhoud noodzakelijk. Bovendien moeten eventuele storingen, bijvoorbeeld verstoppingen of verzakkingen in het drainagesysteem of lekken in de afdichtingslaag, opgeheven kunnen worden door het uitvoeren van reparatiewerkzaamheden. Dit legt uiteraard een aantal beperkingen op aan de bestemming en herinrichting van het stortterrein.

6.2 Controlemethodieken

6.2.1 Visuele inspectie en luchtfotografie

Storingen in het drainagesysteem of lekken in de afdichtingslaag kunnen oorzaak zijn van veranderingen in de water- en luchthuishouding van de afdeklaag. Het is dan in principe mogelijk dat de vegetatie reacties vertoont als gevolg van de gewijzigde groeiomstandigheden. Slechte groei of afsterven van de vegetatie is visueel waarneembaar aan kleurveranderingen in de vegetatie of het ontstaan van kale plekken. Dergelijke effecten zijn waarneembaar bij inspecties in het veld, maar kunnen ook zichtbaar zijn op luchtfoto's (normale kleurenfoto's, infra-rood foto's).

Storingen in het drainagesysteem betreffen veelal verstopping van drains of het losraken van verbindingen als gevolg van onregelmatige zakkingen. Plaatselijk zal dit leiden tot een slechte ontwatering van de afdeklaag. Met name in de winter en het vroege voorjaar (januari, februari, maart) kunnen daardoor plaatselijk drassige situaties ontstaan op het stortterrein. Op de taluds kan dit oorzaak zijn van veel oppervlakte-afvoer en mogelijk erosie tijdens regenbuien. Eventueel kan deze slechte ontwatering leiden tot vertraagde groei van de vegetatie in het voorjaar vanwege lage zuurstofgehalten en een relatief lage bodemtemperatuur.

Infiltratie van water in het afvalstort via lekken in de afdichtingslaag is moeilijk of niet visueel waarneembaar. In

de zomerperiode zal echter geen infiltratie van water via deze lekken plaatsvinden omdat de afdeklaag dan uitgedroogd raakt. Tegen het eind van de zomer ontstaat de mogelijkheid dat via deze lekken stortgas ontwijkt, waardoor de luchthuishouding van de afdeklaag verstoord wordt. Het ontsnappen van gas kan leiden tot anaerobe omstandigheden in de wortelzone, waardoor de vegetatie afsterft. Dergelijke effecten zijn vooral waarneembaar in de periode augustus-september.

Aan de teen van het talud kunnen lekken in de afdichtingslaag aanleiding geven tot het uittreden van verontreinigd percolatiewater. Het drainwater uit het drainagesysteem boven de afdichtingslaag raakt hierdoor verontreinigd. Bij ernstige lekkage zal dit merkbaar kunnen zijn aan de kleur van het te lozen drainwater en eventueel ijzeroxydatie of stank ter plaatse van het lozingspunt. In sommige gevallen kan het verontreinigde percolatiewater zelfs aan het maaiveld uittreden waardoor ter plaatse de vegetatie afsterft. Overigens kan het drainwater ook ijzerhoudend zijn bij gebruik van ijzerrijke venige afdekgrond.

Op luchtfoto's is schade aan de vegetatie herkenbaar aan lichtgroene, gele of bruine verkleuring of ingeval van afsterven zelfs kale plekken. Op infrarood-foto's is schade herkenbaar aan afwijkende rood-tinten. Naarmate de groei van de vegetatie slechter is zullen lichtere tinten (licht rose) voorkomen.

6.2.2 Waterbalansmetingen

Controle van de waterdichtheid van de afdichtingslaag zou in principe moeten plaatsvinden door meten van de verschillende waterbalansstermen, zodat hieruit de eventuele lekkage kan worden vastgesteld. De waterbalans per beschouwende periode bestaat in dit geval uit de volgende termen:

$$N = E_{act} + \Delta B + A_{drain} + A_{runoff} + L$$

waarin:

- N = neerslag (mm)
- E_{act} = actuele verdamping (mm)
- ΔB = verandering in vochtberging (mm)
- A_{drain} = drainafvoer (mm)
- A_{runoff} = oppervlakte-afvoer of runoff (mm)

Zoals eerder in dit rapport is vermeld mag de lekkage door de afdichtingslaag niet groter zijn dan 20 mm/jaar. Dit betekent dat veranderingen in lekkage van bijvoorbeeld 10 mm/jaar nauwkeurig meetbaar zouden moeten zijn. Met behulp van bovenstaande waterbalans is dit in feite niet goed mogelijk. De lekkage (L) is daar de restpost en wordt berekend door twee grote getallen van elkaar af te trekken:

$$L = N - (E_{act} + \Delta B + A_{drain} + A_{runoff})$$

De onnauwkeurigheid wordt daardoor zeer groot. De neerslagmeting kan relatief gezien nog tamelijk nauwkeurig worden uitgevoerd (fout ca. 2%). Een schatting van de werkelijke verdamping is zonder modelberekeningen aanzienlijk minder

nauwkeurig te geven (misschien 5-10%), terwijl in de vochtbergingsverandering ook al gauw een fout van 10 % kan zitten. De afvoer van drainwater en oppervlakte-afvoer is in principe nauwkeurig te meten (2%) mits alle water goed wordt opgevangen en de meetapparatuur geen storingen vertoont.

De absolute fout in de aldus berekende lekkage ligt naar schatting in de orde van minstens 25 mm/jaar. Op een totale lekkage van bijvoorbeeld 25 mm/jaar betekent dit dus een fout van 100 %. In principe moet de jaarlijkse afvoer ongeveer gelijk zijn aan het jaarlijkse neerslagoverschot (N - Eact). Als langjarig gemiddelde wordt gerekend met een neerslagoverschot van 300 mm/jaar voor grasbegroeiing. Afhankelijk van de weersomstandigheden kan dit overschot per jaar echter sterk variëren. Meting van de afvoer (drainafvoer en oppervlakte-afvoer) geeft dus hoogstens een globale indruk van de effectiviteit van de waterdichte eindafdekking.

6.2.3 Kwaliteit van het afgevoerde water

Lekkage van percolatiewater door de afdichtingslaag kan eventueel plaatsvinden langs de rand van de stortplaats ter plaatse van de teenconstructie. Als de afvoer van percolatiewater achter en onder de afdichtingslaag onvoldoende is, bijvoorbeeld door verstopping van drains, dan kan een overdruk ontstaan en bestaat de mogelijkheid dat percolatiewater door de afdichting naar buiten treedt. Vanwege de hoge verontreinigingsgraad van het percolatiewater is bijmengen van dit water bij het schone drainwater uit de afdeklaag vrij gemakkelijk aantoonbaar, bijvoorbeeld door meting van het geleidingsvermogen van het drainwater. Normaal zal het geleidingsvermogen van dit drainwater in de orde van 200-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liggen. Zodra echter vermenging met percolatiewater optreedt zal het geleidingsvermogen veelal hoger zijn dan 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bovendien zal het geleidingsvermogen in het laatste geval sterk variëren met de afvoer. De lekkage van percolatiewater is namelijk vrij constant in de tijd, terwijl de afvoer uit de afdeklaag sterk varieert met de neerslagintensiteit. Bij hoge afvoeren zal daardoor het geleidingsvermogen relatief laag zijn, terwijl het bij lage afvoeren wel kan oplopen tot 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

6.3 Opsporen van lekken en verstopte drains

6.3.1 Lekkage van stortgas

De in par. 6.2 genoemde controle-methodieken geven een eerste indruk van eventuele problemen voor het stortterrein als geheel. Bij constateren van problemen (lekkage van percolatiewater of stortgas, afsterven van vegetatie) zal een meer gedetailleerd onderzoek nodig zijn om de exacte locaties, waar zich problemen voordoen, op te sporen. Lekkage van stortgas is aantoonbaar door in de afdeklaag de aanwezigheid van brandbaar gas (methaan) vast te stellen met behulp van gasdetectie-apparatuur zoals recent ontwikkeld voor het opsporen van

bodemverontreiniging of een explosiemeter. De hoogste concentraties worden uiteraard vlak boven de afdichtingslaag aange troffen. Bij geringe lekkage is het mogelijk dat met de explosiemeter geen uitslag wordt verkregen. Methaangas wordt namelijk in de bodem met gebruik van zuurstof afgebroken door methaan-oxyderende bacteriën (Hoeks, 1972). Dit proces van methaanoxydatie leidt tot lage zuurstofgehalten en hoge koorzuurgehalten in de bodemlucht. Het is daardoor mogelijk dat het zuurstofgehalte zeer laag is (minder dan 5 vol %) terwijl toch geen methaangas kan worden aangetoond. Daarom is naast meten van het gehalte aan methaangas (of brandbaar gas) ook meting van het zuurstofgehalte gewenst. In de winterperiode zal de activiteit van de methaanoxyderende bacteriën sterk teruglopen. Ook bij geringe lekkage is dan methaangas in de afdeklaag aantoonbaar. Dit is echter tevens de periode van afvoer van neerslagoverschot. Lekkage van gas wordt dan bemoeilijkt door infiltratie van water.

6.3.2 Bodemtemperatuur in de afdeklaag

Op plaatsen waar lekkage van stortgas optreedt, kan de bodemtemperatuur in de afdeklaag verhoogd zijn, omdat het onderliggende afvalstort en het daaruit ontwijkende stortgas vaak een hogere temperatuur hebben. Vooral in een relatief jong stort kunnen nog hoge temperaturen tot 40 à 50 °C voorkomen.

In oudere stortplaatsen zal de temperatuur geleidelijk teruglopen tot temperaturen van 25-30 °C. Naarmate meer gaslekkage optreedt zal de temperatuur in de afdekgrond sterker toenemen. Meten van de bodemtemperatuur, vooral vlak boven de afdichtingslaag, kan dus aanvullende informatie geven over lekkage van stortgas.

6.3.3 Drainafvoeren en kwaliteit van drainwater

Als twijfel bestaat over het functioneren van het drainage-systeem of de lektheid van de afdichtingslaag, kunnen afvoermetingen aan afzonderlijke drains nadere informatie verschaffen. De metingen kunnen plaatsvinden in controleputten waar drains uitmonden. Op deze wijze kunnen tijdens perioden van afvoer die drains worden opgespoord die geen of zeer weinig afvoer geven. Gelijktijdig kan per drain het geleidingsvermogen van het afgevoerde water worden gemeten. Hieruit wordt een indicatie verkregen over eventuele lekkage van percolatiewater. Uiteraard moet men er wel zeker van kunnen zijn dat het hoge geleidingsvermogen niet het gevolg is van verontreinigingen in de afdekgrond. Door metingen te herhalen, zowel bij hoge als bij lage afvoeren, kan een indruk worden verkregen over de oorzaak van een eventueel hoog geleidingsvermogen. Bij sterke schommeling met hoge waarden tijdens perioden van geringe afvoer is lekkage van percolatiewater waarschijnlijk. Controle van afvoer en geleidingsvermogen per drain vereist de aanwezigheid van controleputten in het drainagestelsel. In hoofdstuk 5 is reeds aangegeven waar dergelijke controleputten, ook met het oog op het doorspuiten van drains, gewenst zijn.

6.4 Controle, onderhoud en beheer van voorzieningen

De voorzieningen die in het kader van een bovenafdichting zijn vereist, zijn in hoofdstuk 5 nader beschreven. In paragraaf 6.2 en 6.3 zijn voorts enige specifieke controlemethoden beschreven waarmee de goede werking van de afdichtende constructie kan worden getest.

Aangezien de voorzieningen gedurende een lange reeks van jaren dienen te functioneren is een goede controle en nazorg essentieel. Hierbij dient onder controle te worden verstaan het waarnemen van (veranderingen in) de werking van de verschillende voorzieningen alsmede het inspecteren van de technische staat (rest-levensduur). Een belangrijk hulpmiddel hierbij is het bemonsteren en analyseren van percolaat, regenwater en grondwater.

Hoofdbestanddelen van de nazorg voor een stortterrein zijn het instandhouden (organisatie tot beheer) het onderhoud (toezicht, reparatie) en het treffen van ingrijpende maatregelen ingeval van falen van de voorzieningen (bijvoorbeeld geohydrologische isolatie). Gezien de samenhang met de afdichtende constructie zullen hier alleen de maatregelen en initiatieven voor controle, inspecties en onderhoud worden behandeld. In tabel 23 zijn de hoofdonderdelen van de isolerende voorzieningen aangegeven die bij een stortterrein aanwezig kunnen zijn. Voor elk van de voorzieningen zijn inspectie en controle-mogelijkheden en -intervallen vermeld, alsmede de meest voorkomende onderhoudsactiviteiten. Daarbij zijn volledigheidshalve ook de grondwatermonitering en het rapporteren opgenomen, aangezien deze activiteiten enerzijds passen in het beheer van de voorzieningen en anderzijds vaak zijn opgenomen in de Afvalstoffenwet-vergunning (A.W.) of in de vergunning inzake Wet Verontreiniging Oppervlaktewater (W.V.O.). De tabel kan als basis worden gehanteerd voor het opstellen van programma's en kostenramingen voor nazorg.

6.5 Reparatiemogelijkheden

6.5.1 Inleiding

Een afvalstortterrein is in de gebruiksfase onderhevig aan een veelheid van belastingen en vormveranderingen die kunnen leiden tot storingen van de afdichtingsconstructie. Dit kan gevolgen hebben voor het functioneren van het systeem van bovenafdichting en voor het functioneren van de gebruiksvormen op het afgedekte stort. In het navolgende zal alleen aandacht besteed worden aan storingen aan de bovenafdichting.

Het doel van bovenafdichtingen is het voorkomen van infiltratie in het stort. Indien door een storing het functioneren van een of meerdere constructieonderdelen geheel of gedeeltelijk onmogelijk wordt en dit direct of indirect leidt tot een verhoogde infiltratie, zijn maatregelen noodzakelijk.

Tabel 23 Controle, onderhoud en beheer van voorzieningen.

Hoofdelementen/onderdelen	Voorzieningen	Inspectie	Maatregel
1 Bovenafdichting: a veelaardelaag	- grasmat	- 1x per jaar	- frezen, bijzaaien; bestrijden van grote knaag- dierpopulaties
	- beplanting	- 1x per 2 jaar	- snoeien, uitdunnen
	- laagdikte	- 2x per jaar	- aanvulling uitspoelingen
	- doek	- bij reparatie aan andere onderdelen	- niet essentieel
	- drainage stelsel	- 2x per jaar afvoer controleren	- doorspuiten per 2 à 4 jaar
	- drainagemat	- 1x per jaar	- reparatie bij grote zettingen
	- doorvoering gasbuizen	- doorvoering schachten	- ontgraven en repareren
	- doorvoering persc.afvoer	- doorvoering persc.afvoer	- idem
	- drainagestelsel	- drainagemat	- idem
	- drainagemat	- aansluiting op andere dichting	- doorspuiten
2 Gasonttrekking: a aanzuiginrichting	- aansluiting op andere dichting	- 1x per jaar; o.a. door bemonsteren regenwater en grondwater	- repareren doorvoeringen
	- percolaat/gasdrains	- 1x per jaar afvoer controleren	- repareren aansluitingen
	- drainagemat		
	- aanzuiger	- 6x per jaar	- elektromechanisch onderhoud
	- condenswaterafvang	- idem	- reinigen
	- buizenet	- 2x per jaar	- bij zakkings waterafloot opheffen
	- fakkellinrichting	- 6x per jaar	- reiniging, onderhoud
	- aansluitingen, bron	- 6x per jaar controle produktie	- reparatie, opheffen lekkages
	- verzamelleiding en/of koppeldrain	- 2x per jaar	- reiniging, reparatie
	- inspectie schachten		- idem: onderhoud deksels
3 Teenconstructie a afvoer regenwater	- draanaansluitingen	- idem	- idem
	- doorspuitpunten	- idem: doorspuiten elke 2 à 4 jaar	- idem
	- afvoerleidingen	- idem	- idem
	- lozingspunt	- idem: analyse waterkwaliteit	- idem
	- verzamelleiding	- 2x per jaar	- idem
	- schachten	- idem	- idem
	- aansluitingen	- idem	- idem
	- doorvoeringen	- idem: grondwateranalyse	- idem: elektro-mechanisch onderhoud; coördinatie RWZI
	- pompput, persleiding, lozingspunt	- storingsmelder	- idem
	- afdichtende laag	- 1x per jaar zettingen	- aanvulling, reparatie
4 Onderafdichting: a percolaatvoer	- doorvoeringen	- 1x per jaar	- reparatie; grondwateranalyse
	- laag aansluitingen	- idem	- aanvulling, reparatie
	- zie 3b	- idem 3b	- idem
	- percolaatdrainage	- 2x per jaar in schacht	- doorspuiten 1 à 2x per jaar
	- verzamelleiding	- 1x per jaar	- idem
	- doorspuitpunten		- idem
	- pompput, persleiding		- idem
	- lozingspunt		- idem
	- diep en ondiep		- idem
	- achter doorvoeringen		- idem
5 Grondwatermonitoring: a control drainage	- verzamelleiding	- 1x per jaar	- aanvulling, reparatie
	- doorspuitpunten	- 1x per jaar	- doorspuiten 1x per 3 à 5 jaar
	- pompput, persleiding		- elektro-mechanisch onderhoud
	- lozingspunt		- coördinatie waterbeheerder
	- diep en ondiep		- uitgebreid conform vergunningen
	- achter doorvoeringen		- beperkt (indicatief)
	- vergunningen		- instandhouden meetnet
	- levensduur		- reparatie, vervangingen
	- 1x per jaar		
	- 2x per jaar		
6 Rapportages a grondwater b technisch	- vergunningen	- 1x per jaar	- instandhouden meetnet
	- levensduur		- reparatie, vervangingen

Een storing kan pas als zodanig aangemerkt worden, als dezeesignaleerd wordt. Dit houdt niet alleen het waarnemen van een verandering in, maar ook een analyse van de oorzaak, de omvang van de storing en de negatieve effecten op korte en lange termijn. Op grond van deze analyse moet beoordeeld worden in hoeverre het functioneren van het totale systeem van bovenafdichting in gevaar komt, welke invloed dit heeft op de infiltratie van regenwater, op de omgeving, het functioneren van de overige constructieonderdelen en gebruiksvormen, en op welke termijn herstel noodzakelijk is of nader onderzoek gewenst is. Analyse van de effecten van de storing op korte en lange termijn is richtinggevend voor de te treffen maatregelen. Onderscheiden en afgewogen moeten worden:

- het treffen van tijdelijke maatregelen;
- het treffen van definitieve maatregelen;
- niets doen.

Op grond van ernst en omvang zal sprake zijn van:

- aanpassingen (b.v. egaliseren) ;
- herstelmaatregelen (vervangen van onderdelen);
- reconstructie maatregelen (andere constructies).

De voor te stellen maatregelen zullen getoetst moeten worden op onder andere (blijvende) effectiviteit op doorlatendheid, betrouwbaarheid, ervaringen met te kiezen methode, controleerbaarheid van de reparatie, schadelijke neveneffecte beïnvloeding overige kenmerken (ontwatering, stabiliteit, bodemtoxiciteit, bewortelbare diepte, draagkracht, agressiviteit), beïnvloeding van gebruiksfuncties etc.

6.5.2 Reparaties aan de afdichtingslaag

Schade aan de afdichtingslaag moet door het treffen van maatregelen en voorzieningen in de planfase zo veel mogelijk voorkomen worden. Ondanks voorzieningen, maatregelen en voorschriften is schade aan de afdichtingslaag denkbaar. Hierbij valt te denken aan tijdelijke schade (bijvoorbeeld verdroging) en blijvende schade (scheurvorming, verminderde dikte, lekkage langs doorvoeren, penetraties van boven- of onderaf, en toegenomen porositeit). De oorzaken hiervan kunnen veelvuldig zijn: onregelmatige zakkingen, uitspoeling van fijne deeltjes naar de steunlaag, chemische aantasting als gevolg van ongelukken op het maaiveld, aangroei van boomwortels, graven door bodemdieren, slechte kwaliteit bij installeren of nadien verrichte werkzaamheden, en dergelijke.

Een drietal reparatieprincipes zijn te onderscheiden:

- 1 Aanbrengen nieuwe afdichting onder de falende afdichtingslaag.
- 2 Vervangen of verbeteren van gedeelten van de falende afdichtingslaag.
- 3 Aanbrengen nieuwe afdichting boven de falende afdichtingslaag:
 - a waterondoorlatend maken van de drainlaag boven de afdichtingslaag;
 - b lokale afsluiting van de afdeklaag boven maaiveld;
 - c Volledige nieuwe afdichtingslaag op de oude afdichtingslaag.

Hiervoor bestaan in principe de navolgende technieken:

ad 1: Penetren van de afdichtingslaag en injecteren van vloeistoffen of suspensies die de steunlaag waterdicht maken. Als injectiemiddelen komen naar voren: bentonietsuspensie, met cellulose-ethers of ferrochrome-lignosulphonaat verbeterde kleisuspensies, bentoniet-olie-injecties, polyurethaanschuim, natriumsilicaat (waterglas) en lignochroom.

ad 3a: Injecteren van vloeistoffen en suspensies die de drainlaag waterdicht maken. Hierbij komen dezelfde injectiemiddelen naar voren als onder ad 1. Een probleem bij deze methode is dat de ontwatering lokaal verstoord wordt, hetgeen consequenties kan hebben voor de stabiliteit.

ad 3b: Het is mogelijk plaatselijk een bovenafdichting te realiseren op het maaiveld en rondom aansluitingen te maken op de afdichtingslaag. Een bovenafdichting van natuurlijke materialen is bij het toepassen van geringe laagdikten kwetsbaar en zal in zo'n geval beperkingen opleggen aan de gebruiksmogelijkheden.

Andere mogelijke materialen voor de bovenafdichting kunnen zijn: asfaltbeton en folies met gronddekking. De verticale aansluitingen met de oude afdichtingslaag kunnen gevormd worden door b.v. verticale bentonietschermen of kleikisten met folie.

De uitvoering van de ad. 3b genoemde constructie is tamelijk gecompliceerd en zal voor kleinschalige reparaties tot onevenredig hoge kosten leiden. In verband met de verstoring van de ontwatering zullen eveneens enige maatregelen getroffen moeten worden. De onder ad. 1 en 3a genoemde injectiemethoden zijn beperkt toepasbaar, terwijl de ervaringen hiermee nog zeer beperkt zijn.

De geringste verstoring van het opgebouwde lagensysteem kan bereikt worden door het waterdicht maken van de steunlaag of het vervangen van de afdichtingslaag. De grootste mate van betrouwbaarheid kan verkregen worden door het vervangen van de afdichtingslaag.

6.5.3 Uitvoeringsaspecten van reparaties

a vervangen van gedeelten van de afdichtingslaag

Voor het vervangen van de afdichtingslaag moet de gehele afdeklaag afgegraven worden tot aan de steunlaag. Indien sprake is geweest van scheurvorming als gevolg van onregelmatige zakkingen, zal de steunlaag gegaliseerd moeten worden. Om te voorkomen dat via het aansluitvlak tussen oude en nieuwe afdichtingslaag regenwater infiltreert, moet de nieuwe afdichtingslaag de oude aan de randen overlappen. Om breken van de overlapping te voorkomen moet de oude afdeklaag aan de bovenzijde afgeschuind worden. Voor het verkrijgen van extra zekerheid kan ter plaatse van de aansluiting een waterdichte folie aangebracht worden. Boven de nieuwe afdichtingslaag kunnen de drains gelegd worden, waarna de afdeklaag weer laagsgewijs aangevuld kunnen worden. Overigens kunnen hier de uitgangspunten gehanteerd worden zoals beschreven in par. 5.3.5.

b injectie met een slecht doorlatende grondsuspensie

Doorlatende grondlagen kunnen worden afgedicht met behulp van een suspensie van fijne kleideeltjes, die de poriën binnendringen en deze aldus afdichten. De kleisuspensie vormt een stabiel mengsel, dat goed injecteerbaar is. Met behulp van deze injecties kan een goede waterkerende laag worden bereikt. De sterkte neemt echter af. Om de kleinste deeltjes in suspensie te krijgen moet een dispersiemethode (roeren) of -middel worden toegepast. Ook ultrasoon geluid wordt toegepast. Een andere methode is de toevoeging van colloïden aan kleisuspensies: de zogenaamde behandelde kleisuspensie. Eenzelfde verbetering van de injecteerbaarheid van kleisuspensies kan worden bereikt met een toevoeging van natriumsilicaat en verdund zoutzuur. Voor verbetering van de suspensie zijn uit de olieindustrie diverse toevoegingen bekend, waarvan een tweetal kort worden behandeld:

1 cellulose-ethers

werkzame colloïden (ter bescherming tegen het effect van electrolyten) die verlies van suspensie voorkomen. Actief bij een pH-waarde tussen 6 en 14; optimaal bij een pH van 7-9. De effectiviteit vermindert bij hogere zoutconcentraties;

2 ferrochroomlignosulphonaat

werkzaam in een zout milieu tegen verlies van vloeistof uit de suspensie. Door de lage pH (3-5) te gebruiken in combinatie met NaOH; deze combinatie is in de handel verkrijgbaar. Tevens een middel tegen de gevolgen van hard water. Bentoniet kan worden gemengd met gasolie of olie om in suspensie te worden gebracht. Hiermee kunnen niet volledig met water verzadigde gronden worden geïnjecteerd. Het bentoniet vormt met het porievocht een gel, waarmee de poriën worden afgedicht. Er wordt echter olie in de grond gebracht, die in contact kan komen met het grondwater.

c injectie met chemicaliën

In het algemeen wordt afname van de doorlatendheid veroorzaakt door:

- 1 samenkiten van de korrel;
- 2 opvullen van de porie;
- 3 reacties tussen grond en chemicaliën.

Om de indringbaarheid van een injectiemiddel in zelfs de kleinste poriën mogelijk te maken is een zeer fijnkorrelige suspensie of een vloeistof nodig. Als eerste is hiervoor natriumsilicaat toegepast. Als praktisch injectiemiddel komen in aanmerking natriumsilicaat en lignochrome. Beiden vormen een gel. Een gel is een neerslag uit een colloïdale oplossing door uitvloeking of als een gelei. Voor afdichtingsdoeleinden genieten plastische gels de voorkeur. De keuze van de injectiemiddelen wordt voornamelijk bepaald door de doorlatendheid van de grond waarin ze moeten worden gebracht. Ten einde een voldoende regelmatige vulling van de poriën te krijgen zal de in te brengen vloeistof een bepaalde viscositeit moeten hebben. Bovendien zal de samenstelling zo moeten zijn dat in de kleinste poriën geen afzettingen zullen ontstaan welke door het aangroeien tijdens het inpersen een regelmatige verdeling van de injectievloeistof zullen belemmeren. Voor zandgronden betekent dit dat de keuze zal vallen op chemicaliën welke in oplossing in de grond worden geperst en daar na een instelbare

tijd reageren, waarna een zekere opstijving of verharding optreedt. Verbetering van klei met chemicaliën kan geen blijvende ondoorlatendheid garanderen. Bij de keuze van het injectiesysteem is men enerzijds afhankelijk van de poriënafmetingen van de te injecteren grond en de viscositeit van de in te brengen vloeistof. Anderzijds speelt ook het vereiste resultaat, zoals sterkte of waterdoorlatendheid een rol. Bij het op elkaar afstemmen van de verschillende eisen voor uitvoering en uiteindelijk vereist resultaat, zullen ook ervaringen elders betrokken moeten worden. Het injecteringsonderzoek op de betreffende af te dichten laag zal door een gespecialiseerd laboratorium moeten worden uitgevoerd. Gezien de geringe ervaringen en onduidelijkheid op dit moment voor de verschillende grondtypen en samenstellingen zal hier nader onderzoek en inventarisatie nodig zijn.

d injectie met kunststofschuim

Grondverbetering en afdichting kan worden verkregen door de injectie met kunststofschuim. Polyurethaanschuim biedt zeer goede mogelijkheden op basis van de injectiesterkte, gunstige verwerkingstijd, 1-fase injectie en een gelijke viscositeit als water bij de injectie.

Bij injectie van een met water verzadigde zandgrond kan een k-waarde 10^{-7} a 10^{-8} m/s worden bereikt. Droge zandgrond is na injectie zo goed als ondoorlatend, omdat de doorzijging van water op de lange duur tot nog kleinere k-waardes leidt. Aangezien de steunlaag na verloop van tijd permanent vochtig zal zijn, zal met injectie van kunststofschuim als reparatiemiddel maar een beperkte ondoorlatendheid kunnen worden bereikt. Voor de drainerende zandlaag boven de afdichtingslaag kan in een droog jaar wel een redelijk resultaat worden verkregen.

7.1 Inleiding

De specifieke ruimtelijke opbouw van een stort met vaak variërende hoogte en hellingen biedt goede uitgangspunten voor bepaalde functies, die in de situatie voordat er gestort werd veelal niet mogelijk waren. Uit onderzoek (Heidemij 1985) is gebleken dat nagenoeg alle denkbare gebruiksvormen in technische zin gerealiseerd kunnen worden. Het zijn overwegend niet-fysieke aspecten, zoals behoefte, psychologische acceptatie en kosten, die bij een beoordeling van de gebruiksmogelijkheden en de selectie van de gebruiksvormen in de praktijk een belangrijke rol spelen. Een meer efficiënte afstemming van locatiekeuze en inrichting op de eisen van nieuwe gebruiksvormen wordt mogelijk, als reeds in een vroeg stadium (reeds vanaf de lokatiekeuze) rekening kan worden gehouden met de voorwaarden die gesteld worden door de voorziene gebruiksvormen. Van de mogelijkheid om met behulp van afval kunstmatige hoogteverschillen een reliëf te creëren ten behoeve van bijvoorbeeld recreatieve gebruiksvormen is in de praktijk al enkele keren bewust gebruik gemaakt. Hierbij dient bijzondere aandacht te worden besteed aan de ontwatering.

Wanneer bij de voorbereiding en realisering van stortterreinen nog niet bekend is welk gebruik er later van wordt gemaakt, is het van groot belang de stortterreinen zodanig te situeren en in te richten dat de realiseringmogelijkheden voor zoveel mogelijk nieuwe gebruiksvormen worden opengelaten. Dit geldt uiteraard ook wanneer deze situatie zich zou voordoen bij herprofilieren ten behoeve van het aanbrengen van een bovenafdichting. Hiertoe is het in het bijzonder van belang te zorgen voor een kwalitatief goede afdeklaag van voldoende dikte. Tevens dient ervoor gezorgd te worden dat de milieuhygiënische situatie volledig onder controle is en er geen milieuproblemen kunnen ontstaan. Relatief flauwe hellingen bieden meer toekomstige gebruiksmogelijkheden dan steile hellingen.

Realisering van nieuwe gebruiksvormen op afvalstortterreinen vergt een goed samenspel van bestuurders, inrichters en beheerders van afvalstortterreinen, en inrichters en beheerders van de nieuwe gebruiksvormen. Indien bij de inrichting van een stortterrein tijdens de voorbereiding er onvoldoende rekening is gehouden met eisen en randvoorwaarden die voortvloeien uit potentieel gewenste gebruiksvormen, zal op grond van een geschiktheidsbeoordeling bepaald moeten worden welke gebruiksvormen nog mogelijk zijn. Bij vergelijking van de eisen voor het gebruik en de kenmerken (beoordelingsfactoren) van het terrein kunnen zich drie mogelijkheden voordoen:

- 1 eisen en kenmerken sluiten aan: er is sprake van actuele geschiktheid;
- 2 eisen en kenmerken sluiten niet aan, maar de kenmerken zijn wel aanpasbaar: er is sprake van potentiele geschiktheid;
- 3 eisen en kenmerken sluiten niet aan, en de kenmerken zijn niet aanpasbaar: er is sprake van definitieve ongeschiktheid.

7.2 Gebruiksmogelijkheden en beperkingen

Mogelijkheden

Als meest geschikte gebruiksvorm komen naar voren:

- bos (multifunctioneel bos, recreatiebos);
- natuurontwikkeling (natuurbouw, spontane vegetatieontwikkeling);
- beweiding (paarden, schapen, dierenpark);
- bijenweide;
- nutsvoorzieningen (afvalverwerkingsinrichting zoals bijvoorbeeld afvalscheidingen, compostering, gaswinning);
- vele vormen van dagrecreatie:
 - * vormen van landrecreatie (wandelen, fietsen, paardrijden);
 - * lawaaisporten (cross, schietsport, modelvliegen, hondensport);
 - * hellingsporten (zeilvliegen, bergbeklimmen, skiën, sleeën);
 - * golf.

Gebruiksvormen, die op grond van psychologische criteria (mate van acceptatie) als weinig geschikt naar voren komen, zijn:

- agrarische gebruiksvormen (relatie met voedselkwaliteit);
- wonen en werken (woningbouw en industrieterrein), er van uitgaande dat afdoende technische voorzieningen in principe wel mogelijk zijn;
- verblijfsrecreatie.

Voor deze vormen zullen geen eisen geformuleerd worden.

Het blijkt dat afvalstortterreinen een specifieke fysieke geschiktheid voor een aantal gebruiksvormen kunnen bezitten:

- landschapsbouw: visueel en akoestisch scherm, visueel landschapsherstel door opvulling van een ontgronding;
- gaswinning: mogelijk bij een pakket huishoudelijk afval vanaf circa 10 m dik en 500 000 ton;
- gebruiksvormen samenhangend met het mogelijke relief: hellingsporten, motorcross, golf.

Beperkingen en maatregelen

Als primaire eis bij het bepalen van gebruiksmogelijkheden zal gelden dat de afdichtingsconstructie niet mag worden beschadigd en vervangen of repareren mogelijk moet zijn. Dit zal in principe beperkingen kunnen opleggen aan de gebruiksvormen en tot aanvullende voorzieningen leiden, danwel tot bijzondere constructies. Zo zal de mogelijkheid om gebouwen te funderen op palen met het doel ongelijke zettingen te voorkomen, worden uitgesloten. Funderen op staal kan alleen voor zeer lichte constructies, waarbij zakkingen op eenvoudige wijze kunnen worden hersteld. Vloeren in deze lichte constructie moeten bestaan uit elementenverharding (platen, tegels e.d.), zodat zakkingen eenvoudig kunnen worden aangevuld. In het algemeen zal gekozen moeten worden voor plaatfunderingen. Als verhardingsmateriaal zijn toepasbaar halfverhardingen die zakkingen volledig volgen en elementenverhardingen die eenvoudig te herstellen zijn. Wegverharding zoals beton of asfalt zullen door de ongelijke zakkingen scheuren en geven dan hogere onderhoudskosten.

Leidingsystemen zijn bijzonder kwetsbaar door de ongelijke zakkingen. Met name de leidingen, waarvan de inhoud zich kan verspreiden in de bodem, zoals waterleiding en

rioleringen, betekenen een risico. Gasleidingen geven het risico van lekken van brandbaar gas.

Op basis van deze overwegingen dient vanuit de afdichtingsconstructie als eis te worden geformuleerd dat de drainagelaag en een deel van de afdeklaag niet doorgraven mogen worden. Daaruit resteert een ingravingsdiepte van ca. 0,50 m. Indien dat voor bepaalde voorzieningen te gering zou zijn, zal moeten worden voorzien in ophoging.

Om de risico's te beperken dienen nutsleidingen tot een minimum te worden beperkt. Electriciteitsleidingen zijn toelaatbaar, mits ook hiervoor een goede controle plaatsvindt ter plaatse van ongelijkmatige zakkingen. Voor buisleidingen dient zo flexibel mogelijk materiaal te worden gekozen, bijvoorbeeld h.p.e.

Het vaststellen van eisen vanuit gebruiksvormen is een moeilijke stap binnen een geschiktheidsbeoordeling. Het formuleren van eisen kan vaak alleen gebeuren in algemene en omschrijvende termen. Voldoende kwantitatieve gegevens ontbreken veelal, omdat deze alleen gelden onder bepaalde omstandigheden of voor slechts een gedeelte van het onderzoeksgebied. In de tabel 24 t/m 27 wordt voor elke deelgebruiksvorm aangegeven welke eisen de verschillende gebruiksvormen stellen aan de omgeving en het afvalstortterrein. Ter toelichting op de tabellen is het volgende van belang. Op de horizontale as staan de onderdelen die binnen de betreffende deelbestemming worden onderscheiden. Op de verticale as staan de primaire eisen al naar gelang het gaat om de deelbestemmingen A, B, C of D. De gebruikte nummering bij elk van de primaire eisen komt weer terug in par. 7.4. Sommige eisen zijn zodanig geformuleerd dat ze uitgaan van een optimale toestand voor het betreffende onderdeel, bijvoorbeeld de eisen t.a.v. het macro-reliëf. Andere eisen zijn meer gebaseerd op een toestand die nog tolerabel is, bijvoorbeeld de eisen t.a.v. agressiviteit.

De eisen hebben met name betrekking op de afdeklaag, en betreffen vooral:

- ontwateringstoestand;
- bodemfactoren;
- bodemtoxiciteit;
- micro-reliëf;
- draagkracht.

7.3 Geschiktheidsbeoordeling

De inrichting van een afvalstortterrein ten behoeve van een bepaalde gebruiksvorm, kan aan de hand van een aantal stappen weergegeven worden. Het BOKLAS-systeem (Beeren, 1978) of een vergelijkbaar systeem kan bruikbaar zijn bij het zoeken naar de beste benutting van het terrein, waarbij als uitgangspunt een zo laag mogelijk kostenniveau wordt gehanteerd.

Tabel 24 Gebruik t.a.v. beplanting.

	a Landbouwgewassen Akkerbouwgewas Weidegras Volle grond tuinbouw Boomteeltgewas Fruit Glastuinbouwgewas	b Bos (productiebos en multifunctioneel bos)	c Groenvoorzieningen (recreatiebos en sierbeplantingen)	d Natuurlijke vegetatie (natuurbouw of niets doen)
1 Macro-reliëf	< 8%	< 8%		
2 Gas- en warmte- ontwikkeling	Mogen niet in schade- lijke concentraties optreden	Mogen niet in schade- lijke concentraties optreden	Mogen niet in schade- lijke concentraties optreden	Enkele gas- en/of warmte-invloed accen- tabel/gewenst
3 Ontwateringstoestand	Schijngrondwaterstand: zomer > 0,8 m-mv winter > 0,4 m-mv	Schijngrondwaterstand: zomer > 0,8 m-mv winter > 0,4 m-mv	Schijngrondwaterstand: zomer > 0,8 m-mv winter > 0,4 m-mv	
4 Bodemfactoren	Goed(e) vochtleverend vermogen, interne drainage verkruimel- baarheid. Afhankelijk van gewas of teelt: goed(e) stevigheid van de bovengrond, struc- tuurstabiliteit i.v.m. slomp en verstuiven en geringe stevigheid	Goed(e) vochtleverend vermogen, voedingstoe- stand en zuurgraad	Goed(e) vochtleverend vermogen, voedingstoe- stand en zuurgraad	
5 Bodemtoxiciteit	Geen schadelijke stof- fen in zodanige con- centratie dat ze te hoge gehalten in de gewassen veroorzaken	Geen schadelijke stof- fen in zodanige hoge concentratie dat ze schadelijk zijn voor de fauna	Geen schadelijke stof- fen in zodanige hoge concentratie dat ze schadelijk zijn voor de fauna	Geen schadelijke stof- fen in zodanige hoge concentratie dat ze schadelijk zijn voor de fauna
6 Bewortelbare diepte	> 0,8 m	> 0,8 m	> 0,8 m	
7 Micro-reliëf	< 0,1 m per m ²	< 0,1 m per m ²		

Tabel 24 (vervolg).

	e Gras t.b.v. veeleisende recreatievormen: voetbal hockey korfbal softbal rugby kaatsen polo modelvliegen golf (greens en tees)	f Gras t.b.v. minder-eisende recreatievormen: schietbaan honden speel- en ligweiden (dag)camping golf (fairways)	g Gras t.b.v. helling-sporten: skiën sleeën zeepkarren zeilvliegen bergklimmen
1 Macro-reliëf	< 2% (golf variabel)	< 10% (golf variabel)	10-30% voor bergklimmen: 3 : 1 (30%). Benodigd hoogteverschil tot 30 m
2 Gas- en warmteontwikkeling	Mogen niet in schadelijke concentraties optreden	Mogen niet in schadelijke concentraties optreden	Mogen niet in schadelijke concentraties optreden
3 Ontwateringstoestand	Schijngrondwaterstand: winter > 0,5 m-mv	Schijngrondwaterstand: winter > 0,25 m-mv	Goed(e) vochtleverend vermogen, interne drainage, infiltratiecapaciteit, stevigheid van de bovengrond
4 Bodemfactoren	Goed(e) vochtleverend vermogen, interne drainage, infiltratiecapaciteit, stevigheid van de bovengrond en geringe stenigheid	Goed(e) vochtleverend vermogen, interne drainage, infiltratiecapaciteit, stevigheid van de bovengrond	Goed(e) vochtleverend vermogen, interne drainage, infiltratiecapaciteit, stevigheid van de bovengrond
5 Bodemtoxiciteit	Geen schadelijke stoffen in zodanige concentratie dat ze de kwaliteit of de groei-kraft van het gras beïnvloeden	Geen schadelijke stoffen in zodanige hoge concentratie dat ze de groei-kraft of de volksgezondheid beïnvloeden	Geen schadelijke stoffen in zodanige hoge concentratie dat ze de groei-kraft of de volksgezondheid beïnvloeden
6 Bewortelbare diepte	> 0,1 m	> 0,1 m	> 0,1 m
7 Micro-reliëf	< 0,05 m per m ²	< 0,05 m per m ²	< 0,1 m per m ²

Tabel 25 Gebruik t.a.v. bovenaardse infrastructuur.

Deelgebruiksvorm B bovengrondse infra- structuur met onder- delen	h "Licht" verkeer (voet-, fietspaden, landbouwwegen)	i "Licht" verkeer (verharde speel- en sportvelden)	j "Normaal" verkeer (toegangsweg, par- keerterreinen)	k "Zwaar" verkeer (opslagterreinen)
1 Macro-reliëf		+++ (0%)	+ (< 8%)	++
2 Gas- en warmte- ontwikkeling		Mogen niet in scha- delijke concentraties ophopen onder grote afgesloten opper- vlakken		
3 Ontwateringstoestand	Schijngroundwaterstand: > 0,5 m-mv	Schijngroundwaterstand: > 0,5 m-mv	Schijngroundwaterstand: > 0,7 à 0,8 m-mv (vorstgrens)	Schijngroundwaterstand: > 1 m-mv
8 Zakkingsgevoeligheid		+++ (mag niet voor- komen)	+	++
9 Draagkracht		++	++	+++
10 Agressiviteit		Geen schadelijke stof- fen in zodanige con- centraties dat ze een duurzame en kostbare toplaag aantasten		

Tabel 26 Gebruik t.a.v. ondergrondse infrastructuur.

Deelgebruiksvorm C Ondergrondse infra- structuur met onder- delen	1 Riolering	m Gas- en waterlei- dingen	n Kabels t.b.v. telefoon en elektriciteit
1 Macro-reliëf	< 8%	< 8%	
2 Gas- en warmte- ontwikkeling	Niet teveel H ₂ S-ontwik- keling, dit geeft eventueel aantasting beton via SO ₃ ²⁻	Niet teveel H ₂ S-ontwik- keling, dit geeft eventueel aantasting van staal. Temperatuur < 60-70 C vanwege mogelijke aan- tasting PVC; water mag niet bij hoge temp. aan de consument gele- verd worden	
3 Ontwateringstoestand	Schijngrondwaterstand: > 0,6-1 m-mv	Schijngrondwaterstand: > 0,6-1 m-mv	Schijngrondwaterstand: > 0,6-1 m-mv
8 Zakkingsgevoeligheid	Een ongelijke zakking wordt al opgevangen, doordag de stukken flexibel aan elkaar bevestigd zijn		
9 Draagkracht	++		
10 Agressiviteit	Geen schadelijke stof- fen in zodanige con- centraties dat ze de leiding aantasten (betonrot)	Niet teveel vrijkomen- de toluene en xyleen, deze kunnen door PVC leidingen heen diffun- deren	Geen schadelijke stof- fen in zodanige con- centraties dat ze de kabels aantasten (cor- rosie)

Tabel 27 Gebruik t.a.v. constructies.

Deelgebruiksform D	o "Lichte bebouwing met fundering op staal"	p "Overige bebouwing" met fundering op palen
1 Macro-reliëf	< 8%	< 8%
2 Gas- en warmte-ontwikkeling	Mogen zich niet in schadelijke concentraties ophopen in afgesloten ruimten. Niet teveel H ₂ S ontwikkeling, aantasting en staal	Mogen zich niet in schadelijke concentratie ophopen in afgesloten ruimten. Niet teveel H ₂ S ontwikkeling, aantasting beton en staal
3 Ontwateringstoestand	Schijngrondwaterstand: > 0,25 m - onderkant fundering (-0,7 m-mv)	Schijngrondwaterstand: > 0,25 m - onderkant fundering (-0,7 m-mv)
8 Zakkingsgevoeligheid	< 0,10 m/jaar	< 0,01 m/jaar
9 Draagkracht	Sondeerwaarde funderingslaag > 70 kg/cm ² voor een laag van min. 1 m dikte + sondeerwaarde onderliggende laag > 40 à 50 kg/cm ² - een laag van min. 2 m dikte gerekend vanaf onderkant fundering	Sondeerwaarde funderingslaag > 100 kg/cm ²
10 Agressiviteit	Geen schadelijke stoffen in zodanige concentraties dat ze gevaar opleveren voor de bewoners of de gebruiker of de constructie aantasten (corrosie, betonrot)	Geen schadelijke stoffen in zodanige concentraties dat ze gevaar opleveren voor de bewoners of de gebruiker of de constructie aantasten (corrosie, betonrot)

Bij het hanteren van dit systeem worden de volgende stappen onderscheiden:

- a De gebruiksvorm wordt ontleed in een aantal deelgebruiksvormen met het te verwachten oppervlakte-aandeel. De gebruiksvorm "gebied voor extensieve dagrecreatie" kan bijvoorbeeld bestaan uit de deelgebruiksvormen bos (70%), grasvelden (25%), wegen en paden (4%) en bebouwing (1%). Vervolgens worden de eisen geformuleerd die deze deelgebruiksvormen aan de grond stellen.
- b Op basis van een terreinonderzoek, gericht op de eisen van de deelgebruiksvormen, kan nagegaan worden welke aanpassingsmaatregelen per deelgebruiksvorm nodig zullen zijn. Relevante verschillen in de terreingesteldheid worden op een kaart weergegeven.
- c Vervolgens het aangeven van de benodigde aanpassingsmaatregelen van de onderscheiden terreingedeelten ten behoeve van de verschillende deelgebruiksvormen, met bijbehorende kosten per oppervlakte-eenheid.
- d Voor iedere deelgebruiksvorm kan een geschiktheidskaart gemaakt worden op basis van (klassen van) de aanpassingskosten per oppervlakte-eenheid.
- e Deze geschiktheidsgegevens kunnen als volgt gebruikt worden:
 - een zodanige ruimtelijke verdeling van de deelgebruiksvormen maken, dat de totale aanpassingskosten het laagst zijn;
 - voor iedere ruimtelijke verdeling van deelgebruiksvormen een overzicht maken van de te verwachten aanpassingskosten.
- f Al vóór de inrichting van een afvalstortterrein kan met dit systeem nagegaan worden welke gebruiksvormafhankelijke aanpassingsmaatregelen waar genomen moeten worden ten behoeve van een bepaalde toekomstige gebruiksvorm.

De bruikbaarheid van het omschreven classificatiesysteem is vooral afhankelijk van de mate waarin terreingedeelten met verschillende eigenschappen onderscheiden kunnen worden en de mate waarin de toekomstige deelgebruiksvormen (nog niet) ruimtelijk vastliggen. Bij toepassing van het BOKLAS-systeem zijn de volgende kanttekeningen van belang:

- hoe eerder men weet welke nieuwe gebruiksvorm aangebracht zal worden op het afvalstortterrein, hoe flexibeler en effectiever hierop met aanpassingsmaatregelen ingespeeld kan worden;
- de eventuele extra kosten van aanpassing van de werkwijze tijdens het storten, bijvoorbeeld compartimentering met het oog op toekomstige gebruiksvormen, dienen te worden afgewogen tegen aanpassingskosten die later gemaakt zouden moeten worden, wanneer geen aanpassing van de werkwijze tijdens storten zou worden toegepast;
- met het oog op mogelijke rendabele of winstgevende gaswinning dienen ook eventuele opbrengsten en andere voordelen van gaswinning in de beoordeling te worden betrokken;
- een aantal beoordelingsfactoren zijn op afvalstortterreinen nogal aan veranderingen in de tijd onderhevig, met name gas- en warmteontwikkeling en zakkingsgevoeligheid. Een alternatief voor aanpassingsmaatregelen rond deze beoordelingsfactoren kan zijn het wachten totdat de gas- en warmteontwikkeling en/of zakkingen zijn gereduceerd tot een aanvaardbaar niveau.

7.4 Aanpassingen in de afdeklaag

Als tijdens de planfase of uitvoeringsfase duidelijkheid ontstaat over de potentiële toekomstige bestemmingen, kan bij het kiezen van de samenstelling, de dikte en de opbouw van de afvallagen en de vormgeving van het stortterrein hiermee rekening gehouden worden. Hiermee kunnen beïnvloed worden de beoordelingsfactoren: macro-relief, gas- en warmte-ontwikkeling, zakkingsgevoeligheid, draagkracht en agressiviteit.

Als de aanpassingen plaats moeten vinden nadat de bovenafdichting aangebracht is, zullen alleen nog aanpassingen in de afdeklaagen mogelijk zijn. Het doorgraven van de afdichtingslaag moet vermeden worden.

Hierdoor zijn de mogelijkheden beperkt tot het aanpassen van:

- ontwateringstoestand;
- bodemfactoren;
- bewortelbare diepte;
- micro-reliëf;
- zakkingsgevoeligheid;
- draagkracht.

Ontwateringstoestand

Aanpassing van de ontwateringstoestand kan plaatsvinden door:

- 1 aanpassing van het drainagesysteem;
- 2 ophoging van de afdeklaag met een zandlaag;
- 3 het breken van een ondoorlatend geworden gedeelte van de afdeklaag door middel van diepe grondbewerking;
- 4 het aanbrengen/aanpassen van het reliëf, zodat geen ingesloten laagten ontstaan.

Bodemfactoren

Aanpassing van de bodemfactoren kan plaatsvinden door het opbrengen van grond en/of structuurverbeterende maatregelen, of bemesting. Aanpassing van de bodemtoxiciteit kan plaatsvinden door het opbrengen van grond, dan wel het afgraven of reinigen van de "verontreinigde" afdeklaag.

Bewortelbare diepte

Aanpassing van de bewortelbare diepte kan plaatsvinden door:

- 1 het breken van moeilijk doorwortelbare lagen, bijvoorbeeld door diepe grondbewerking (verbeteren wortelgroei);
- 2 het opbrengen van grond (beschermen afdichting) ;
- 3 een aanpassing van de ontwateringstoestand (betere wortelgroei).

Indien een wortelremmende laag is aangebracht om te voorkomen dat wortels te ver in de bovenste drainlaag kunnen doordringen, zal bij voorkeur moeten worden gekozen voor ophogen om een stagnerende groei op te heffen.

Micro-reliëf

Aanpassing van het micro-reliëf kan plaatsvinden door egalisatie.

Zakkingsgevoeligheid

Aanpassing bij de zakkingsgevoeligheid en nodige aanpassingen ten gevolge van opgetreden zakkingsen kunnen plaatsvinden door:

- 1 aanpassing van het micro-reliëf;

- 2 het gebruik uitstellen totdat de zakkings zijn gereduceerd tot een aanvaardbaar niveau;
- 3 het verdichten van de afdeklaag door druk van bovenaf m.b.v. een extra statische belasting (bijvoorbeeld een grondlichaam) ;
- 4 de aanleg van een starre constructie door het funderingszand van een weg of verhard veld sterk te verdichten of te verkitten;
- 5 het gebruik van ongebonden of lichtgebonden granulair materiaal als verharding voor een weg of veld;
- 6 het leggen van eventuele kabels en leidingen in een zandbed;
- 7 het gebruik van expansiestukken bij de aanleg van kabels en leidingen;
- 8 het leggen van kabels met enige slagen;
- 9 het aanbrengen van dilatatiezones in constructies.

ad 3 Na verloop van tijd wordt de druk van bovenaf verminderd door het grondlichaam (gedeeltelijk) af te graven en te beginnen met de constructie van de eigenlijke weg of het verharde veld.

ad 5 Op deze manier blijft de mogelijkheid bestaan ontstane oneffenheden te egaliseren.

ad 7 Voor kunststof buisleidingen worden hiertoe zettingsmoffen (in elkaar schuivende buizen) of flexibele tussenstukken gebruikt.

Draagkracht

Aanpassing van de draagkracht kan plaatsvinden door:

- 1 een aanpassing van de ontwateringstoestand;
- 2 het afgraven van de afdeklaag en een vervanging hiervan door een zandlaag;
- 3 het aanbrengen van een fundering voor constructies, wegen of verharde velden, die of een grote stijfheid en geringe dikte heeft, of een geringe stijfheid en een grote dikte;
- 4 een weglichaam of fundering breder en lichter maken dan in een normaal geval;
- 5 het gebruik van voormalige rijbanen, gebruikt tijdens het storten, als ondergrond voor toekomstige wegtraces;
- 6 de buisleidingen leggen in een funderingslaag van zand.

ad 4 De druk van het weglichaam op de ondergrond wordt hierdoor gespreid. Dit kan onder andere met behulp van polystyreenplaten, die vooral aantrekkelijk kunnen zijn voor verharde sport- en speelvelden. Ook matten van gevlochten rijshout worden voor dit doel wel gebruikt.

Samenvattend kan worden gesteld dat vanuit het stortterrein slechts de eis tot instandhouding en bescherming van voorzieningen in en bij de teen alsmede de instandhouding van de afdichtende constructie met ontgassing zal gelden. Onder instandhouding dient tevens reparatie en vervangen te worden verstaan. Of een bepaalde gebruiksvorm past bij een stortterrein en de bijbehorende technische eisen zal binnen de beschikheidsafweging moeten worden vastgesteld. Daarbij dient tevens een overzicht te worden gemaakt van bijzondere technische voorzieningen en maatregelen die noodzakelijk zijn voor elke deelgebruiksvorm. Indien derden initiatiefnemer zijn bij

het ontwikkelen van een gebruiksvorm, zal een plan van aanleg ter goedkeuring bij de beheerder van een stort moeten worden ingediend.

LITERATUUR

- Algra, E.A.H. en F.A. der Kinderen, 1984. Protocollen voor het toepassen van afdichtingsfolies ten behoeve van bodem-
bescherming, in het bijzonder bij stortplaatsen. Bodem-
bescherming nr 39. Min. VROM, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
- Bakker, H. en J. Schelling, 1966. Systeem van bodem-
classificatie voor Nederland. PUDOC, Wageningen.
- Bogaard, E.J.A.M. van den en J. Hoeks, 1988. Milieu-effecten
en milieutechnische maatregelen betreffende de stortplaats
Linne/Montfort. ICW-rapport 25, Staring Centrum, Wageningen.
- Bolderman, M.B.N. en A.W.C. Dwars, 1968. Waterbouwkunde, deel
I: Algemene Waterbouwkunde. Herzien door M.J. Fraanje.
Uitgeverij L.J. Veen, Amsterdam. Commissie MER, 1987
- Breeuwsma, A., 1989. Mondelinge mededeling.
- Epa, 1984. Slurry trench constructions for pollutant migration
control. EPA-540/2-84-001, EPA, Cincinnati, USA.
- Floss, R. e.a. 1968, Verdichtungs- und Verformungs-
eigenschaften grobköriger, bindiger Mischboden. Bundesanstalt
für Strassenwesen, Wissenschaftliche Berichte, Heft 6.
- Godecke, H.J., 1980. Entwicklung eines Fliessgesetzes für die
Porenwasserdurchströmung feinkörniger Boden unter kleinen
Druckgradienten. Die Bautechnik 6: 184-193
- Gabener, H.G., 1983. Untersuchungen über die Anfangsgradienten
und Filtergesetze bei bindiger Boden. Mitt. Grundbau und
Bodentechnik, Univ. Gesamt Hochschule Essen (D).
- Gabener, H.G., 1948. Über Abweichungen vom Darcysche Gezetzes
bei durchströmung bindigen Boden. Bautechnik, Fachblad für dem
gesamte Bauingenieurswesen, Nr. 6, 351-358. Berlin.
- Glas, H., 1985. Afvalstortterreinen, resultaten
afstudeeropdracht Technische Hogeschool, Delft.
- Hidding, A.P., 1963. Verbetering van plaatgronden. Resultaten
van het verdiepen van de doorwortelbare zone van plaatgronden.
Verspr. Overdr. 8., Instituut voor Cultuurtechniek en
Waterhuishouding, Wageningen.
- Hoeks, J. en G.J. Agelink, 1982. Onderzoek naar mogelijkheden
om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te
verminderen. ICW-Rapport 3, Staringcentrum, Wageningen.
- Hoeks, J., A.H. Ryhiner en J. van Dommelen, 1987. Onderzoek
naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op
afvalstortterreinen. ICW-Rapport 21, Staringcentrum,
Wageningen.
- Hofkamp, J.R., 1986. Zand-bentoniet mengsels als
afdichtingsmateriaal voor vuilstortplaatsen. ICW-Nota 1722,
Staringcentrum, Wageningen.

Hoogerkamp, M., 1976. De beworteling van grassen. De Buffer 22(1): p. 5-18. Consulentschap Bodemaangelegenheden in de landbouw - Wageningen.

Kezdi, A., 1969. Handbuch der Bodenmechanik Bd. I+II, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Krabbenborg, A.J., J.B.N. Poelman en E.J. van Zuilen, 1983. Standaardvochtkarakteristieken van zand- en veenkoloniale gronden. Rp. 1680. Stichting voor Bodemkartering - Wageningen.

Lambe, T.W., R.V. Whitman, 1969. Soil Mechanics. John Wiley, inc. New York, London.

Lundgren, T.A., J.R., 1986. Some bentonite sealants in soil mixed blankets. Proc. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng., June 1981, Stockholm, Vol 2: 349-354

Lutton, R.J., G.L. Regan and L.W. Jones, 1979. Design and construction of covers for solid waste landfills. EPA-600/2-79-165, EPA, Cincinnati, USA. 1982. Evaluating cover systems for solid and hazardous waste, EPA, Cincinnati USA.

Nortier, I.W. en H. van der Velde, 1963. Hydraulica voor waterbouwkundigen. De Technische Uitgeverij H. Stam N.V., Haarlem.

Oosterom, H.P., 1989. Waterdichtheid van natuurlijke materialen bij de eindafdekking van stortterreinen. Rapport 69, Staring Centrum-Wageningen.

Poelman, J.B.N. en Th. van Egmond, 1979. Uit eenvoudige grootheden af te leiden pF-waarden voor de rivier- en zeeleiggronden. Rp. 1492. Stichting voor Bodemkartering - Wageningen.

Reuter, E., 1985. Eignungsuntersuchungen von natürlichen Dichtungsmaterialien für Deponien. Heft Nr.17, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

Ryhiner, A.H. en J. Hoeks, 1986, Onderzoek naar de bruikbaarheid van Reuverse en Tegelse klei als afdichtingsmateriaal op afvalstortterreinen. ICW-Nota 1726, Staringcentrum, Wageningen.

Stuyt, L.C.P.M., 1989. Mondelinge mededeling.

VRM, 1985. Richtlijn gecontroleerd storten. Uitvoeringsvoorschrift C IV-5 Afvalstoffenwet. Wetgeving inzake afvalstoffen. Uitg. Koninkl. Vermande BV, Lelystad.

VRM, 1985. Protocolen voor het toepassen van afdichtingsfolies ten behoeve van de bodembescherming. Bodembescherming nr. 39. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiëne, 's-Gravenhage.

Werkgroep HELP-tabel, 1987. De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige produktie. Landinrichtingsdienst - Utrecht.

Wind, G.P., 1967. Rootgrowth in acid soils. Neth.J. Agric. Sci. 15: p. 259-266.

INHOUD		blz.
1	GRONDEIGENSCHAPPEN	165
2	STABILITEIT	167
2.1	Algemeen	167
2.2	Recht glijvlak	168
2.2.1	Oneindig talud	168
2.2.2	Talud met terras	171
2.3	Cirkelvormig glijvlak	173
FIGUREN		
1	Definitie gehanteerde symbolen	168
2	Mogelijke bezwijksituaties	171

Ter bepaling van de stabiliteit van de eindafdekking dient onderzoek plaats te vinden naar materiaalparameters van de toegepaste grondsoorten. Dit zijn:

- Cohesie, c , in kPa en hoek van interne wrijving, ϕ , in graden. De sterkteparameters c en ϕ dienen te worden bepaald met triaxiaalproeven voor de interne sterkte en direct schuifproef voor de contactsterkte tussen grond en folie. Deze proeven dienen als drietraps geconsolideerde ongedraineerde proef te worden uitgevoerd. Ten behoeve van een statistische analyse van deze parameters verdient het de voorkeur minimaal 4 proeven per materiaal uit te voeren.
- Volumieke massa, ρ , in kg/m^3 , zowel nat als droog.

Bovenstaande proeven dienen te worden uitgevoerd op monsters die representatief zijn voor de grondsoort welke wordt toegepast.

2.1 Algemeen

Grondmechanische berekeningen moeten worden uitgevoerd ter bepaling van de standzekerheid van het talud. Twee glijcriteria moeten nader worden beschouwd:

- afschuiving evenwijdig aan het talud;
- afschuiving langs een cirkelvormig glijvlak.

Geadviseerd wordt de berekeningen toe te passen conform de semi-probabilistische methode uit de "Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 - bovenrivierengebied". Er wordt gesteld dat de kans op overschrijding van de grenstoestand voor afschuiven voldoende klein moet zijn. Deze eis wordt als volgt geformuleerd:

$$\frac{S_c}{B_c} \geq 1$$

waarin

S_c = rekenwaarde voor de ontwerpsterkte

B_c = rekenwaarde voor de ontwerpbelasting

In geval van afschuiving beïnvloeden belasting en sterkte elkaar. Zo is het gewicht van de grond bepalend voor zowel de belasting als de sterkte. In zo'n geval geldt algemeen:

$$\frac{S_c}{B_c} = \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot S(F_d, f_d, a_d)}{B(F_d, f_d, a_d)}$$

waarin:

S_c	= rekenwaarde voor de ontwerpsterkte
B_c	= rekenwaarde voor de ontwerpbelasting
$S(F_d, f_d, a_d)$	= ontwerpwaarde voor de sterkte als functie van F_d, f_d, a_d
$B(F_d, f_d, a_d)$	= ontwerpwaarde voor de belasting als functie van F_d, f_d, a_d
F_d	= ontwerpwaarde van een belasting
f_d	= ontwerpwaarde van een materiaalparameter
a_d	= ontwerpwaarde van een geometrische parameter
γ_n	= schadefactor
γ_d	= gevoeligheidsfactor

Ter bepaling van de ontwerpsterkte en de ontwerpbelasting en de ontwerpsterkte moeten per grondlaag ontwerpwaarden worden toegekend aan de materiaaleigenschappen volumieke massa, hoek van inwendige wrijving en cohesie. Voor de ontwerpwaarde van een materiaaleigenschap geldt:

$$f_d = \frac{f_r}{\gamma_m}$$

waarin:

f_d = ontwerpwaarde van een materiaaleigenschap

f_r = representatieve waarde

γ_m = materiaalfactor

Men spreekt van een karakteristieke waarde als de representatieve waarde wordt vastgesteld op basis van statistische analyse. Als karakteristieke waarde wordt aanbevolen de gemiddelde waarde, die met 95% waarschijnlijkheid voorkomt. Deze methode wordt aanbevolen als men over 4 of meer monsters beschikt. Als er echter onvoldoende gegevens zijn om een karakteristieke waarde te bepalen of als dit niet relevant is, kan ook een op andere wijze vastgestelde, zogenaamde nominale waarde worden gebruikt als representatieve waarde. Als materiaalfactoren voor de grondparameters worden aanbevolen:

	γ_m (grond-grond)	γ_m (grond-folie)
Volumieke massa-nat/droog (ρ)	1,0	-
Inwendige wrijving ($\text{tg } \varphi$)		
. zand	1,15	1,25
. klei	1,20	1,30
. veen	1,25	1,35
Cohesie	1,30	1,40
Doorlatendheid	1,25	-

Als schadefactor wordt een waarde van 1,1 gehanteerd.

2.2 Recht glijvlak

2.2.1 Oneindig talud

De krachten die op een lamel grond - met eenheidsoppervlakte en dikte d - in het talud werken, zijn weergegeven in figuur 1.

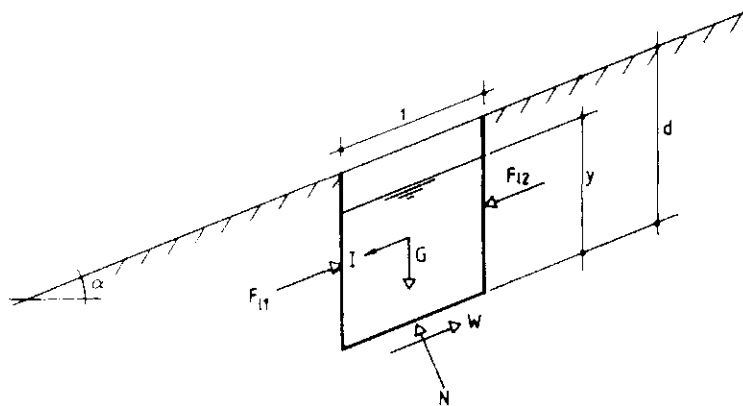


Fig. 1 Definitie gehanteerde symbolen.

Net als bij een glijvlakberekening volgens Bishop worden de interlamelkrachten F_{11} en F_{12} buiten beschouwing gelaten. Dit is geoorloofd bij oneindig lange taluds, dat wil zeggen taluds waarvan de lengte groot is ten opzichte van de afdeklaag. Voor het evenwicht van de lamel in de richting evenwijdig aan het talud zijn de volgende krachten van belang (zie figuur 1):

$$G = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot g \cdot d_i - y \cdot \rho_w \cdot g$$

waarin:

G = neerwaartse kracht tengevolge van grondgewicht in kN
 ρ_i = volumieke massa van grondlaag i in kg/m^3
 g = zwaartekrachtversnelling = 10 m/s^2
 d_i = dikte van grondlaag i in m
 n = totaal aantal grondlagen
 y = opbolling grondwater in m boven beschouwd glijvlak
 ρ_w = volumieke massa van grondwater in kg/m^3

Voor ρ_i wordt het nat volumegewicht bij verzadiging genomen als de laag beneden de grondwaterspiegel ligt. Ligt de betreffende laag boven het grondwater dan wordt een verzadigingsgraad van 75% aanbevolen.

$$I = i \cdot \rho_w \cdot g \cdot y$$

waarin:

I = stromingskracht
 i = verhang van de grondwaterstroming, $i = \sin \alpha$

$$\text{dus: } I = \rho_w \cdot g \cdot y \cdot \sin \alpha$$

$$w = c + N \tan \phi$$

waarin:

w = schuifkracht langs glijvlak in kN
 c = cohesie in kPa
 N = normaalkracht op glijvlak in kN
 ϕ = hoek van inwendige wrijving in graden

De normaalkracht N op het glijvlak is afhankelijk van de korrelspanning σ loodrecht op het talud op een diepte d . Bij een breedte van de lamel gelijk aan 1 geldt $N = \sigma_n$. De korrelspanning σ_n is gelijk aan:

$$\sigma_n = \sigma_k \cdot \cos \alpha$$

waarin:

σ_n = korrelspanning loodrecht op talud in kPa
 σ_k = verticale korrelspanning in kPa
 α = hellingshoek talud in graden

De verticale korrelspanning wordt als volgt berekend:

$$\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot g \cdot d_i - y \cdot \rho_w \cdot g$$

waarin:

y = opbolling grondwater boven glijvlak

ρ_w = volumieke massa van grondwater = 1000 kg/m³

Na substitutie wordt voor de schuifkracht W gevonden:

$$w = c + [\sigma_k \cos \alpha] \operatorname{tg} \varphi$$

Voor het evenwicht van de lamel in de richting evenwijdig aan het talud geldt nu:

Aandrijvende kracht $B = G \sin \alpha + I$

Weerstandbiedende kracht $S = W$

Om de grenstoestand afschuiven voldoende uit te sluiten, moet gelden

$$\frac{S_c}{B_c} \geq 1$$

Hierin zijn S_c en B_c de ontwerpwaarden voor de weerstandbiedende en aandrijvende kracht. Deze volgen uit S en B na toepassing van de materiaalfactor γ_m , de schadefactor γ_n en de gevoeligheidsfactor γ_d .

Na substitutie van afgeleide definities voor B en S wordt gevonden:

$$\frac{c + [\sigma_k \cos \alpha] \operatorname{tg} \varphi}{\sigma_g \sin \alpha} \geq 1$$

$$\sigma_g = \sum_{i=1}^n \{\rho_i \cdot g \cdot d_i\}$$

waarin:

σ_k = korrelspanning ter plaatse van beschouwde laagscheiding

σ_g = grondspanning ter plaatse van beschouwde laagscheiding

Aanbevolen wordt dit evenwicht op iedere laagscheiding te onderzoeken. Doorgaans treedt opbolling van het grondwater alleen boven de afdichtingslaag op. Aan de voet van de helling kan echter ook waterdruk onder de afdichtingslaag ontstaan door uittredend percolatiewater. Op plaatsen waar dit voorkomt, zal dit leiden tot vermindering van de schuifspanning en neemt dus de kans op afschuiving toe. In principe kan de korrelspanning ook afnemen door een verhoogde gasdruk onder de afdichtingslaag.

2.2.2 Talud met terras

Indien de stabiliteit van de afdeklaag, berekend met de in paragraaf 1.2.1 afgeleide formule, onvoldoende blijkt te zijn, is het mogelijk deze te ondersteunen door middel van een terras. In figuur 2 zijn drie mogelijke bezwijkvormen geschematiseerd:

- I afschuiven over horizontaal glijvlak vanwege onvoldoende wrijvingsweerstand van terras
- II passief bezwijken grondmoot onderaan talud
- III passief bezwijken grondmoot in talud

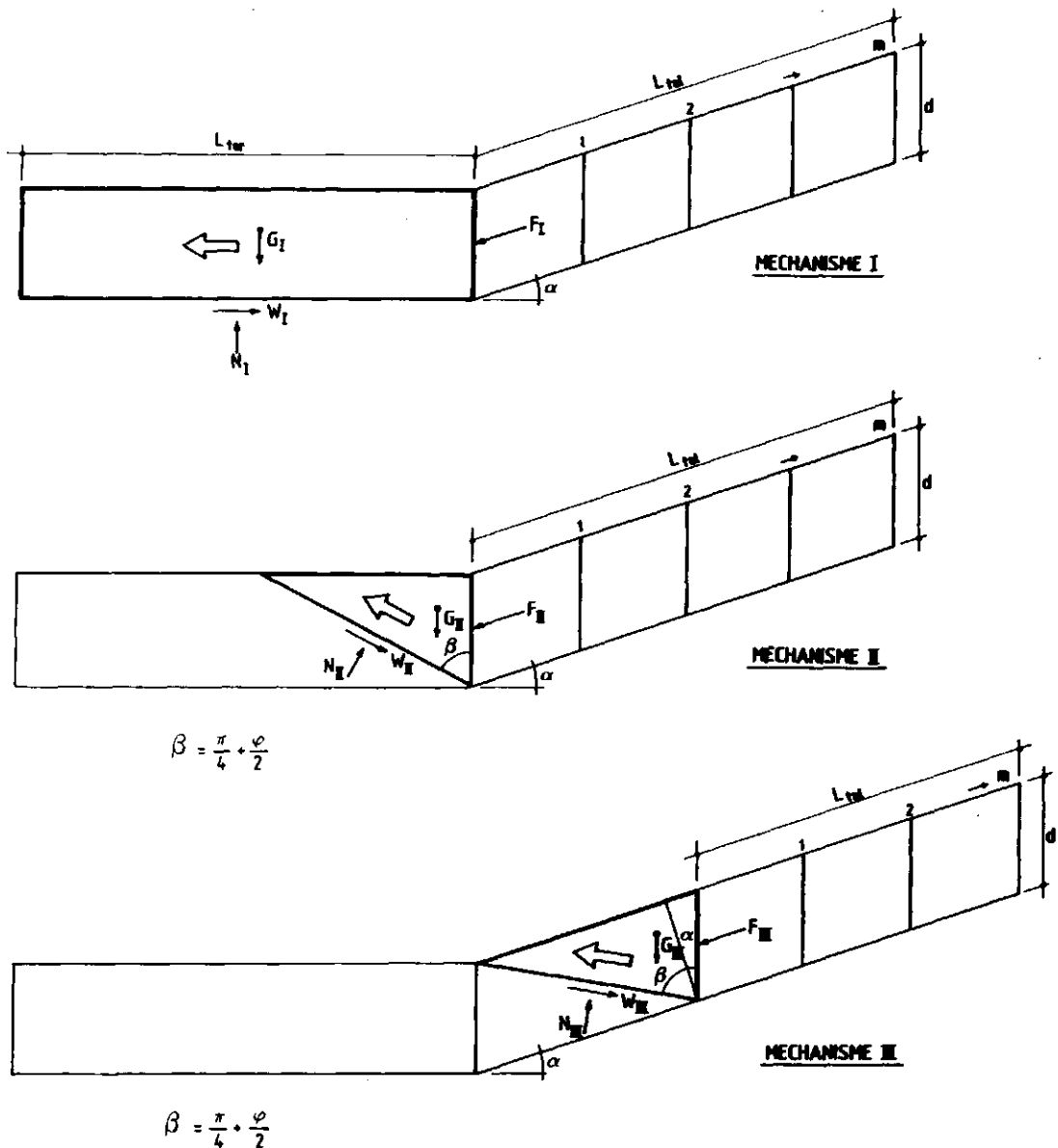


Fig. 2 Mogelijke bezwijksituaties.

Een constructie bezwijkt altijd volgens een mechanisme met de laagste bezwijkweerstand. De bezwijkbelasting F evenwijdig aan het talud is de sommatie van interlamelkrachten F_1 per taludlamel met eenheidsbreedte over de gehele lengte van het talud L_{tal} .

$$F = L_{tal} \cdot L_p$$

F_1 is het verschil tussen de aandrijvende en de weerstand-biedende kracht per lamel met eenheidsbreedte (zie paragraaf 2.2.1):

$$F_1 = B_c - S_c$$

Ter bepaling van een maximale taludlengte L_{tal} bij een bepaalde terraslengte L_{ter} dient het minimum te worden bepaald van bezwijkkrachten F_I , F_{II} en F_{III} .

$$\text{Min } (F_I, F_{II})$$

Bij het mechanisme II wordt een passieve, horizontale grond-druk op het terras uitgeoefend. De voorwaarde voor optreden hiervan is dat deze belasting kleiner is dan de optredende wrijvingsweerstand W_I . In formule:

$$\text{min}(F_I, F_{II}) = F_{II} \text{ als } L_{ter} > \frac{d \cdot k_p \cdot \sigma_k}{2(c + \sigma_k \text{tg}\varphi)}$$

waarin:

- L_{ter} = lengte terras in m
- d = dikte van grondlaag boven beschouwde laagscheiding
- c = cohesie ter plaatse van beschouwde laagscheiding in kPa
- φ = hoek van interne wrijving ter plaatse van beschouwde laagscheiding in graden
- k_p = passieve gronddrukcoëfficiënt = $(1 + \sin \varphi_i) / (1 - \sin \varphi_i)$
- σ_k = korrelspanning ter plaatse van beschouwde laag-scheiding (zie 2.2.1).

$$\text{Min } (F_{II}, F_{III})$$

Af te leiden is dat in geval van een homogene afdeklaag bij mechanisme III een lagere bezwijkwaarde hoort dan bij mechanisme II. Dit valt o.a. te verklaren uit het feit dat de lengte waarover de wrijvingsweerstand W_{III} werkt kleiner is dan die waarover W_{II} werkt. Bij mechanisme III is dus minder interne weerstand voorradig dan bij mechanisme II.

Conclusie:

$$\text{Min } (F_I, F_{II}, F_{III}) = F_{II} \text{ als } L_{ter} > \frac{d \cdot k_p \cdot \sigma_k}{2(c + \sigma_k \text{tg}\varphi)}$$

De lengte L_{ter} de minimale ontwerplengte voor het aan te leggen terras.

Een evenwichtsbeschouwing dient te worden gemaakt voor mechanisme III. Hierbij moet, uitgaande van weerstandskrachten W_{III} en G_{III} een bezwijkbelasting F_{III} worden bepaald. Dan geldt:

$$L_{tal} = \frac{F_{III}}{F_I}$$

2.3 Cirkelvormig glijvlak

De natuurlijke afschuifvorm van een talud is cirkelvormig. Cirkelvorige afschuiving treedt op indien afschuiving niet gedwongen plaatsvindt langs rechte vlakken met een lage sterkte, zoals is aangegeven in paragraaf 1.2. Dit bezwijkmechanisme valt te verwachten als er wel voldoende wrijvingsweerstand op de scheidingsvlakken aanwezig is, dus als $S_c/B_c > 1$. Het verdient de voorkeur in dat geval een stabiliteitsberekening voor een cirkelvormig glijvlak uit te voeren volgens de methode Bishop met afsluiting, welke is voorgescreven door de "Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken".

Ook kan in voorkomende gevallen worden gerekend met een stabiliteitsmodel dat is gebaseerd op de eindige elementenmodule, waarin grond wordt gemodelleerd als elasto-plastisch medium (model PLAXIS). Aanbevolen wordt dergelijke specialistische berekeningen uitsluitend over te laten aan grondmechanici.