

Functionele levensduur van minerale afdichtingsmaterialen en kunststoffen in vloeistofdichte eindafwerking van stortplaatsen

D. Boels¹

J. Breen²

¹ Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte
Postbus 47, 6700 AA Wageningen

² TNO Industrie
Postbus 6235, 5600 HE Eindhoven

Alterra-rapport 290

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001

REFERAAT

Boels, D. en J. Breen, 2001. *Functionele levensduur van minerale afdichtingsmaterialen en kunststoffen in vloeistofdichte eindafwerking van stortplaatsen*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 290. 126 blz., 20 fig.; 20 tab.; 82 ref.

De levensduur van zandbentoniet, Trisoplast, en bentonietmatten wordt hoofdzakelijk bepaald door het niveau van de totale concentratie en de verhouding tussen een- en tweewaardige ionen in de bodemoplossing (uitgedrukt in een SAR-waarde). Voor Hydrostab is het stabiel blijven van het vochtgehalte van belang. Verandering van vochtgehalte in Hydrostab is niet waarschijnlijk, zodat mag worden aangenomen dat deze duurzaam is. Goed aangelegde zand-bentoniet en Trisoplast behouden hun functie "eeuwigdurend" bij geringere zoutconcentratie in de bodemoplossing dan resp. 115 en 225 meq/l, ongeacht de SAR-waarde. Bentonietmatten verlangen een van de concentratie afhankelijke minimale SAR-waarde. In steunlagen treft men concentraties aan van <10 tot ca. 500 meq/l en SAR-waarden van minder dan 0,35 tot meer dan 5. In de meeste gevallen zullen de minerale afdichtingen hun functie "eeuwigdurend" behouden. Verlenging van levensduur door toeslag van soda aan de steunlaag is onder bepaalde kritieke omstandigheden mogelijk, maar kan niet als generieke maatregel worden toegepast.

Voor kunststoffen zijn de belangrijkste degradatieprocessen thermische oxidatie, langzame scheurgroei en hydrolyse. De microbiologische afbraak van de toegepaste kunststoffen is verwaarloosbaar. Een levensduur van 100 jaar voor geomembranen, drainagelagen, drainageleidingen en weefsels in bentonietmatten is haalbaar mits ze zijn vervaardigd uit een beperkt aantal grondstoffen grades, waarvan de samenstelling is geoptimaliseerd op duurzaamheid.

Trefwoorden: bentonietmat, drainagemat, geomembranen, hydrolyse, hydrostab, kwaliteit afdichtingslaag, SAR, thermische oxidatie, scheurgroei, steunlaag, Trisoplast, zandbentoniet

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door NLG 53,00 (€24,-) over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 290. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2001 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

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

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
Deel 1 Levensduur minerale materialen (D. Boels)	17
1 Inleiding	19
2 Levensduur bepalende factoren	21
2.1 Minerale materialen	21
2.1.1 Fysisch-chemische processen	21
2.1.2 Invloed fysisch-chemische veranderingen op de functionaliteit van afdichtingslagen	25
2.1.2.1 Beschrijving kenmerken afdichtingsmaterialen	25
2.1.2.2 Invloed rek / stuik op de doorlatendheid	28
2.1.2.3 Invloed van de temperatuur op de doorlatendheid	30
2.1.2.4 Invloed externe factoren op de functionaliteit van afdichtingsmaterialen	31
2.1.3 Samenvatting en conclusies (literatuuronderzoek)	33
3 Invloed chemische samenstelling bodemvocht op de doorlatendheid	37
3.1 Methoden	38
3.1.1 Doorlatendheid	38
3.1.2 Potentiële zwelcapaciteit	39
3.1.3 Bepaling oppervlak van de granulaire massa	40
3.1.4 Bepaling chemische samenstelling vocht in monsters	40
3.1.5 Bepaling CEC monsters	40
3.2 Testvloeistoffen	40
3.3 Resultaten	41
3.3.1 Samenstelling 'bodemvocht' en CEC	41
3.3.2 Potentiële zwelcapaciteit en inwendig oppervlak	42
3.4 Invloed samenstelling vloeistof op de doorlatendheid	45
3.5 Toetsing theoretische benadering doorlatendheid	49
3.6 Samenstelling steunlagen	51
3.7 Conclusies laboratoriumonderzoek	52
4 Berekening van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen	55
4.1 Uitgangspunten voor de berekening	55
4.2 Inputparameters	57
4.3 Berekening verloop kwaliteit afdichtingslagen	58
4.4 Levensduur verlengende maatregelen	60
4.5 Conclusies ten aanzien van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen	61
4.6 Synchronisatie vervanging componenten in afdichtingsconstructies	62
4.7 Hergebruik van afdichtingsmaterialen bij vervanging	63
Literatuur	65

Aanhangsels deel 1

1	Theoretische achtergronden van de invloed van samenstelling bodemvocht op de doorlatendheid van klei-houdende afdichtingsmaterialen	71
2	Interactie afdichtingslaag en omgeving	77
3	Bemonstering en chemische analyse steunlaag materiaal tbv. risico analyse	89

Deel 2 Levensduur kunststoffen (J. Breen)

89

5	Inleiding	91
6	Kunststoffen in bovenafdichting	93
	6.1 Geomembraan (kunststof folie)	93
	6.2 Drainageleidingen	94
	6.3 Drainagematten	95
	6.4 Bentonietmatten	96
7	Degradatie van kunststoffen	99
	7.1 Kunststof folie	99
	7.2 Drainageleiding	102
	7.3 Drainagematten	102
	7.4 Bentonietmatten	103
	7.5 Opslag en verwerking	103
8	Levensduurvoorspellingen	105
	8.1 Oxidatie	106
	8.2 Spanningscorrosie en langzame scheurgroei	109
	8.3 Chemische resistentie	112
9	Conclusies en aanbevelingen	113
	Referenties	115

Aanhangsels deel 2

1	Oxidatiebestandheid	117
2	Spanningscorrosie en langzame scheurgroei	121
3	Chemische resistentie en hydrolyse	123

Woord vooraf

Ter onderbouwing van heffingen die provincies opleggen aan eigenaren van afgesloten stortplaatsen voor de financiering van de nazorg conform de Leemtetwet, 1997, is de functionele levensduur van verschillende materialen in de vloeistofdichte eindafwerking van stortplaatsen in opdracht van het Inter Provinciaal Overleg (IPO) nader onderzocht.

Het onderzoek van bentoniet houdende minerale afdichtingsmaterialen is door Alterra en van kunststoffen door TNO-Industrie uitgevoerd. Aspecten van de levensduur van Hydrostab zijn in een separaat onderzoek uitgevoerd en samengevat in dit rapport opgenomen.

Het onderzoek is begeleid door de IPO-werkgroep “BENTIN” en enkele externe deskundigen. De volgende personen hebben hieraan bijgedragen: J. Ditters (Prov. Brabant), E. Foppen (Prov. Zuid-Holland), A. Kan (Prov. Limburg), J. Kok(VVAV), M. Min (Prov. Noord-Holland) (opvolger van F.J.M. Tuerlings, Prov. Brabant), M. Power (Prov. Drenthe), A. de Wit (N.V. Afvalzorg Noord-Holland), S. Seuren (Prov. Gelderland), R. Franken (RIVM) en W. van der Zon (Geodelft).

Het conceptrapport is voorts ter beoordeling voorgelegd aan leden van het Expertisenetwerk Bodembescherming (ENBB). Het ENBB heeft ingestemd met de conclusies ten aanzien van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen en kunststoffen.

Samenvatting

Provinciale overheden zijn volgens de Leemtewet belast met de nazorg van stortterreinen waar na 1 september 1996 nog is of zal worden gestort. Ter dekking van de kosten van het beheer en 'eeuwige' nazorg legt de provincie een heffing op aan de eigenaar van die stortplaats. Vervanging van afdichtingconstructies op het moment waarop deze niet meer aan de eisen volgens de oorspronkelijk afgegeven vergunning voldoen, maakt deel uit van die kosten. Deze eisen betreffen kwaliteitseisen voor de bovenafdichting die zijn opgenomen in de vergunning(en) voor de stortplaats en voldoen minstens aan de eisen volgens het Stortbesluit. De (gekapitaliseerde) kosten van vervanging hangen nauw samen met de levensduur van onderdelen van die constructie.

In de uitvoeringspraktijk van de Leemtewet bleek dat het nodig was om de levensduur van minerale afdichtingslagen waarmee gerekend werd aan een nader onderzoek te onderwerpen. Op initiatief van de technische werkgroep, BENTIN genaamd, die onder de vlag van de IPO-projectgroep AF4a opereert, is dit onderzoek gestart. Daarbij is de nadruk gelegd op het onderbouwen van de eerder ontwikkelde theoretische benadering van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen. Tegelijkertijd is een opdracht verleend voor het onderbouwen van de levensduur van diverse kunststoffen in de afdichtings- en eindafwerkingsconstructie. Dat onderzoek is op verzoek van de opdrachtgever onderaanbesteed aan TNO-Industrie, Eindhoven.

Tot nu toe is de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen gebaseerd op een theoretische (fysisch-chemisch) benadering. Daarin was aangetoond dat de chemische samenstelling van het vocht in de steunlaag of bodemlagen die direct in contact staan met de afdichtingslaag een grote invloed kan hebben. Ook bleek daaruit dat de levensduur nauw samenhangt met de initiële afdichtende werking. De benadering was echter niet met empirisch onderzoek onderbouwd.

Het ingesteld (onderbouwend) onderzoek betreft:

1. een literatuuronderzoek van levensduurbepalende factoren van fysisch-chemische aard bij minerale afdichtingsmaterialen;
2. een bureaustudie van de levensduur van geomembranen, kunststof drainage systemen, drainageleidingen en weefsels in bentonietmatten (uitgevoerd door TNO-Industrie);
3. een laboratoriumonderzoek van de samenhang tussen chemische samenstelling van de vloeistof in afdichtingsmaterialen zand-bentoniet, Trisoplast en bentonietmatten, en de doorlatendheid;
4. een theoretische (model) studie van het verloop van de chemische samenstelling van vocht in afdichtingslagen in relatie tot de chemische samenstelling van vocht in steunlagen of lagen in direct contact met het afdichtingsmateriaal;
5. een berekening van de levensduur van voornoemde materialen voor verschillende (chemische samenstelling van) steunlagen;

6. een inventarisatie van mogelijkheden voor hergebruik van minerale afdichtingsmaterialen wanneer vervanging nodig is;
7. een overzicht van afstemming van het vervangingsmoment van onderdelen van de combinatieafdichting.

Ad 1 Levensduur bepalende factoren van minerale afdichtingsmaterialen

De levensduur van afdichtingsmaterialen hangt samen met externe invloeden van chemische of fysisch-chemische aard. Het materiaal kan gaan scheuren (of afschuiven) onder invloed van krachten of kan chemische veranderingen ondergaan waardoor de afdichtende eigenschappen veranderen. Ongelijkmatige zetting van het stortlichaam, verandering van het vochtgehalte (uitdroging), wisselende temperatuur, uittredend percolaat of uitwisseling van opgeloste stoffen tussen afdichtingslagen en lagen waarmee deze in nauw contact staan, zijn als potentieel levensduur bepalende factoren aangemerkt.

Het literatuuronderzoek liet zien dat in de praktijk gemeten ongelijkmatige zettingen (alzijdige rek < 5%) geringer zijn dan de materialen Trisoplast, bentonietmatten en Hydrostab zonder functieverlies kunnen opvangen (< 10%). Aangezien minerale materialen niet volledig verzadigd in bovenafdichtingsconstructies worden aangetroffen en het vervormingsgedrag van zand-bentoniet alleen onder verzadigde condities is onderzocht, bestaat nog onvoldoende zekerheid of voornoemde conclusie ook geldt voor zand-bentoniet. Temperatuurschommelingen hebben in de meest voorkomende gevallen geen nadelige invloed op de functionaliteit van minerale afdichtingsmaterialen (Hoofdstuk 2). Vorsteffecten worden bij de gangbare diktes van afdekkingen (1,0 – 1,3 m) niet verwacht: het vorstfront dringt niet tot die diepte door. Overigens is gebleken dat herhaalde vorst-dooi cycli geen blijvend nadelig effect hebben op de doorlatendheid van zand-bentoniet. Temperatuurschommelingen kunnen watertransport via de gasfase veroorzaken in afdichtingslagen onder een geomembraan. Van Hydrostab, waarvan de afdichtende werking berust op een ruimtelijke structuur van waterglasgel met ingesloten water, is gebleken dat het vochtgehalte slechts weinig varieert rond een vrijwel constante waarde die overeenkomt met het inbouwvochtgehalte. Met theoretische berekeningen is aangetoond dat het vochtgehalte in afdichtingslagen onder een folie nauwelijks zal veranderen: een afname van minder dan 3% in 100 jaar. Het vochtgehalte in de afdichtingslagen in bovenafdichtingen zal echter toenemen wanneer de temperatuur in het stortmateriaal verhoogd is, en komt in de buurt van verzadiging, hetgeen overigens niet nadelig is.

Afname van de fractie geadsorbeerde eenwaardige ionen (voornamelijk natrium en kalium en soms ook ammonium) aan het adsorptiecomplex van kleimineralen ten gunste van tweewaardige ionen (voornamen calcium en magnesium) bleek grote invloed te kunnen hebben op de doorlatendheid. Dat effect wordt nog versterkt door hoge zoutconcentraties in het porievocht.

Geconcludeerd is dat toename van het aandeel twee-waardige ionen in de oplossing in bentoniet-houdende afdichtingslagen en hoge zoutgehalten vrijwel de enige levensduur bepalende factoren zijn van bentoniet-houdende afdichtingsmaterialen.

Of zo'n toename verwacht mocht worden werd niet in de geraadpleegde literatuur aangetroffen.

Ad 2 Levensduur kunststoffen in bovenafdichtingen

De belangrijkste degradatieprocessen zijn thermische oxidatie, langzame scheurgroei en hydrolyse. De microbiologische afbraak van de toegepaste kunststoffen is verwaarloosbaar en de chemische bestandheid tegen organische verbindingen en oxiderende zuren is behalve misschien voor gasdrainagesystemen niet relevant voor een bovenafdichting. Wortelpenetratie kan bij hemelwaterdrainage- en bentonietmatten voorkomen. Echter deze vorm van degradatie kan worden vermeden.

Een levensduur voor de toe te passen geomembranen, drainagelagen, drainageleidingen en weefsels om de bentonietmatten van 100 jaar is haalbaar. Deze levensduur geldt slechts voor producten vervaardigd uit een beperkt aantal grondstoffen grades, waarvan de samenstelling {chemische structuur, molecuulgewicht en stabilisator/additieven pakket} is geoptimaliseerd op duurzaamheid. De gerenommeerde fabrikanten hebben het aspect duurzaamheid onderkend en kunnen producten, vervaardigd uit deze grades, leveren.

De eisen verwoord in de protocollen [ref. 10 deel II] zijn gebaseerd op een kortere levensduur van ca. 35 jaar. Om een langere levensduur vooraf vast te leggen, zouden de eisen in onder andere de protocollen dienen te worden aangescherpt en zouden er bovendien duurzaamheidseisen moeten komen voor de toe te passen drainage-matten, drainageleidingen en bentonietmatweefsels.

Het degradatieproces, langzame scheurgroei, kan in het geomembraan optreden. Echter bij geringe verschilzettingen zal de trekspanning in het geomembraan dusdanig laag blijven dat bij gebruik van kunststof grades, met een grote weerstand tegen scheurgroei, geen langzame scheurgroei binnen 100 jaar optreedt.

Lasverbindingen in de geomembraanbanen onderling, met name tussen de boven- en onderafdichting, en tussen het geomembraan en doorvoerconstructies zijn kritieke punten. Deze kritieke punten zijn een extra zorg en verdienen regelmatige inspectie, met name als zich zettingsverschillen voordoen. In de nazorg zou een post opgenomen kunnen worden voor controle en reparatie van locale lekkage op deze lassen.

Een ander kritiek degradatieproces is hydrolyse van PET (polyester) en PA (polyamide). Dit kan bij PET geotextielen in combinatie met basisch bentoniet. PA vertoont met name hydrolyse in zure milieus.

Vooraf zou de pH-waarde van de omringende bodem kunnen worden bepaald en kan bij twijfel de bestandheid van de voorziene geotextielen met PA of PET garen worden gekwantificeerd. Dit geldt bijvoorbeeld voor de drainagemat op basis van aan elkaar gesmolten PE schuim voorzien van een PET filterdoek. Zonodig kan dan nog voor een ander geotextiel worden gekozen. De gerenommeerde fabrikanten van kunststof onderdelen voor een stortplaats bieden voor de kritieke delen uitsluitend op PE en PP gebaseerde producten aan.

In tabel S.1 wordt de levensduur van de verschillende kunststof producten in een bovenafdichting van een stortplaats samengevat.

Tabel S.1 Samenvatting van verwachte levensduur voor optredende degradatievormen.

Product	Materiaal	Degradatievorm	Voorwaarden	Levensduur-verwachting
Geomembraan	HDPE HDPE-flex LLDPE VLDPE	Oxidatie	Temp. < 20 °C; Geringe uitloging; Alleen O ₂ als oxiderende stof; Voldoend gestabiliseerd	Goede kwaliteit: > 100 jaar Marginale kwaliteit: ~ 35 jaar
		Langzame scheurgroei	Temp. < 20 °C; Voldoend hoog molecuulgewicht	Goede kwaliteit: > 100 jaar Marginale kwaliteit: ~ 35 jaar
		Chemische resistentie	n.v.t.	> 100 jaar
		Hydrolyse	n.v.t.	> 100 jaar
		Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar
Geomembraan-lassen	Met name extrusielassen bij doorvoeren en andere details en wiglasverbindingen tussen de boven- en onderafdichting zijn kritisch. Deze kunnen een lagere weerstand tegen oxidatie en langzame scheurgroei vertonen			
Gasdrainageleiding	HDPE PP	Oxidatie	Temp. < 20 °C; Geringe uitloging; Alleen O ₂ als oxiderende stof; Voldoend gestabiliseerd	Goede kwaliteit: > 100 jaar Marginale waterleiding kwaliteit: ~ 50 jaar
		Langzame scheurgroei	Temp. < 20 °C; Voldoend hoog molecuulgewicht	Goede kwaliteit: > 100 jaar Marginale waterleiding kwaliteit: ~ 50 jaar
		Chemische resistentie	Tot hoge concentratie aan organische oplosmiddelen	> 100 jaar
		Hydrolyse	n.v.t.	> 100 jaar
		Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar
Gasdrainageleiding	PVC	Oxidatie	n.v.t.	> 100 jaar
		Langzame scheurgroei	Temp. < 20 °C; Voldoend hoog molecuulgewicht	Goede waterleiding kwaliteit: > 50 jaar
		Chemische resistentie	Tot geringe concentratie organische oplosmiddelen	> 50 jaar
		Hydrolyse	n.v.t.	> 100 jaar
		Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar

Gas- en waterdrainagemat	PP, PE (vlies, weefsel, schuim)	Oxidatie	Temp. < 20 °C; Geringe uitloging; Alleen O ₂ als oxiderende stof; Voldoend gestabiliseerd	Goede kwaliteit: > 100 jaar Marginale kwaliteit: < 25 jaar
		Chemische resistentie	Tot matige concentratie aan organische oplosmiddelen	> 100 jaar
		Hydrolyse	n.v.t.	> 100 jaar
		Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar
Gas- en waterdrainagemat	PET (vlies)	Oxidatie	n.v.t.	> 100 jaar
		Chemische resistentie	Tot geringe concentratie aan organische oplosmiddelen	> 100 jaar
		Hydrolyse	pH < 9	> 100 jaar
			pH > 9	< 100 jaar
Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar		
Bentonietmat	PP, PE (weefsel, vlies)	Oxidatie	Temp. < 20 °C; Geringe uitloging; Alleen O ₂ als oxiderende stof; Voldoend gestabiliseerd	Goede kwaliteit: > 100 jaar Marginale kwaliteit: < 25 jaar
		Chemische resistentie	Tot hoge concentratie aan organische oplosmiddelen	> 100 jaar
		Hydrolyse	n.v.t.	> 100 jaar
		Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar
Bentonietmat	PET, PA (vlies, weefsel)	Oxidatie	n.v.t.	> 100 jaar
		Chemische resistentie	Tot geringe concentratie aan organische oplosmiddelen	> 100 jaar
		Hydrolyse	pH < 9 (PET) pH > 4 (PA)	> 100 jaar
			pH > 9 (PET) pH < 4 (PA)	< 100 jaar
Microbiologisch	n.v.t.	> 100 jaar		

Ad 3 Laboratorium onderzoek aan minerale afdichtingsmaterialen

De invloed van de samenstelling van het porievocht op de doorlatendheid van de materialen zand-bentoniet, bentonietmatten en zand-bentoniet is gemeten voor een reeks van verschillende oplossingen, waarvan de totale zoutconcentratie varieerde van 50 tot 500 meq/l en het aandeel van natrium in de oplossing van 5 tot 95%. Gebleken is dat zowel de potentiële zwelcapaciteit als de doorlatendheid wordt beïnvloed door zowel de totale concentratie van opgeloste stoffen (kationen en anionen) in de vloeistof als de verhouding tussen een- en tweewaardige kationen. Die verhouding is gerepresenteerd door de zogenaamde SAR-waarde (§ 3.2). Uit de metingen is een empirische relatie afgeleid tussen de doorlatendheid, totale concentratie in de oplossing en de SAR-waarde. De invloed van de chemische

samenstelling op de doorlatendheid neemt pas relevant toe wanneer de SAR-waarde onder een zekere, materiaal en concentratieafhankelijke grens daalt (§ 3.4).

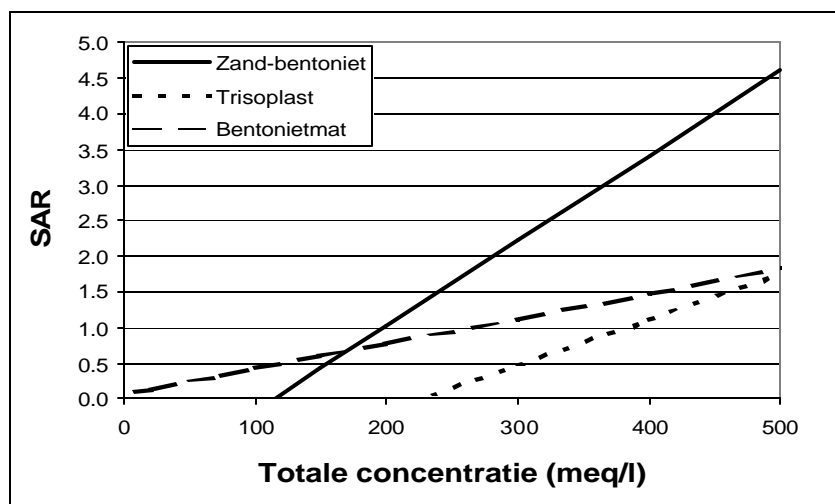


Fig. S.1 Samenhang tussen SAR-waarde en totale concentratie van het vocht in afdichtingsmaterialen waarbij onder gemiddelde omstandigheden de doorlatendheid nog juist aan de eisen van het Stortbesluit voldoet.

In de praktijk wordt voor de materialen zand-bentoniet, Trisoplast en bentonietmatten een gemiddelde doorlatendheid gerealiseerd van respectievelijk $1,0 \times 10^{-10}$; $0,1 \times 10^{-10}$ en $0,07 \times 10^{-10}$ $m \cdot s^{-1}$. Om aan de eisen van het Stortbesluit te voldoen, is een doorlatendheid nodig van respectievelijk $2,31 \times 10^{-10}$, $0,76 \times 10^{-10}$ en $0,115 \times 10^{-10}$ $m \cdot s^{-1}$. Voor zand-bentoniet is een laagdikte van 0,25 m aangehouden, voor Trisoplast 0,07 m en bentonietmatten 0,01 m. Berekend is bij welke combinatie van SAR-waarde en totaal zoutgehalte de doorlatendheid van deze materialen zover is toegenomen dat nog juist aan de eisen van het Stortbesluit voor bovenafdichtingen is voldaan. De resultaten zijn in figuur S.1 weergegeven. Hieruit blijkt de toename van de doorlatendheid zo gering is dat ook op de zeer lange termijn steeds zal worden voldaan aan de eisen volgens het Stortbesluit, zolang de totale zoutconcentratie in het vocht in de afdichtingslagen minder is dan 115 en 225 meq/l voor respectievelijk zand-bentoniet en Trisoplast (fig. S.1). Zolang die concentratiegrenzen niet worden overschreden, heeft de SAR-waarde nauwelijks invloed.

Om na te gaan of de samenstelling van steunlagen in de praktijk de levensduur van afdichtingslagen beperken, is de chemische samenstelling van het vocht in verschillende soorten steunlagen gemeten. Daaruit is gebleken dat de zoutconcentratie uiteen loopt van minder dan 10 meq/l tot meer dan 400 meq/l. De SAR-waarden zijn in het algemeen laag ($< 0,3$) met een enkele uitschieter van meer dan 5. In grond afkomstig van landbouwgrond of natuurterreinen ("normale grond") is de concentratie minder dan 10 meq/l en de SAR-waarden minder dan 0,03. Steunlagen van die samenstelling leiden in het algemeen niet tot beperking van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen. Steunlagen van verontreinigde grond kunnen een aanzienlijk hogere concentratie hebben dan de grenswaarden voor de materialen en zullen de levensduur dan ook beïnvloeden.

De afdichtende functie van de afdichtingslaag is gedefinieerd in termen van kwaliteit. Een kwaliteit 1 (of 100%) betreft de afdichtende werking direct na aanleg van de constructie. Een lagere kwaliteit betekent een toename van de doorlatendheid (§ 4.1).

De levensduur in een bepaalde situatie wordt bepaald door het moment waarop de kwaliteit zover daalt dat niet meer aan de eisen van het Stortbesluit wordt voldaan. Voor gemiddelde situaties (goed aangelegde afdichtingen, goede materialen) mag de kwaliteit van bentonietmatten dalen tot ca 60%, van zand-bentoniet afdichtingen tot ca. 45% en van Trisoplast tot ca 15% van de kwaliteit bij aanleg.

Deze resultaten kunnen worden gebruikt om snel te beoordelen of in een bepaalde constructie een ontoelaatbare achteruitgang van de kwaliteit verwacht mag worden. Daartoe dient men de chemische samenstelling te bepalen van het vocht in de laag waarmee het afdichtingsmateriaal in contact zal komen te staan (1:1 extract). Voor Trisoplast en zand-bentoniet is dat de steunlaag, voor bentonietmatten de drainagelaag en de laag teelaarde. Op basis van de analyses kan men de verwachte toename van de doorlatendheid met de empirisch bepaalde relaties berekenen. Als blijkt de kwaliteit meer dan acceptabel daalt, kan men de verwachte levensduur berekenen om te beoordelen of de levensduur acceptabel is, dan wel dat men kiest voor andere constructiematerialen.

De validiteit van de theoretische benadering van de doorlatendheid in relatie tot de chemische samenstelling van de bodemoplossing is getoetst. Geconcludeerd kon worden dat deze toepasbaar is zolang de kleimineralen in volledig gedispergeerde toestand verkeren (in het algemeen bij relatief hoge Na-gehalten en geen te hoge totale concentraties), maar niet wanneer de kleikristallen samenklonteren en aggregaten vormen (relatief hoge Ca-gehalten en hoge totale concentraties). Bij aggregaatvorming neemt het inwendig oppervlak, dat voor een belangrijk deel de lage doorlatendheid verklaart, aanzienlijk af. De theoretisch benadering houdt daarmee geen rekening. Geconcludeerd is dat bij de berekening van het effect van verandering van de chemische samenstelling van het vocht in de afdichtingslaag op de doorlatendheid uitgegaan moet worden van de empirisch bepaalde relatie, juist omdat daarin wel de effecten van aggregaatvorming zijn verdisconteerd.

Ad 4 en 5 Verloop chemische samenstelling vocht in afdichtingslagen en levensduur

Het verloop van de chemische samenstelling van het vocht in de minerale afdichtingslaag is van belang voor de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen. Deze levensduur is in twee stappen benaderd. Eerst werd met behulp van het gecombineerd geo-chemisch en stoftransport simulatie model "DISPOCHE" het verloop berekend van de chemische samenstelling (en complexbezetting) in (verschillende sub-laagjes in) de afdichtingslaag. Deze samenstelling verandert onder invloed van transport van een- en tweewaardige kationen door moleculaire diffusie vanuit de steunlaag naar de afdichtingslaag en omgekeerd. Daarna werd de (gemiddelde) doorlatendheid van de afdichtingslaag berekend met de empirische relatie die uit het laboratoriumonderzoek was afgeleid.

Wanneer het totale zoutgehalte en de SAR-waarde in de lagen waarmee de afdichtingsmaterialen direct in contact staan gering is neemt de kwaliteit van de afdichtingslaag niet noemenswaard af. Wordt daarentegen materiaal in de steunlaag verwerkt waarin met name de totale concentratie van opgeloste zouten relatief hoog en het gehalte van tweewaardige kationen veel groter is dan van eenwaardige kationen, dan daalt de afdichtende werking (kwaliteit) onder de vereiste waarde. Zand-bentoniet bijvoorbeeld toegepast op een steunlaag met een SAR-waarde van 0,05 en een concentratie van 225 meq/l, heeft onder gemiddelde condities een levensduur van 35 – 50 jaar. Bentonietmatten op zo'n steunlaag verliezen hun vereiste functionaliteit al binnen enkele jaren, terwijl de functionaliteit van Trisoplast niet onder de vereiste waarde daalt. Berekeningen laten zien dat wanneer de levensduur eindig is, de afname van de kwaliteit van de afdichtingslaag zich in een betrekkelijk snel tempo voltrekt. De kwaliteitsafname van bentonietmatten is het snelst onder zulke omstandigheden, dan volgt Trisoplast en daarna zand-bentoniet. De kwaliteit van afdichtingslagen vijf jaar na de aanleg geeft goede indicatie voor de verwachte levensduur.

Gelet op de variatie in de samenstelling van steunlagen kan geen algemeen geldende uitspraak worden gedaan van de verwachte levensduur van minerale afdichtingsmaterialen. Men is aangewezen op chemisch onderzoek. Overigens kan wel worden gesteld dat wanneer steunlagen zijn opgebouwd uit grond afkomstig van landbouwgronden of natuur terreinen, de levensduur van bentoniethoudende afdichtingsmaterialen in het algemeen niet zal worden ingeperkt en min of meer “eeuwig” durend is.

Met behulp van modelberekeningen is aangetoond dat door toevoegen van soda aan de steunlaag men de levensduur kan verlengen die anders beperkt zou zijn. Het aanvankelijk positief effect bleek na vijftig jaar sterk te zijn afgenomen. Bovendien bleek dat toevoeging niet als generieke maatregel mag worden gebruikt. Onder bepaalde omstandigheden wordt namelijk het nadelig effect van verhoogde zoutconcentratie groter dan het positief effect van de verhoging van de Na-concentratie (en SAR-waarde).

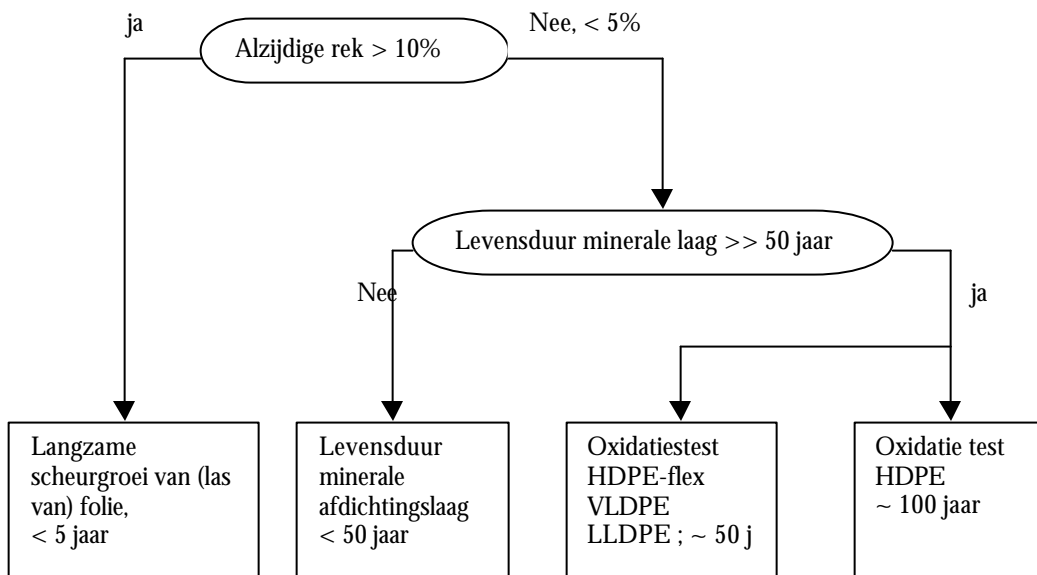
Ad 6 Hergebruik minerale afdichtingsmaterialen bij vervanging

Hergebruik van minerale afdichtingsmateriaal is via telefonische interviews met uitvoeringsdeskundigen beoordeeld. Hergebruik van bentonietmatten en Hydrostab werd unaniem uitgesloten. Ten aanzien van zand-bentoniet en Trisoplast werd geconcludeerd dat omputten (omkering van de profielopbouw) waarbij de oude afdichtingslaag op het afval wordt gelegd en de steunlaag op het afdichtingsmateriaal, een methode is om dit materiaal niet te hoeven afvoeren. Ook het drogen en malen van het afdichtingsmateriaal en vervolgens gebruik als grondstof voor een nieuwe afdichtingslaag werd als een optie gezien, ook al verwacht men uitvoeringsproblemen. De algemene teneur is dat hergebruik niet hoog wordt aangeslagen.

Ad 7 Synchronisatie vervanging onderdelen van de eindafdichting

Vervanging van bepaalde componenten van de afdichtingsconstructie betekent soms dat de functie van andere, nog goed functionerende componenten wordt verstoord en ook die dan moeten worden vervangen. In tabel 13, deel 1, is een overzicht gegeven van componenten waarvan de functie zal worden verstoord bij vervanging van bepaalde componenten die niet meer goed functioneren. De levensduur van de gehele constructie kan worden afgeleid uit de levensduur van de individuele componenten en de aard van de levensduur bepalende factoren:

- (1) levensduur minerale laag < 50 jaar en alzijdige rek < 5%: minerale laag bepaalt levensduur;
- (2) levensduur minerale laag >> 50 jaar en alzijdige rek < 5%: oxidatie test HDPE-flex, VLDPE en LLDPE folies bepalen levensduur van de constructie;
- (3) alzijdige rek > 10%: langzame scheurgroei van folies of van de las van folies (bij spanningscorrosie milieu) bepaalt van levensduur constructie.



Schema S1. Interactie onderdelen bij bepaling levensduur van een constructie

Deel 1 Levensduur minerale materialen (D. Boels)

1 Inleiding

De Leemtewet (Sb. 532, 1997) regelt de nazorg van afgesloten stortplaatsen waar na 1-9-1996 nog is of zal worden gestort, en belast de Provincie of een door de provincie(s) aan te wijzen rechtspersoon of instantie met het beheer (nazorg). Met nazorg beoogt men onder meer om bodembeschermende voorzieningen 'eeuwig durend' in stand te houden op een niveau dat in de vergunning was voorgeschreven. De nazorgkosten worden bestreden via een door de Provinciale Staten vastgestelde heffing. Dat leidt tot tegengestelde belangen tussen enerzijds de instantie die belast is met de nazorg en financiële risico's wil minimaliseren (en de vervangingstermijnen daarop afstemt) en anderzijds de stortplaatseigenaar die risico's lager inschat en levensduur optimistischer taxeert om daarmee kosten voor de nazorg te minimaliseren.

Door het IPO (Inter Provinciaal Overleg) is ter voorbereiding van de Leemtewet een werkgroep, AF4a, geformeerd, die de IPO-Checklist heeft opgesteld. Deze checklist is gebruikt bij het overleg en besluitvorming rond nazorgplannen van stortplaatsen. In de inspraakprocedure voor de beoordeling van nazorgplannen zijn verscheidene reacties binnen gekomen op de technische inhoud cq onderbouwing van deze checklist. Een technische werkgroep, BENTIN genaamd, die onder de vlag van de werkgroep AF4a opereert, evalueert de IPO-Checklist. Deze werkgroep heeft aangegeven dat nader inzicht gewenst is in het moment van vervanging van de bovenafdichtingsconstructie van een stortplaats. Deze problematiek is toegespitst op de levensduur van de minerale afdichtingslaag, de folie en de gasdrainage cq gasdrainage matten. Daarbij is als uitgangspunt gekozen dat combinatieafdichting te allen tijde moet voldoen aan de eisen volgens het Stortbesluit (Richtlijn Dichte Eindafwerking, Hoeks et al. 1991) en dat gasdrainage gedurende minimaal 30 jaar dient te functioneren. Daarnaast zou, gelet op het beleidsstandpunt met betrekking tot hergebruik, het mineraal materiaal in afdichtingslaag bij vervanging zoveel mogelijk opnieuw moeten worden gebruikt.

In de praktijk wordt HDPE-flex, CHD, VLDPE als geomembraan toegepast en zand en bentoniet, TRISOPLAST (zand bentoniet plus een polymeer), HYDROSTAB (reststoffen met een toeslag van waterglas) en tertiaire klei in minerale afdichtingslagen. De meeste afdichtingslagen bestaan uit zand-bentoniet en TRISOPLAST. Hydrostab en tertiaire klei worden incidenteel toegepast. Bentonietmatten (woven en non-woven kunststofweefsels met zuivere bentoniet) dienen als alternatief voor de minerale afdichtingslaag. Verwacht werd dat elk materiaal een specifieke, mogelijk van de locale omstandigheden afhankende levensduur en dus vervangingstermijn heeft.

Door het Expertise Netwerk Bodembescherming was in haar advies aan de Provincie Noord-Brabant d.d. 14-08-1998 een benadering van de verwachte levensduur van minerale, bentoniet houdende afdichtingsmaterialen geformuleerd en was een raming

gemaakt van de vermoedelijke levensduur. Die benadering was geheel gebaseerd op theoretische gronden.

Naar aanleiding van dat advies heeft het IPO aangegeven dat er behoefte bestaat aan: (1) een onderbouwing van deze termijnen; (2) inzicht in mogelijke maatregelen om de levensduur van de afdichting op relatief simpele wijze te verlengen door bijvoorbeeld reparaties, grotere laagdiktes, chemische samenstelling steunlaag en het synchroniseren van de vervangingstermijn van de folie en minerale afdichtingslaag; (3) een indicatie omtrent de mogelijkheden van en voorwaarden voor hergebruik van het te vervangen materiaal.

Daarvan zijn enkele onderzoeksdoelstellingen afgeleid:

- 1 onderbouwing van de levensduur en de daarmee samenhangende vervangingsstermijn van minerale afdichtingsmaterialen;
- 2 onderbouwing van de levensduur en de daarmee samenhangende vervangingsstermijn van kunststofelementen in de afwerkingconstructie (folies, gasdrainage, dragers van bentonietmatten);
- 3 onderzoeken van mogelijkheden om vervangingstermijnen van onderdelen van de afdichtingconstructie te synchroniseren;
- 4 gelet op de achteruitgang van de kwaliteit van afdichtingsmateriaal, onderzoeken hoe dit materiaal bij vervanging kan worden hergebruikt (te denken valt aan het aanbrengen van (een laagje) nieuw materiaal op de oude laag of de oude laag verbeteren door er een hoeveelheid bentoniet doorheen te mengen met bijvoorbeeld de “mixed in place” methode);inventarisatie van levensduurverlengende maatregelen.

2 Levensduur bepalende factoren

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van externe factoren die direct of indirect invloed hebben op de kwaliteit van afdichtingslagen. Kenmerken van minerale materialen die in afdichtingsconstructies worden toegepast, zijn beschreven en aangegeven is welke eigenschap(en) door externe factoren worden beïnvloed. Tot slot zijn de theoretische achtergronden van het verloop van de externe factoren gepresenteerd, voor zover deze relevant zijn voor de levensduur. Ook is ingegaan op een aan de literatuur ontleende samenhang tussen externe factoren en de functionaliteit.

2.1 Minerale materialen

De levensduur (vervangingstermijn) van minerale afdichtingsmaterialen wordt bepaald door het moment waarop de functionaliteit (afdichtende werking) zover is afgenomen dat niet meer is voldaan aan de eisen volgens het Stortbesluit en bepalingen in de oorspronkelijke vergunning. De levensduur wordt in principe bepaald door (1) de snelheid waarmee externe factoren die invloed hebben op de afdichtende functie verlopen en (2) de mate waarin externe factoren de functionaliteit beïnvloeden en (3) het moment waarop de vereiste functionaliteit niet meer aanwezig is. In deze context speelt de aanvankelijke kwaliteit van afdichtingslagen een belangrijke rol. Immers naarmate deze beter is dan strikt vereist, duurt het langer voor de vereiste kwaliteit niet meer aanwezig is.

2.1.1 Fysisch-chemische processen

In gestort afval treden diverse processen op waardoor het oorspronkelijk volume afneemt. Deels betreffen deze consolidatie, afbraak van organische stof en verandering van afvalstoffen ten gevolge van complexe reacties waarvan hydrolyse de voornaamste is (Boels and Fleming, 1994). De temperatuur kan daarbij oplopen tot (ver) boven de gemiddelde lucht- en bodemtemperatuur in Nederland.

Consolidatie is het proces waarbij afval onder invloed van het eigen gewicht in volume afneemt (verdichting). Dat volume afname leidt tot daling van het oppervlak van het stort en ook tot afname van het bovenoppervlak van het stort. De hoogteafname is niet overal gelijk, maar heeft een zekere samenhang met de dikte van de laag afval: dus geringe hoogteafname langs de teen en maximale afname midden op de kruin. Afbraak van organische stof, vaak onder vorming van methaangas, leidt eveneens tot volume afname, maar niet direct tot verdichting. Beide processen tonen als gevolg van de inhomogeniteit van afval een ruimtelijke variatie waardoor verschillzettingen kunnen optreden, die aanleiding zijn voor lokale rek in de afdichtingslaag en in bepaalde gevallen nadelig is voor de afdichtende werking.

Variaties van de temperatuur in afdichtingslagen, al dan niet beïnvloed door verhoogde temperatuur in het afval zelf, kunnen in de minerale afdichtingslagen onder folies vochtveranderingen induceren. Deze verandering kan weer gevolgen hebben voor het gedrag van afdichtingslagen bij ongelijke zetting.

Uit onderzoek van Boels en Beuving, 2000, is gebleken dat de temperatuur in afdichtingslagen van zand-bentoniet en TRISOPLAST op een stortplaats te Bavel jaarlijks varieert van 5 tot 21 °C. Er kon geen dag- en nacht ritme in het temperatuurverloop worden onderscheiden zoals op geringe dieptes wel het geval is (fig. 2). De vochttoestand van de afdichtingslagen toont ook een gering jaarlijks verloop rond een zekere gemiddelde (niet verzadigde) waarde op de helling en de kruin, terwijl het vochtgehalte in de teen geleidelijk oploopt. Uit het onderzoek van het vochtregime in Hydrostab afdichtingslagen blijkt een geringe variatie in de vochttoestand (fig. 1)

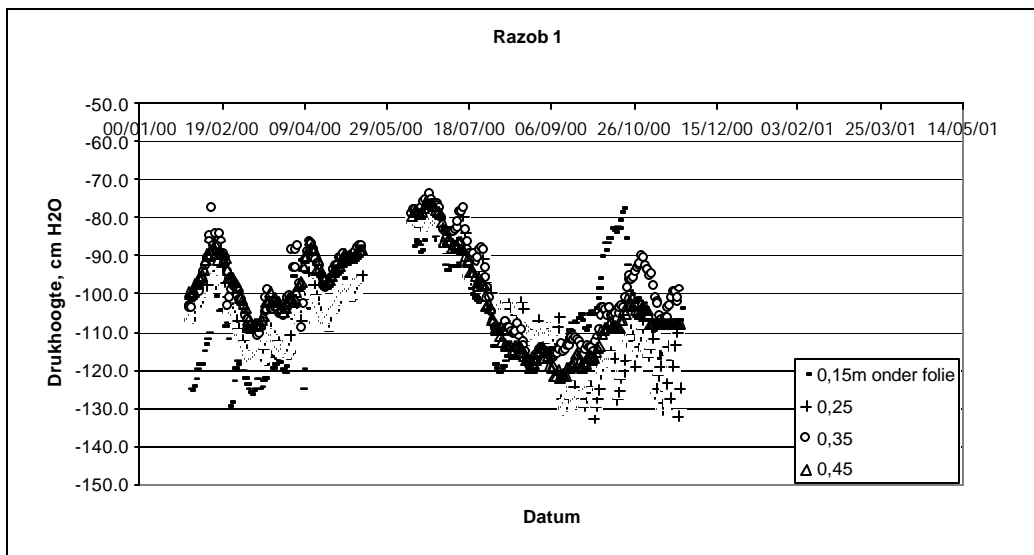


Fig. 1 Verloop van de vochtspanning in een Hydrostab-laag op de stortplaats van RAZOB.

De vochttoestand op de stortplaats van RAZOB te Nuenen is gemeten als een onderdruk in het poriewater. Deze onderdruk schommelt rond een waarde van -100 cm waterkolom (~ -100 mBar). Deze onderdruk is gerelateerd aan het vochtgehalte en voor elk mineraal materiaal bestaat een unieke relatie tussen het vochtgehalte en de vochtspanning (vocht-retentie karakteristiek). Een vochtspanning van 0 cm waterkolom betekent een verzadigd materiaal, vrijwel droog materiaal is gekarakteriseerd door een onderdruk van ca. 100.000 Bar. Het vochtverlies tussen een vochtspanning 0 en -100 bedraagt voor materiaal vergelijkbaar met Hydrostab ca. 3%. De variatie in het vochtgehalte van Hydrostab gedurende een jaar bedraagt dus minder dan +/- 0,8%. Metingen tonen aan dat het vochtgehalte van Hydrostab vrijwel constant is en slechts geringe variaties toont.

Ook uit modelberekeningen werd afgeleid dat de invloed van temperatuur-geïnduceerd damptransport op het vochtverloop verwaarloosbaar is zolang de temperatuur in het stort niet verhoogd is. Is echter die temperatuur wel verhoogd,

dan zal het vochtgehalte oplopen, hetgeen niet ongunstig is. Het verwachte lange termijn vochtgehalte van afdichtingslagen hangt nauw samen met het vochtgehalte in het afdichtingsmateriaal en de steunlaag ten tijde van de aanleg. Indien de steunlaag op grof materiaal rust (zoals afval), zal gedurende de eerste jaren na aanleg van de afdichtingslaag herverdeling van vocht over deze lagen optreden en blijft het vochtgehalte daarna vrijwel constant of neemt toe bij een verhoogde temperatuur in het afval.

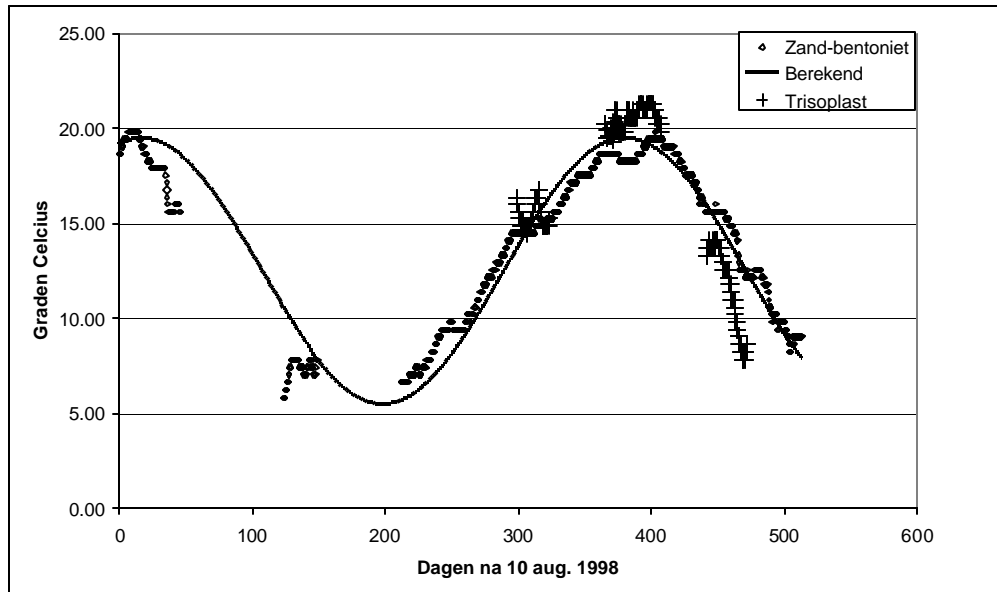


Fig. 2 Temperatuurverloop in zandbentoniet en Trisoplast afdichtingslaag op de stortplaats Bavel

Bij een gelijkmatige zetting neemt de laagdikte van het afval evenredig met die laagdikte af, waardoor het bovenoppervlak van het stortlichaam afneemt en stuik optreedt in afdichtingslagen (stuik = relatieve lengte of oppervlakte afname). Is de zetting daarentegen ongelijkmatig, evenals degradatie (afbraak) van afval, dan kan plaatselijk rek (lengte of oppervlakte toename) optreden. Rek kan binnen zekere marges worden opgevangen door minerale materialen. Bij overschrijding van die grens treedt breuk op en zijn open scheuren zelfs niet onwaarschijnlijk.

Ziehman, 2000, heeft zettingen van gestort afval afgeleid uit veranderingen van de hoogteligging van buizen in bovenafdichtingen. Als maximale zetting rapporteert deze auteur waarden van 0 (langs de rand van het stort) tot ruim 2 m (kruin). Maximale zettingen en degradatie kunnen zelfs meer dan 20% van de oorspronkelijke dikte van het gestort afval bedragen. Een onderzoek van Grontmij, 1998, op drie stortplaatsen in Nederland laat zien dat een stortplaats met storthoogte van 35 m waarvan het afval in de periode 1960-1998 werd gestort en met een compactor werd verdicht, een zetting van minder dan 2 m liet zien. De zetting varieerde van 0,1 tot 2,0 m op een stortplaats uit de periode 1969-1992 met een storthoogte van 15 m waar het afval de eerste jaren met een bulldozer was verdicht en later met een compactor. De zetting op de derde stortplaats uit de periode 1979-1992 met eveneens een storthoogte van 15 m en verdichting van het afval met een compactor

bleek minder dan 2,0 m. Nadere analyse van de hoogtemetingen op die terreinen laat zien dat rek en stuik tengevolge van verschilzettingen minder is dan 1% op ca. 95% van het oppervlak. In dit verband verstaat men onder rek een relatieve toename van het oppervlak van een denkbeeldig vlak en is stuik een relatieve afname van het oppervlak. Rek van meer dan 1% komen voor op 1 – 2% van het oppervlak. Extrapolatie van de ongelijkmatige zettingen leidde tot de conclusie dat verschilzettingen een rek tot gevolg heeft die geringer is dan 5%.

De fysisch-chemische samenstelling van afdichtingslagen en steunlagen is niet gelijk. De steunlaag dient volgens Hoeks et. al. (1991) als klankbord voor het verdichten van de afdichtingslaag en dient daarom een zekere dikte en verdichtingsgraad te hebben. Tevens dient deze laag als aarden baan voor transport van afdekmaterialen tijdens de eindafwerking en dient dus ook een zekere draagkracht te hebben. In de steunlaag wordt in het algemeen aardachtig materiaal verwerkt. Vaak wordt (licht) verontreinigde grond toegepast. Ook andere materialen zoals vormzand (restproduct van ijzergieterijen, bestaande uit zuiver kwartszand, bentoniet en deels verbrande glanskool en harsen), vliegas, AVI-slak en boorspoeling (bentoniet plus diverse toevoegingen) zouden als steunlaagmateriaal in aanmerking komen, mits deze chemisch en civieltechnisch geschikt zijn (Boels en Veerman, 1995). Overigens zij vermeld dat de invloed van de aard en samenstelling van de steunlaag wordt onderschat. Een steunlaag met een geringe doorlatendheid voor water of een te hoge fractie fijne delen, geeft problemen bij de aanleg van afdichtingslagen. Te geringe verdichting of ongelijkmatige ligging en dikte vanwege diepe sporen in de steunlaag vinden vaak hun oorzaak in een te geringe draagkracht van de steunlaag.

In de beginfase na het aanbrengen van een afdichtingslaag op de steunlaag komt vochttransport opgang tussen beide lagen wanneer het vochtgehalte ('vochttoestand') duidelijk verschillend is. Dat gaat door tot het moment waarop het vocht is herverdeeld en een (thermodynamisch) evenwicht is bereikt. Opgeloste stoffen worden daarbij van de ene laag naar de andere getransporteerd. Het stoftransport gaat na het bereiken van de evenwichtssituatie voor vocht door. De aard van het transport verandert van bulk transport (met de waterstroom) naar moleculaire diffusie in de waterfase. Diffusie stopt pas wanneer er geen concentratiegradiënten meer bestaan. Tijdens stoftransport kan uitwisseling plaats vinden tussen geadsorbeerde stoffen aan de vaste fase en in de waterfase. Ook kunnen daarbij neerslag- (of evenwicht-)reacties voorkomen (Rowe et al. 1988). Voor kleihoudende materialen betekent het adsorptie/desorptie proces dat de samenstelling van het adsorptiecomplex wijzigt, waardoor bij klei het zwelvermogen en daardoor ook de afdichtende werking kan veranderen.

Externe factoren die de functionaliteit van afdichtingslagen kunnen beïnvloeden zijn dus:

- 1 ongelijkmatige zetting van het stortlichaam, die leidt tot een bepaalde rek waardoor de doorlatendheid toeneemt of zelfs open scheuren in de afdichtingslaag ontstaan;
- 2 verandering van samenstelling van de bezetting van kationen aan het klei-adsorptiecomplex, waarbij eenwaardige ionen geheel of gedeeltelijk worden

- vervangen voor tweewaardige. Dit vermindert de zwelcapaciteit van bentoniet met als gevolg een toename van de effectieve porositeit en daardoor een toename van doorlatendheid (geldt voor zand-bentoniet, Trisoplast en bentonietmatten);
- 3 verandering van het vochtgehalte van minerale afdichtingen. Dit is van belang voor Hydrostab, waarbij vochtverlies veranderingen in de structuur van de waterglasgel teweegbrengt waardoor de afdichtende werking terug kan lopen;
 - 4 Temperatuursdaling onder het vriespunt: effecten van herhaaldelijk bevriezen en dooien (minerale afdichtingslagen) kunnen onder bepaalde omstandigheden aggregaatforming in de hand werken waardoor de doorlatendheid toeneemt;
 - 5 Invloed van percolaat (voornamelijk in de teen van taluds), waardoor vergelijkbaar met punt 2 de samenstelling van het adsorptiecomplex verandert ten nadele van de fractie eenwaardige ionen;

2.1.2 Invloed fysisch-chemische veranderingen op de functionaliteit van afdichtingslagen

2.1.2.1 Beschrijving kenmerken afdichtingsmaterialen

De meeste afdichtingslagen op stortplaatsen in Nederland bestaan uit mengsels van zand en bentoniet, met eventueel een polymeer toeslag, zoals bij Trisoplast. Natuurlijke klei wordt op zeer beperkte schaal toegepast, evenals Hydrostab. Bentonietmatten zijn in Nederland van een recentere datum en zijn (nog) niet op grote schaal toegepast. De afdichtende werking van afdichtingslagen berust op een zeer lage doorlatendheid voor water, die het gevolg is van een zeer gering effectief poriën volume.

Een gering poriën volume wordt bij inerte materialen verkregen door een korrelgrootteverdeling te kiezen waarbij een kleinere korrel juist past in de ruimte van het dichtst gepakte skelet van grotere korrels. De korrelgrootteverdeling waarbij een maximale pakking wordt verkregen wordt berekend met behulp van de "Fuller vergelijking" (Hoeks et. al., 1991). De functionaliteit van Hydrostab berust deels op dit principe. Afdichtingsmaterialen die hun functionaliteit ontleen aan een dichte pakking van het korrelskelet verliezen (een deel van) hun functionaliteit wanneer de pakkingdichtheid afneemt (zoals bij rek en stuik kan voorkomen).

Mengsels van zand en bentoniet met al dan geen toeslagmateriaal, krijgen een zeer lage doorlatendheid doordat de ruimtes in het zandskelet worden opgevuld met het zwellend bentoniet. Deze mengsels verliezen (een deel van) hun functionaliteit wanneer het zwelvermogen van bentoniet vermindert.

Natuurlijke klei ontleend zijn afdichtende werking aan een combinatie van dichte pakking en zwelvermogen van kleimineralen. In tegenstelling tot zandbentoniet-mengsels waarin bij vochtverandering de bentoniet binnen zekere marges kan zwellen en krimpen zonder verandering van het volume van het zandskelet, leidt vochtverandering bij natuurlijke klei altijd tot volume verandering. Bij uitdroging kan

natuurlijke klei een zekere rijping ondergaan, waardoor het volume blijvend wordt verkleind. Dat gaat vaak gepaard met (haar-)scheurvorming en komt tot uitdrukking in een (blijvende) toename van de doorlatendheid.

Bentoniet bevat gemiddeld ca 70% montmorilloniet. Deze kleimineraal bestaat uit een laag gibsiet (octahedraal) tussen twee lagen silica (tetrahedraal). Montmorilloniet is ontstaan uit de verwerking van vulkanische as (glasachtige materialen) in een semi-aride omgeving (weinig uitspoeling, alkaline grond en grondwater). Bij de vorming is een belangrijk deel van de Al vervangen door Mg en andere kationen en heeft Al deels de Si vervangen, waardoor een ladingtekort (negatief geladen kleikristal) is ontstaan. Dit tekort is geneutraliseerd door de adsorptie van kationen (positief geladen ionen). De bindingskrachten tussen de lagen is zwak, waardoor gemakkelijk water en polaire vloeistoffen tussen de lagen dringen. Deze eigenschap, gepaard aan een hoog specifiek oppervlak (50 – 840 m².g⁻¹) verleent montmorilloniet de bekende zweieigenschappen. Bij wateropname blijven de kationen niet op hun plaats maar hebben de neiging om van het kleioppervlak af te bewegen. Er ontstaan een soort kationen atmosfeer met een relatief hoge concentratie vlak bij het kleioppervlak en een naar buiten toe sterk afnemende concentratie. De laag waarin de kationen zich bevinden heeft een positieve lading, het kleioppervlak een negatieve. Wegens het bestaan van deze twee lagen spreekt men van een diëlectrische dubbellaag. De dikte van de laag kationen wordt bepaald door de verhouding een- en meerwaardige ionen, de concentratie van de vloeistof buiten deze laag en de diëlectrische eigenschappen van de vloeistof. Bij veel meerwaardige ionen is de laag dunner dan bij uitsluitend eenwaardige ionen, bij hoge concentraties is de laag dunner dan bij geringe concentraties en bij vloeistoffen met een lage diëlectrische constante (apolaire vloeistoffen) is de laag aanzienlijk dunner dan bij vloeistoffen met een hoge diëlectrische constante (polaire vloeistoffen bijvoorbeeld water).

De dikte van de diëlectrische dubbellaag bepaalt tezamen met het oppervlak van de klei het effectief poriënvolume en dus de doorlatendheid van bentoniet(klei)-houdende materialen.

De potentiële zwelcapaciteit wordt beïnvloed door het type kation. Wordt bijvoorbeeld calcium op het adsorptiecomplex van montmorilloniet aangetroffen dan kan dit mineraal tot 5 keer z'n eigen volume aan water opnemen (zwellen). Zijn daarentegen alleen Na ionen geadsorbeerd, dan neemt de wateropnamecapaciteit toe tot wel 20 keer z'n eigen volume.

Het vermogen om kationen te adsorberen en weer uit te wisselen tegen andere kationen, wordt aangeduid als kationomwisselcapaciteit, afgekort als CEC ('Cation Exchange Capacity) en uitgedrukt in meq/100g mineraal. De CEC van montmorilloniet ligt tussen 80 en 120 meq/100 gr (Hoeks et al., 1991). Het geheel van (minerale) materialen en het kationomwisselcapaciteit wordt in het vervolg aangeduid met 'het adsorptie-complex'.

Wegens de beperkte verkrijgbaarheid en de relatief hoge prijs anderzijds gaat men uit van het beter verkrijgbare en goedkopere calcium-bentoniet. Ca-montmorilloniet kan

worden omgezet naar een Na-montmorilloniet met een oplossing van 0,25% Na₂CO₃ (Goldman et al.). In de praktijk wordt dat gerealiseerd door bentoniet met ca. 3% soda te mengen en het daarna te drogen. Uitgaande van een CEC van 100 meq/100gr, wordt daarbij per kg montmorilloniet ca. 50 gr CaCO₃ gevormd. Veel van de in Nederland toegepaste bentoniet is zo'n "gemodificeerde" Ca-bentoniet. De natuurlijke Wyoming bentoniet bestaat echter vrijwel uit Na-bentoniet.

Trisoplast bestaat uit een mengsel van bentoniet, zand en een polymeer. Dit polymeer wordt gebonden aan bentoniet waardoor de zwelcapaciteit wordt vergroot, terwijl de CEC juist wordt verlaagd. Weitz et al., 1994, rapporteren CEC-waarden van 45 meq/100 gr. Het zwelvermogen van Trisoplast (en bentoniet) blijft ook behouden na vele cycli van drogen en herbevochtigen (Weitz. et al, 1994).

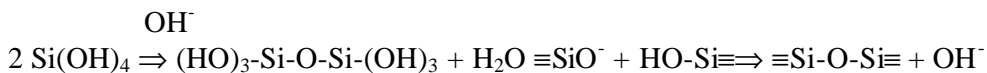
Hydrostab bestaat uit een uitgebalanceerd mengsel van reststoffen met een toevoeging van waterglas. Als reststoffen kunnen onder andere worden gebruikt: zeefzand, vormzand, vliegias, koepelovenstof, zuiveringslib en papierslib (Boels en Beuving, 1996).

Waterglas is een verzamelnaam voor in water oplosbare alkalisilicaten (Na- of K-) die worden verkregen door kwartzand en alkalicarbonaat in bepaalde verhoudingen te smelten bij 1500oC. Chemisch worden alkalisilicaten gedefinieerd door de verhouding SiO₂/MeO, waarin Me staat voor Na₂ of K₂ (Belouschek en Novotny, 1989; Boels et al., 1993). Waterglas is zowel in vloeibare vorm als in poedervorm verkrijgbaar.

De pH van waterglas in vloeibare vorm is hoog en hangt af van de concentratie en de verhouding tussen SiO₂ en MeO: bij 25 g per 1000 gr water is de pH 11 voor natrium-waterglas bij een verhouding 3,27 en bij een verhouding 1,6 is de pH 12,5; bij 100 gr. per 1000 gr water is de pH respectievelijk 11,3 en 12,7 (opgave AKZO-PQ Silica, Amersfoort).

In oplossingen van alkalisilicaten worden twee fracties onderscheiden: de werkelijk opgeloste moleculen (Na- of K-ionen, hydroxide ionen en silicaat-ionen: SiO₄⁻) en de colloïdale fractie. Bij pH > 3,5 is het oppervlak van de colloïden negatief geladen en is in staat om positief geladen kationen en polaire stoffen te absorberen. De oppervlaktelading is pH-afhankelijk.

Het monosilicazuur is instabiel en kan polymeren vormen. Belangrijk daarbij zijn de reacties waarbij water wordt afgesplitst:



Bij pH-waarden lager dan 9 neemt de polymerisatie sterk toe en ontstaan silicaatstructuren. Deze kunnen tot kiezelzuurdeeltjes reageren die nog een reactief oppervlak bezitten waarop verdere condensatiereactie mogelijk is. De reactie verloopt via de vorming van een sol naar een gel. In de gel zijn de silica-atomen via

een zuurstofbrug onderling gebonden. Deze bruggen strekken zich in alle richtingen uit waardoor een driedimensionaal netwerk kan ontstaan waarbinnen watermoleculen zijn ingesloten. Gelvorming wordt sterk bevorderd onder invloed van aardalkalimetalen, vooral calcium en magnesium en di- en trivalente metaalionen, bijvoorbeeld ijzerzouten. Daarbij kunnen onoplosbare metaalsilicaten ontstaan. Gelvorming kan ook worden veroorzaakt door organische zuren of verbindingen (bijvoorbeeld esters), die bij ontleding zuren vormen. De tijdsduur voor de vorming van een gel uit een waterige oplossing is pH- en concentratieafhankelijk. In het pH-traject tussen pH 5 en 8 is gelvorming vrijwel momentaan. Vertraging van de gelvorming is mogelijk bij een zuurgraad tussen pH 2 en 5 en pH 8 en 10.

Kieselzuursolen en -gelen zijn chemisch stabiel in contact met vuilstortpercolaat (BKB, 1995a). Stoffen uit dit percolaat kunnen via chemisch-fysische processen zoals ionenuitwisseling en complexvorming worden gebonden. Deze adsorptie-eigenschappen komen overeen met die van de zogenaamde actieve kleimineralen. Organische verbindingen met hydrofiele functionele groepen (-OH, -COOH, -NH₂) kunnen via de vorming van waterstofbruggen met silanol-groepen (SiOH-) aan het oppervlak van kieselzuursolen en -gelen worden gebonden. Krimp (syneresis) van kieselzuursolen en -gelen zou op grond van de compacte coagulatiestructuur zijn uitgesloten (Calmano en Förstner, 1995).

2.1.2.2 Invloed rek / stuik op de doorlatendheid

Om er zeker van te zijn dat minerale materialen bij ongelijkmatige zetting hun functie behouden, is in het Stortbesluit en de daarbij behorende Richtlijnen voorgeschreven dat de plasticiteitindex van minerale afdichtingen minstens 35% moet zijn.

De plasticiteitsindex is gedefinieerd als het verschil in vochtgehalte van een materiaal bij vloeigrens en uitrol grens. De vloeigrens wordt in het apparaat van Cassagrande bepaald. De uitrol grens wordt bepaald door van het materiaal een rol te maken en deze net zolang op een gipsplaat uit te rollen dat de rol in brokken uiteen valt. De ondergrond heeft dan een hoeveelheid water aan het materiaal onttrokken.

Impliciet is een zuiver plastisch gedrag van de afdichtingslaag aangenomen. Deze eis is tot stand gekomen op het moment waarop de minerale afdichting als enige afdichtingslaag zou gelden en zou bloot staan aan frequente uitdroging en herbevochtiging. In de uiteindelijke regelgeving is een combinatieafdichting voorgeschreven. Bij gebruik van zand-bentoniet, Trisoplast en Hydrostab ligt de folie op de minerale laag in tegenstelling tot bentonietmatten die vaak op de folie worden gelegd. De dynamiek in het vochtgehalte van de afdichtingslaag is aanzienlijk geringer wanneer de minerale laag onder de folie wordt gelegd dan wanneer deze er op ligt of wordt toegepast zonder folie. Overigens is gebleken dat de gangbare zandbentonietmengsels niet aan de oorspronkelijke plasticiteits-eis konden voldoen. Wegens het ontbreken van voldoende inzicht in de werkelijke betekenis van die eis, is deze in de CUR-Aanbeveling 33 niet meer opgevoerd. Ook blijken bepaalde tertiaire kleisoorten niet altijd aan het 35% plasticiteitscriterium te voldoen.

Onder auspiciën van de CUR-commissie VC50 en het ministerie van VROM is een meetmethode ontwikkeld voor de bepaling van de invloed van ongelijkmatige zetting (alzijdige rek) op de doorlatendheid. Deze methode is toegepast op zand-bentoniet, Trisoplast en Hydrostab. De aandacht is voornamelijk gericht op rek omdat daarvan de meest nadelige effecten werden verwacht en volgens Egloffstein et al., 1996 stuik goed door minerale afdichtingen kan worden opgevangen, als de daarmee gepaard gaande oppervlakteverkleiningen niet meer dan 4% bedraagt. In de praktijk blijft de consolidatie van het afval beperkt tot ca. 20%, waardoor de gemiddelde stuik op stortplaatsen met een talud van 1:3 beperkt blijft tot 1%. Van belang voor het effect van rek is het vochtgehalte. Dat is eveneens onderzocht. Gebleken is dat afdichtingslagen niet met water verzadigd zijn. Van zand-bentoniet werden geruime tijd na de aanleg vochtgehaltenes van 13-14% gemeten en van Trisoplast 8 – 20%. Het gedrag van afdichtingsmaterialen is daarom zowel bij vochtgehaltenes gemeten waarbij ze in de praktijk worden aangebracht als bij volledige verzadiging (Boels en Schreiber, 1999).

Tabel 1 Samenhang alzijdige rek en doorlatendheid drie typen afdichtingsmaterialen

Rek (%)	Doorlatendheid (x10 ⁻¹⁰ m.s ⁻¹)						Bentonietmat (gemiddeld)
	Zand-bentoniet		Trisoplast		Hydrostab		
	Verz.	Onverz.	Verz.	Onverz.	Verz.	Onverz.	
0,0	9,1	Nb	0,06	Nb	0,87	Nb	100 %
1,0	4,1	Nb	0,09	Nb	Nb	Nb	
2,0	Nb	Nb	0,11	Nb	Nb	Nb	
2,5	3,7	Nb	Nb	Nb	0,89	Nb	
3,0	Nb	Nb	0,16	Nb	Nb	Nb	
5,0	3,4	Nb	0,23	Nb	0,98	1,47	90 %
7,5	3,3	Nb	0,21	0,60	1,46	2,26	
10,0	3,1	Nb	0,21	0,37	0,89	1,45	60 %

Nb = niet bepaald

Resultaten van dat onderzoek zijn in tabel 1 samengevat en bevat de samenhang tussen (alzijdige) rek en de doorlatendheid van verschillende afdichtingsmaterialen. De gegevens over bentonietmatten zijn betrouwbaar. Daarom is volstaan met gemiddelde relatieve gegevens. Geconcludeerd werd dat de doorlatendheid van zand-

bentoniet, Trisoplast, Hydrostab en bentonietmatten niet noemenswaardig beïnvloed wordt door alzijdige rek tot 10%.

Aangezien onder normale omstandigheden de omvang van rek (en stuik) door ongelijkmatige zetting beperkte blijft en bovendien de meest gangbare materialen deze zonder noemenswaardig functieverlies kunnen opvangen, wordt ongelijkmatige zetting niet als een levensduurbepalende factor beschouwd. Dit neemt overigens niet weg dat lokaal wel een aanzienlijke ongelijkmatige zetting kan optreden. Deze zijn in het algemeen visueel op te sporen en via lokale hoogtemetingen is de grootte van rek (of stuik) eenvoudig vast te stellen. Op grond daarvan en het vermogen van de afdichtingsmaterialen om rek op te vangen, kan worden beoordeeld of herstel nodig is. Grontmij, 1999, heeft een geval van grote lokale verschilzetting op het stortterrein van de VAM te Wijster nader onderzocht. De plaatselijke totale zetting bedroeg ruim 4 m. Aan de hand van detailmetingen kon een maximale rek van de zand-bentonietlaag van 4,5% worden afgeleid. Visuele inspectie van de afdichtingslaag door de (bijna) voltallige commissie CUR-VC50 heeft tot de conclusie geleid dat geen scheuren zijn opgetreden.

Van de sporadisch gebruikte tertiaire klei staat niet vast dat deze rek zonder functieverlies kan opvangen.

Edelmann (2000) heeft op modelschaal 1:1 de samenhang tussen de doorbuiging van een 0,6 m dikke afdichtingslaag (diameter 4 m) en de waterdoorslag bepaald voor een materiaal met een gering kleigehalte (5%). Bij een doorbuiging met een kromtestraal van 40 tot 70 m (rek 0,04 resp. 0,014 %) bleken er plaatselijke scheuren te ontstaan en bleek de laag niet meer te functioneren. De doorlatendheid van het materiaal waarin geen scheuren waren aangetroffen, bleek overigens ongewijzigd. Dat experiment werd trouwens uitgevoerd zonder een bovenbelasting op de afdichtingslaag, terwijl in het CUR-VC50 onderzoek standaard met een bovenbelasting van 25 Kpa (~ een natte bovenlaag van 1,30 m) is gewerkt. De laatste methode komt beter met praktijkomstandigheden overeen.

2.1.2.3 Invloed van de temperatuur op de doorlatendheid

Temperatuur heeft invloed op de viscositeit van vloeistoffen en beïnvloed daardoor de doorlatendheid. Deze invloed is echter niet blijvend en geldt dan ook niet als een levensduur bepalende factor.

Indien de temperatuur in afdichtingslagen echter onder het vriespunt daalt bestaat de kans dat vocht vanuit bodemlagen onder het vorstfront naar het front stroomt en daar bevriest onder vorming van ijslenzen. In dat geval worden kleiaggregaten gevormd en kan een structuur met grote poriën ontstaan. De druk die door de groeiende ijslens wordt uitgeoefend kan oplopen tot 1000kPa, waardoor het bovenliggend grondpakket wordt opgeheven. Dat verschijnsel staat bekend als vorstheffing of opvriezen.

Weitz en Boels (1994) hebben het proces in een model experiment in zand-bentoniet nagebootst en de invloed van vorst-dooi cycli op de doorlatendheid op zand-bentoniet

gemeten. Uit het experiment bleek dat inderdaad vocht in de richting van het vorstfront stroomt. Verder bleek dat de oorspronkelijke doorlatendheid van $1,7 - 2,0 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ na de laatste vorst-dooi cyclus was toegenomen tot $11 - 35 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$, voornamelijk als gevolg van de afgenomen dichtheid (ijslensvorming). Binnen een week daalde de doorlatendheid naar ca. $1,0 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ en bleef tijdens de 80 dagen durende meetperiode constant. Geconcludeerd werd dat hoewel de dichtheid van zand-bentoniet bij bevriezing kan afnemen, het nadelig effect weer verdwijnt na herconsolidatie. Voor zand-bentoniet zijn temperaturen onder de vorstgrens derhalve geen levensduur bepalende factoren. Deze conclusie wordt bevestigd door onderzoek van Kraus et al, 1995 en Othman et al, 1994 die ook geen invloed van vorst-dooi cycli op de doorlatendheid van kleihoudende afdichtingslagen konden vaststellen. Overigens is het niet erg waarschijnlijk dat onder Nederlandse omstandigheden de temperatuur in afdichtingslagen onder het vriespunt daalt, omdat deze met een laag grond van minstens 0,8 – 1,0 m zijn afgedekt en de vorstgrens niet tot die diepte doordringt.

2.1.2.4 Invloed externe factoren op de functionaliteit van afdichtingsmaterialen

In deze paragraaf is een compilatie gemaakt van in de literatuur aangetroffen samenhang tussen de doorlatendheid van afdichtingsmaterialen in contact met vloeistoffen.

Heling en Klapperich (1987) hebben de invloed van oplossingen van Na, K en NH_4Cl op de doorlatendheid van een natuurlijke klei met 30% lutum onderzocht. Zij concluderen dat oplossingen tot 1 N NaCl, KCl en NH_4Cl een zeer geringe invloed hebben op de doorlatendheid evenals oplossingen van dezelfde normaliteit van NaOH, KOH, H_2SO_4 en HCL. Wel bleek dat aluminium uit het kristalrooster verdwijnt wanneer klei in een zuur milieu wordt gebracht. In een (zeer) basisch milieu komt silicium vrij. Beide processen wijzen op een (geringe) aantasting van de kleikristallen. Proeven met vuilstortpercolaat laten zien dat de doorlatendheid van zand-bentoniet wel (beperkt) toeneemt (Oostrom, 1990) en van potklei niet (Koenis en Looovers, 1991). Ustrich (1991) stelt dat bij montmorilloniet onder invloed van verdunde elektrolyten dispersie en zwelverschijnselen domineren, terwijl bij inwerking van hogere zoutconcentraties en zware metalen en koolwaterstoffen met lange ketens aggregatie overheerst en een toename van de effectieve porositeit betekent.

De invloed van oplossingen met een organische verbindingen hebben invloed via de diëlectrische eigenschappen van deze verbindingen. Met name doen oplossingen met een geringe diëlectrische constante het zwel vermogen afnemen, waardoor de klei lijkt te krimpen en soms haarscheurtjes vertoont (Anderson et al, 1985). Goldman et al. (1990) rapporteert toename van de doorlatendheid van kleiafdichtingen met een factor 2 tot 5 bij contact met alifatische en aromatische verbindingen (bijvoorbeeld heptaan, kerosine, xyleen, benzeen)

Bentonietmatten zijn volgens Didier en Comeag (1997) gevoelig voor vuilstortpercolaat (totaal zoutgehalte 270 meq/l en een Na/(Ca+Mg)-verhouding van 0,46 en pH 7). De verhouding tussen de een- en tweewaardige ionen aan het adsorptiecomplex die in evenwicht is met de verhouding in het percolaat bedraagt ca. 0,2 – 0,3. Dus het aandeel van natrium aan het adsorptiecomplex bedraagt 20-30% van alle geadsorbeerde ionen. De toename van de doorlatendheid van bentonietmatten door contact met percolaat hangt af van de bevochtigingsgraad van de mat voordat deze aan het percolaat werd blootgesteld. Deze toename bedroeg een factor 2 wanneer de mat vrijwel met water was verzadigd en ca. 2000 wanneer het aanvangsvochtgehalte van de mat slechts enkele procenten bedroeg. Trisoplast blijkt in contact met diverse vloeistoffen vrij ongevoelig, hetgeen kan worden toegeschreven aan de invloed van het polymeer (Weitz et al. 1994, Boels en Veerman, 1996).

Recente gerichte metingen van het Bundes Anstalt für Material Forschung (BAM) te Berlijn van de invloed van verandering van de Na-bezettingsgraad van bentoniet in zand-bentoniet mengsels, laat zien dat het aandeel van natrium kan dalen tot ca 30% (calcium 70%), zonder een significant effect op de doorlatendheid. Bij een bezetting van 25% en minder neemt de doorlatendheid aanzienlijk toe (tabel 2)

Tabel 2 Relatieve doorlatendheid zand-bentoniet in relatie tot Na-bezetting adsorptiecomplex (Metingen BAM-Berlijn, 2000)

Bezettingsgraad (% Na)	Doorl.h / (Doorl.h bij Na = 100%)
0	4242,4
25	2447,0
33	1,3
50	2,9
100	1

Volgens mondelinge mededeling van Dr. Holzlöhner (medewerker van BAM, Berlijn) zijn deze metingen verricht met mengsels van Na- en Ca-bentoniet waarbij was aangenomen dat het adsorptiecomplex in beide gevallen voor 100% met Na of Ca was bezet. Aangezien er na menging nog omwisselreacties kunnen plaatsvinden, is niet met zekerheid te zeggen of de beweerde bezettingsgraad juist is.

De beperkte invloed die vuilstortpercolaat heeft op de doorlatendheid van de meeste afdichtingsmaterialen moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan de verhoudingsgewijze hoog gehalte Na+K+NH₄ ten opzichte van Ca + Mg. En mogelijk ook aan het verstopping van de poriën door het zwevend organisch materiaal, zoals wordt gesuggereerd door Albiker (1986). Overigens komen de BAM-metingen overeen met die van Didier en Comeag (1997).

Boels en Wiebing (1991) hebben ruim 7 jaar na de aanleg de doorlatendheid van een zand-bentoniet bovenafdichting zonder folie op verschillende plaatsen op een talud van de stortplaats van de VAM te Wijster gemeten. Vergeleken met de doorlatendheidsmeting tijdens de aanleg van de laag bleek de doorlatendheid niet significant veranderd.

2.1.3 Samenvatting, discussie en conclusies (literatuuronderzoek)

Na het aanbrengen van de bovenafdichting op afvalstorten kunnen diverse processen in het afval nadelig werken op de kwaliteit van de minerale afdichtingslaag. Deze processen betreffen enerzijds zetting en afbraak van het afval waardoor de laagdikte van het afval afneemt en de temperatuur van het afval gedurende een bepaalde periode verhoogd kan zijn, anderzijds fysisch-chemische interacties tussen afval, steunlaag en de afdichtingslaag.

De afname van de laagdikte van het afval is in het algemeen evenredig met de laagdikte en de samenstelling van het oorspronkelijk gestort afval. Afhankelijk van de heterogeniteit van het afval en de mate van voorverdichting, kan de hoogteafname van het gestort afval sterk uiteenlopen en spreekt men van ongelijkmatige zettingen. Het oppervlak van de afdichtingslaag kan daardoor zowel toe- als afnemen. Bij regelmatige, maar niet gelijkmatige zetting komt alleen oppervlakteafname voor die met stuijk wordt aangeduid en binnen zekere grenzen (oppervlakte afname <4%) geen nadelige gevolgen heeft voor de afdichtende werking van de afdichtingslaag. Bij ongelijkmatige zetting kan daarentegen ook oppervlaktetoename voorkomen. Deze wordt aangeduid met rek. Van bentonietmatten, zand-bentoniet, Trisoplast en Hydrostab is aangetoond dat ze rek tot 10% kan ondergaan zonder noemenswaardig functieverlies. Die eigenschap bezitten deze materialen in zowel verzadigde toestand als onverzadigde toestand. Omtrent het gedrag van zand-bentoniet bestaat in dit verband nog onzekerheid omdat de gevolgen van rek in onverzadigde toestand niet zijn gemeten. Aangenomen wordt dat scheurvorming bij rek in onverzadigde toestand eerder optreedt dan in verzadigde toestand. Een grootschalig Duits model onderzoek (Edelman, 2000) laat zien dat in natuurlijke klei al bij geringe rek (< 1%) plaatselijk scheuren ontstaan die een aanzienlijke lek tot gevolg heeft. Overigens moet worden opgemerkt, dat bij die proef geen bovenbelasting was aangebracht zoals in de praktijk wel het geval is. De conclusies ten aanzien van natuurlijke klei hebben dus een beperkte geldigheid.

De invloed van temperatuur(s variatie) op de afdichtende functie betreft een (normale, maar geen blijvende) beïnvloeding van de viscositeit van het water of percolaat, waardoor de doorlatendheid van de afdichtingslaag indirect afhangt van de temperatuur. De temperatuur in de afdichtingslaag varieert jaarlijks tussen 5 en 20 graden, maar toont geen dag- en nacht ritme. De daarmee samenhangende variatie in de doorlatendheid bedraagt +/- 15%. Deze temperatuurschommeling is overigens niet levensduur bepalend.

Temperatuursveranderingen gaan gepaard met een temperatuursgradiënt, die de drijvende kracht is voor (zeer langzaam) transport van water en waterdamp daardoor verandering van het vochtgehalte in de afdichtingslaag veroorzaakt. Deze verandering is bij afwezigheid van een verhoogde temperatuur in het afval ook op de lange termijn verwaarloosbaar (minder dan 2% afname in 100 jaar). Is daarentegen de temperatuur in het afval wel verhoogd, dan neemt het vochtgehalte in de afdichtingslaag na de aanleg significant toe. Veldonderzoek heeft laten zien dat het vochtgehalte van afdichtingslagen in de teen van afvalstorten na aanleg toeneemt,

hetgeen moet worden toegeschreven aan indringend percolaat in de afdichtingslaag. Aangezien de functionaliteit van Hydrostab aangetast kan worden door aanzienlijk vochtverlies, mag op grond van metingen en berekeningen worden aangenomen dat dit materiaal duurzaam is.

Bij daling van de temperatuur in de afdichtingslaag onder het vriespunt vormen zich onder bepaalde condities ijslenzen (vorstheffing). Daardoor kan de pakkingsdichtheid afnemen. Van zand-bentoniet afdichtingen is experimenteel aangetoond dat de doorlatendheid na vorst-dooi cyclus aanzienlijk toeneemt, maar dat binnen een week geen effect meer was te bespeuren als gevolg van (her)consolidatie. Diverse literatuurbronnen bevestigen dat bevriezing vrijwel geen effect heeft op de doorlatendheid van afdichtingslagen. Onder Nederlandse omstandigheden is bevriezing van de afdichtingslaag niet waarschijnlijk omdat de afdichtingslagen minstens op 1 m onder maaiveld liggen het vorstfront zelden tot meer dan 1 m diepte in de bodem dringt.

Afdichtingslagen worden in het algemeen onder een folie en op steunlagen aangebracht. Bentonietmatten legt men daarentegen vaak op de folie en onder de drainagelaag. De chemische samenstelling van de afdichtingslaag en de laag waarmee deze in direct contact staat verschilt doorgaans, waardoor uitwisseling van opgeloste stoffen tussen beide lagen zal optreden. Dit stoffentransport wordt aanvankelijk veroorzaakt door een herverdeling van vocht in beide lagen tot een thermodynamisch evenwicht is bereikt en daarna door moleculaire diffusie in de waterfase tot het moment waarop geen concentratiegradiënten meer aanwezig zijn. Tijdens dit transport vindt ook uitwisseling plaats tussen stoffen in oplossing tegen stoffen die aan de minerale bestanddelen zijn geadsorbeerd. De theoretische benadering van het transportmechanisme, chemische evenwichtsreacties in het bodemvocht en de adsorptie-desorptieprocessen zijn in aanhangsel 2 beschreven.

Het zwelvermogen van kleimineralen bepaalt de afdichtende werking van de materialen bentonietmatten, zand-bentoniet, Trisoplast en natuurlijke klei. Dit zwelvermogen is evenredig met de dikte van de diëlectrische dubbellaag van kleimineralen en wordt beïnvloed door de verhouding tussen een- en meerwaardige kationen (positief geladen ionen) aan het kleicomplex en de diëlectrische constante van de vloeistof waarmee de mineralen zijn omgeven. De ion-verhouding aan het adsorptiecomplex hangt samen met de verhouding in de opgeloste fase. Een theoretische benadering voor de berekening van de dikte van de dubbellaag in relatie tot de vloeistofsamenstelling is in aanhangsel 1 gegeven. Ook is daarin de samenhang beschreven tussen die dikte en de doorlatendheid.

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat de doorlatendheid van zand-bentoniet nauwelijks verandert als de fractie natrium aan het adsorptiecomplex daalt van 100 tot ca 35%, maar juist zeer sterk toeneemt als dit percentage daalt. Dit omslagpunt komt min of meer overeen met een verhouding tussen de concentraties (eq/l) van een- en tweewaardige ionen in de bodemoplossing van 1:1. Veldonderzoek van de doorlatendheid van zand-bentoniet in een constructie zonder folie heeft aangetoond dat 7 jaar na eenleg de doorlatendheid (nog) niet significant is veranderd.

Afdichtingsmaterialen waarvan de afdichtende werking op waterglasgelvorming berust, zijn gevoelig zijn voor vochtverlies. Het vochtverlies in lagen onder een folie blijft overigens zeer beperkt. Hydrostab wordt daarom als duurzaam beoordeeld, mede doordat Hydrostab daarnaast alzijdige rek tot 10% verdraagt zonder noemenswaardige functieverlies.

Geconcludeerd kan worden dat ongelijkmatige zetting van het afvallichaam, fluctuaties in de temperatuur, bevriezing, vochtverandering, transport en uitwisseling van opgeloste stoffen tegen geadsorbeerde stoffen aan kleimineralen, externe factoren zijn die in principe van invloed kunnen zijn op de functionele levensduur van afdichtingslagen. Uit literatuuronderzoek blijkt dat voornamelijk de uitwisseling van eenwaardige ionen tegen meerwaardige ionen aan kleimineralen bij overschrijding van zekere grenzen grote nadelige effecten heeft op de doorlatendheid. Die effecten kunnen met de theoretische benaderingen worden gekwantificeerd en kunnen voorspellingen worden gedaan omtrent de functionele levensduur van kleihoudende minerale afdichtingen in relatie tot de aard van de lagen waarmee de afdichtingslagen in contact staan.

3 Invloed chemische samenstelling bodemvocht op de doorlatendheid

Op basis van theoretische beschouwingen (zie aanhangsel 1) is aannemelijk gemaakt dat de doorlatendheid van kleihoudende minerale afdichtingen onder invloed staat van (1) de totale zoutconcentratie (via de osmotische potentiaal) en (2) de verhouding tussen de een- en tweewaardige kationen in de bodemoplossing, waarvan natrium, en calcium de belangrijkste zijn en in mindere mate kalium en magnesium. De invloed kon worden toegeschreven aan de verandering van de dikte van de diëlectrische dubbellaag, die nauw samenhangt met de potentiële zwelcapaciteit, en de verandering van de effectieve porositeit dientengevolge.

De functionaliteit van Hydrostab wordt bepaald door de ontwikkeling van een waterglasgel. Gelvorming wordt bevorderd door een zeker elektrolytgehalte in het vocht. Een nadelige invloed van de chemische samenstelling van het vocht in de afdichtingslaag op de functionaliteit van dit materiaal ontbreekt dan ook.

Laboratoriumonderzoek is opgezet om de theoretische benaderingen van de samenhang tussen de samenstelling van de testvloeistof, doorlatendheid en zwelcapaciteit te toetsen. De doorlatendheid van monsters van de materialen zandbenoniet, Trisoplast en bentonietmatten is eerst gemeten met water met een zeer laag zoutgehalte en een relatief hoog Na-gehalte. Een relatief hoog Na-gehalte waarborgt een vrijwel volledige bezetting van het adsorptiecomplex met natrium. Aansluitend is een reeks verschillende vloeistoffen toegepast met opklimmend totaal zout- en calciumgehalte en afnemend natriumgehalte. Ook materiaaleigenschappen zoals totale porositeit en inwendig oppervlak (= oppervlak van de minerale fractie) zijn gemeten om de vergelijking tussen gemeten en berekende doorlatendheid te toetsen.

De chemische samenstelling van het vocht in verschillende soorten steunlagen is bepaald om een beeld te vormen van de gevolgen van toepassing van die materialen voor de duurzaamheid van afdichtingslagen. Aangezien de uitwisseling van opgeloste stoffen tussen steun- en afdichtingslaag samenhangt met een concentratiegradiënt en de veranderingssnelheid van de concentraties van verschillende stoffen bepaald wordt door de kation omwisselcapaciteit, zijn ook die parameters gemeten.

Alle relevante parameters zijn dus bepaald:

- actuele samenstelling vocht in het monster (afdichtingsmateriaal, steunlaag);
- kationuitwisselcapaciteit (afdichtingsmateriaal, steunlaag);
- totaal oppervlak van de bodemmaterialen (afdichtingsmateriaal);
- relatie tussen samenstelling vloeistof en potentiële zwelcapaciteit (afdichtingsmateriaal);
- relatie tussen samenstelling vloeistof en doorlatendheid (afdichtingsmateriaal).

3.1 Methoden

3.1.1 Doorlatendheid

De doorlatendheid is gemeten in een opstelling volgens de 'falling head' methode. In deze opstelling wordt een monster opgesloten in een starre cilinder tussen twee filters. Vloeistof stroomt onder een zekere in de tijd veranderend drukverval door het monster. Gekozen is voor een opwaartse stroming om luchtinsluiting tijdens de verzadiging van het monster te voorkomen. De vloeistof wordt aangevoerd vanuit een stijgbuis met een schaalverdeling. Afvoer van de vloeistof vindt plaats aan de bovenzijde van het monster op een vaste uitstroomhoogte (fig. 2). Gedurende de meting daalt het niveau van de vloeistof in de stijgbuis. Het volume dat door het monster stroomt is evenredig met deze daling. Het vloeistofniveau is tevens een maat voor het drukverval over het monster (zie fig.2). De doorlatendheid wordt berekend uit het verschil in de drukhoogte op twee opeenvolgende tijdstippen volgens:

$$K_{sat} = - \frac{l}{\Delta T} \frac{a_{buis}}{A_{monster}} \text{Ln} \left(\frac{h(T + \Delta T)}{h(T)} \right)$$

Hierin is

K_{sat}	doorlatendheid (m/s)
ΔT	tijdsverschil tussen twee opeenvolgende waarnemingen (s)
a_{buis}	oppervlak dwars doorsnede stijgbuis (0,0000283 m ²)
$A_{monster}$	oppervlak dwarsdoorsnede monster (0,00785 m ²)
$h(T)$	niveau vloeistof in stijgbuis t.o.v uitstroomniveau op tijdstip T (max. 1 m)
$\text{Ln}(\dots)$	natuurlijke logaritme (grondtal e)

Metingen worden zolang voortgezet tot de doorlatendheid niet meer verandert. In dit onderzoek is de initiële doorlatendheid bepaald voor een situatie waarin het adsorptiecomplex voor nagenoeg 100% bezet is met eenwaardige kationen (Na). Daarvoor is een vloeistof gebruikt met een zeer geringe totale zoutconcentratie en een relatief hoge natriumconcentratie. Na deze meting zijn andere vloeistoffen toegepast. Om de invloed daarvan te kunnen bepalen dient de aanvankelijk aanwezige testvloeistof in de poriën van de monsters voor een belangrijk deel worden verdreven. Daarvoor moet de vloeistof in de poriën een aantal keren te worden verversen. Dit aantal hangt af van de afwijking van de gerealiseerde concentratie ten opzichte van de concentratie in de testvloeistof. Indien deze afwijking 10% bedraagt van het verschil tussen de concentratie in de aanvankelijk aanwezige vloeistof en de concentratie in de aangeboden vloeistof, kan men volstaan met ca 2,5 keer verversen; is de toegestane afwijking echter 1% dan dient men het volume 4,5 keer en bij 0,1% afwijking, 7 keer te verversen. In dit onderzoek is een afwijking van 1% acceptabel. Het gevolg daarvan is echter wel dat de meetduur bij geringe doorlatendheid aanzienlijk is. In het onderzoek is daarmee rekening gehouden door uit te gaan van monsters met een dikte van 0,015 m.

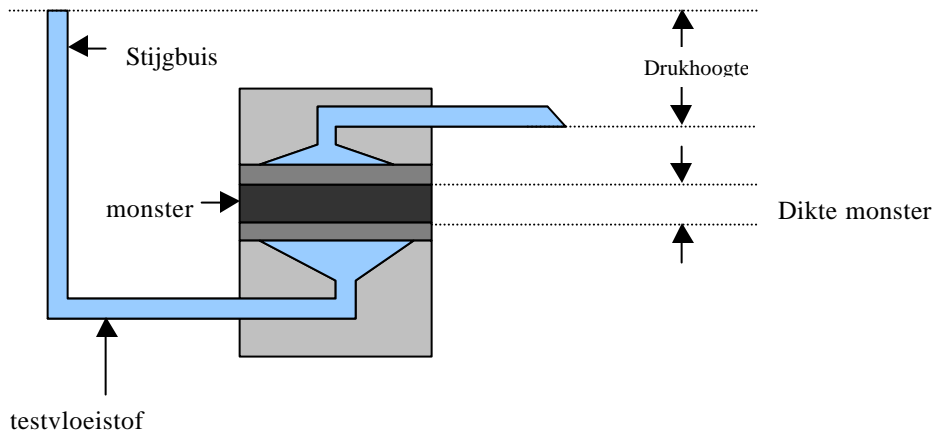


Fig 3 Opstelling voor het meten van doorlatendheid van minerale afdichtingsmaterialen

3.1.2 Potentiële zwelcapaciteit

De potentiële zwelcapaciteit is bepaald volgens de Enslin-methode. Daarbij brengt men een zekere hoeveelheid mineraal materiaal op een filterplaat die net verzadigd is. De filterplaat staat in verbinding met een horizontaal geplaatste buret met schaalverdeling, waarmee de wateropname door het monster eenvoudig en kwantitatief kan worden bepaald (Fig. 3). De potentiële zwelcapaciteit is gedefinieerd als de maximale hoeveelheid opgenomen water per massa-eenheid. De zwelcapaciteit wordt potentieel genoemd omdat de metingen zonder een bovenbelasting worden uitgevoerd.

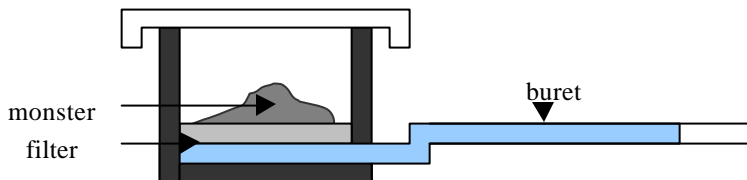


Fig. 4 Principe opstelling voor bepaling van de potentiële zwelcapaciteit

In dit onderzoek is de zwelcapaciteit bepaald aan monsters die zijn genomen aan het einde van de doorlatendheidsmetingen. De monsters (mengsels van zand en bentoniet plus eventueel een polymeer) zijn gedroogd. De hoeveelheid opgebracht droog materiaal bevat ca. 1 gram (droge) bentoniet. In de zwelproef is de buret gevuld met gedemineraliseerd water, waardoor de concentratie van het water in het monster lager wordt naarmate de wateropname toeneemt. Bij de bepaling van de samenhang tussen de samenstelling van de vloeistof en de zwelcapaciteit, is de concentratie gebaseerd op de gemeten concentratie in het bodemvocht, maar gecorrigeerd voor de verdunning ten gevolge van wateropname.

3.1.3 Bepaling oppervlak van de granulaire massa

Het principe van de bepaling van het totaal oppervlak van de granulaire massa bestaat het aanbrengen van een monomoleculaire laag op het oppervlak van de minerale massa, die vervolgens wordt verwijderd. Uit het gewichtsverlies en de (bekende) hoeveelheid massa in de monomoleculaire laag per oppervlakteenheid leidt men het oppervlak van het onderzocht materiaal af. Dit oppervlak wordt uitgedrukt in vierkante meters per gram droog materiaal.. De bepaling kan worden uitgevoerd met water (Niskanen and Mantylakti, 1987) of ethyleenglycol (Klute, 1986), waarvan 0,00031 g per vierkante meter nodig is voor een monomoleculaire laag. De methode volgens Klute is gebruikt.

3.1.4 Bepaling chemische samenstelling vocht in monsters

Voor de bepaling van de chemische samenstelling van het vocht in de monsters, is ca. 4 gram water aan verzadigd monstermateriaal onttrokken door dit te centrifugeren. Het aldus verkregen vocht is verdund (factor 5 – 10). In deze vloeistof is de concentratie van de macroparameters Na, K, Ca, Mg, Al, Fe en Mn gemeten met behulp van ICP.

3.1.5 Bepaling CEC monsters

De kationuitwisselcapaciteit (CEC) en de uitwisselbare basische kationen in grondmonsters is volgens NEN 5738 uitgevoerd. Het principe is dat alle geadsorbeerde ionen aan het complex worden vervangen door Ba-ionen. Deze worden vervolgens met een bekende hoeveelheid en concentratie $MgCl_2$ verdreven. De CEC wordt afgeleid uit het verschil tussen de toegevoegde hoeveelheid Mg en de in de oplossing achtergebleven hoeveelheid. De analyse van de basische kationen (en ook Mg) is uitgevoerd met behulp van de ICP (Thermo Jarrell Ash). De CEC wordt uitgedrukt in meq per kg droge massa.

3.2 Testvloeistoffen

De zwelcapaciteit en dus ook de doorlatendheid wordt bepaald door geadsorbeerde een-(voornamelijk Na) en tweewaardige kationen (voornamelijk Ca). De verhouding tussen de geadsorbeerde kationen is gerelateerd aan de verhouding tussen de kationen in de vloeistof waarmee het kleicomplex in contact staat. Deze laatste verhouding wordt in de zogenaamde SAR-waarde uitgedrukt (Bolt en Bruggenwert, 1978: 'Sodium Adsorption Ratio', Rowell, 1963: (Sodium) Activity Ratio). De relatie laat zich met de Gapon vergelijking weergeven:

$$\frac{G_{Na}}{G_{Ca}} = K_{Gapon} * SAR = K_{Gapon} * \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Hierin is:

G	geadsorbeerde concentratie (eq/kg)
K_{Gapon}	evenredigheidsfactor volgens Gapon
Na en Ca	concentratie (of activiteit) in vloeistof (eq/l)

De waarde van de Gapon-factor is ongeveer 0,5 voor de meeste kleimineralen en vrijwel gelijk aan 1 voor montmorilloniet. Vanaf een bepaalde SAR-waarde is het kleicomplex vrijwel volledig met natrium bezet. De samenstelling van de vloeistoffen is in tabel 3 weergegeven. De range van concentraties is zodanig gekozen dat bentoniet zowel in een gedispergeerde (gewenst om een lage doorlatendheid te bewerkstelligen) als in een geaggregeerde toestand (voor afdichtingslagen ongewenste) zal worden aangetroffen. Rowell (1963) rapporteert dat montmorilloniet (hoofdbestanddeel van bentoniet) pas zwel vertoont wanneer de totale concentratie (som anionen en kationen) lager is dan 100 meq/l en dat dispersie ontstaat bij een totale concentratie van minder dan 6 meq/l.

Op grond van voorgaande overwegingen zijn negen verschillende testvloeistoffen samengesteld, waarvan enerzijds de totale concentratie uiteen loopt van 10 tot 500 meq/l en de verhouding tussen Na en (Ca + Na) ligt tussen 0,05 – 0,95 (SAR-waarden van 0,05 – 4,25).

Tabel 3 Samenstelling testvloeistoffen

Vloeistof nummer	Concentratie (meq/l)		SAR
	Natrium	Calcium	
1	4,75	0,25	0,425
2	47,5	2,5	1,343
3	237,5	12,5	3,004
4	2,5	2,5	0,071
5	25	25,0	0,224
6	125	125,0	0,500
7	0,25	4,75	0,005
8	2,5	47,5	0,016
9	12,5	237,5	0,036

3.3 Resultaten

3.3.1 Samenstelling 'bodemvocht' en CEC

Uit de analyse van de samenstelling van de vloeistof in het monster zelf is gebleken dat het Mg- en K-gehalte relatief hoog is. Aangezien deze kationen niet in de aangeboden vloeistof aanwezig zijn, is hun aanwezigheid te verklaren uit het uitwissel proces tussen het kleicomplex en de oplossing. Het gehalte aan Ca komt vrijwel overeen met het Ca-gehalte van de testvloeistof, terwijl het Na-gehalte systematisch ca. 100 meq/l hoger is dan de testvloeistof (zie tabel 4, fig. 4 A en B). De oorzaak van de relatief hoge gehalten van Na is niet duidelijk. Voor de aanmaak van de mengsels is (volgens opgaaf van de leverancier) gewassen zeezand gebruikt. Blijkens de analyse lijkt het er op alsof dat wassen niet zo succesvol is geweest. In het onderzoek is hiermee rekening gehouden door het porievolume ca. 5 keer te

verversen, waarmee een goede uitspoeling is verkregen. Na afloop van de experimenten bleek het Na-gehalte hoger dan het gehalte in de testvloeistof. Des al niettemin is de range van SAR-waarden voldoende groot voor dit onderzoek.

Tabel 4 Samenstelling 'bodenvocht' en kationuitwisselcapaciteit (CEC) van zand-bentoniet(Zb)- en Trisoplast (Tp) monsters

Materiaal	Samenstelling bodenvocht (meq/l)				Gemiddelde activiteits-coëfficiënt	SAR	CEC (meq/kg)
	Na	K	Ca	Mg			
Zb2	120,8	0,95	2,94	2,16	0,73	2,41	67
Zb6	277,5	1,1	10,05	3,26	0,66	3,42	73
Zb12	255,23	1,12	103,4	6,74	0,62	1,09	74
Zb18	214,5	1,35	198,5	8,64	0,59	0,67	72
Tp24	187,3	2,9	11,58	4,64	0,69	2,11	107
Tp27	338,9	1,24	14,81	5,65	0,64	3,30	107
Tp33	293,6	1,33	92,87	8,16	0,62	1,31	110
Tp21	156,8	1,05	182,1	8,75	0,61	0,51	111

De CEC toont weinig variatie, hetgeen betekent dat de mengsels homogeen en gelijk zijn. De CEC van zand-bentoniet (7,5% bentoniet) wordt uitsluitend bepaald door die van de bentoniet (~950 meq/kg). Hetzelfde geldt voor Trisoplast (~ 800 meq/kg)

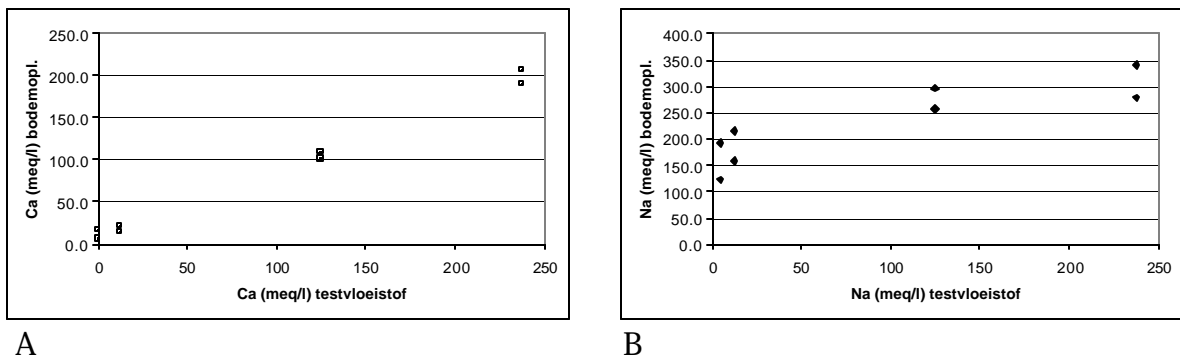


Fig. 6 Vergelijking Ca in de testvloeistof en Ca in het 'bodenvocht' (A) en Na in de testvloeistof en Na in het 'bodenvocht' (B)

3.3.2 Potentiële zwelcapaciteit en inwendig oppervlak

De potentiële zwelcapaciteit is bepaald van monsters van zand-bentoniet en Trisoplast die na beëindiging van de doorlatendheidsmeting zijn genomen. De chemische samenstelling van het vocht in deze monsters is bepaald, waarna de monsters zijn gedroogd. De zwelcapaciteit is bepaald met gedemineraliseerd water. Als gevolg van de wateropname gaan de aanwezige zouten in oplossing en bij voortschrijdende wateropname verandert de totale concentratie opgeloste stof en dus ook de SAR-waarde van de vloeistof. De concentratie en SAR-waarde zijn gecorrigeerd voor de verdunning tijdens het zwelproces. De totale wateropname door het monsters is een combinatie van wateropname door een granulaire structuur,

zoals alle droge gronden water opnemen, en een daarboven uitgaande wateropname door zwel van de kleimineralen. De wateropname van zand, zonder bentoniet is op dezelfde manier bepaald en in mindering gebracht op de totale wateropname van de mengsels. Deze wateropname is aangeduid als de potentiële zwel omdat geen bovenbelasting is aangebracht en de mineralen dus maximaal kunnen zwellen. In tabel 5 zijn de resultaten van de zwelproef en bepaling van het (inwendig) oppervlak van de granulaire massa (klei + zand) samengevat.

Tabel 5 Potentiële zwel in 24 uur van kleimineralen in mengsels zand bentoniet (Zb) en Trisoplast (Tp) bij verschillende samenstelling van de vloeistof.

Materiaal	Dichth, (kg/m ³)	Porositeit (m ³ /m ³)	Vochtgeh. (m ³ /m ³)	Tot. conc. (meq/l)	SAR	Inwendig oppervlak (m ² /gr)	Zwelcap. (g H ₂ O/g klei)
Zb2	1700	0,36	0,33	50,8	0,89	13,5	6,65
Zb6	1700	0,36	0,29	139,6	1,38	12,7	5,65
Zb12	1700	0,36	0,23	380,4	0,65	11,6	2,61
Zb18	1700	0,36	0,25	805,8	0,54	10,2	1,49
Tp24	1650	0,38	0,31	46,8	0,59	19,0	7,24
Tp27	1650	0,38	0,25	82,0	0,94	18,3	7,3
Tp33	1650	0,38	0,24	202,0	0,55	22,3	3,15
Tp21	1650	0,38	0,32	250,8	0,26	19,8	2,29

De hoeveelheid opgenomen vocht kan worden uitgedrukt als een laagdikte op het inwendig oppervlak van de minerale fractie. De laagdikte bedraagt 500 Å bij Trisoplast en 350 Å bij zand-bentoniet. Deze diktes zijn aanzienlijk groter dan die met behulp van röntgenrefractie methoden zijn aangetoond of uit theoretische berekeningen zijn afgeleid (Bolt, 1955; Norrish, 1954; Schofield 1946 en Verwey en Overbeek, 1948).

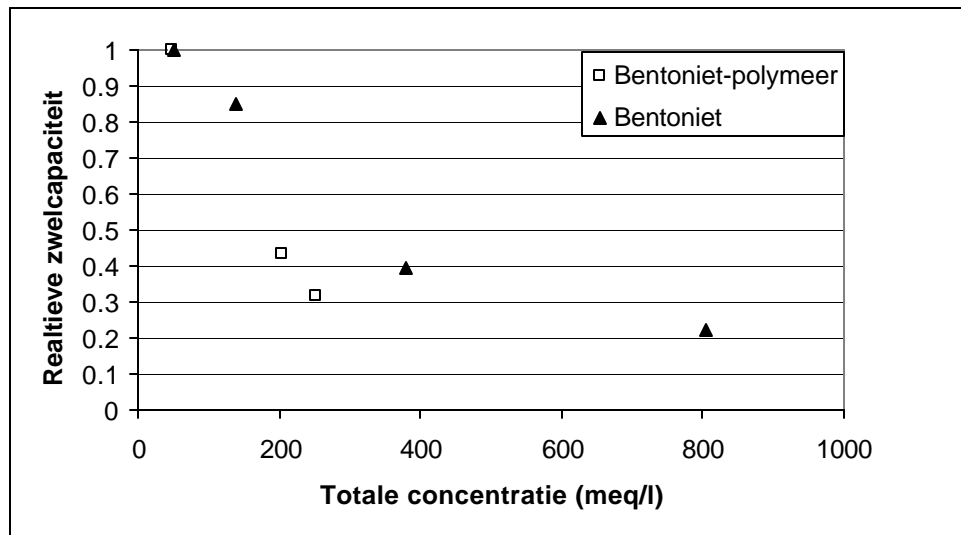


Fig. 7 Gemeten samenhang tussen totale concentratie van de vloeistof en relatieve zwelcapaciteit (actuele zwel / maximale zwel) voor bentoniet en bentoniet-polymeer.

In een discussie over dit verschijnsel somt Rowell (1963) hiervoor onder verwijzing naar verschillende bronnen, een aantal verklaringen op:

- 1 discontinuïteit in een systeem dat uit onderling evenwijdige georiënteerde kleiplaatjes bestaat waardoor wellicht het oppervlak aanzienlijk toeneemt;
- 2 kleiplaatjes vormen een ruimtelijke structuur (gel) en sluiten water in;
- 3 kleiplaatjes verbinden inerte kristallen en vormen een ruimtelijke structuur waarin water opgesloten is.

De twee laatste verklaringen lijken het meest aannemelijk omdat bij overschrijding van een zekere totale concentratie in de vloeistof, zwel zeer sterk terugloopt, wat mogelijk kan worden toegeschreven aan het niet ontwikkelen van een ruimtelijke structuur, dan wel het ineenstorten daarvan, hetgeen grotere diktes van de (geaggregeerde) mineralen verklaart.

Uit de metingen blijkt dat de potentiële zwel zeer gering is ($< 0,4$ x maximale zwel) bij een totale activiteit boven 100 – 200 meq/l (fig. 7), hetgeen overeenkomt met waarden die door Rowell (1963) gerefereerd zijn. Ook blijkt dat bij een activiteit geringer dan 60 meq/l, de potentiële relatieve zwel niet meer nadelig wordt beïnvloed door de activiteit.

Aangezien ook de Na/Ca-verhouding invloed heeft op de zwelcapaciteit, is de relatieve zwel in verband gebracht de SAR-waarde van de vloeistof (fig. 7).

Uit figuur 8 blijkt dat de zwelcapaciteit sterk wordt beïnvloed door de verhouding tussen een- en tweewaardige kationen in de oplossing. Een SAR-waarde van de vloeistof boven 0,7 en 1,0 heeft geen nadelig effect op de zwelcapaciteit van respectievelijk Bentoniet-polymeer (Trisoplast) en bentoniet (zand-bentoniet). Trisoplast blijkt minder gevoelig voor (relatief) verhoogde Ca-concentraties dan zand-bentoniet.

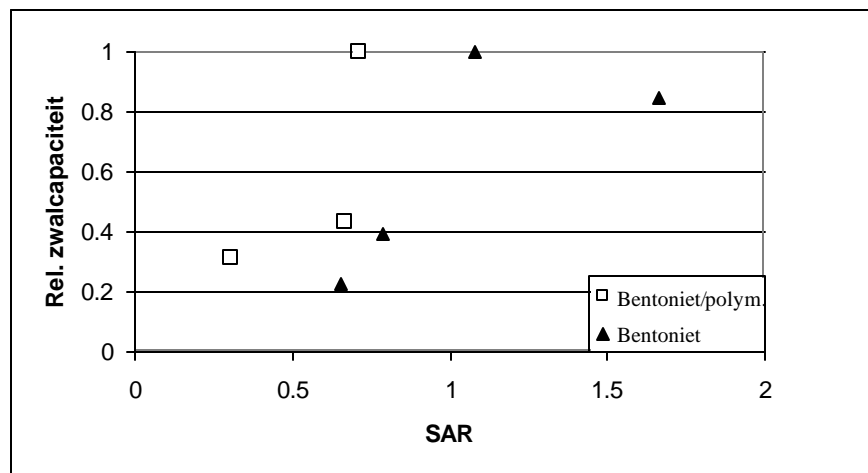


Fig. 8 Gemeten samenhang tussen relatieve potentiële zwel en SAR-waarde van de vloeistof

Via regressieanalyse is de gecombineerde invloed van activiteit en SAR op de potentiële zwelcapaciteit berekend: relatieve zwelcapaciteit = Z_1 x totale activiteit + Z_2 x SAR + Z_3 (resultaten in tabel 6).

Tabel 6 Constanten voor het regressiemodel: $\text{relatieve zwelcapaciteit} = Z_1 \times \text{totale activiteit} + Z_2 \times \text{SAR} + Z_3$

Materiaal	Z ₁	Z ₂	Z ₃	R ²
Bentoniet	-0,00091	0,12018	0,802637	0,89
Bentomiet-polymeer	-0,00325	0,18334	1,034534	0,98

Met behulp van dit model is berekend bij welke combinatie van totale activiteit en SAR geen nadelige invloed verwacht wordt op de potentiële zwelcapaciteit van de verschillende afdichtingsmaterialen (figuur 9).

Uit figuur 9 blijkt dat voor bentoniet bij relatief geringe concentraties een hogere SAR-waarde (en dus een hogere Na-gehalte) is vereist dan voor bentoniet-polymeer om nadelige invloed van de vloeistofsamenstelling op de zwelcapaciteit uit te sluiten. Dit verschil moet worden toegeschreven aan de polymeer in Trisoplast.

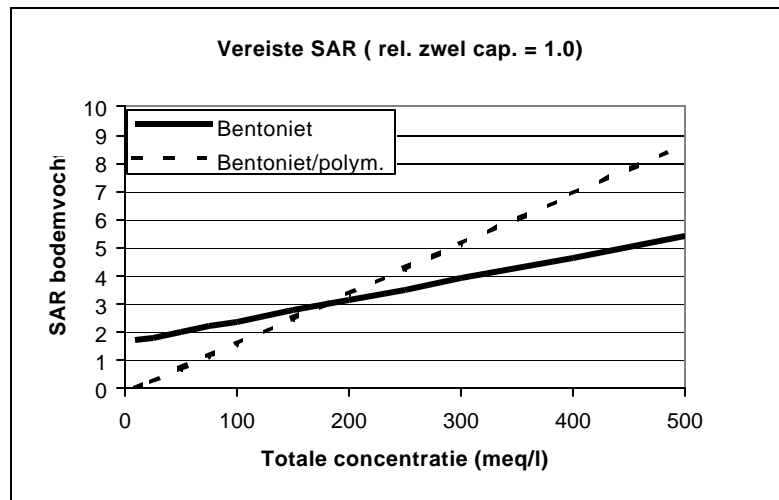


Fig. 9 Vereiste minimale SAR-waarde waarbij de zwelcapaciteit niet wordt beïnvloed door de samenstelling van de vloeistof

3.4 Invloed samenstelling vloeistof op de doorlatendheid

Mengsels van zand-bentoniet (7,5% bentoniet) en Trisoplast (standaard mengsel) zijn op een dichtheid van 1700 en 1650 kg m⁻³ geperst in laagdiktes van respectievelijk 0,025 en 0,015 m. Monsters van de bentonietmat zijn op maat gesneden voor de meetopstelling, waarbij de diameter 1-2 mm groter is genomen dan de inwendige diameter van de monsterring om een goede aansluiting op de rand te bewerkstelligen.

De zand-bentoniet en Trisoplast monsters zijn eerst doorstroomd (en verzadigd met vloeistof 1 (Na/(Ca + Na) = 0,95, totale concentratie 10 meq/l). De bentonietmatten zijn verzadigd met gedemineraliseerd water. Na verzadiging is de doorlatendheid gemeten tot deze constant bleef (= referentie doorlatendheid, K_{ref}). Daarna is de feitelijke testvloeistof aangebracht en werd de doorlatendheidsmeting gecontinueerd. De resultaten zijn in de tabellen 7 A t/m B weergegeven.

Tabel 7A Relatieve doorlatendheid, Trisoplast

Tot. conc. (meq/l)	Verhouding Na/(Ca+Na) testvloeistof		
	0,95	0,50	0,05
10	1,00	1,6	4,5
100	1,36	2,7	9,2
500	4,26	6,6	52,7

Tabel 7B Relatieve doorlatendheid zand-bentoniet

Tot. conc. (meq/l)	Verhouding Na/(Ca+Na), testvloeistof		
	0,95	0,50	0,05
10	1,00	2,5	45
100	1,72	7,9	806
500	1,94	29,0	3074

Tabel 7C Relatieve doorlatendheid bentonietmat

Tot. conc. (meq/l)	Verhouding Na/(Ca + Na) testvloeistof		
	0,95	0,50	0,05
10	1,14	1,11	1,29
100	1,36	1,15	2,59
500	1,25	1,21	13,50

Uit de metingen blijkt dat de doorlatendheid nauwelijks wordt beïnvloed door de totale concentratie van de vloeistof, zolang de Na-concentratie relatief hoog blijft. Daarentegen heeft een afnemende Na-(Na+Ca) verhouding bij geringe totale concentraties een grote invloed op de doorlatendheid van zand-bentoniet en een geringe invloed bij Trisoplast.

De doorlatendheid van Trisoplast blijkt onder invloed van toenemende totale concentraties bij een gelijk blijvende verhouding tussen Na en (Ca+Na) van 0,5, beperkt toe te nemen, terwijl die van zand-bentoniet aanmerkelijk toeneemt bij toenemende totale concentraties.

De samenstelling van het vocht in de monsters van zand-bentoniet en Trisoplast bleek ondanks de intensieve doorspoeling (gebruikte zand bleek onvoldoende gespoeld zeezand, zie §3.3.1) nog af te wijken van de samenstelling van de testvloeistof. De invloed van de totale concentratie en de verhouding tussen Na en (Ca+Na) op de doorlatendheid is daarom in verband gebracht met de gemeten samenstelling (zie fig. 10).

Gepresenteerd in deze vorm kan de afzonderlijke invloed van totale concentratie of SAR niet worden afgelezen uit de figuren. De invloed van deze parameters op de doorlatendheid is via multiële regressieanalyse bepaald. Daarbij is de doorlatendheid uitgedrukt in de logaritme van de verhouding tussen de actuele doorlatendheid en de referentiedoorlatendheid (= logaritme van de relatieve doorlatendheid).

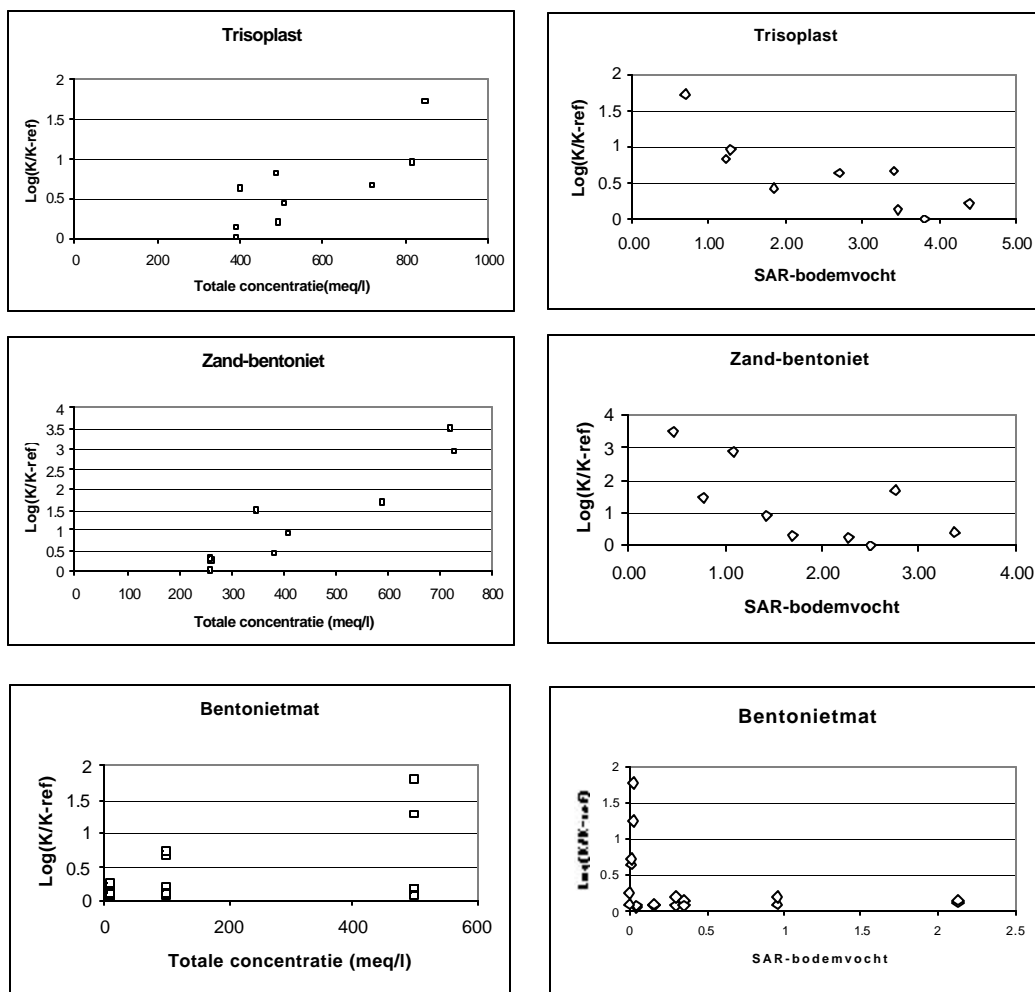


Fig. 10 Invloed van de totale concentratie en SAR van het 'bodemvocht' op de relatieve doorlatendheid van zand-bentoniet en Trisoplast en bentonietmatten

De constanten in het regressiemodel: $\text{Log}(K/K\text{-ref}) = A_1 \times \text{totale concentratie} + A_2 \times \text{SAR} + A_3$, zijn in tabel 8 weergegeven. Hoewel in principe met activiteit in plaats van concentratie gerekend zou moeten worden, is om omrekening te vermijden in dit geval uitgegaan van concentraties (meq/l).

Tabel 8 Constanten in de regressievergelijking: $\text{Log}(K/K\text{-ref}) = A_1 \times \text{totale concentratie} + A_2 \times \text{SAR} + A_3$

Materiaal	A ₁	A ₂	A ₃	R ²
Zand-bentoniet	0,00517	-0,43399	-0,22683	0,98
Trisoplast	0,001398	-0,21751	0,381511	0,92
Bentonietmat	0,001427	-0,404814	0,22907	0,45

Met behulp van de regressievergelijking is de samenhang tussen totale concentratie, SAR-waarde van het bodemvocht en doorlatendheid berekend en weergegeven in figuur 11A (zand-bentoniet), B (Trisoplast) en C (Bentonietmat).

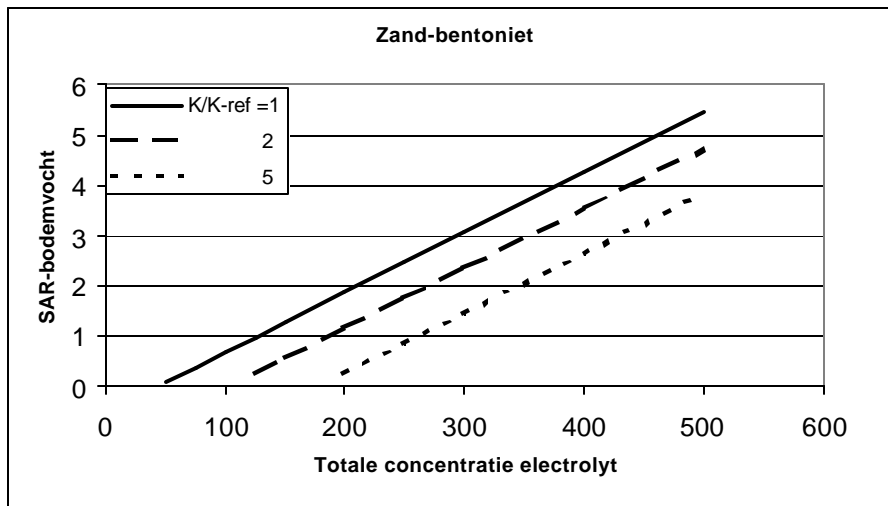


Fig. 11A Berekende samenhang voor zand-bentoniet tussen totale concentratie en SAR voor enkele verhoudingen tussen actuele en referentiedoorlatendheid (K/K_{ref})

De lijn voor $K/K_{ref} = 1$ geeft de grens weer voor combinaties van totale concentratie en SAR-waarde waarbij een hogere SAR-waarde een beperkte invloed heeft op de doorlatendheid. Die invloed laat zich benaderen met de theoretische benadering voor de doorlatendheid. De omstandigheden voor de referentiedoorlatendheid voor zand-bentoniet zijn 255 meq/l totale concentratie van de oplossing (elektrolyt) en een SAR = 2,4 (op basis van eq/l) en voor Trisoplast respectievelijk 412 meq/l en SAR = 3,36.

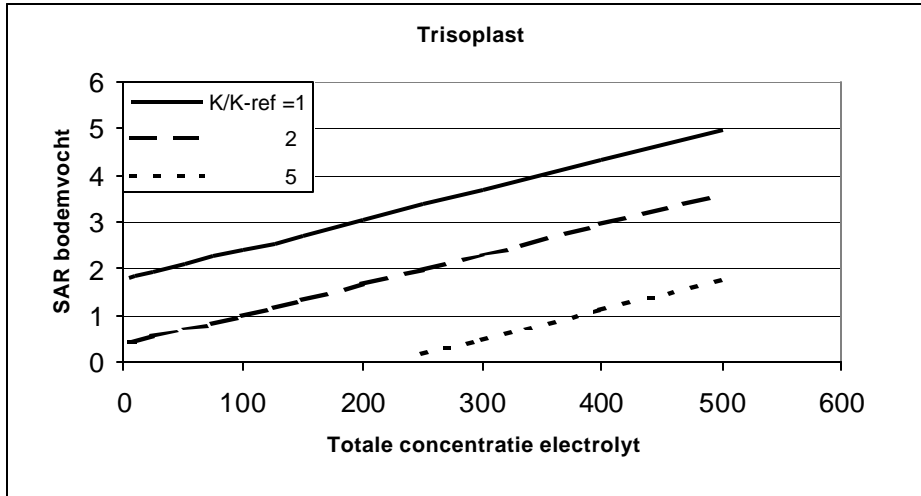


Fig. 11B Berekende samenhang voor Trisoplast tussen totale concentratie en SAR voor enkele verhoudingen tussen actuele en referentiedoorlatendheid (K/K_{ref})

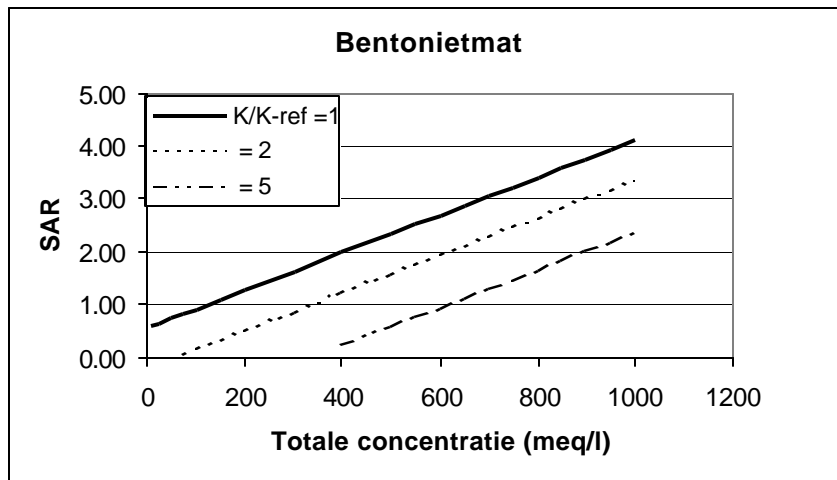


Fig. 11 C Berekende samenhang voor bentonietmat tussen totale concentratie en SAR voor enkele verhoudingen tussen actuele en referentiedoortlatendheid ($K/K\text{-ref}$)

Bij deze grenzen ligt het omslagpunt van een gedispergeerde toestand van bentoniet naar een geaggregeerde toestand. Extrapolatie heeft plaats gevonden voor totale concentraties onder 200 meq/l. Uit deze figuur blijkt dat wanneer een toenemende concentratie in het bodemvocht gepaard gaat met een toenemende SAR-waarde, dus sterk toenemend Na-gehalte, de doorlatendheid nauwelijks wordt beïnvloed. Een lage SAR-waarde (< 1) heeft daarentegen een zeer grote invloed op de doorlatendheid (zie ook § 4.3).

3.5 Toetsing theoretische benadering doorlatendheid

Een van de doelen van dit onderzoek is het toetsen van het theoretisch benaderd effect van een bepaalde samenstelling van het bodemvocht op de doorlatendheid van klei-houdende afdichtingsmaterialen. De basis voor het berekende effect is de dikte van de diëlectrische dubbellaag, waarvan aannemelijk is gemaakt dat het watervolume daarin niet bijdraagt aan de effectieve porositeit. Een juiste berekening van dit inert volume is dus cruciaal. Een tweede cruciale parameter is het inwendig oppervlak, dat in combinatie met de porositeit de inwendige weerstand voor stroming bepaald. Naarmate dat oppervlak groter is, is ook de stromingsweerstand groter en dus de doorlatendheid geringer. Bij de theoretische benadering is aangenomen dat het inwendig oppervlak ook bij toenemende zoutgehalten onveranderd blijft.

Met behulp van de hiervoor gepresenteerde metingen is de doorlatendheid volgens Karman-Cozeny (zie bijlage 1) berekend van de verschillende monsters. Vervolgens is de relatieve doorlatendheid berekend en vergeleken met de gemeten relatieve doorlatendheid voor uiteenlopende situaties (figuur 12).

Uit figuur 12 blijkt dat er een duidelijk lineair verband bestaat tussen de logaritme van de berekende en gemeten relatieve doorlatendheid voor Trisoplast en zandbentoniet, maar niet voor de bentonietmat. Een afnemende dikte van de diëlectrische

dubbellaag gaat bij de zuivere bentoniet gepaard met krimp. Bij de berekeningen van de doorlatendheid van de bentonietmat is daarmee rekening gehouden via aanpassing van het droogvolumegegewicht. Het absoluut niveau van de berekende en gemeten doorlatendheid in de referentie situatie ligt dicht bij elkaar, maar de berekende invloed van de samenstelling van de testvloeistof op de doorlatendheid bij hogere concentraties en lage SAR-waarden is vergeleken met de metingen sterk onderschat.

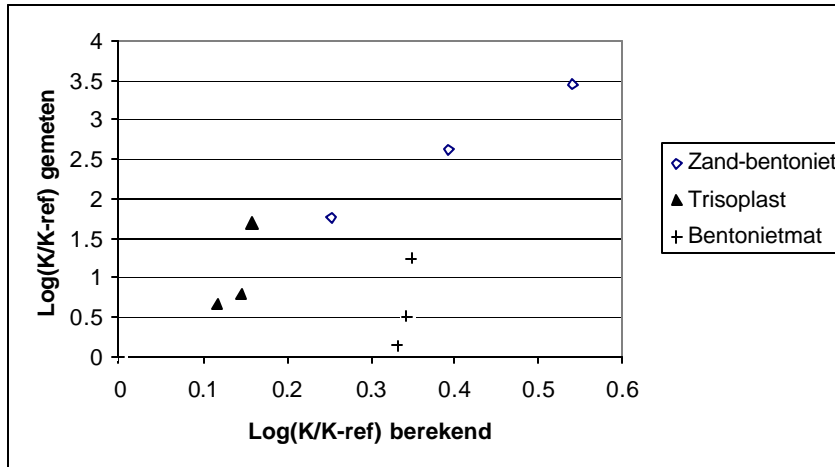


Fig 12 Gemeten en berekende relatieve doorlatendheid van Trisoplast, zand-bentoniet en bentonietmat

Deze discrepantie wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat bij de berekening wordt uitgegaan van het gemeten inwendig oppervlak dat inherent aan de bepalingsmethode geldt voor een vrijwel volledig gedispergeerde toestand van de klei. Aggregatie van kleikristallen die bij toenemende totale concentraties en afnemende SAR-waarden tot een geringer inwendig oppervlak leidt, kan met de toegepaste meetmethode niet worden vastgesteld.

De eventuele invloed van aggregaatvorming op het inwendig oppervlak is berekend door het inwendig oppervlak voor de gemeten doorlatendheid op te lossen uit de doorlatendheidsformule. Vervolgens is berekend welke diameter aggregaten moeten hebben om een gezamenlijk inwendig oppervlak te hebben dat gelijk is aan het berekend inwendig oppervlak. De resultaten van de berekende diameters van aggregaten is in tabel 9 weergegeven.

Tabel 9 Gemeten en uit Ksat metingen afgeleid inwendig oppervlak en de daarvan afgeleide gemiddelde diameter van de klei-aggregaten.

Materiaal	Totale activiteit (meq/l)	SAR	Inwendig oppervlak (m ² /kg)		Diameter aggregaat (µm)	
			Gemeten	Berekend	Gemeten	Berekend
Zb2	186	2,41	13500	12160	0,17	0,19
Zb6	386	3,42	12700	1631	0,18	1,39
Zb12	454	1,09	11600	597	0,20	3,79
Zb18	503	0,67	10200	229	0,22	9,87
Tp24	283	2,11	19000	15195	0,12	0,15
Tp27	461	3,36	18300	7071	0,12	0,32
Tp33	487	1,31	22300	6021	0,10	0,38
Tp21	427	0,51	19800	2198	0,11	1,03

Uit de berekeningen is af te leiden dat de klei in gedispergeerde toestand in pakketjes (aggregaten) van slechts enkele kristallen (2 – 3) aanwezig is, terwijl dit aantal bij zandbentoniet kan toenemen tot meer dan 100. Bij Trisoplast is de aggregatie aanzienlijk geringer en het aantal kleikristallen dat een aggregaat vormt blijft beperkt tot ca 10 stuks bij een hoge totale concentratie en geringe SAR. Uit de berekeningen volgt dat (1) de aanvankelijk ijle ruimtelijke structuur van de kleimineralen met een groot inwendig oppervlak bij toenemende totale concentratie en afnemende SAR (Na-gehalte) kennelijk ineens stort en aggregaten vormt met een aanzienlijk geringer inwendig oppervlak dan in gedispergeerde toestand. Het model waarmee de doorlatendheid wordt berekend voorziet niet in dit verschijnsel, maar gaat daarentegen uitsluitend uit van verandering van de dikte van de diëlectrische dubbellaag en toenemende effectieve porositeit. Bij geringe variaties van de totale concentratie en bij een betrekkelijk geringe totale concentratie voldoet het model wel, maar niet voor omstandigheden waarbij duidelijk aggregatie optreedt.

Bij de berekening van de levensduur en verandering van de functionaliteit van afdichtingslagen, zal dan ook worden uitgegaan van de empirisch bepaalde relatie tussen de relatieve doorlatendheid, de totale concentratie en de SAR.

3.6 Samenstelling steunlagen

De samenstelling van in de praktijk gebruikte steunlagen is onderzocht. Daarbij is rekening gehouden met de praktijk om ook (licht) verontreinigt materiaal te verwerken.

De chemische samenstelling van het vocht in steunlagen van enkele stortplaatsen is gemeten aan monsters. De chemisch samenstelling van de oplossing in de drainagelaag is aan de literatuur ontleend (zie tabel 10). Uit de analyses van steunlagen blijkt dat de totale concentratie varieert van 3,5 (drainlaag) tot ca 450 meq/l en de SAR-waarde van 0,018 tot 7,5. Voor zandgronden met een zeer gering organische stofgehalte die als grasland en bouwland in gebruik zijn, bedraagt de totale zoutconcentratie ca. 7 meq/l en de SAR-waarde 0,03. Voor humusarm zand afkomstig uit natuurgebieden (geen landbouwkundig gebruik) zijn de waarden 1,5 meq/l en SAR=0,06. De totale zoutconcentratie van vocht in grond afkomstig van

een kleiveenpakket bedraagt ca. 10 meq/l en de SAR-waarde is 0,015 wegens het relatief hoog gehalte aan calcium (bron: Alterra databestanden).

3.7 Conclusies laboratoriumonderzoek

De invloed van de chemische samenstelling van vocht in de afdichtingsmaterialen zand-bentoniet, Trisoplast en bentonietmatten is experimenteel onderzocht. De chemische samenstelling van de vloeistof in een afdichtingslaag die verantwoordelijk is voor de zweleigenschappen van bentoniet en dus voor de doorlatendheid van de laag, kan worden beschreven met een totale concentratie of activiteit en de SAR-waarde (Sodium Adsorption Ratio, zie §3.2). De SAR-waarde, mits berekend op basis van eq/l of Mol/l, is een maat voor de verhouding tussen geadsorbeerde een- en tweewaardige kationen en voor montmorilloniet daaraan vrijwel gelijk ($K_{\text{Capon}} = 0,9 - 1,0$).

De potentiële zwelcapaciteit van kleimineralen staat onder invloed van het gecombineerd effect van totale concentratie (of activiteit) van de vloeistof waarmee ze in contact staan en de verhouding tussen de een- en tweewaardige kationen in die vloeistof. Zowel de potentiële zwelcapaciteit (meting zonder bovenbelasting) als de doorlatendheid kan zeer goed worden beschreven als functie van deze parameters. Typisch combinaties van de totale concentratie en minimale SAR-waarden geven de grens aan tussen omstandigheden waarin de zwel (figuur 9) of de doorlatendheid (figuur 11 A, B en C) wel en niet nadelig worden beïnvloed door de samenstelling van de vloeistof. Onder deze grens is sprake van nadelige beïnvloeding (fig. 13).

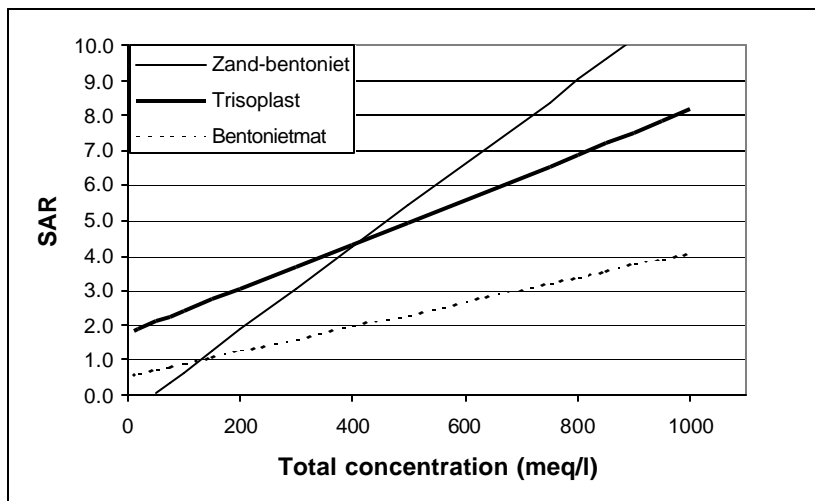


Fig 13 Laagste SAR-waarde waarbij de doorlatendheid niet wordt beïnvloed.

De doorlatendheid van zand-bentoniet, Trisoplast en de bentonietmat blijkt bij een geringe totale concentraties slechts beperkt toe te nemen wanneer de verhouding tussen Na en Ca afneemt. Trisoplast reageert minder uitgesproken dan zand-bentoniet, terwijl de bentonietmat minder uitgesproken reageert dan Trisoplast. De toename van de doorlatendheid blijft ook beperkt wanneer de totale concentratie sterk stijgt, en het Na-gehalte in de oplossing relatief hoog blijft (tabel 7A, B en C). Neemt daarentegen de verhouding tussen Na en Ca af bij een stijgende totale

concentraties, dan neemt de doorlatendheid van zand-bentoniet zeer sterk toe (factor 3000), terwijl ook Trisoplast en de bentonietmat niet ongevoelig blijken (factor 50 respectievelijk 15), maar wel aanzienlijk minder gevoelig dan zand-bentoniet.

Een goede relatie werd gevonden tussen de berekende doorlatendheid op basis van meetgegevens en de gemeten doorlatendheid voor zand-bentoniet en Trisoplast, maar niet voor de bentonietmat. De berekende doorlatendheid is te laag bij relatief hoge concentraties en lage SAR-waarden. Deze discrepantie kan worden toegeschreven aan de vorming van aggregaten uit aanvankelijke gedispergeerde kleimineralen. Bij aggregaatforming in zand-bentoniet zijn volgens berekeningen gemiddeld meer dan 100 kleikristallen betrokken zijn, terwijl dat tot ca. 10 beperkt blijft bij Trisoplast.

Inherent aan de bepalingmethode geldt het gemeten inwendig oppervlak voor een gedispergeerde toestand van de kleimineralen en is de oorzaak van de discrepantie tussen gemeten en berekende doorlatendheid. Een methode waarbij de aggregaten in tact blijven is in de daarnaar ingestelde literatuurrecherche niet aangetroffen, terwijl aggregaatforming, behalve in kwalitatieve zin geen theoretisch gefundeerde kwantitatieve benadering kent.

Aanbevolen wordt om bij de berekening van de verandering van de functionaliteit van minerale afdichtingsmaterialen uit te gaan van enerzijds theoretische berekening van de verandering van de samenstelling van de vloeistof in de afdichtingslaag en anderzijds empirisch afgeleide relaties voor de vertaling van die verandering naar verandering van de doorlatendheid.

Zolang het effect van aggregaatforming in de minerale afdichtingslagen niet theoretisch kan worden benaderd, verdient de hiervoor voorgestelde semi-empirische benadering dan ook de voorkeur boven een theoretische benadering met correctie voor aggregaatforming.

Grond afkomstig van landbouwgronden, “natuurterreinen” of braak liggend terrein heeft in het algemeen een laag zoutgehalte en een lage SAR-waarde, terwijl verontreinigde gronden soms hoge zoutgehalten bevatten en meestal een lage SAR-waarde bezitten, ook komen hoge SAR-waarden voor.

4 Berekening van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen

4.1 Uitgangspunten voor de berekening

Berekening van het verloop van de afdichtende werking van minerale afdichtingsmaterialen is gebaseerd op het kwantificeren van het verloop van (1) de chemische samenstelling van de vloeistof in de afdichtings- en steunlaag als gevolg van transport van opgeloste stoffen en adsorptie- en desorptieprocessen en (2) van de verandering van de doorlatendheid tengevolge van de verandering van de chemische samenstelling. De functionaliteit (afdichtende werking) van een afdichtingslaag dient met een parameter gekwantificeerd te worden om onderlinge vergelijking van materialen mogelijk te maken. De hydraulische weerstand is een parameter waarin zowel de doorlatendheid als de laagdikte verwerkt is en kan dienen als basis voor de definitie van de kwaliteit van een afdichtingslaag. Om aan de eisen van het Stortbesluit te voldoen heeft de hydraulische weerstand een waarde die onafhankelijk is van het materiaal en de laagdikte. De kwaliteit van de afdichtingslaag op een zeker moment wordt uitgedrukt als een fractie van de oorspronkelijke kwaliteit. De hydraulische weerstand (R_h) is gedefinieerd als:

$$R_{h,t} = \int_D \frac{l}{K_{z,t}} dz$$

Hierin is:

- D dikte van de afdichtingslaag (m)
- $K_{z,t}$ doorlatendheid op diepte z onder de bovenrand van de laag op tijdstip t (m/s)
- dz increment (m)
- R_h hydraulische weerstand afdichtingslaag (s)

De kwaliteit van een afdichtingslaag op een zeker tijdstip (t) definiëren we als de verhouding tussen de actuele weerstand en de weerstand die bij aanleg (t=0) werd gerealiseerd:

$$Kwaliteit(t) = \frac{R_{h,t}}{R_{h,0}}$$

In deze vergelijking is $R_{h,0}$ de hydraulische weerstand die direct na de aanleg werd gerealiseerd. De functionele levensduur is bereikt op het tijdstip waarop de hydraulische weerstand niet meer voldoet aan de eisen volgens het Stortbesluit. De kwaliteit kan dan wel al zijn afgenomen wanneer de aanvankelijke weerstand groter is dan strikt noodzakelijk.

Tabel 10 Input gegevens voor modelberekeningen: chemische samenstelling afdichtingslagen, steunlagen en drainagelaag

Materiaal	Dicht-heid (kg/l)	Fractie water-gevulde poriën	CEC (meq/kg)	CaCO3 (g/kg ds)	PH	Na + K (meq/l)	Ca + Mg (meq/l)	Constante in empirische relatie: Log(K/K-ref) = A1 x Tot. conc. + A2 x SAR + A3		
								A1	A2	A3
Zand-bentoniet	1,70	0,95	71	15,7	9,5	20,5	4,8	0,00517	-0,43399	-0,2268
Trisoplast	1,65	0,95	108	12,4	9,8	25,3	5,52	0,001398	-0,2175	0,38151
Bentonietmat	1,35	0,97	835	25,0	9,8	27,0	3,0	0,001427	-0,404814	0,22907
Zand + Bouw en sloopafval	1,55	0,75	38	6,2	7,0	34,9	185,8	SAR = 0,114	Conc. = 440 (meq/l)	
Zand + vormzand	1,55	0,75	47	14,2	7,5	49,9	61,0	0,286	220	
Zand/klei	1,55	0,75	54	6,6	8,2	21,5	59,6	0,125	162	
Zand/klei	1,55	0,75	48	10,3	8,5	46,1	67,0	0,252	226	
Verontr. 1	1,60	0,9	34	Nb	9,25	24,63	0,0524	4,812	50	
Verontr. 2	1,60	0,9	43	Nb	4,97	1,75	0,00011	7,462	3,5	
AVI-bodemas (1)	1,50	0,75	75	55	7,5	0,8	4,1	0,018	9,8	
Drainlaag	1,70	0,50	10	10	5,7	2,5	11,1	0,034	27	

NB AVI-bodemas (1) betreft uitgelopen materiaal. Vers materiaal heeft een pH 8,0, (Na + K) van 170 meq/l en (Ca + Mg) van 54 meq/l. (SAR = 1,025 conc. = ~450 meq/l)

Ten behoeve van de berekening wordt het profiel (afdichtingslaag plus steunlaag) opgedeeld in laagjes van 0,01 m. In elk laagje definieert men als begintoestand: chemische samenstelling van de vloeistof in afdichtingslaag, droog volumegewicht, CEC, fractie watergevulde poriën, en diffusiecoëfficiënt.

De opbouw van de afdichtingsconstructie is voor zand-bentoniet en Trisoplast gelijk en ziet er van boven naar beneden als volgt uit:

- 1 Afdekgrond en drainlaag (1,0 – 1,3 m);
- 2 Geomembraan, absoluut waterdicht en ondoorlatend voor anorganische verbindingen;
- 3 Afdichtingslaag (0,25 m zand-bentoniet of 0,08 m Trisoplast);
- 4 Steunlaag, met een dikte van 0,30 m;
- 5 Afvallichaam.

In deze constructie treedt behalve gedurende een beperkte tijd (1 – 2 jaar) na de aanleg geen vloeistofstroming op en berust het verplaatsen van opgeloste stoffen alleen op moleculaire diffusie. De diffusieflux is nihil aan de bovenzijde van de kolom (geen transport door de folie) evenals aan de onderzijde (wegens de overgang van een fijnkorrelige naar een grofkorrelige structuur, die bovendien vrijwel geen watergevulde poriën bezit). Aangenomen is dat de vochttoestand in de steun- en afdichtingslaag overeenkomt met een verzadigingsgraad van 95%.

In afdichtingconstructies met bentonietmatten ligt de bentonietmat op de folie. De laagopbouw in dat geval ziet er als volgt uit (mededeling CTN, Lochem):

1. Afdeklaag (ca. 0,8 m);
2. Drainlaag (ca. 0,3 m);
3. Bentonietmat;
4. Folie (geomembraan);
5. Steunlaag (ca. 0,3 m);
6. Afvallichaam.

In de berekeningen voor bentonietmatten uitgegaan van een vrijwel verzadigde toestand (95%) en een constante chemische samenstelling van het vocht in de drainlaag die gelijk is aan de initiële samenstelling.

4.2 Inputparameters

Voor de berekeningen zijn de volgende gegevens nodig:

1. laagopbouw;
2. vochtfractie per onderscheiden laag;
3. diffusiecoëfficiënt opgeloste stoffen, gecorrigeerd voor vochtfractie en poriegeometrie;
4. kationomwisselcapaciteit (CEC, meq/kg);
5. Initiële chemische samenstelling oplossing (pH, Na, Ca, Mg, K, HCO₃⁻, Cl⁻);
6. Selectiviteitscoëfficiënten voor verschillende componenten (op basis van Gapon evenwicht);

7. Parameters voor de empirische relatie tussen relatieve doorlatendheid, totale concentratie en SAR (alleen voor de afdichtingslaag);

4.3 Berekening verloop kwaliteit afdichtingslagen

Om resultaten van berekeningen te kunnen interpreteren, dient men zich te realiseren dat een zekere achteruitgang van de kwaliteit nog niet wil zeggen dat niet meer is voldaan aan de eisen volgens het Stortbesluit. Indien namelijk de aanvankelijke doorlatendheid onder de strikt benodigde doorlatendheid ligt, ontstaat een zekere tolerantie. Deze is in tabel 11 weergegeven en geeft aan welke aanvankelijke doorlatendheid een bepaald materiaal moet hebben om bij een zekere kwaliteit nog juist te voldoen aan de eisen van het Stortbesluit. Als bijvoorbeeld de aanvankelijke doorlatendheid van zand-bentoniet gemiddeld $0,93 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ was, zou de kwaliteit mogen dalen tot 0,4 (40% van de oorspronkelijke kwaliteit) (zie tabel 11).

Tabel 11 Vereiste aanvankelijke doorlatendheid ($\times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$) bij een zekere kwaliteit van de afdichtingslaag om nog juist aan de eisen van het Stortbesluit te voldoen.

Materiaal	Laagd. (m)	Kwaliteit afdichtingslaag						
		1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,01
Zand-bentoniet	0,25	2,31	1,85	1,39	0,93	0,46	0,23	0,023
Trisoplast	0,08	0,86	0,69	0,51	0,34	0,17	0,09	0,009
Bentonietmat	0,01	0,115	0,09	0,07	0,05	0,02	0,01	0,001

In de praktijk kan men bij een goede uitvoering en materiaalkeuze een gemiddelde doorlatendheid van zand-bentoniet realiseren van $1,0 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$, van Trisoplast $0,1 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ en bentoniet matten $0,07 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Dat betekent dat de kwaliteit van afdichtingslagen met zand-bentoniet tot ca. 0,45 mag afnemen, van Trisoplast tot 0,12 en met bentonietmatten tot 0,61. De samenstelling van de vloeistof in de afdichtingslaag waarbij nog juist aan het Stortbesluit is voldaan (totale concentratie en SAR-waarde) is in onderstaande figuur weergegeven.

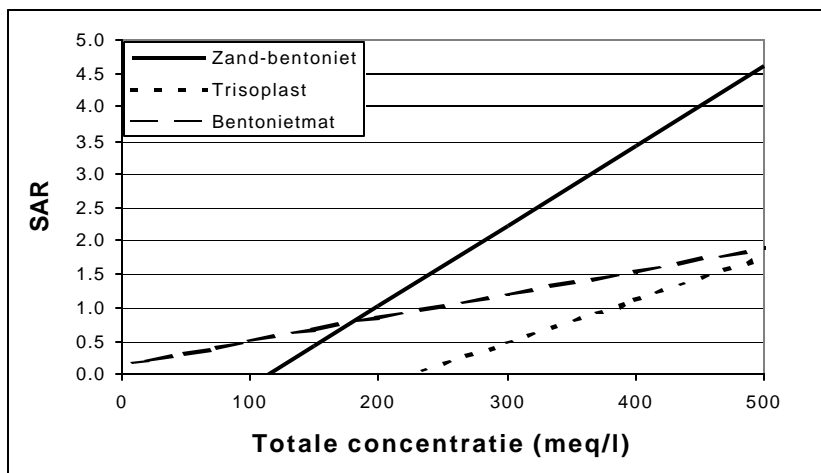


Fig. 14 Minimale SAR-waarden waarbij afdichtingsmaterialen nog juist aan het Stortbesluit voldoen (afgeleid uit laboratorium onderzoek)

Uit figuur 14 valt af te leiden dat ongeacht de SAR-waarde, de functionaliteit niet onder de vereiste functionaliteit volgens het Stortbesluit daalt, wanneer de totale zoutconcentratie geringer is dan 115 en 225 meq/l voor respectievelijk zand-bentoniet en Trisoplast. Berekeningen zijn uitgevoerd van het verloop in 100 jaar van de kwaliteit zand-bentoniet en Trisoplast en bentonietmatten. (figuur 15).

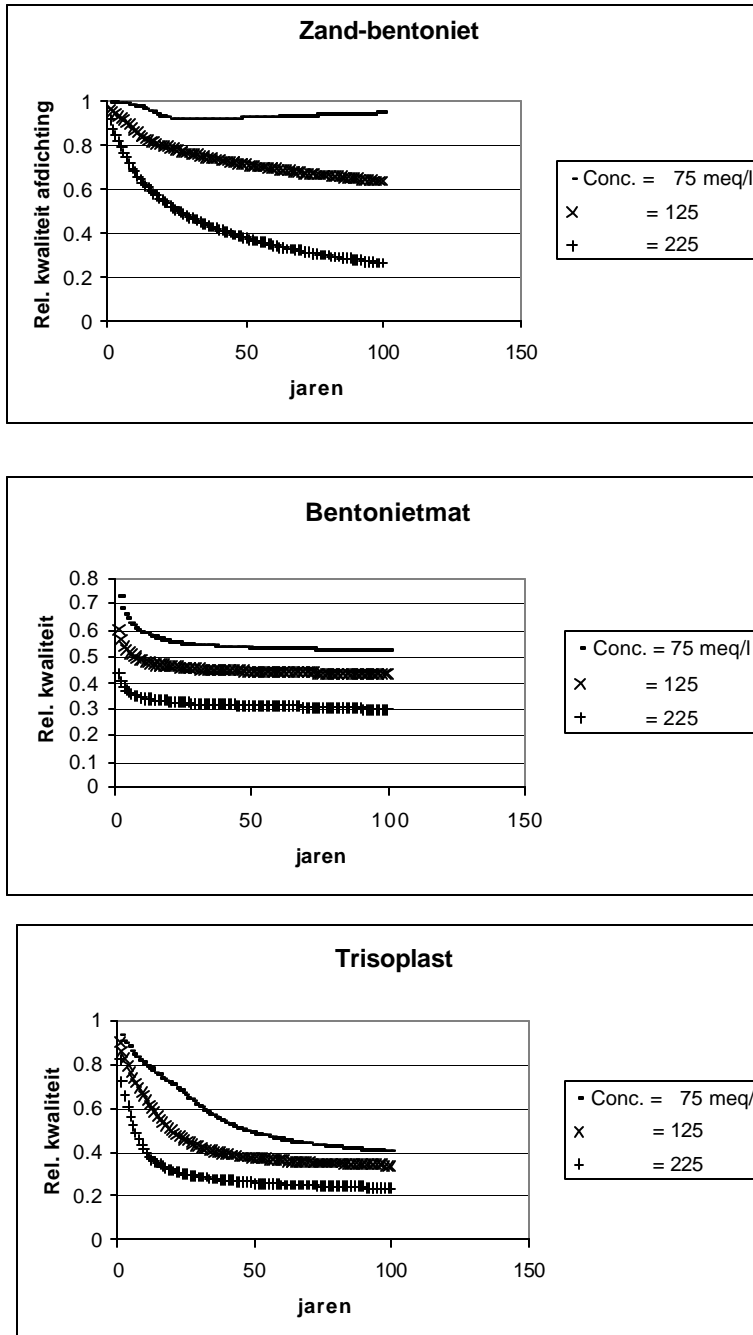


Fig. 15 Berekend verloop van de kwaliteit van afdichtingslagen voor verschillende chemische samenstelling van de steunlaag bij een SAR = 0,35). Bij een rel. kwaliteit van 0,6 voldoen bentonietmatten i.h.a. niet meer aan het Stortbesluit. Grenzen voor zand-bentoniet en Trisoplast liggen bij resp. 0,45 en 0,12.

Uit deze berekeningen kan men concluderen dat naarmate de dikte van de afdichtingslaag groter is, de aanpassingssnelheid geringer is en er meer tijd verstrijkt voor de kwaliteit van de laag in evenwicht is met de chemische samenstelling van de steunlaag. Ook blijkt dat wanneer de chemische samenstelling van de steunlaag of laag waarmee de afdichting in contact staat, de kwaliteit tot onder de vereiste waarde kan doen dalen, die kwaliteitsvermindering bij bentonietmatten binnen enkele jaren (<5 jaar) zal optreden. Bij zand-bentoniet ligt die periode tussen 10 en 20 jaar, terwijl Trisoplast daar tussenin ligt.

Uit de berekeningen blijkt dat als gevolg van herverdeling van de opgeloste stoffen over de steun- en afdichtingslaag, de dikte van de afdichtingslaag in verhouding tot de dikte van de steunlaag een belangrijke rol speelt. Uit tabel 12 blijkt dat de concentratie in de afdichtingslaag na herverdeling van opgeloste stoffen af kan wijken van de aanvankelijke concentratie in de steunlaag. De samenstelling van het vocht in bentonietmat neemt vrijwel de samenstelling van het vocht in de steunlaag aan, in tegenstelling tot zand-bentoniet en Trisoplast die beide en die een grotere dikte hebben.

Tabel 12 Gemiddelde zoutconcentratie en SAR-waarde in de afdichtingslaag na 100 jaar in contact met een steunlaag met SAR= 0,35 en verschillende zoutgehaltes.

Conc. steunlaag	Zand-bentoniet		Trisoplast		Bentonietmat	
	Conc. (meq/l)	SAR	Conc. (meq/l)	SAR	Conc. (meq/l)	SAR
75	53	0,56	69	0,18	73	0,09
125	78	0,58	115	0,14	122	0,07
225	135	0,63	215	0,11	225	0,06
500			500			

4.4 Levensduur verlengende maatregelen

De levensduur van bentoniethoudende minerale materialen wordt voornamelijk bepaald door de samenstelling van de steunlaag. De dikte van de lagen waarover zich de opgeloste stoffen kunnen verdelen speelt eveneens een rol. Manipulatie van deze parameters betekent dus beïnvloeding van de levensduur.

De belangrijkste maatregel om de levensduur van afdichtingslagen te verlengen of ze zelfs “oneindig lang” te maken, is voor de steunlaag materiaal te gebruiken met een gering zoutgehalte. Ligt echter het totaal zoutgehalte hoger boven de grenswaarde waarbij nog wordt voldaan aan het Stortbesluit, kan men overwegen om een zekere hoeveelheid soda door de steunlaag te mengen, waardoor de SAR-waarde wordt verhoogd. Eveneens verhoogt men dan ook de totale zoutconcentratie, wat een nadelige invloed heeft op de levensduur. Een goede afweging is van te voeren nodig om deze maatregel te beoordelen. In figuur 16 is een voorbeeld gegeven van een situatie waarin de kwaliteit kon worden verbeterd door soda toe te voegen. Dit voorbeeld laat zien dat de kwaliteit van de afdichtingslaag in de eerste twintig jaar aanmerkelijk verbeterde, maar dat het effect langzaam wegebt. De oorzaak is dat de soda alleen door de bovenste decimeter van de steunlaag was gemengd. De

toegevoegde hoeveelheid verdeelt zich geleidelijk over zowel de afdichtingslaag als de resterende lagen van de steunlaag, waardoor de concentraties in de afdichtingslaag stijgen en de SAR-waarde aanvankelijk sterk stijgt maar daarna weer daalt als het natrium zich over beide lagen verdeelt.

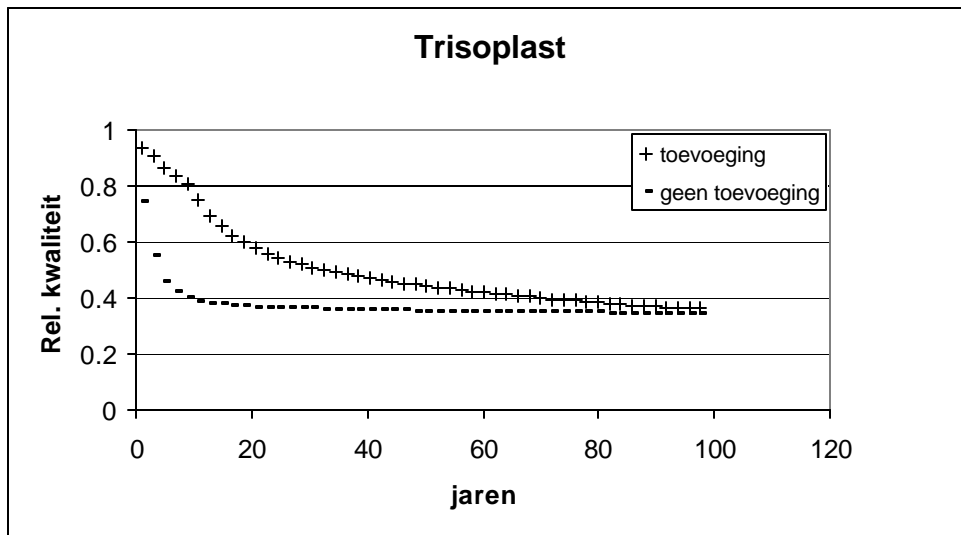


Fig. 16 Invloed van soda toevoeging aan steunlaag op verloop kwaliteit afdichtingslaag

Soda toevoeging aan steunlagen als generieke maatregel voor verbetering van de kwaliteit van bentoniethoudende afdichtingslagen, moet daarom worden ontraden.

4.5 Conclusies ten aanzien van de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen

De gemiddelde doorlatendheid van minerale afdichtingslagen is bij aanleg meestal lager dan volgens het Stortbesluit nodig is. Dat wordt mede veroorzaakt door de criteria die bij het vooronderzoek en oplevercontrole worden gehanteerd. Volgens de CUR-Aanbeveling 33 dient de bovengrens van een bepaald betrouwbaarheidsinterval van de gemeten gemiddelde doorlatendheid nog aan door partijen overeen te komen waarde te voldoen, terwijl de (meetkundig) gemiddelde doorlatendheid minstens aan het Stortbesluit moet voldoen. In de praktijk wordt meestal de eis volgens het Stortbesluit als bovengrens aangehouden. De kwaliteit van afdichtingslagen mag dan tot een zekere waarde afnemen voordat de laag niet meer aan de eisen van het Besluit voldoet.

In de meest voorkomende gevallen zal de kwaliteit van afdichtingslagen met zand-bentoniet tot ca. 45% van de aanvankelijke kwaliteit mogen dalen voor de vereiste functionaliteit niet meer wordt gerealiseerd. Voor Trisoplast is een gemiddeld aanvaardbare minimum kwaliteit ca. 15% en voor bentoniet matten 60%. Op grond van dat gegeven is afgeleid dat wanneer de totale zoutconcentratie in het vocht in de steunlaag (of afdekgrond voor bentonietmatten) geringer is dan 115 en 225 meq/l voor respectievelijk zand-bentoniet en Trisoplast, de afdichting “eeuwig durend” aan

de eisen van het Stortbesluit voldoet, ongeacht de SAR-waarde. Bij hogere totale zoutgehaltes speelt de SAR-waarde een cruciale. Om bentonietmatten "eeuwigdurend" voldoende te laten functioneren, is een minimale SAR-waarde nodig die afhangt van de concentratie opgeloste zouten. Bij 10 meq/l dient de SAR-waarde voor deze matten minstens 0,1 te bedragen en bij 100 meq/l minstens 0,5

De samenstelling van het vocht in steunlagen blijkt nogal te variëren: van minder dan 10 meq/l tot meer dan 400 meq/l en SAR-waarden van minder dan 0,3 tot meer dan 5. Verwacht mag worden dat wanneer men grond uit landbouwgebieden of natuurterreinen gebruikt voor steunlagen, men geen invloed op de levensduur hoeft te verwachten. Gebruik van (licht) verontreinigde grond kan daarentegen wel een negatieve invloed hebben op de levensduur van bentoniethoudende afdichtingsmaterialen. Om de bruikbaarheid van grond voor steunlagen te beoordelen is het in elk geval aan te bevelen om de chemische samenstelling van het verzadigd extract van dat materiaal te onderzoeken.

De levensduur van HYDROSTAB wordt niet door de samenstelling van het porievocht beïnvloed. Vochtverlies is voor dat materiaal echter wel levensduur bepalend. Veldmetingen en modelberekeningen leren echter dat vochtverlies van afdichtingslagen in bovenafdichtingsconstructies onder folies zeer beperkt is en minder zal zijn dan 3% in 100 jaar. Hydrostab wordt daarom als duurzaam materiaal beoordeelt.

De tolerantie voor verhoogde zoutgehaltes is het grootst bij Trisoplast en het geringst bij bentonietmatten. Gebruik van materialen in de steunlaag met (1) hoge totale gehalten van de macro-elementen (Na, K, Ca en Mg) en relatief hoge Ca-gehalten, moet ontraden worden. Toevoeging van soda aan een steunlaag waarvan een nadelig effect op de levensduur wordt verwacht heeft alleen zin wanneer het nadelig effect van vergrootte zoutconcentratie ruim wordt gecompenseerd door een verhoogde SAR-waarde. Het positief effect op de afdichtende werking verdwijnt echter in een periode van 100 jaar volledig. Soda toevoeging dient derhalve niet als generieke verbeteringsmaatregel te worden gezien.

De chemische samenstelling van het vocht in de steunlaag in constructies met een combinatieafdichting, is dus bepalend voor de levensduur van de afdichtingslaag.

4.6 Synchronisatie vervanging componenten in afdichtingsconstructies

Wanneer bepaalde componenten van een afdichtingsconstructie vervangen moeten worden wegens ontoereikend functioneren of functieverlies, is het soms raadzaam ook andere componenten te vervangen die nog een zekere tijd zullen functioneren, maar niet voldoende lang om ze tot de volgende herstelperiode te laten zitten. Gelijktijdig vervangen (synchroniseren) van componenten kan dus voordelig zijn. Synchronisatie wordt bepaald door de levensduur van de afzonderlijke componenten. Indien het ontoereikend functioneren van een bepaalde component tot vervanging

noodzaakt, zal men overigens alle componenten moeten vervangen waarvan de functie wordt verstoord door vervanging de eerste component.

Tabel 12 Overzicht van verstoring van functies bij vervanging van verschillende componenten

Te vervangen component	Verstoort bij vervanging functie van:				
	Drain	Folie	Afdichtingslaag	Gasdrain	Afdeklaag
Drainbuis	+	-	-	-	-/+
Folie	+	+	-	-	+
Minerale afdichting	+	+	+	-	+
Gas drainage	+	+	+	+	+

+ verstoorte functie door vervanging van component

- functie niet verstoord door vervanging component

In tabel 13 is aangegeven van welke component de functie wordt verstoord wanneer een component die in de linker kolom is genoemd, wordt vervangen.

De levensduur van folies bedraagt meer dan 35 jaar (HDPE, HDPE-flex, VLDPE en LLDPE) op basis van oxidatietesten en meer dan 100 jaar (HDPE) volgens een “expert opinion”. De levensduur van de kunststofdrager in bentonietmatten bedraagt minstens 25 jaar en meer dan 100 jaar volgens de “expert opinion”. Voor drainbuizen van HDPE geldt dat deze minstens 50 jaar mee gaan. De levensduur van kunststof in drainage-matten bedraagt minstens 25 jaar (PE en PP), 70 jaar (PA en PET) en volgens de “expert opinion” minstens 100 jaar. De berekende levensduur op basis van weerstand tegen langzame scheurgroei zoals wordt aangetroffen in spanningscorrosie milieu bedraagt meer dan 30 jaar voor de folies (zonder spanningscorrosie milieu) en meer dan 15 jaar met spanningscorrosie milieu. De levensduur van lasnaden in een spanningscorrosie milieu bedraagt meer dan 3 jaar. Scheurgroei zal echter pas optreden bij zettingsverschillen waarbij aanzienlijke (alzijdige) rek (vermoedelijk > 10%) optreedt.

Indien men inzicht heeft in de verwachte levensduur van de minerale afdichtingslaag, dan wordt de levensduur van de constructie als volgt bepaald:

- (1) levensduur minerale laag < 50 jaar en alzijdige rek < 5%: minerale laag bepaalt levensduur;
- (2) levensduur minerale laag > 100 jaar en alzijdige rek < 5%: oxidatie test HDPE-flex, VLDPE en LLDPE folies bepalen levensduur van de constructie;
- (3) alzijdige rek > 10%: langzame scheurgroei van folies of van de las van folies (bij spanningscorrosie milieu) bepalen levensduur constructie.

In de “Samenvatting” is een schema weergegeven waarin deze samenhang in beeld is gebracht (figuur S.1).

4.7 Hergebruik van afdichtingsmaterialen bij vervanging

Hergebruik van minerale afdichtingsmateriaal bij vervanging zal afhangen van (1) de verwerkbaarheid van het materiaal en (2) de mogelijkheid om het materiaal op te werken tot weer een deugdelijk afdichtingsmateriaal.

Om vast te stellen of afdichtingsmateriaal verwerkbaar is, is uitgegaan van een verdichte laag met een vochtgehalte dat dicht tegen verzadiging aan ligt. In de praktijk doen zich zulke omstandigheden voor wanneer een aangelegde afdichtingslaag is afgekeurd en deze na de aanleg aan regen was blootgesteld. Via een telefonische interview met een aantal uitvoeringsdeskundigen is gebleken dat het vochtgehalte een grote rol speelt en verwerkbaarheid van zand-bentoniet en Trisoplast bij hoge vochtgehaltes ondoenlijk is. Men verwachtte grote problemen bij het opmengen met bentoniet en een zeer inhomogeen eindproduct. Hergebruik van bentoniet matten en Hydrostab lijkt uitgesloten.

Wel werden enkele mogelijkheden genoemd: (1) ontgraven, drogen, malen en gebruik als grondstof (in plaats van zand) in zand-bentoniet of Trisoplast, vergelijkbaar met hergebruik van vormzand; (2) afdichtingslaag laten liggen en een laagje bentoniet er door heen frezen. Deze optie wordt niet hoog aangeslagen aangezien het mengsucces sterk afhangt van de vochttoestand van de laag en verwacht wordt dat deze te nat zal zijn voor deze vorm van mengen; (3) afdichtingslaag laten liggen en er een nieuwe overheen leggen. Hierbij voorziet men uitvoeringsproblemen (insporing, wegglijden op hellingen, oncontroleerbaarheid verdichtingproces). Als oplossing zag een deskundige het aanbrengen van een laagje grond waarop dan weer een nieuwe afdichtingslaag wordt aangelegd. Een andere suggereerde om ongebluste kalk op de natte afdichtingslaag te strooien om deze snel droog te krijgen (vorming van CaOH_2 uit CaO onder opname van H_2O). Die optie valt af omdat dat veroudering van de nieuwe laag alleen maar versnelt; (4) de oude afdichtingslaag onder (een deel) van de steunlaag leggen, vergelijkbaar met het aanbrengen van een laag grond op de afdichtingslaag (om-putten).

In het algemeen wordt hergebruik van afdichtingsmateriaal niet hoog aangeslagen.

Literatuur

Albiker, B., 1986. Die Selbstdichtung von Schlamm lagerfeldern. Wasser und Boden 11:558-563.

Anderson, D.C., K.W. Brown and J.C. Thomas, 1985. Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids. Waste Management & Research 3: 339-349

Belouschek, P., R. Novotny, 1989. Zur Chemie von pulverförmigen Wasserglas und seinen Folgeprodukten: Kieselsäuresole und -gele in Wasser als Ausgangsmaterial für die Herstellung einer hochwertigen mineralischen Abdichtungsschicht aus bindiger Böden. Müll und Abfall. 12: 636-643

Boels, D. & R. Wiebing: Duurzame werking van zand-bentoniet afdichtingen in eindafdekkingen van stortplaatsen. Wageningen, SC, 1991. Rapport 115, 27 blz.

Boels, D.: Studie naar onderafdichtingsconstructies voor afval- en reststofbergingen. Wageningen, SC-DLO, 1993. Rapport 247, 62 blz.

Boels, D., E.P.W. Koenis & E.M. Loovers: Geschiktheid van tertiaire kleien en waterglas voor afdichting van afval- en reststofbergingen. Wageningen, SC-DLO, 1993. Rapport 291, 45 blz.

Boels, D. & G. Flemming: Chemical timebombs from landfills: appraisal and modelling. Land Degrad. Rehabil. 4 (1994), 4: 399-405.

Boels, D. & G.J. Veerman: Toepassingsmogelijkheden van vormzand voor de afdichting van afval- en reststofbergingen. Wageningen, SC-DLO, 1995. Rapport 406, 23 blz.

Boels, D. en J. Beuving, 1996. Afdichtende functie van met waterglas geïmmobiliseerde afvalstoffen. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 482

Boels, D. en D. Schreiber, 1999. Effecten van alzijdige rek op de waterdoorlatendheid van minerale afdichtingsmaterialen. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Alterra rapport 290. 21 blz. .5 fig.; 4 tab.

D. Boels en J. Beuving, 2000. Vochtregime in afdichtinglagen van afvalstorten; Veld- en modelonderzoek. Wageningen, ALTERRA, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Concept eindrapport. 31 blz.

Bolt, G.H., 1955. Analysis of the validity of the Gouy-Chapman theory of electric double layer. Journal of Colloid Science, 10: 206 - 219

Bolt, G.H. and M.G.M. Bruggenwert (eds.), 1978. Soil chemistry. A. Basic Elements. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company

Bolt, G.H. (ed.), 1982. Soil Chemistry. B. Physico-Chemical Models. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company

CUR-PBV. Aanbeveling 33. Granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet al dan niet in combinatie met kunststof geomembranen. Tweede druk. Gouda, Civieltechnisch Centrum Uitvoering en Regelgeving. 44 pag.

CUR-PBV. Aanbeveling 49. Bentonietmatten in bodembeschermende voorzieningen; beoordeling geschiktheid. Gouda, Civieltechnisch Centrum Uitvoering en Regelgeving. 28 pag.

Didier, G. and L. Comeaga, 1997. "Influence of Initial Hydration conditions on GCL leachate permeability". In: L. W. Well (ed), 1997. "Testing and acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, ASTM STP 1308". American Society for Testing and Materials.

Egloffstein, T., G. Burckhardt und A. Mainka, 1996. Setzungsbetrachten bei Oberflächenabdichtungssystemen von Siedlungsabfalldeponien. Z. Mull und Abfall, Heft 5/96, Erich Schmidt Verlag Berlin.

Edelman, L., 2000. Verformbaarheid mineralischer Deponiebarrieren- Ergebnisse von Groszversuchen. In: Rosenberg, M. und Th. Schulz, 2000. 9. Braunschweiger Deponieseminar 2000; Vertikale und horizontale Abdichtungssysteme. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft nr. 6a, pag. 63-76.

Egloffstein, T., 2000. Der Einfluss de Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. Duitsland, Karlsruhe, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3. (tevens dissertatie Universiteit Karlsruhe, faculteit Bio- en Geowetenschappen)

Fugro, 1997. Invloed AV_-bodemas-eluaat in combinatie met stortpercolaat op de doorlatendheid van zand/bentoniet. Arnhem, FUGRO Ingenieursbureau bv, opdracht nummer H-1272.

Goldman, L.J., L.I. Greenfield, A.S. Damle, G.L. Kingsbury, C.M. Notheim and R.S. Truesdale. Clay liners for waste management facilities. Design, Construction and Evaluation. USA, New Yersey, Park Ridge, Noyes Data Corporation.

Graham, J., F.G. Walker and G.W. West, 1964. Nuclear magnetic resonance study of interlayer water in hydrated silicates. J. Chem. Phys., 40: 540 - 550

Heling, D. und V. Klapperich, 1987. Die Durchlässigkeit von Sedimentgefüge für anorganische Elektrolytlosungen. Bielefeld, Erich Schmidt Verlag

Hoeks, J., H.P. Oosterom, D. Boels, J.F.M. Borsten, K. Strijbis en W. ter Hoeven, 1991. Handleiding voor ontwerp en constructie van eindafdekkingen van afval- en reststofbergingen. Den Haag, Ministerie van VROM, Directie DWB. Publikatie reeks Bodembescherming nr. 1991/4 (tevens verschenen als Staring Centrum Rapport 91, 1990).

Grontmij, 1998. Verschilzetting op stortplaatsen. De Bilt

Klute, A. 1986 (ed.). Methods of soil analysis; Part I Physical and Mineralogical Methods, Second edition. USA, Madison Wisconsin, Amer. Soc. of Agron. Inc., Soil Sci. Soc. of Amer. Inc. Agronomy, number 9

Koenis en Loovers, 1991. Klei als basisafdichtingsmateriaal voor vuil stortplaatsen. Wageningen, Landbouwwuniversiteit, Vakgroep Ruimtelijke Planvorming.

Kraus, J.F., C.H. Benson, A.E. Erickson and E.J. Chamberlain, 1997. Freeze-Thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonite barriers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123:229-238

Kutilek, M., 1964. The infiltration of water in soils in the region of laminar flow. Int. Congr. Soil Sci., 2:45-52; Bukarest

Lagerwerf, J.V., F.S. Nakayama and M.H. Frere, 1969. Hydraulic Conductivity related to Porosity and Swelling of soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 33

Low, P.F., 1960. Viscosity of water in clay systems. In: Clays and Clay Minerals, 8: 170 – 182; New York (Pergamon Press)

Mitchel, J.K., 1976. Fundamentals of soil behavior. 422 p.; New York (Wiley)

Norrish, K., 1954. The swelling of montmorillonite. Discussions Faraday Soc. 18:120

Olsen, H.W., 1962. Hydraulic flow through saturated clays. In: Clays and Clay Minerals, 9:131-161; Oxford (Pergamon Press)

Oosterom, H.P., 1990. De waterdichtheid van natuurlijke materialen in relatie met de bovenafdichting van stortterreinen. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 96.

Othman, M.A., C.H. Benson, E.J. Chamberlain and T.F. Zimme, 1994. Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze-thaw: state of the art. Pages 227-254. In: Daniel D.E. and S.J. Trautwein (eds.), 1994. Hydraulic Conductivity and Waste Containment Transport in Soil, ASTM STP 1142. American Society for testing and Materials, Philadelphia, PA.

Rijtema, P.E., P. Groenendijk & J. Kroes. Environmental impact of landuse in rural regions. Imperial College Press, Series on environmental science management Vol.1

Rowe, R.K., C.J. Caers and F. Barone, 1988. Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed clayey soil. *Can. Geotech. J.*, 108-118

Rowell, D. L., 1963. Effect of electrolyte concentration on the swelling of oriented aggregates of montmorillonite. *Soil Science*, 96: 368-375

Schofield, R. K., 1946. Ionic forces in thick films of liquids. *Trans. Faraday Soc.* 42B:219

Schwartzendruber, D., 1966. Soil-water behavior as described by transport coefficients and functions. *Advance Agron.*, 18: 327-370

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

Verwey, E.J.W. and J. T. G. Overbeek, 1948. Theory of the stability of Lyophobic Colloids, pp. 106-126. Amsterdam, Elsevier Publishing Company.

Weitz, A.M. & D. Boels: Effect van vorst op de kwaliteit van zand-bentoniet-afdichtingen. Wageningen, SC-DLO, 1993. Rapport 301, 36 blz.

Weitz, A.M., D. Boels, H.J.J. Wieggers & J.J. Evers-Vermeer: Toepassingsmogelijkheden van TRISOPLAST voor de afdichting van afval- en reststofbergen. Wageningen, SC-DLO, 1994. Rapport 300, 59 blz.

Zevenbergen, C., 1994. Natural weathering of MSWI bottom ash. Delft: Eburon.-III, tevens als proefschrift Universiteit Utrecht

Ziehman, G., 2000. Gefährdung von Oberflächenabdichtungssystemen aufgrund von Setzung des Deponiekörpers. In: Rosenberg, M. und Th. Schulz, 2000. 9. Braunschweiger Deponieseminar 2000; Vertikale und horizontale Abdichtungssysteme. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft nr. 6a, pag. 63-76.

Niet gepubliceerde bronnen

BKB, 1995a. Toepassing van afvalstoffen in een waterdichte, niet uitlogende, afdeklaag boven op een vuilstort, ter vervanging van de zand-bentoniet en HDPE-folie afdeklaag. Dalfsen, BKB-Reststoffenmanagement.

BKB, 1995b. Toepassing van afvalstoffen in een waterdichte, niet uitlogende, afdeklaag boven op een vuilstort, ter vervanging van de zand-bentoniet en HDPE-folie afdeklaag; Deelrapport 1. Dalfsen, BKB-Reststoffen Management.

Calmano, W. & U. Förstner, 1995. Gutachterliche Stellungnahme zum Demonstrationsvorhaben Oberflächenabdichtung der Zentraldeponie Bochum-Kornharpen aus wasserglasvergüteten Massenreststoffen mit aktiver Risz-sicherung'. Duitsland, Hamburg, Technischen Universität, Arbeitsbereich Umweltschutztechnik.

Siedek, H. en J.U. Kügler, 1995. Proefvelden op de stortplaats Twente; Oppervlakteafdichting op basis van waterglasverrijkte residuenmengsels, met actieve scheurbeveiliging; Grondmechanische aspecten. Duitsland, Essen, Institut für Umweltforschung Schlieben e.V. Rapport nr. 94.02.14.

Aanhangsel 1 Theoretische achtergronden van de invloed van samenstelling bodemvocht op de doorlatendheid van klei-houdende afdichtingsmaterialen

Benaderingsmethode

De invloed van de samenstelling van het vocht in afdekklagen op de afdichtende werking is een complex fenomeen en alleen van belang voor afdichtingsmaterialen waarvan de werking op het zwelvermogen van kleimineralen berust. In deze paragraaf zal dit effect aan de hand van een fysisch-chemisch theoretische beschouwing worden toegelicht. Eerst wordt een theoretische benadering gegeven van de samenhang tussen porositeit en doorlatendheid van granulaire materialen. De doorlatendheid hangt namelijk voornamelijk af van (1) de porositeit en (2) de poriegeometrie. Deze laatste wordt vertaald in het inwendig oppervlak van de poriënruimte. Kleihoudende materialen bezitten een diëlectrische dubbellaag. In deze laag vindt geen watertransport plaats, zodat dat volume niet wezenlijk bijdraagt aan het “effectief” poriënvolume. De dikte van de diëlectrische dubbellaag hangt nauw samen met de samenstelling van de bodemoplossing. Deze samenhang wordt ook op theoretische gronden bepaald. Het niet effectieve deel van de poriën is dus het volume dat wordt berekend als het product van het inwendig oppervlak van de kleifractie en de dikte van de dubbellaag. Dit niet effectieve deel wordt in mindering gebracht op het werkelijk poriënvolume in de theoretische formule voor de doorlatendheid en de daarbij behorende doorlatendheid wordt dan berekend. Tenslotte wordt rekening gehouden met de grilligheid van poriën. Dat gebeurt door de waarschijnlijkheid te bepalen dat poriën een continue systeem vormen. Op basis van deze waarschijnlijkheid wordt de verwachtingswaarde van de effectieve doorsnede bepaald.

Theoretische doorlatendheid

De doorlatendheid van poreuze materialen kan theoretisch worden beschreven met de vergelijking van Kozeny-Carman:

$$K = k_h \left(\frac{h}{r} \right) = \frac{1}{t^2 S_0^2} e^3 \quad (1)$$

hierin is:

τ	tortuositeit (<1)
S_0	inwendig oppervlak
e	porositeit
K	intrinsieke doorlatendheid
k_h	hydraulische doorlatendheid
ρ	dichtheid vloeistof
η	kinematische viscositeit

Porositeit:
verhouding volume
poriën en het totaal
bodenvolume

In deze vergelijking worden de poriën opgevat als een stelsel evenwijdige zeer dunne buizen. Omdat die voorstelling onjuist is, is de tortuositeit (“kronkeligheid”)

ingevoerd als correctiefactor voor de wegverlenging die de vloeistof ondervindt omdat de poriën geen rechte buizen zijn. Deze vergelijking demonstreert duidelijk dat wanneer de porositeit (of porie getal) verandert, ook de doorlatendheid verandert. Ook laat deze vergelijking zien dat de doorlatendheid in fijnkorrelige materialen (groot inwendig oppervlak) veel kleiner is dan in grofkorrelige materialen.

De werkelijkheid poriegeometrie wijkt sterk af van de vereenvoudigde benadering volgens deze formule. Om de werkelijkheid beter te benaderen worden een aantal correcties op deze vergelijking aangebracht.

De eerste betreft een correctie voor de porositeit. In werkelijkheid bestaat het poriën systeem uit poriën van verschillende grootte, die al dan niet op elkaar aansluiten en discontinuïteiten vertonen. Om daarmee rekening te houden is door Boels et al. (1993) een correctie aangebracht op de effectieve porositeit. Deze correctie is gebaseerd op de (statistische) waarschijnlijkheid van continuïteit van poriënsystemen. Afhankelijk van de voorstelling die men heeft van de vorm van de poriën kan de verwachtingswaarde, $E(\underline{\epsilon})$, van het effectieve poriënvolume worden berekend. Onder effectief porievolume verstaat men dat volume dat daadwerkelijk bijdraagt aan het transport van water door de bodem. Vat met poriën op als stelsel evenwijdige buizen in een bepaalde laag die al dan geen verbinding hebben met de poriën in de volgende (hypothetische) laag, dan berekent men het effectief poriënvolume voor $\epsilon < 0,5$, volgens:

$$E(\underline{\epsilon}) = \int_0^{\epsilon} P(\mathbf{e}_i > \mathbf{e}_v) \partial \mathbf{e} = \mathbf{e}^2 \quad (2a)$$

en bij een grotere porositeit dan 0,5:

$$E(\underline{\epsilon}) = \int_0^{\epsilon} P(\mathbf{e}_i > \mathbf{e}_v / \mathbf{e} > 1 - \mathbf{e}) \partial \mathbf{e} = 2\mathbf{e} - \frac{1}{2}\mathbf{e}^2 - \frac{1}{2} \quad (2b)$$

Vat men daarentegen de poriën op als bollen, dan wordt de effectieve porositeit berekend met:

$$E(\underline{\epsilon}) = 0,3 \mathbf{e}^{\frac{2}{3}} \quad (2c)$$

Het berekend effectief poriënvolume wordt in vergelijking ingevoerd, waarbij het poriegetal gelijk is aan: $e = \epsilon / (1 + \epsilon)$.

Benadering van de dikte van de diëlectrische dubbellaag

In het voorgaande is uiteengezet dat kleimineralen omgeven kunnen zijn met een laag water waarin ionen worden aangetroffen die de negatieve lading van het kleikristal compenseren.

Het water in deze dubbellaag bevindt zich op het grensvlak met een porie of bevindt zich tussen twee kleiplaatjes. Vaak zijn de kationen omgeven door watermoleculen en vormen in interactie met het negatief geladen oppervlak een gerichte dipool. Daardoor wordt als het ware een laag kristalwater aan het kleikristal gebonden (Low, 1960). Dit leidt tot een hoge viscositeit van water aan het kleioppervlak en verder tot elektrokinetische invloeden (Olsen, 1962, Swartzendruber, 1966, Kutilek, 1972 en Mitchel, 1976). Op basis van een NMR (nuclear resonance response) studie concludeert Graham, 1966, dat de viscositeit van water op kleioppervlaktes sterk lijkt te zijn toegenomen.

Op grond van gerefereerd onderzoek lijkt het aannemelijk dat een belangrijk deel van het water in de dubbellaag zodanig is gebonden of een zodanige hoge viscositeit heeft, dat het volume in de dubbellaag niet bijdraagt aan het transport van water en in mindering gebracht dient te worden op het effectief poriënvolume. Dit principe is door Lagerwerf et al., 1969 toegepast om de doorlatendheid van klei te berekenen voor systemen met enkelvoudige ionen (of alleen Na of alleen Ca), maar verschillende zoutconcentraties.

Voor de benadering van de invloed van de samenstelling van het vocht in de afdichtingslaag op de doorlatendheid, wordt de benadering van Lagerwerf c.s. uitgebreid naar een systeem met zowel een als twee-waardige ionen. Driewaardige ionen komen vrijwel niet voor en zeker niet in anaëroob vuilstortpercolaat (Boels, 1993)

Om het volume water te bepalen dat zich in de dubbellaag bevindt dient men zowel het totaal oppervlak te kennen van de kleikristallen als de dikte van de dubbellaag. Het oppervlak wordt gemeten (Carter et al., 1986), de dikte wordt langs theoretische weg en enkele gemeten parameters berekend. Daarbij wordt uitgegaan van de potentiaalvergelijking in de nabijheid van het kleioppervlak (Bolt, 1955):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = - \frac{4p}{\epsilon} \sum_{i=1}^{i=J} n_i F n_{0,i} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (3)$$

Hierin is:

- ψ = elektrische potentiaal
- F = Faraday (= elementaire lading x getal van Avogadro, N_A)
- J = aantal ionsoorten
- ϵ = diëlectrische constante
- v_i = waardigheid ionsoort i
- $n_{0,i}$ = concentratie ion, i , in the bulk oplossing
- E_i = arbeid om ion, i , vanuit de bulk oplossing naar de gespecificeerde positie te brengen
- k = constante van Boltzman
- T = absolute temperatuur
- X = afstand tot kleioppervlak

De verhouding tussen de elektrische energie, $e\psi$, en thermische energie, kT , wordt gedefinieerd als:

$$y = \frac{e\psi}{kT} ; \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{e}{kT} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

De concentratie van ion soort, i , bij een elektrische potentiaal, ψ , is een functie van y :

$$c_i = c_{i,0} e^{z_i y} \quad (5)$$

en wordt gesubstitueerd in de vergelijking van Lagerwerff et al. 1969:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \sqrt{b} \sqrt{\sum_i c_i - \sum_i c_{i,b}} \quad (6)$$

hierin is:

$$b = \frac{8p F^2}{eRT} \quad (7)$$

en:

$c_{i,b}$ = concentratie van ion, i , (mol. m^{-3}), in het vlak waar $x = X$ and $\psi_x = \psi_X$

$c_{i,0}$ = concentratie ion, i , in de bulk oplossing

De totale zoutconcentratie in de bulkoplossing, N_0 , wordt uitgedrukt in eq. m^{-3} .

De fractie tweewaardige kationen in de oplossing wordt aangeduid met f_k en de fractie tweewaardige anionen met f_a . We definiëren $u = e^{-y}$ and $v = e^y$. De concentratie monovalente kationen is dus $(1-f_k) \cdot N_0 \cdot u$, de tweewaardige kationen $0.5 f_k N_0 \cdot u^2$ en de anionen concentratie is dan respectievelijk $(1-f_a) \cdot N_0 \cdot v$ en $0.5 f_a N_0 \cdot v^2$. Voorts stellen we:

$$\Delta u = u - u_b ; \Delta v = v - v_b \quad (8)$$

Vergelijking (7) gaat na substitutie over in:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \sqrt{b} \sqrt{N_0} \sqrt{\Delta u \left\{ \frac{f_k}{2} \Delta u + f_k (u_b - 1) + 1 \right\} + \Delta v \left\{ \frac{f_a}{2} \Delta v + f_a (v_b - 1) + 1 \right\}} \quad (9)$$

De waarde van y_b zijn door Lagerwerff c.s. experimenteel afgeleid uit een serie doorlatendheidsmetingen waarin of bij een gelijk zoutgehalte de verhouding tussen een en tweewaardige kationen is gevarieerd, of bij gelijkblijvende verhouding tussen een en tweewaardige kationen, het totaal zoutgehalte gevarieerd. Bij lage zoutgehalten in de bulkoplossing ($< 10 \text{ meq. l}^{-1}$) neemt de waarde van y_b af tot $-2,9$ tot $-2,3$ (~ -55

$\psi_b > -75$ mV). Bij concentraties tussen 10 en 100 meq. l⁻¹ ligt deze waarde tussen -1,6 and -1,0 en voor totale zoutconcentratie boven de 500 meq. l⁻¹ stijgt ψ_b naar ongeveer -0,4 ($\psi_b \sim -10$ mV).

Correctie porositeit voor volume dielectrische dubbellaag en viscositeit

Vergelijking (9) wordt langs numerieke weg opgelost waarmee de dikte van de dubbellaag wordt berekend. De oplossing is gevonden wanneer de totale som der ladingen in de dubbellaag gelijk is aan de ladingsdichtheid van het kleioppervlak (Boels et al. 1993). Deze dikte wordt vervolgens vermenigvuldigd met het (specifiek) oppervlak van de kleifractie en als fractie inert water in mindering gebracht op het effectief porievolume in de Kozeny-Carman vergelijking.

De werkelijke doorlatendheid wordt verkregen door de intrinsieke doorlatendheid te vermenigvuldigen met de dichtheid van de vloeistof en te delen door de kinematische viscositeit. Voor de samenhang tussen temperatuur en viscositeit wordt een empirische relatie gebruikt:

$$h = h_0 e^{(-0,0318 + 1,6592 \cdot 10^{-4} (T - 10))T} \quad (10)$$

met:

η_0 = Viscositeit bij 0 °C (N.s.m⁻²)

T = temperatuur (°C)

Aanhangsel 2 Interactie afdichtingslaag en omgeving

Benadering levensduur minerale afdichtingslaag

In aanhangsel 1 is de theoretische invloed van de chemische samenstelling op de doorlatendheid gegeven. Als men de levensduur van minerale afdichtingsmaterialen wil benaderen, zal het verloop van de samenstelling van het vocht in de afdichtingslaag bekend moeten zijn. Als dit verloop bekend is dan kan op elk moment de theoretische (of anders bepaalde) doorlatendheid worden berekend. Het tijdstip waarop die doorlatendheid van een afdichtingslaag niet meer aan het Stortbesluit (of vergunningsvoorwaarden) voldoet bepaald het einde van de functionele levensduur van de afdichtingslaag.

Opbouw afdichtingsconstructie en transportprocessen

De opbouw van de afdekkingen bestaat van onder naar boven uit: afval, steunlaag, minerale afdichtingslaag, geomembraan (folie), drainlaag, teelaarde. Bij een goed functionerende geomembraan vindt geen water en stoffen uitwisseling plaats tussen de drainlaag en de afdichtingslaag. Wel is dat het geval tussen de afdichtingslaag en de steunlaag. De interactie tussen afval en steunlaag zal, behoudens via de gasfase (zoals bij ammoniak) vrijwel afwezig zijn. De interactie tussen steun- en afdichtingslaag bestaat uit (1) transport van stoffen, (2) evenwichtsreacties tussen getransporteerde stoffen en (3) uitwisseling van opgeloste stoffen in de waterfase tegen geadsorbeerde stoffen aan de vaste fase.

Wanneer echter de minerale laag op de folie wordt gelegd, zoals vaak met bentonietmatten het geval is, vindt uitwisseling plaats tussen de laag teelaarde en de drainage laag en de drainagelaag en de afdichtingslaag. Deze uitwisseling kenmerkt zich ook door het ontbreken van een massastroming van opgeloste stoffen door de afdichtingslaag. De uitwisseling tussen drainagelaag en de laag teelaarde betreft wel een massastroming, terwijl die tussen drainagelaag en afdichtingslaag bepaald wordt door moleculaire diffusie.

Hieronder worden de transport- en uitwisselingsprocessen beschreven met behulp van een theoretische benadering van het stoftransport en geochemische processen. Deze processen worden in een numeriek model, EPIDIM, gebruikt voor de simulatie van het verloop van de chemische samenstelling van het vocht in de afdichtingslaag. Op basis van deze gegevens wordt met het in aanhangsel 1 gepresenteerd model de doorlatendheid op een aantal tijdstippen na aanleg en op verschillende niveaus in de afdichtingslaag berekend.

Transport van stoffen

Wanneer een afdichtingslaag op een steunlaag wordt aangelegd, zal wanneer de chemische samenstelling van het vocht in beide lagen verschilt, transport van opgeloste stoffen opgang komen. Na een aanvankelijk herverdeling van vocht blijft als voornaamste oorzaak van transport moleculaire diffusie over. De verplaatste hoeveelheid per tijdseenheid is evenredig met de concentratie gradiënt, de diffusiecoëfficiënt voor de verschillende stoffen en de effectieve doorsnede van de

waterhoudende poriën en kan worden beschreven met de tweede wet van Fick (niet-stationair transport):

$$\Theta \frac{dC}{dt} = \frac{dJ}{dx} - \frac{dS_a}{dt} \quad (11)$$

Hierin is:

Θ	volume vochtgehalte
C	concentratie
X	afstand
T	tijd
J	diffusie flux
S _a	hoeveelheid van bepaalde stof geadsorbeerd per volume-eenheid bodem
D	diffusiecoëfficiënt

De diffusie flux, J wordt beschreven met de eerste wet van Fick:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (12)$$

De diffusiecoëfficiënt is stof afhankelijk. Enkele waarden zijn in tabel 1 weergegeven.

Tabel 1 Diffusiecoëfficiënt voor enkel stoffen

Kation	Diffusie coëfficiënt (x 10 ⁻⁹ m.s ⁻¹)	Anion	Diffusiecoëfficiënt (x 10 ⁻⁹ m.s ⁻¹)
H	9,30	OH	5,26
Na	1,33	Cl	2,03
K	1,96	NO ₃	1,90
NH ₄	1,96	HCO ₃	1,19
Mg	0,71	SO ₄	1,07
Ca	0,79	CO ₃	0,92
Ba	0,85		
Cu	0,72		
Zn	0,7		
Pb	0,93		

Evenwichtsreacties

Reacties die tijdens het transport kunnen optreden worden als volledig omkeerbaar beschouwd en worden beschreven volgens de algemene benadering:



Chemisch evenwicht is bereikt wanneer de voorwaartse reactiesnelheid (vorming van de stoffen C en D uit de stoffen A en B) gelijk is aan de achterwaartse reactiesnelheid (vorming van A en B uit C en D) en de totale vrije Gibbs-energie voor het chemisch systeem op een minimum niveau ligt. De evenwichtstoestand wordt dan beschreven met:

$$\frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} = \frac{k_f}{k_b} = K \quad (14)$$

Dit model volgt de traditionele geochemische modellering en houdt rekening met ion-paarvorming en complexvorming. Om de chemie van oplossingen te beschrijven wordt een set van onafhankelijke chemische componenten gekozen zodanig dat alle verbindingen daaruit kunnen ontstaan en geen enkel component uit de andere ontstaan. In het algemeen geldt dat een anorganisch geochemisch model N onbekende componenten bevat en N vergelijkingen. De uitdrukking voor de concentratie van verschillende soorten stoffen wordt geformuleerd op basis van de wet van behoud van massa. De vorming van stofsoort, S_i , uit de componenten A_j kan worden beschreven

$$a_{i,1} A_1 + \dots + a_{i,j} A_j + \dots + a_{i,N} A_N \leftrightarrow S_i \quad (15)$$

Hierin is a_{ij} de stoichiometrische coëfficiënt die hoort bij component j bij de vorming van stofsoort i en geeft de relatieve hoeveelheid van stof A_j weer die voor de reactie nodig is. N staat voor het aantal componenten. De mathematische formulering van de wet van behoud van massa die de vorming van stofsoort S_i beschrijft, luidt:

$$[S_i] = K_i \prod_{j=1}^N [A_j]^{a_{i,j}} \quad (16)$$

Voor elke component in de waterige oplossing wordt een materiaal balans opgesteld. De totale concentratie van elke component kan worden uitgedrukt als de som van concentraties van afzonderlijke stofsoorten volgens:

$$[A_j^{aq}]_T = \sum_{i=1}^m a_{i,j} [S_i] = \sum_{i=1}^m a_{i,j} \left\{ K_i \prod_{j=1}^n [A_j]^{a_{i,j}} \right\} \quad (17)$$

Het chemisch systeem is hiermee mathematisch weergegeven in de vorm van N- (niet lineaire) vergelijkingen met N onbekenden en kan dus worden opgelost. Daartoe wordt een Newton-Raphson iteratie methode gebruikt. De oplossing van de vergelijkingen geeft de concentratie van elke stofsoort. De definitie van een chemische multi-componentensysteem wordt vaak in een componenten tabel weergegeven (zie tabel 2)

Tabel 2 Voorbeeld van een componenten tabel ($a_{2,j}$: stochiometrisch coëfficiënten)

Soort	Component						log(K)
	A ₁	A ₂	.	A _j	.	A _N	
S ₁	a _{1,1}	a _{1,2}	.	a _{1,j}	.	a _{1,N}	log(K ₁)
S ₂	a _{2,1}	a _{2,2}	.	a _{2,j}	.	a _{2,N}	log(K ₂)
.
S _i	a _{i,1}	a _{i,2}	.	a _{i,j}	.	a _{i,N}	log(K _i)
.
S _M	a _{M,1}	a _{M,2}	.	a _{M,j}	.	a _{M,N}	log(K _M)
	[A ₁ ^{aq}] _T	[A ₂ ^{aq}] _T	.	[A _j ^{aq}] _T	.	[A _N ^{aq}] _T	

In voorgaande benadering is gerekend met concentraties. Echter zodra deze niet uiterst gering zijn, gedragen de opgeloste stoffen, ionen, zich niet meer ideaal en dient men voor de beschrijving van de reacties te rekenen met schijnbare concentraties. De verhouding tussen de schijnbare concentratie (ook wel de activiteit) en de werkelijke concentratie wordt aangeduid met activiteitcoëfficiënt en is een getal kleiner dan 1. De activiteit van stof A wordt dan beschreven volgens:

$$(A) = g_A [A] \quad (18)$$

Hierin is:

(A) activiteit van stof A in de oplossing

[A] concentratie van stof A in de oplossing

γ_A activiteitcoëfficiënt.

De thermodynamische formulering van het chemisch evenwicht gaat dan over in:

$$K^o = \frac{(C)^c (D)^d}{(A)^a (B)^b} \quad (12)$$

met K^o als een thermodynamische evenwichtsconstante. De dissociatie constante, K (vgl. 14) wordt berekend op basis van de activiteitcoëfficiënten en de constant K^o volgens:

$$K = \frac{g_A g_B}{g_C g_D} K^o \quad (30)$$

De activiteitscoëfficiënten worden berekend met de “extended Debye-Hückel” vergelijking

$$-\log g_k = \frac{A_g z_k^2 \sqrt{I}}{1 + a B_g \sqrt{I}} - C_g I \quad (21)$$

met:

γ_k : activiteitcoëfficiënt van ion k (-)

z_k : waardigheid ion k (-)

I :	ionsterkte	(mole.l ⁻¹)
A _γ :	temperatuur afhankelijke coëfficiënt	(mole ^{-0.5} .l ^{-0.5})
B _γ :	idem	(mole ^{-0.5} .l ^{-0.5} .Å ⁻¹)
à :	ion-specifieke diameter	(Å)
C _γ :	ion specifieke parameter	(mole ⁻¹ .l ⁻¹)

Een alternatieve formulering is de eenvoudigere Davies vergelijking:

$$-\log g_k = 0.5 z_k^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3 I \quad (22)$$

De ion-sterkte is een maat voor de gewogen gemiddelde molariteit van de oplossing en wordt berekend met:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i^n z_i [S_i] \quad (23)$$

Hierin is [S_i] de concentratie van stofsoort i en z_i is z'n lading. Beide vergelijkingen zijn niet toepasbaar voor ionsterktes ter grote van een molair. Het meest betrouwbaar gebied voor de ionsterkte, I, ligt onder de 0,1 molair.

De temperatuur in de afdichtings- en steunlaag varieert en heeft daardoor invloed op de grootte van het thermodynamisch evenwicht van de reacties. De verandering van de constante, K, wordt beschreven volgens de van 't Hoff vergelijking:

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta H^o}{RT^2} \quad (24)$$

Met ΔH^o als de standaard entalpie (J.mol⁻¹), R universele gasconstante (J.mol⁻¹.K⁻¹) en T als de absolute temperatuur (°Kelvin). Aangezien de waarde van ΔH^o in het temperatuurtraject van 0 - 30 °C nauwelijks wordt beïnvloed wordt deze als temperatuuronafhankelijke beschouwt. In dat geval kan vergelijking (24) worden omgewerkt naar:

$$K_T = K_{298.15} \exp \left\{ \frac{\Delta H^o}{R} \left(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (25)$$

Adsorptie en (kat-)ion uitwisseling

De interactie tussen de vloeibare en vaste fase is een veel voor komend natuurlijk fenomeen dat meestal wordt beschreven via de verhouding tussen de concentratie van een bepaalde stof in de vloeibare fase en die van de vaste fase. In het verleden zijn door diverse onderzoekers empirische relaties voor deze verhouding ontwikkeld, waarvan bijvoorbeeld de Freundlich vergelijking bekend is om zijn gebruik bij sporen elementen.

De interactie tussen de vloeibare en vaste fase is een omkeerbaar proces en lijkt daarin sterk op chemische evenwichtsreacties. Het is daarom dan ook mogelijk om de

adsorptie- desorptie verschijnselen te behandelen als een geochemisch proces, waarbij het adsorptiecomplex (vaste fase) als een soort component wordt opgevat. Dit principe laat zich toelichten aan de uitwisseling van de kationen X^+ die zijn geadsorbeerd aan het complex tegen de kationen, Y^+ , in de waterfase en omgekeerd:



met X_Q en Y_Q de geadsorbeerde hoeveelheden van respectievelijk de stoffen X en Y. Q kan worden opgevat als een stof die de concentratie van het adsorptiecomplex voorstelt. De concentraties van de geadsorbeerde stoffen X_Q en Y_Q worden berekend met:

$$\begin{array}{l}
 X_Q = K_X [X^+] [Q^-] \\
 Y_Q = K_Y [Y^+] [Q^-]
 \end{array}
 \tag{27}$$

Voor elke kationsoort die betrokken is bij de kationuitwisseling in het bodemwatersysteem kunnen relaties tussen de concentratie in de waterfase en de vaste fase worden bepaald volgens vgl. 27. De voorkeur (selectiviteit) voor adsorptie van een bepaald kation boven een andere wordt gevonden door uit vgl. 27 van beide stoffen $[Q^-]$ te elimineren.

We noemen z_x en z_y de waardigheid van de kationen X en Y, $a_x^{z_x}$ en $a_y^{z_y}$ de activiteit van beide kationen en N_x en N_y als de fractie van het adsorptiecomplex dat is bezet door respectievelijk de kationen X en Y:

$$N_x = \frac{\Gamma_X}{CEC} \quad \text{and} \quad N_y = \frac{\Gamma_Y}{CEC}
 \tag{28}$$

Γ_X and Γ_Y stellen de geadsorbeerde equivalente hoeveelheden voor en zijn in dezelfde eenheid uitgedrukt als de kationomwisselcapaciteit (CEC).

De vergelijking voor de selectiviteit kan worden beschreven met:

$$K_N = \frac{N_X \frac{1}{z_x} (Y^{z_y})^{\frac{1}{z_y}}}{N_Y \frac{1}{z_y} (X^{z_x})^{\frac{1}{z_x}}}
 \tag{29}$$

Voor een overzicht van waarden van K_N voor verschillende bodems en omstandigheden, zij verwezen naar Bruggenwert and Kamphorst (1982) die deze auteurs ontleenden aan ruim 500 publicaties.

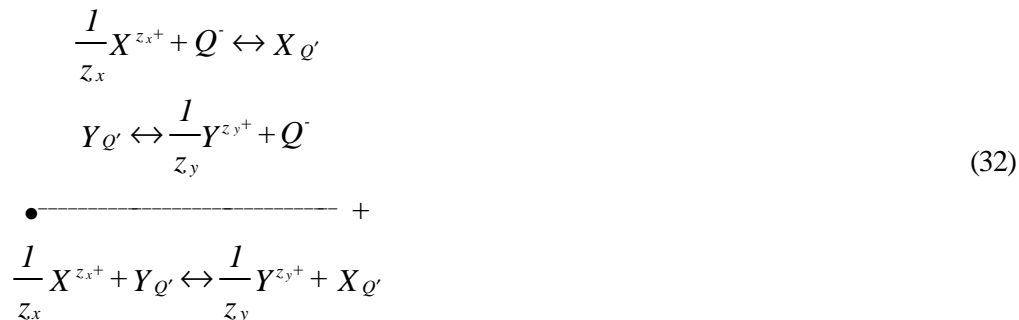
In de rekenmodellen wordt de Gapon selectiviteitsvergelijking gebruikt om de uitwisseling van hetero-valente kationen te beschrijven. Deze vergelijking luidt:

$$K_G = \frac{\Gamma_X (Y^{z_y+})^{\frac{1}{z_y}}}{\Gamma_Y (X^{z_x+})^{\frac{1}{z_x}}} \quad (30)$$

met K_G als de Gapon selectiviteitsvergelijking en Γ_X en Γ_Y als de geadsorbeerde hoeveelheden kationen X en Y (in meq./100gr). De som van de geadsorbeerde kationen is gelijk aan de waarde van de CEC. De Gapon selectiviteitcoëfficiënt is gerelateerd aan de eerder gegeven verhouding K_N en luidt:

$$K_G = K_N \frac{N_X^{\frac{1}{z_x}}}{N_Y^{\frac{1}{z_y}}} \quad (31)$$

De Gapon selectiviteitcoëfficiënt wordt in de componenten tabel van de evenwichtsreactie opgenomen. Ter illustratie van de analogie van de omwisseling met chemische evenwichtsreacties wordt uitgegaan van twee chemische half-reacties. De variabelen X_Q' and Y_Q' stellen de geadsorbeerde hoeveelheden voor en zijn uitgedrukt in meq./100gr:



Hieruit worden de vergelijkingen afgeleid om de geadsorbeerde hoeveelheden te berekenen uit de concentraties van X en Y:

$$\begin{aligned} X_{Q'} &= \frac{r_d}{100q_v} K_G^X (X^{z_x+})^{\frac{1}{z_x}} [Q^-] \\ Y_{Q'} &= \frac{r_d}{100q_v} K_G^Y (Y^{z_y+})^{\frac{1}{z_y}} [Q^-] \end{aligned} \quad (33)$$

De verhouding van K_G^X en K_G^Y is gelijk aan de Gapon selectiviteitcoëfficiënt. De hoeveelheden $X_{Q'}$ en $Y_{Q'}$ zijn uitgedrukt in eq.l⁻¹. Zowel de variabele Q^- en de bodemfactoren worden geëlimineerd door combinatie van beide vergelijkingen. De resterende vergelijking wordt ingevoerd in de componenten tabel voor chemische evenwichtsreacties. In de componententabel worden omgekeerde waarden van de stoichiometrische coëfficiënten in de kolom van het betreffend kation. Dat heeft een conversie van eenheid van concentratie tot gevolg. De bijdrage van de geadsorbeerde fase in de som van concentraties van kationen zal worden uitgedrukt in mol.l⁻¹. De som van de concentraties in de 'Q-kolom' wordt berekend in equivalente ladingseenheden. Een voorbeeld van een systeem met Gapon constanten is in tabel 3 gegeven. Ca⁺⁺ geldt als referentie-ion.

Tabel 3. Beschrijving van de stoichiometrie van een systeem met drie kationen die volgens de Gapon vergelijking worden omgewisseld.

Soort	Componenten				log(K) of K_G
	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Al ⁺⁺⁺	Q ⁻	
Na ⁺	1	0	0	0	0
Ca ⁺⁺	0	1	0	0	0
Al ⁺⁺⁺	0	0	1	0	0
Geadsorbeerde soorten					
Na _Q	1	0	0	1	$K_G(\text{Na/Ca})$
Ca _Q	0	1/2	0	1	1
Al _Q	0	0	1/3	1	$K_G(\text{Al/Ca})$
SOM	Na _T	Ca _T	Al _T	Q _T	-

Voor de beschrijving van de omwisseling tussen ionen met gelijke waardigheid, is de Kerr vergelijking gebruikt. De volgende vergelijking is zo'n Kerr vergelijking voor de uitwisseling Ca⁺⁺ en Mg⁺⁺:

$$K_K = \frac{\Gamma_X (Y^{2+})}{\Gamma_Y (X^{2+})} \quad (34)$$

Hierin is K_K de selectiviteitscoëfficiënt volgens Kerr. De Kerr vergelijkingen kunnen ook worden ingevoerd in de componenten tabel, maar niet tegelijkertijd met de Gapon vergelijking. Immers in de Gapon vergelijking wordt een evenredigheid verondersteld met de z-wortel van de activiteit in de bodemoplossing. (z = waardigheid betreffende ion). Tabel.4 geeft een voorbeeld van het systeem met uitwisseling Ca⁺⁺ and Mg⁺⁺. In dit geval is Ca⁺⁺ weer als referentie-ion gebruikt.

Tabel 4. Beschrijving van een stoichiometrisch a systeem met kationuitwisseling volgens een Kerr vergelijking.

Soort	Componenten			log(K) of K_K
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Q ⁻	
Ca ⁺⁺	1	0	0	0
Mg ⁺⁺	0	1	0	0
Geadsorbeerde soorten				
Ca _Q	1	0	1	1
Mg _Q	0	1	1	$K_K(\text{Mg/Ca})$
SOM	Ca _T	Mg _T	Q _{tot}	-

Als men een systeem wil beschrijven met ionen van verschillende waardigheden met meer dan drie soorten kationen volgens de Kerr en Gapon benadering, is het mogelijk om de Kerr-vergelijkingen te elimineren door een nieuwe Gapon vergelijking in te voeren. Een systeem met bijvoorbeeld Na⁺, Ca⁺⁺ and Mg⁺⁺, en beschreven met een Gapon en Kerr vergelijking en met Ca⁺⁺ als referentie ion, kan worden omgezet in een systeem met twee Gapon vergelijkingen met Na⁺ als referentie-ion.

Table 5 Overzicht van stofsoorten, componenten en dissociatie constanten

	H ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	CEC	log(K)
H ⁺	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
OH ⁻	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-14.0
Na ⁺	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.0
NaOH	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	-14.20
NaCO ₃ ⁻	-1	1	0	0	1	0	0	0	0	-9.07
NaHCO ₃	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0.24
Na ₂ CO ₃	-1	1	0	0	2	0	0	0	0	-10.32
NaSO ₄ ⁻	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0.70
NaCl	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0.0
K ⁺	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.0
KOH	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	-14.50
K ₂ CO ₃	-1	1	0	0	0	2	0	0	0	-10.35
KSO ₄ ⁻	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0.85
KCl	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-0.70
Ca ⁺⁺	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.0
CaOH ⁺	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	-12.70
CaCO ₃	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	-7.13
CaHCO ₃ ⁺	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1.26
CaSO ₄	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2.31
CaCl ⁺	0	0	0	1	0	0	1	0	0	-1.00
CaCl ₂	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0.0
Mg ⁺⁺	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.0
MgOH ⁺	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	-11.45
MgCO ₃	-1	1	0	0	0	0	0	1	0	-6.93
MgHCO ₃ ⁺	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1.16
MgSO ₄	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2.23
MgCl ₂	0	0	0	2	0	0	0	1	0	-0.03
HCO ₃ ⁻	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.0
CO ₃ ⁻	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	-10.33
H ₂ CO ₃ [*]	1	1	0	0	0	0	0	0	0	6.36
SO ₄ ⁻	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.0
Cl ⁻	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.0
kation uitwisseling										
CEC-H	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
CEC-Na	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
CEC-K	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
CEC-Ca	0	0	0	0	0	0	1	0	2	
CEC-Mg	0	0	0	0	0	0	0	1	2	
SOM	H _T	HCO _{3T}	SO _{4T}	Cl _T	Na _T	K _T	Ca _T	Mg _T	CEC _T	

Aanhangsel 3 Bemonstering en chemische analyse steunlaag materiaal tbv. risico analyse

Monstername

De bemonsteringsintensiteit zal nog nader moeten worden vastgesteld. Voorlopig kan worden uitgegaan van èèn analyse per 2000 ton steunlaag materiaal, waarbij monstername overeenkomstig conform NEN 7300 plaats vindt. De monstergrootte bedraagt ca. 1 kg.

Extractiemethode

Het monster wordt gemengd en een klein monster wordt genomen voor de bepaling van het vochtgehalte (NEN 5747). Een hoeveelheid (niet gedroogd) monstermateriaal, ca. 500 gr., wordt op een vochtgehalte van 25% (m/m) gebracht (mengen). Dit monster laat men vervolgens 48 uur in een geconditioneerde ruimte (20 gr.) staan.

Het vocht voor de chemische analyse wordt aan dit monster onttrokken met behulp van een centrifuge, voorzien van speciale filters (Alterra standaardwerkvoorschrift E0002 "Verkrijgen van bodemvocht door centrifugeren).

Chemische analyses

In het watermonster wordt het elektrisch geleidingsvermogen (EC) gemeten (Alterra standaard werkvoorschrift E0102 of NEN 5749 of NEN 7888). Deze meting dient als controle op de uit de vervolg analyses af te leiden activiteit van de oplossing. Ook wordt de pH gemeten ter controle op aanwijzingen voor afwijkende samenstelling (bijvoorbeeld $pH < 4,5$ of > 8).

In de waterige oplossing (monster) wordt de concentratie van de elementen Al, As, Ca, Cd, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Na, Ni, P, Pb, S en Zn bepaald met een ICP-AES (Alterra standaardwerkvoorschrift E1304 of NEN 6424). Het element zwavel is meestal als sulfaat aanwezig. Het chloridegehalte wordt bepaald met een flowinjectionanalyser (Alterra standaardwerkvoorschrift E1400 of NEN 6651).

Risico-analyse

De bedoeling van deze analyse is om globaal vast te stellen of de steunlaag waarop bentoniethoudende afdichtingsmaterialen worden aangebracht mogelijk een nadelige invloed heeft op de functionele levensduur.

Met behulp van de chemische analyse van het verzadigd extract, wordt de totale concentratie van de oplossing berekend (=Conc, meq/l). Vervolgens berekent men de SAR-waarde door de som van alle eenwaardige ionen (S1k, in eq/l) en ook die van alle twee-waardige ionen (S2k). Aangezien Al in zeer geringe concentraties aanwezig is, kan men dit element buitenbeschouwing laten. De SAR-waarde berekent men met:

$$SAR = S1K / \sqrt[4]{S2k/2}$$

Er wordt geen invloed van de steunlaag op de levensduur van goede afdichtingen verwacht indien aan de volgende criteria is voldaan:

$$\begin{aligned} \text{Zand-bentoniet:} & \quad \{A1 \times \text{Conc} + A2 \times SAR + A3\} < 0,3468 \\ \text{Bentonietmat :} & \quad \{A1 \times \text{Conc} + A2 \times SAR + A3\} < 0,2218 \\ \text{Trisoplast :} & \quad \{A1 \times \text{Conc} + A2 \times SAR + A3\} < 0,9208 \end{aligned}$$

De parameterwaarden zijn:

-----Zand-bentoniet-----	Bentonietmat-----	Trisoplast---
A1 = 0,00517	0,001427	0,001398
A2 = -0,43399	-0,404814	-0,21751
A3 = -0,22683	0,22907	0,381511

Blijkt er een risico aanwezig te zijn dan is het zaak om het werkelijk risico te bepalen of ander steunlaag materiaal te kiezen. De werkelijke risicobepaling houdt een doorlatendheidsproef in met het afdichtingsmateriaal waarbij een testvloeistof wordt gebruikt met de zelfde SAR-waarde en totale concentratie als het verzadigd extract van het steunlaagmateriaal. Als dan blijkt dat de doorlatendheid ontoereikend is om nog aan de eisen van het Stortbesluit te voldoen, is gebruik van het steunlaagmateriaal af te raden.

Deel 2 Levensduur kunststoffen (J. Breen)

5 Inleiding

Het IPO (Interprovinciaal overleg) heeft opdracht gegeven voor een studie naar de duurzaamheid van de bovenafdichting van stortplaatsen [1]. In het kader van dit project wordt een overzicht gemaakt van de verschillende voorzieningen, die bepalend zijn voor de isolatie en de controle van de stortplaats. Van de belangrijke onderdelen worden vervolgens de relevante degradatieprocessen, die bepalend zijn voor de duurzaamheid van deze onderdelen, in kaart gebracht. De coördinatie en de studie naar de minerale afdichtingslagen wordt uitgevoerd door Alterra. Het overzicht van de kunststof producten, die in een stortplaats kunnen voorkomen, wordt verzorgd door TNO Industrie. Het betreft hier onder andere geomembranen, gas- en waterdrainageleidingen, gas- en waterdrainagematten en geotextielen.

In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de kunststof onderdelen. Hierbij is gebruik gemaakt van de ter beschikking gestelde gegevens en van brochures van deze producten.

Een beschrijving op basis van expertise en literatuur van de verschillende degradatieprocessen, die bepalend zijn voor de levensduur (duurzaamheid) van het betreffende product in de stortplaats, wordt gepresenteerd in hoofdstuk 3. Deze beschrijving is specifiek voor elke product/materiaal combinatie. Afhankelijk van de in de stort aanwezige stoffen kan chemische, fysische en/of thermische degradatie optreden. Hiernaast moet rekening worden gehouden met de mechanische belasting die aanleiding kan geven tot spanningscorrosie, scheurvorming en vloeï. De degradatie van de producten tijdens opslag en verwerking wordt beknopt toegelicht. Foto-oxidatie is dan één van de belangrijkste degradatieprocessen.

De levensduurvoorspellingen uitgaande van in de kunststof producten voorkomende degradatieprocessen en de aanwezige belastingen worden uitgewerkt in hoofdstuk 4. Er wordt ingegaan op het extrapoleren van versnelde degradatietesten in de ANNEXEN. Omdat de achtergrond gegevens van kunststof onderdelen in bovenafdichtingen te summier zijn, is bij leveranciers, fabrikanten en grondstoffenleveranciers navraag gedaan. Op basis hiervan is uiteindelijk een levensduur bepaald.

De conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 9. De conclusie met betrekking tot de haalbare levensduur is gebaseerd op meetresultaten voor een select aantal producten. Dientengevolge wordt de noodzaak benadrukt tot het beschikbaar hebben van de juiste materiaalgegevens om voor de kunststofonderdelen van een specifieke bovenafdichting tot een betrouwbare levensduur voorspelling te kunnen komen. Verder worden, wat betreft duurzaamheid, kritieke locaties in een bovenafdichting aangegeven.

6 Kunststoffen in bovenafdichting

In dit rapport wordt uitgegaan van een opbouw van de bovenafdichting zoals is voorgesteld in [2]. De voorgestelde bovenafdichting wordt getoond in figuur 1.

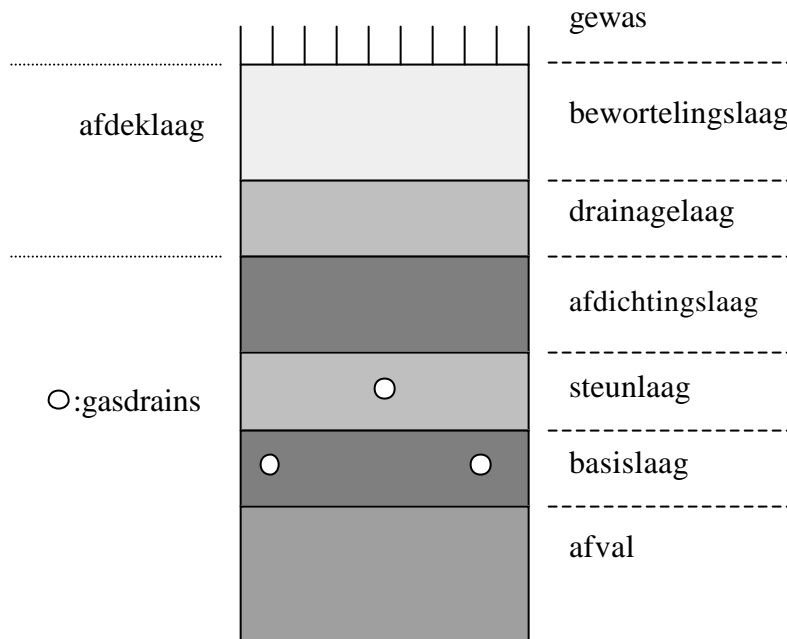


Fig. 1 Schematische opbouw van de afdeklaag [2].

De kunststof producten, die in een bovenafdichting worden aangetroffen, zijn geomembranen, drainageleidingen onder en door de afdichtingslaag, waterdrainagematten en kunststof geotextiel om de bentonietmatten.

Als het gasdrainagesysteem buiten beschouwing wordt gelaten, worden de kunststof producten toegepast in twee lagen, te weten de drainagelaag en de afdichtingslaag. Een kunststof waterdrainagelaag bestaat veelal uit één laag. De afdichtingslaag bestaat veelal uit een geomembraan en een bentonietlaag.

6.1 Geomembraan (kunststof folie)

Tot nu toe vormt het geomembraan bijna altijd de toplaag van de afdichtingslaag¹. Onder het geomembraan ligt een minerale afdichtingslaag. Een geomembraan is

¹ Het geomembraan kan, mits de steunlaag niet al te grof is, ook direct op de steunlaag worden gelegd. Bij gebruik van bentonietmatten kan worden overwogen om de bentonietmatten op het geomembraan in plaats van onder het geomembraan aan te brengen.

synoniem met een kunststof folie. Voor de bovenafdichting van stortplaatsen kunnen HDPE (hoge dichtheid polyetheen), HDPE-flex (hoge dichtheid polyetheen met flexibilisator) en VLDPE (erg lage dichtheid polyetheen) folies worden toegepast. LLDPE (lineaire lage dichtheid polyetheen) is voor zover bekend nog niet toegepast in Nederland. Echter de toepassing van LLDPE folie, mits deze voldoet aan de KIWA BRL 546, kan zondermeer voor de bovenafdichting van een stortplaats (zie paragraaf 7.1).

De kunststof folies worden op rol geleverd. De breedte van de rol bedraagt afhankelijk van de leverancier en de grondstof 5 tot 10 m en de lengte op een rol ca. 100 m. De folies worden volgens een van tevoren uitgewerkt legplan verwerkt. De foliebanen worden in de lengte veelal door wiglassen (ook wel genoemd heet-elementlassen) verbonden. Hierbij wordt een dubbele las (kanaallas) gemaakt. Controle op de lekdichtheid van deze lassen vindt plaats door het afpersen van het kanaal. De lassen op de kops kant en de verbindingen met de onderafdichting² vergen meer aandacht maar zijn eveneens met wiglassen te realiseren. Voor de details worden extrusiessen toegepast. Details zijn onder andere doorvoeren van de drainageleidingen. Extrusiessen hebben als nadeel dat deze zich moeilijker laten controleren en soms een minder goed lange duur gedrag vertonen [3].

Voor de kans op beschadigingen en voortijdige scheurgroei naar locatie geldt:

? extrusielas > wiglas > niet-gelaste delen

Er wordt aanbevolen in het nazorgplan geld te reserveren voor reparatie van onder andere enige lekkende extrusiessen binnen de beoogde levensduur.

Onder de levensduur van het geomembraan wordt bedoeld de levensduur van de niet-gelaste delen. Het is te overwegen om de levensduur te koppelen aan de wiglassen. Zodra de wiglassen over een grote lengte scheurvorming vertonen, zal reparatie economisch niet meer verantwoord zijn.

6.2 Drainageleidingen

Het gasdrainageleidingsysteem bevindt zich in de stort boven het afval en onder de afdichtingslaag. Het systeem zal gedeeltelijk geperforeerd zijn. Dit leidingsysteem dient in verband met de kans op organische stoffen in de stort bij voorkeur te bestaan uit PE (polyetheen) leidingen. Voor het maken van een doorvoer van het gasdrainageleidingsysteem naar buiten dient een opening in de afdichtende folie te worden gemaakt. De folie dient vervolgens lekdicht om de doorvoer te worden afgewerkt. Een lekdichte verbinding kan worden verkregen door lassen mits de doorvoerleiding, de doorvoerconstructie en de kunststof folie alle zijn vervaardigd uit HDPE, LLDPE, VLDPE of HDPE-flex.

² Wiglassen tussen de folies van een onder- en een bovenafdichting zijn moeilijk te vervaardigen en hebben dus een verhoogd risico op lekkage. Duurzame lassen tussen HDPE en HDPE-flex, VLDPE en LLDPE zijn door ervaren lassers te maken [2].

PP en PVC doorvoerleidingen laten zich door lassen niet verbinden met een PE doorvoerconstructie. Bij gebruik van deze leidingen zal voor een andere afdichtingsconstructie moeten worden gekozen.

Hoewel het mogelijk is zowel in het talud als op het horizontale vlak dichte verbindingen tussen een PE folie en een vlakke PE plaat met hierin gelast de PE doorverbuis te maken, dient wel enige voorzorg te worden betracht. Met name als grote zettingen worden verwacht, kan een gelaste verbinding te rigide zijn en is de kans op scheurvorming en hiermee lekkage van de één of andere las groot.

Het waterdrainagesysteem in een bovenafdichting bevindt zich boven de afdichtingslaag en wordt niet blootgesteld aan organische stoffen uit de stort. Voor de leidingen in het waterdrainagesysteem kan elke kunststof leiding, mits voldoende duurzaam, worden toegepast. Het ligt voor de hand hiervoor PE, PP of PVC te kiezen.

6.3 Drainagematten

Drainagematten worden ook op rol en in afmetingen vergelijkbaar met de PE foliebanen geleverd. Drainagematten bestaan veelal uit een open middelste laag die aan beide zijden is voorzien van een vlies (niet-geweven geotextiel). Het vlies zorgt voor de filterwerking. Een voorbeeld van zo'n drainagemat wordt getoond in figuur 2. De materialen die worden toegepast voor zo'n drainagemat zijn PE (polyetheen), PP (polypropeen), PA (polyamide) en PET (polyetheentereftalaat).



Drainage mat

Fig. 2 Voorbeeld van een drainagemat [4].

Naast de drainagemat zoals getoond in figuur 4 wordt in Nederland voor hemelwaterafvoer nog een andere drainagemat toegepast. Deze mat bestaat uit thermisch verbonden (aan elkaar gesmolten), geslotencellige PE vlokken waarop aan de bovenzijde een PET filtervlies is aangebracht [5]. De gebruikte PE vlokken worden door het vermalen van resten van PE schuimen verkregen. De herkomst van deze PE schuimen is bekend. Echter er is een grote variatie in de dichtheden en stijfheid van de toegepaste PE.

Drainagematten worden in de bovenafdichting van een stortplaats toegepast voor hemelwatertransport boven de afdichtingslaag en voor gastransport onder de afdichtingslaag. Verder worden drainagesystemen ingezet voor het transport van percolaat.

De hemelwaterdrainagematten worden niet blootgesteld aan in de stort aanwezige verontreinigingen, maar aan water en componenten uit de bewortelingslaag die worden uitgespoeld en lucht. Als de drainagemat direct op een kleilaag of bentonietmat ligt, dient rekening te worden gehouden met basische componenten uit deze laag die de hydrolyse van PET bevorderen.

Toegepaste gasdrainagemat wordt blootgesteld aan in de stort aanwezige verontreinigingen en aan componenten uit de in de stort toegepaste isolatie- en steunlagen. De zuurstofconcentratie in een afgedichte stort zal laag zijn, waardoor de oxidatieprocessen worden onderdrukt. Echter de chemische omzettingprocessen in de stort kunnen wel resulteren in een verhoogde temperatuur.

6.4 Bentonietmatten

De afdichtingslaag bevat naast het geomembraan een minerale afdichtingslaag. Dit kan zijn een kleilaag (CCL = compacted clay layer) of een kleilaag tussen geotextielen (GCL = geosynthetic clay layer). Deze laatstgenoemde laag wordt in Nederland een bentonietmat genoemd. De bentonietmat bestaat uit twee (wel of niet) geweven geotextiellagen waartussen zich de kleilaag, het bentoniet bevindt. De (wel of niet) geweven lagen zijn onderling verbonden. Bij een gestikte verbinding is de dikte van de kleilaag op de lijnen waar is gestikt veelal dunner dan in de andere gebieden. Bij een genaaldprikte verbinding wordt de kleilaag minder beschadigd en wordt na zwelling door wateropname in de afdichtingslaag een homogene dichte laag verkregen. In figuur 3 wordt het naaldprikproces getoond. Met naalden worden garens van de bovenste laag verbonden met de onderste laag. Hierna kunnen deze garens thermisch worden verbonden met de onderste weefsellaag om een hogere stabiliteit en afschuifsterkte te verkrijgen.

De (wel of niet) geweven geotextiellagen bestaan veelal uit PP (polypropeen) [6], maar kunnen ook bestaan uit PE (polyetheen) [7].

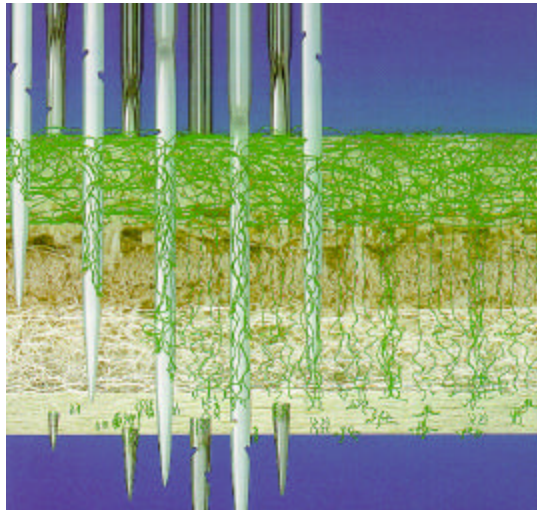


Fig. 3 Illustratie van een bentonietmat met een genaaldprikte verbinding tussen de beide geotextiellagen [8].

Een voor de bovenafdichting voorgesteld en ook toegepast multibarrièreconcept op basis van een drainagelaag, een PE folie en een bentonietmat wordt getoond in figuur 4.

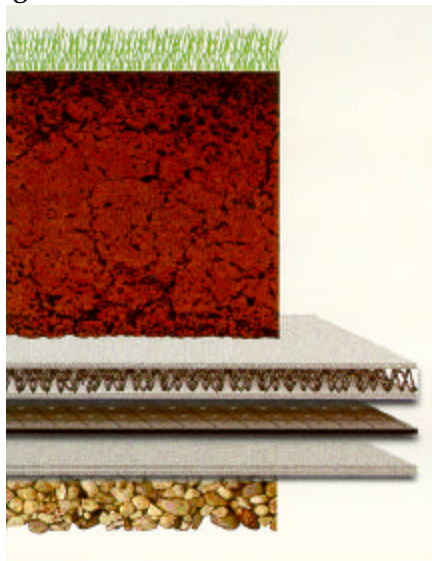


Fig. 4 Multibarrièreconcept voor bovenafdichting bestaande uit een kunststof hemelwaterdrainagemat, een PE folie en een bentonietmat [6].

7 Degradatie van kunststoffen

In dit hoofdstuk worden de relevante degradatieprocessen van de in de bovenafdichting van een stortplaats voorkomende kunststoffen behandeld. Relevante degradatieprocessen zijn processen die resulteren in lekkage en/of toename van de permeatie. Hoewel de degradatieprocessen veelal dezelfde oorsprong hebben, worden de degradatieprocessen per kunststof type beschouwd.

7.1 Kunststof folie

Voor de bovenafdichting van stortplaatsen worden uitsluitend PE gebruikt. HDPE (hoge dichtheid polyetheen) heeft van alle PE typen de beste weerstand tegen zwellend door aromatische koolwaterstoffen, gechlloreerde koolwaterstoffen en oplosmiddelen. Echter HDPE is tevens het meest stijve materiaal en hiermee gevoelig voor spanningscorrosie³ en scheurvorming bij grote of onregelmatige zettingen.

Door copolymerisatie of bijmengen van een ander polymeer, veelal EVA (ethyl vinylacetaat), kan minder stijf HDPE materiaal worden verkregen. Dit is bekend onder de naam HDPE-flex. Een andere naam voor dit materiaal is CHDPE.

Door PE te polymeriseren volgens het HDPE proces, maar met verbeterde katalysatoren waarbij kleine hoeveelheden buteen, hexeen, octeen of andere kleine alkenen worden toegevoegd kan een meer flexibel lineair PE materiaal worden verkregen [9]. De kleine alkenen geven korte zijketens. Afhankelijk van de hoeveelheid en de aard van de toegevoegde alkenen kan de dichtheid worden gevarieerd van die van HDPE tot een dichtheid van bijna 0,900 g/cc. Het VLDPE materiaal benadert de dichtheid van 0,900 g/cc en bevat relatief veel octeen monomeer. LLDPE heeft een iets hogere dichtheid en bevat veelal buteen en hexeen. De chemische bindingen in HDPE, LLDPE en VLDPE zijn gelijk. Hierdoor zijn de chemische degradatieprocessen, zoals oxidatie, voor deze PE materialen gelijk.

Voor de toepassing van afdichtingslaag is de isolatie het belangrijkste. De isolatie wordt gedomineerd door de weerstand tegen scheurvorming. Deze weerstand neemt, mits de beschouwde PE materialen een voldoende lage MFI (melt flow index) hebben, bij een gegeven rek door lokale zetting toe van HDPE via LLDPE naar VLDPE. De sterkte en stijfheid van PE materialen nemen af van HDPE via LLDPE naar VLDPE. Echter VLDPE folie materiaal heeft nog steeds voldoende sterkte en stijfheid om zonder problemen te worden verlegd. Waar HDPE en VLDPE folies worden toegestaan voor de bovenafdichting van een stortplaats, kan LLDPE folie dus ook worden toegepast.

³ Spanningscorrosie staat voor het fenomeen waarbij een op trek belaste kunststof in aanwezigheid van een damp of vloeistof versneld scheurinitiatie en scheurgroei vertoont.

LDPE is in tegenstelling tot HDPE, LLDPE en VLDPE een sterk vertakt PE met lange vertakkingen. Dientengevolge is de verwerkbaarheid minder en komt als zodanig niet voor als afdichtingsmateriaal voor een stortplaats.

Oxidatie

PE materialen zijn relatief gevoelig voor foto-oxidatie en thermo-oxidatie. Oxidatie staat voor het reageren met zuurstof waarbij na enkele reactiestappen de polymeerketen in stukken breekt. De initiatie van deze reacties wordt versneld door UV straling en door verhoogde temperatuur. Als het product wordt blootgesteld aan UV straling, zal de foto-oxidatie dominant zijn in de andere gevallen de thermo-oxidatie.

PE materialen, die worden gebruikt in de afdichtingsfolie voor een stortplaats, bevatten een stabilisatorpakket en roet. Het stabilisator pakket wordt afgestemd op de toepassing. Een folie, die langdurig wordt blootgesteld aan straling van de zon, zal op een andere wijze worden gestabiliseerd dan een folie die wordt toegepast onder een 1 m dikke bewortelingslaag. Voor de laatstgenoemde situatie, onder de bewortelingslaag, dient de folie een stabilisatiepakket te bevatten dat de thermische oxidatie gedurende lange tijd onderdrukt.

De thermische stabiliteit wordt bepaald aan de hand van een oxidatietest en/of de zuurstofinductietijd [10]. Deze moet voor materialen met een grote duurzaamheid 20 min bedragen bij 200 °C [10]. De thermische stabiliteit kan ook worden bepaald door de reststerkte te meten na een expositie in kokend water gedurende 1 week gevolgd door een expositie in lucht van 100 °C gedurende 6 weken. De slagsterkte mag, volgens de in de protocollen gestelde eis [10], niet meer dan 30 % zijn afgenomen ten opzichte van die van het oorspronkelijke materiaal. In hoofdstuk 4 worden de consequenties van deze meetresultaten op de levensduurverwachting uitgewerkt. Verder wordt ingegaan op de verschillen tussen de verschillende PE materialen en de invloed van het lassen

Spanningscorrosie

Chemische degradatie is een proces dat nauwelijks wordt versneld voor de aanwezigheid van een mechanische belasting. Ten gevolge van zettingen en afschuiving van de bovenliggende grondlaag kunnen trekspanningen in de kunststof folie worden ingebracht. In een inert milieu vertonen onbeschadigde PE materialen niet snel scheurvorming onder een relaxerende trekspanning. Echter in aanwezigheid van zeep, alcoholen, esters en andere oplosmiddelen kunnen wel scheuren binnen een beperkte belastingsperiode worden geïnitieerd. Dit fenomeen heet spanningscorrosie. De weerstand tegen spanningscorrosie wordt bepaald door middel van de Bell Telephone Test [10]. Dit experiment wordt uitgevoerd bij 50 °C in een zeepoplossing aan gebogen proefstukken. De maximale rek in het proefstuk bedraagt hierbij ongeveer 10 %.

Een HDPE materiaal is gevoeliger voor spanningscorrosie dan een meer flexibel PE materiaal, zoals VLDPE, LLDPE of HDPE-flex.

Ter plaatse van de las kunnen spanningsconcentraties optreden zodra de folie wordt opgerekt. Bovendien kan het lassen resulteren in scheurtjes in de gelaste delen. Daarom vormen gelaste zones kritieke punten voor spanningscorrosie en langzame scheurgroei. Hierbij zullen de wiglassen, waarmee foliebanen aan elkaar worden gelast, naar verwachting minder worden gerekend dan de extrusielassen ter plaatse van doorvoeren en andere details. Controle op extrusielassen moet daarom de prioriteit krijgen.

Langzame scheurgroei

De weerstand tegen langzame scheurgroei, die is gerelateerd aan de weerstand tegen spanningscorrosie, wordt als een belangrijk aspect beschouwd bij de levensduur-beschouwing van de folieafdichtingen [11]. Het overzicht van veldincidenten van Hsuan toont dat in het merendeel van de gevallen scheurgroei optreedt ter plaatse van de las. Het schuren en de hoge lastemperatuur worden als belangrijkste faaloorzaak aangegeven. Het versneld testen op de weerstand tegen langzame scheurgroei wordt veelal in een spanningscorrosief medium uitgevoerd. De concentratie van de spanningscorrosieve componenten uit de stort, waaraan een bovenafdichtingsfolie wordt blootgesteld, is waarschijnlijk zo laag dat deze onder praktijkomstandigheden geen significante versnelling van het scheurgroei proces geeft. Uitgaande van deze hypothese kan binnen enkele maanden testen op langzame scheurgroei een uitspraak worden gedaan over de duurzaamheid met betrekking tot deze degradatievorm tot ca. 50 jaar.

Vloei

Onder vloei wordt de plastische vervorming verstaan, die optreedt bij rekken vanaf ca. 10 %. Vloei resulteert in een afname van de dikte van de folie. Een geringe vloei hoeft niet desastreus te zijn, omdat deze niet resulteert in scheuren. Vloei zou alleen kunnen voorkomen bij extreme, en dus niet te tolereren, verschilzettingen en wordt daarom als bezwijkproces verder niet beschouwd.

Chemische resistentie

De inwerking van chemische stoffen op de kunststof folie varieert sterk. Zo resulteren de alifatische gechloreerde koolwaterstoffen in een aanzienlijke zwelling, kunnen sterk hygroscopische stoffen als natriumhydroxide, zoutzuur en waterstoffluoride blaasvorming veroorzaken en leiden oxiderende zuren tot oxidatie. Uitgaande van de praktijk zijn in de protocollen enige proefvloeistoffen opgenomen, waartegen de toe te passen kunststof folies bestand moeten zijn. Van kunststof folie in de bovenafdichting wordt verwacht dat ze niet aan hoge concentraties van de in deze paragraaf genoemde stoffen worden blootgesteld.

Microbiologische afbraak

De microbiologische afbraak wordt bepaald door de in de bodem aanwezige micro-organismen. Bodemomstandigheden met micro-organismen worden gesimuleerd in laboratoriumtesten en vervolgens wordt de snelheid van aantasting bepaald. PE materialen zijn zeer resistent.

Onvoorziene omstandigheden

De bovenafdichting van een stortplaats bedraagt meestal vele hectares. Controle op de foliebanen, de lassen, de ondergrond en het aanbrengen van volgende lagen kan het optreden van lekkage niet altijd voorkomen. Met name de aanwezigheid van scherpe voorwerpen kan tot scheuren en lekkage leiden. Verder dient men rekening te houden met de UV degradatie die optreedt tijdens het verleggen.

Het afschuiven van de toplaag op een talud is een andere niet gewenst fenomeen. Echter als het optreedt, zal dit grote afschuifkrachten met zich meebrengen, waardoor uiteindelijk de folie bezwijkt.

Deze onvoorziene omstandigheden worden verder in dit rapport niet meegenomen, omdat ze niet bepalend zijn voor de haalbare levensduur van een foliemateriaal. Bovendien kunnen kleine lokale lekkage in de bovenafdichting worden gerepareerd.

7.2 Drainageleiding

De drainageleidingen kunnen bestaan uit HDPE, PP of PVC buizen. De degradatieprocessen van PE zijn reeds onder kunststof folie behandeld. PP wordt hieronder behandeld bij de paragraaf over drainagematten. Daarom hier alleen een korte uiteenzetting van de degradatieprocessen bij PVC. PVC wordt verder niet behandeld omdat dit materiaal minder geschikt lijkt als leiding. Het is namelijk in het algemeen niet mogelijk om een lekdichte afdichting tussen een PVC buis en een PE folie te maken..

Oxidatie

Gestabiliseerd PVC is relatief ongevoelig voor thermo-oxidatie, mits de temperatuur lager is dan 150 °C. Bij hogere temperatuur treedt zoutzuur afsplitsing op.

Spanningscorrosie

Spanningscorrosie komt ook voor bij PVC materialen. Met name damp van aromatische en gechlloreerde oplosmiddelen resulteert in scheurvorming onder zeer lage trek- of buigspanningen.

Chemische resistentie

PVC materialen kunnen sterk verweken en soms zelfs oplossen in zuivere organische oplosmiddelen. PVC zal de expositie in de proefvloeistof met de gechlloreerde koolwaterstoffen, zoals beschreven in de protocollen [10], niet doorstaan.

Microbiologische afbraak

PVC is niet gevoelig voor microbiologische afbraak.

7.3 Drainagematten

Drainagematten kunnen bestaan uit meerdere materialen, te weten PE, PP, PA en PET. Het materiaal PE is reeds bij de folies behandeld.

Oxidatie

PP materialen zijn gevoeliger voor foto-oxidatie en thermo-oxidatie dan PE. PA en PET zijn daarentegen minder gevoelig voor oxidatie dan PE. Oxidatie speelt voor het hemelwaterdrainagesysteem dat is aangebracht tussen de afdeklaag en de afdichtingslaag. Oxidatie van in de stort toegepaste gasdrainagesystemen lijkt minder waarschijnlijk omdat door omzettingsprocessen de zuurstofconcentratie in de stort laag zal zijn. Wel kan de temperatuur in de stort door deze processen oplopen.

Spanningscorrosie

Spanningscorrosie wordt nagenoeg niet aangetroffen in PP. PA en PET zijn in de vorm van verstrekte garens ook niet gevoelig voor spanningscorrosie.

Chemische resistentie

De chemische resistentie van PP is vergelijkbaar met die van PE.

De chemische bestandheid van PET en PA is op enige gechloreerde verbindingen, zuren en basen daargelaten goed. Voor PET garens in neutraal water (pH=7) is de verwachte levensduur bij 20 °C minimaal 150 jaar [6]. Echter in basisch milieu neemt de verwachte levensduur sterk af bij hoge pH-waarden (> 9). Het betreffende chemische degradatieproces is hydrolyse.

Microbiologische afbraak

Hoog moleculaire PP, PE, PA en PET materialen vertonen weinig biologische afbraak.

Onvoorziene omstandigheden

De verbindingen van drainagematten zijn niet erg kritisch.

Wortelpenetratie is mogelijk bij hemelwaterdrainagematten en kan de drainage-eigenschappen verminderen. Hoewel wortelpenetratie kan worden voorkomen door een optimale bewortelingslaag en een juiste keuze van beplanting aan te leggen, blijkt het effect van wortelpenetratie op de drainagecapaciteit in onderzochte gevallen acceptabel te zijn [12].

7.4 Bentonietmatten

De kunststof weefsels in bentonietmatten bestaan uit al eerder behandelde garens als PE en PP.

Een additionele bezwijkvorm naast de reeds eerder gegeven bezwijkvormen is afschuiving in de bentonietlaag. Dit kan spelen bij steile taluds.

7.5 Opslag en verwerking

Tijdens de opslag dienen de producten te zijn voorzien van een beschermende folie of een andere bescherming. Deze bescherming dient blootstelling van het product gedurende de opslagperiode aan UV straling uit zonlicht te voorkomen. Verder dient

de temperatuur tijdens de opslagperiode zo laag mogelijk te worden gehouden in verband met thermische oxidatie.

Tijdens de verwerking dient de blootstelling aan zonlicht te worden beperkt tot ca. enkele dagen. Van de toe te passen geoproducten wordt slechts een geringe bestandheid tegen UV straling geëist in de protocollen en de beoordelingsrichtlijnen. Als tijdens de aanleg een langdurige blootstelling wordt voorzien, dient een hogere bestandheid tegen UV straling te worden geëist.

Als de opslag bij temperaturen lager dan 20 °C en onder uitsluiting van UV straling plaatsvindt en de UV belasting tijdens de verwerking beperkt blijft, heeft dit geen consequenties voor de levensduur van het geoproduct in de bovenafdichting, mits het geoproduct voldoende is gestabiliseerd tegen verwachte geringe UV straling tijdens de aanleg.

8 Levensduurvoorspellingen

Opmerking:

Een levensduurvoorspelling is meestal gebaseerd op een extrapolatie. Zo'n extrapolatie kan worden verkregen uit metingen bij verhoogde temperatuur. Door de logaritme van de tijd tot falen bij verschillende temperaturen, al dan niet gecorrigeerd voor andere variabelen (bijvoorbeeld de opgelegde spanning), uit te zetten tegen de reciproce temperaturen, kan een extrapolatie naar de gebruiksomstandigheden worden uitgevoerd. De bestpassende lijn door de meetpunten wordt door getrokken naar de praktijktemperatuur. Deze procedure is arbeidsintensief en daarom slechts beschikbaar voor een beperkt aantal kunststof grades en faalprocessen. In normen wordt daarom een helling voor de betreffende faallijn aangenomen. De helling bepaalt de versnellingsfactor tussen de temperatuur in de versnelde laboratoriumtest en de praktijktemperatuur. De waarde van de helling is evenredig met de activeringsenergie. Bij deze aanpak volstaat het versneld meten bij 1 temperatuur. Echter om de meettijd te beperken wordt in de normen, de protocollen en de beoordelingsrichtlijnen nog een concessie gedaan. Er hoeft in de versnelde test niet te worden doorgemeten tot falen maar slechts gedurende een periode die representatief is voor de beoogde levensduur van de toepassing in combinatie met de verwachte praktijktemperatuur.

Hierdoor is het niet mogelijk op basis van bijvoorbeeld een KIWA certificaat van bijvoorbeeld een HDPE folie een exacte levensduurvoorspelling te geven. Zo'n KIWA certificaat vermeldt alleen: *dikte: 2,0 mm; tweezijdig glad; vloeispanning > 16 MPa; rek tot breuk > 500 %; trekslagsterkte > 500 kJ/m²; doorslagsterkte > 1500 mm valhoogte; krimp bij 100 °C < 2 %; in vouwproef geen scheuren; doorscheursterkte > 130 N/mm; voldoende weerstand tegen UV straling; roetgehalte: 2,3 %; OIT > 20 minuten; bestandheid tegen percolaatwater goed; weerstand tegen spanningscorrosie volgens ASTM-D 1693 voldoende.*

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste regels voor het voorspellen van de levensduur van kunststof producten in vereenvoudigde vorm gegeven. De parameters zijn temperatuur, vochtigheid, zuurstofconcentratie, zuurgraad, spanning (of deformatie) en beschadigingen. De hier gegeven regels dienen met enige voorzichtigheid te worden gebruikt. Er is hierover nog steeds veel discussie in CEN commissies. Waar de voorspelling kritisch wordt, kunnen metingen worden gebruikt om te komen tot een nauwkeuriger uitspraak. In ANNEX I wordt ingegaan op de processen die de oxidatie bepalen. In ANNEX II wordt ingegaan op spanningscorrosie en langzame scheurgroei. In ANNEX III wordt ingegaan op chemische resistentie en hydrolyse. In dit hoofdstuk worden deze degradatieprocessen globaal besproken. Uit de literatuur en eigen ervaring blijkt dat microbiologische afbraak kan worden verwaarloosd als degradatieproces voor de in een bovenafdichting voorkomende kunststoffen.

8.1 Oxidatie

De relatie, die wordt gebruikt om de levensduur te voorspellen als er oxidatie optreedt, is gebaseerd op een thermisch geactiveerd degradatieproces [13]:

$$r \propto e^{-\frac{E_{act}}{RT}} \quad (8.1)$$

waarbij r de reactiesnelheid is, E_{act} de activeringsenergie van het oxidatieproces, R de gasconstante en T de temperatuur.

Het bepalen van de oxidatiesnelheid is complex. Het is gebruikelijker dat een mechanische eigenschap (sterkte, rek bij breuk of slagsterkte) wordt bepaald. De activeringsenergie wordt dientengevolge veelal berekend uit de bij verschillende temperaturen gevonden expositieperiode, waarna de mechanische eigenschap nog 50 % van de oorspronkelijke waarde is.

De conservatieve waarde voor de activeringsenergie van oxidatie bij PE en PP is ongeveer 60 kJ/mol. Er kunnen kleine variaties optreden die samenhangen met morfologie en aanwezige additieven en verontreinigingen, waardoor een hogere activeringsenergie wordt verkregen. Op grond van de huidige inzichten en gegevens lijkt de activeringsenergie voor de oxidatie van HDPE, VLDPE en LLDPE gelijk te zijn. De activeringsenergie voor de oxidatie van de in HDPE-flex aanwezige flexibilisator wordt geacht hoger te zijn dan die van HDPE. Voor PA wordt een waarde van 95 kJ/mol berekend uitgaande van de in [14] getoonde data. PET wordt geacht een activeringsenergie te hebben vergelijkbaar met die van PA.

Uitgaande van vergelijking (8.1) en de gestelde eisen in de beoordelingsrichtlijnen, protocollen en prEN 13438 kan de volgende relatie voor de levensduur [in dagen] van een PP en PE materiaal worden afgeleid:

$$\text{levensduur}(PE, PP; T_{praktijk}) \approx A \times 2 \times 10^{-7} \times e^{\frac{60000}{8,314 T_{praktijk}}} \quad (8.2)$$

waarbij $T_{praktijk}$ de temperatuur in de bovenafdichting van de stortplaats in graden Kelvin is en A een evenredigheidsfactor. De evenredigheidsfactor A is gedefinieerd als het quotiënt van de expositietijd, benodigd om een functionele eigenschap tot onder een kritische waarde te laten afnemen, en van de expositietijd, die correspondeert met een levensduur van 25 jaar.

Voor PA en PET geldt onder de voorwaarde, dat geen falen is opgetreden na een expositieperiode van 14 dagen bij 110 °C in lucht:

$$\text{levensduur}(PET, PA; T_{praktijk}) > 1 \times 10^{-12} \times e^{\frac{95000}{8,314 T_{praktijk}}} \quad (8.3)$$

Voor PP en PE volgt uit vergelijking (8.2) dat een temperatuurdaling met 10 °C de levensduur met een factor 2-2,5 doet toenemen en een temperatuurtoename met 10 °C de levensduur met een factor 2-2,5 doet afnemen. Omdat de voorgeschreven

procedures in protocollen en beoordelingsrichtlijnen een vaste expositietijd voorschrijven waarna een mechanische eigenschap wordt bepaald, kan in de gevallen, waarbij het kunststof product voldoet en in totaal geen degradatie vertoont, geen levensduur worden berekend. Het enige dat men dan weet is: $A > 1$.

Om een levensduur te kunnen voorspellen dient door te worden gegaan totdat de degradatie door middel van mechanische proeven wordt waargenomen. Op deze wijze kan de factor A uit vergelijking (8.2) worden bepaald.

Tabel 8.1 geeft de levensduren van kunststof onderdelen waar het thermische oxidatie betreft. Extra metingen (of meetresultaten) zijn dus nodig, waarbij de expositietijd tot significante achteruitgang in mechanische eigenschappen exact wordt bepaald, om de (rest)levensduur te bepalen. Slechts voor een beperkt aantal materialen zijn deze gegevens voorhanden. Deze vormen de basis voor de “expert opinion”.

Tabel 8.1 Berekende levensduur op basis van oxidatietesten voor verschillende kunststof onderdelen bij een temperatuur in de stortplaats van 15 °C.

Onderdeel	Materiaal	Test volgens	Levensduur (jaren) op basis van test	Verwachte levensduur (jaren) “expert opinion” #)
Folie	HDPE	Protocollen [10]	> 35	> 100
	HDPE-flex	Protocollen [10]	> 35	?)
	VLDPE	Protocollen [10]	> 35	?)
	LLDPE	Protocollen [10]	> 35	?)
Gasdrainage-buis	HDPE, PP	BRL PE/PP waterleiding	> 50	?)
Gasdrainage-buis	PVC	BRL PVC waterleiding	> 50	In onderzoek
Gas- en waterdrainagemat ⁴	PE	CEN ISO 13438	> 25	> 100
	PP	CEN ISO 13438	> 25	> 100
	PA	*14 dagen bij 110 °C	> 70	> 100
	PET	*14 dagen bij 110 °C	> 70	> 100
Bentonietmat	PE	CEN ISO 13438	> 25	> 100
	PP	CEN ISO 13438	> 25	> 100

*) Deze testen voor PET en PA zijn niet voorgeschreven

#) Gebaseerd op gegevens van beperkte aantal materialen. Van niet alle in Nederland toegepaste materialen werden de gegevens verstrekt.

?) Voor HDPE-flex, VLDPE en LLDPE geldt een zelfde levensduurverwachting als voor HDPE. Dus ook voor deze materialen geldt > 100 jaar.

Informatie van folieleveranciers en onderzoeksinstituten geeft op basis van metingen van de expositietijd tot significante achteruitgang een langere levensduur dan 35 jaar [15-21,28,29]. Deze levensduur is vermeld in de laatste kolom van tabel 8.1 en is gebaseerd op argumentatie en gegevens gepresenteerd in ANNEX 1. Een levensduur van 100 jaar lijkt haalbaar. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat

⁴ De samengestelde drainagemat van Schmitz B.V. kan ook aan deze testen worden onderworpen ten einde de duurzaamheid te bepalen.

De oxidatie in de hemelwaterdrainagelaag van een bovenafdichting wordt bevorderd door de mogelijkheid van uitloging van stabilisatoren door waterstroming en door het transport van zuurstof door de bewortelingslaag. De oxidatie van gasdrainagedelen wordt enerzijds gestimuleerd als de temperatuur in de stort oploopt en anderzijds afgeremd als de zuurstofconcentratie in de stort afneemt. Als eerste benadering kan daarom de oxidatie van de gasdrainagesystemen gelijk worden gesteld aan die van de hemelwaterdrainage.

deze “expert opinion” is gebaseerd op gegevens van slechts een beperkt aantal PE foliematerialen en PP garens. Bovendien handelt het hier soms om in de Verenigde Staten toegepaste materialen. De eis in de Verenigde Staten, waar het de thermische oxidatie betreft is een factor 3 tot 5 zwaarder dan eis verwoord in de Nederlandse protocollen [19]. De eis verwoord in de Nederlandse protocollen is overeenkomstig met die gesteld door de BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung). Een levensduur van 100 jaar op basis van de door BAM gestelde eisen wordt evenwel mogelijk geacht op grond van onder andere de lagere zuurstofconcentratie ter plaatse van de folie in de bodem [20].

Waar de protocollen worden voorgeschreven voor de PE folies is een minimale weerstand tegen oxidatie gegarandeerd. In de ter beschikking gestelde stukken is de auteur geen duurzaamheidseisen met betrekking tot oxidatie en hydrolyse voor de andere in de bovenafdichting toegepaste kunststof onderdelen tegengekomen.

Twee leveranciers van de gas- en waterdrainagematten zoals getoond in figuur 2 hebben evenwel aanvullende gegevens verstrekt, waaruit blijkt dat de thermische oxidatie wel degelijk is onderzocht [21,22]. Uit de verstrekte gegevens volgt een levensduur van meer dan 100 jaar, waar het thermische degradatie betreft (zie ook ANNEX 1).

De leverancier van de drainagemat bestaande uit aan elkaar gesmolten PE schuimvlokken kon geen informatie over thermische oxidatie verstrekken. De gebruikte PE schuimen worden toegepast in de automobiellindustrie. Het mag dus worden verondersteld dat de levensduur minimaal 10 jaar is.

Eén leverancier van bentonietmatten stelde gegevens beschikbaar over het toegepaste textiel [22]. Hieruit kon worden opgemaakt dat een levensduur van 100 jaar haalbaar is, waar het de kunststof onderdelen betreft.

Aan de toegepaste gasdrainagebuizen lijken op grond van de verstrekte bestekgegevens geen eisen te worden gesteld aan levensduur. Als hiervoor gecertificeerde PE of PP leidingen worden toegepast is een levensduur van 50 jaar haalbaar.

Enige kanttekeningen bij het gebruik van tabel 8.1:

De “expert opinion” voor folies heeft betrekking op HDPE materiaal. Er zijn evenwel geen redenen om aan te nemen dat voor de andere PE materialen een andere verwachting geldt, mits voorzien van een vergelijkbaar stabilisatiepakket en een voldoende hoog molecuulgewicht.

In tabel 8.1 wordt uitgegaan van een temperatuur van 15-20 °C. In een stort kan de temperatuur hoger oplopen. Met name de gasdrainagebuizen kunnen worden blootgesteld aan deze hoge temperaturen in een stort. Als hoge temperaturen worden verwacht in een stort zouden drainagebuizen met een verbeterde temperatuurbestandheid moeten worden toegepast.

De kunststof folie ligt op de minerale afdichtinglaag (zand-bentoniet, Trisoplast, Hydrostab) of op de steunlaag (bentonietmat). De hemelwaterdrainagelaag ligt op de folie of indien deze wordt gebruikt, op de bentonietmat. De gemeten temperatuur in de zandbentoniet en Trisoplastlaag op de stortplaats Bavel varieert tussen 5 en 20 °C [23]. De effectieve temperatuur ligt daar lager dan 15 °C. De in tabel 8.1 vermelde waarden voor de levensduur zullen voor dit temperatuurverloop minimaal 10 % hoger liggen.

De hier gegeven waarden voor de levensduur zijn gebaseerd op expositie in lucht bij verhoogde temperatuur en op OIT (zuurstof inductietijd) metingen [24,25]. De OIT kan worden gebruikt om de levensduur te voorspellen, maar is eveneens illustratief waar het de degradatie door het lasproces betreft. De geëiste OIT is 20 minuten bij 200 °C [10]. Als nu wordt gelast bij 200 °C en het materiaal blijft gedurende 1 minuut op deze temperatuur, is reeds $1/20 = 0,05$ of 5 % van de levensduur verbruikt tijdens het lassen. Oxidatie zal zich in geomembranen als eerste manifesteren op lasnaden.

Een ander aspect betreft de zuurstofconcentratie. Als de bodem (bewortelingslaag) zuurstof verbruikt, kan de zuurstofconcentratie bij de kunststof onderdelen lager worden. De thermische oxidatie kan bij lage concentraties meer dan evenredig af te nemen met afnemende zuurstofconcentratie [22].

Concluderend kan voor het degradatieproces oxidatie worden gesteld dat er zeer duurzame kunststoffen voor geoepassingen bestaan.

Echter de gestelde eisen in de beoordelingsrichtlijnen en de protocollen zijn gebaseerd op een levensduur van 25-35 jaar. Nu blijkt uit metingen dat als gecertificeerde kunststof materialen worden toegepast, de gestelde eisen ruimschoots worden gehaald. Op basis van een beperkt aantal uitgebreidere meetseries en het argument dat de omstandigheden in de bodem gunstiger zijn dan waarop de versnelde oxidatietest is gebaseerd, komt men tot een langere levensduur.

Om risico's te vermijden bij de nazorg zouden van de toe te passen kunststof materialen benodigde meetresultaten moeten worden geëist waarmee een nauwkeurige levensduurvoorspelling kan worden uitgevoerd en zouden na 10, 20, 30, etc jaar controlemetingen moeten worden voorgeschreven.

8.2 Spanningscorrosie en langzame scheurgroei

Spanningscorrosie valt nagenoeg uit te sluiten in de PP, PET en PA onderdelen, omdat dit verstrekte garens betreft. Daarom worden hier alleen de niet verstrekte PE onderdelen beschouwd.

Spanningscorrosie is eveneens een complex degradatieproces. Waar bij thermische oxidatie de temperatuur en de zuurstofconcentratie de belangrijke variabelen zijn, wordt spanningscorrosie bepaald door de temperatuur, de relatieve dampdruk of concentratie van spanningscorrosie veroorzakende stoffen, de mate van beschadiging

van de kunststof (schuurplaatsen, lasvlakken, etc.) en van de spanning ten gevolge van de vervorming die de kunststof folie moet opvangen.

Spanningscorrosie kan onder normale omstandigheden niet voorkomen in de kunststof folie in de bovenafdichting. De waarschijnlijkheid, dat er damp van stoffen als methanol, ethanol, azijnzuur, esters, etc. en/of oppervlakte actieve stoffen (o.a. zeep) in de directe aanwezigheid van de folie aanwezig zijn, zou uitgesloten moeten zijn. Als de aanwezigheid van spanningscorrosieve stoffen wordt verwaarloosd, resteert de langzame scheurvorming als gevolg van de optredende spanning en de oppervlakte beschadigingen. Door de spanningscorrosiegevoeligheid van PE materialen onder een constante deformatie of constante belasting te testen, wordt eveneens inzicht verkregen in de weerstand tegen langzame scheurgroei.

De protocollen [10] schrijven een test voor om de spanningsgevoeligheid te kwantificeren.

Een in de literatuur voorgestelde methode is gebaseerd op het verloop van de bezwijkcurve (opgelegde spanning versus tijd tot falen) van PE materialen. Een illustratie van zo'n curve wordt getoond in figuur 5. De relatie tussen opgelegde spanning en de tijd tot breuk bij verschillende temperaturen wordt voor deze curve gegeven door [26]:

$$t_{breuk} = t_{ref} \left(\frac{s_k}{s} \right)^n e^{\frac{85500}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (8.4)$$

waarbij t_{breuk} de tijd tot falen is, t_{ref} de tijd tot falen bij de referentietemperatuur, s_k de minimum spanning voor falen door scheurgroei, s de opgelegde spanning, R de gasconstante, T de absolute temperatuur en T_{ref} de referentietemperatuur. De constante n bedraagt 34 voor het bezwijken door vloeï en 3.3 voor het bezwijken door scheurvorming.

Deze vergelijking maakt het mogelijk de tijd tot falen bij een willekeurige temperatuur en spanning te berekenen als deze onder één conditie is gemeten. Tot nu toe wordt deze methode nog niet toegepast voor kunststof PE folies. De methode zou volgens Lu en Brown toepasbaar zijn op alle typen PE materialen.

De metingen om de langzame scheurgroei te bepalen vinden meestal plaats bij 50 of 60 °C. Als de metingen bij 60 °C plaatsvinden onder een spanning van s_k en er gedurende 3 maanden geen scheurvorming is opgetreden, kan worden gesteld dat langzame scheurvorming in de folie bij 15 °C niet binnen 30 jaren optreedt.

De tijd tot breuk wordt mede bepaald door de in de folie aanwezige trekspanning. Deze spanning is lager in de flexibele PE folies (HDPE-flex, LLDPE, VLDPE), omdat deze folies minder stijf zijn (een lagere elasticiteitsmodulus bezitten). Dientengevolge worden de flexibele PE folies aanbevolen voor bovenafdichtingen waar grotere zettingen worden verwacht. Als afdichtingsmateriaal zijn LLDPE en

VLDPE folies in contact met vocht waarin een geringe concentratie aan organische verontreinigingen wordt aangetroffen, gelijkwaardig aan HDPE folie. Het verschil tussen HDPE, LLDPE en VLDPE betreft met name de vloeispanning. Deze is van LLDPE ca. 30 % en voor VLDPE ca. 40 % lager dan voor HDPE. Momenteel wordt onder de naam VFPE een materiaal geleverd dat een LLDPE of een VLDPE kan zijn.

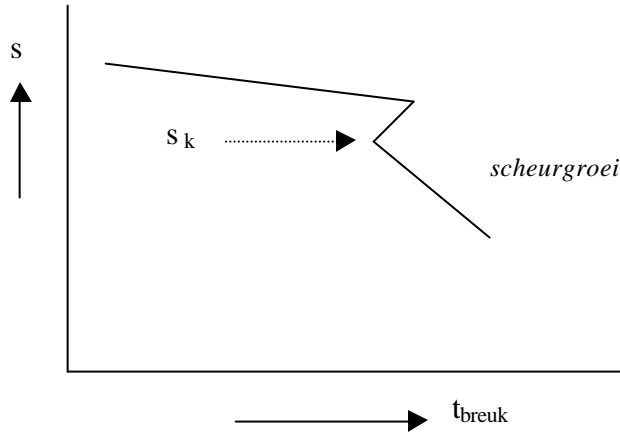


Fig. 5 Illustratie van bezwijkcurve (tijden tot breuk versus opgelegde spanning) en de kritieke spanning, s_k .

Tabel 8.2 Berekende levensduur op basis van weerstand tegen langzame scheurgroei, zoals wordt aangetroffen in een spanningscorrosie milieu, voor PE folies bij een temperatuur in de stortplaats van 15 °C.

Onderdeel	Materiaal	Test	Levensduur (jaren)
Folie	HDPE	3 maanden 60 °C bij s_k	> 30
	HDPE-flex	3 maanden 60 °C bij s_k	> 30
	VLDPE	3 maanden 60 °C bij s_k	> 30
	LLDPE	3 maanden 60 °C bij s_k	> 30
Folie	HDPE	1000 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 15 (bij spanningscorr. milieu)
	HDPE-flex	1000 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 15 (bij spanningscorr. milieu)
	VLDPE	1000 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 15 (bij spanningscorr. milieu)
	LLDPE	1000 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 15 (bij spanningscorr. milieu)
Las	HDPE	200 uren 60 °C bij s_k in zeep ⁵	> 3 (bij spanningscorr. milieu)
	HDPE-flex	200 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 3 (bij spanningscorr. milieu)
	VLDPE	200 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 3 (bij spanningscorr. milieu)
	LLDPE	200 uren 60 °C bij s_k in zeep	> 3 (bij spanningscorr. milieu)

Waar de protocollen worden voorgeschreven voor de PE folies is een minimale weerstand tegen langzame scheurgroei gegarandeerd. De in tabel 8.2 vermelde minimale waarden voor de levensduur zijn alle kleiner dan 50 jaar. Toch moet ook hier een kanttekening worden geplaatst. De omstandigheden in de toepassing zijn naar mag worden aangenomen gunstiger dan in de versnelde test. De vermelde waarden gaan uit van een constante trekspanning in de folie. Bij een goed ontwerp van de stortplaats zullen grondzettingen beperkt blijven en zal de optredende spanning in de kunststof folie gedurende de gehele gebruiksperiode laag zijn. Geen spanning betekent dat er geen langzame scheurgroei optreedt. Zodra zettings-

⁵ Dit is een voorstel van Koerner [27].

verschillen worden waargenomen, dient actie te worden ondernomen om na te gaan of dit heeft geresulteerd in langzame scheurgroei.

Een ander aspect zijn de lasverbindingen. Met name de lasverbindingen van folie op een dikkere PE plaat resulteren bij ongelijkmatige zettingen in spanningsconcentraties [3]. Als zich langzame scheurgroei voordoet, zal zich dit als eerste manifesteren bij de extrusielassen op de overgang van de folie naar de doorvoerconstructie, als tweede bij de wiglassen tussen de foliebanen onderling en als laatste pas in het foliemateriaal sec.

In ANNEX II wordt beargumenteerd dat langzame scheurgroei niet tot falen leidt binnen enige honderden jaren, mits geen spanningscorrosie optreedt en de lassen dezelfde duurzaamheid hebben als de folie. Verzwakkingen, die voor een kortere levensduur kunnen zorgen, zijn lasverbindingen tussen oude en nieuwe PE (folie)materialen, tussen verschillende typen PE materialen en niet optimale lasconstructie bij onder andere doorvoeren.

Het is de vraag of de kunststof onderdelen van het hemelwaterdrainagesysteem zijn onderzocht op de weerstand tegen langzame scheurgroei. Als gebruik is gemaakt van gecertificeerde kunststof waterleidingsystemen is de weerstand tegen langzame scheurgroei gegarandeerd.

Concluderend kan worden gesteld dat de risico's op langzame scheurgroei het grootste zijn bij extrusielassen. Ook bij wiglassen, met name tussen boven- en onderafdichting, is een verhoogd risico op scheurvorming. Daarom wordt een controle ter plaatse van enkele extrusielassen aanbevolen. De controle frequentie kan aanvankelijk 10 jaar zijn. Een verhoogde controlefrequentie is nodig zodra verschilzettingen gaan optreden in de bovenafdichting.

8.3 Chemische resistentie

De aanwezigheid van sterke oxiderende zuren of hoge concentratie aan gechloreerde koolwaterstoffen lijkt uitgesloten ter plaatse van de afdichtingsfolie in de bovenafdichting. Daarom mogen PE en PP materialen voor de stoffen, waarmee ze in aanraking kunnen komen in de bovenafdichting, als chemisch resistent worden beschouwd.

De toegepaste PE folies verschillen een weinig in chemische resistentie en in stijfheid en vloeispanning. De verweking en doorlatendheid voor organische stoffen nemen van HDPE naar VLDPE toe.

Bij PET en PA moet men beducht zijn op hydrolyse. In een neutraal milieu zijn PA en PET zeer duurzaam. Echter zodra de pH afneemt en de omgeving zuur wordt of toeneemt en basis wordt, kan de levensduur sterk afnemen. Bij gebruik van bentoniet kan een tamelijk basisch milieu (pH = 10) worden gerealiseerd. Het lijkt dientengevolge niet verstandig om bijvoorbeeld PET weefsel direct op bentoniet toe te passen.

9 Conclusies en aanbevelingen

Uitgaande van de in de protocollen, beoordelingsrichtlijnen en normen gestelde eisen en de condities, waaronder deze kunststoffen moeten functioneren in een bovenafdichting, is een levensduur van ongeveer 30 jaar haalbaar. De eisen verwoord in de protocollen [10] en de beoordelingsrichtlijnen beogen een levensduur van ca. 35 jaar. Een KIWA certificaat op basis van een beoordelingsrichtlijn geeft geen garantie voor een langere levensduur maar wel informatie over het gebruikte materiaal, zodat bij de leverancier om nadere informatie kan worden gevraagd.

Als de juiste materiaalkeuzen zijn gemaakt is een levensduur voor de toe te passen geomembranen, drainagematten en -buizen en weefsels om de bentonietmatten van 100 jaar haalbaar. De gerenommeerde fabrikanten gebruiken deze materialen.

Om te komen tot een goede levensduurvoorspelling met zo min mogelijk onzekerheden is het essentieel dat de juiste materiaal- en verwerkingsgegevens beschikbaar worden gesteld of worden bepaald.

Het kunnen doen van uitspraken over de feitelijke functionele levensduur is mogelijk door uitgebreidere en langdurige meetseries te verlangen.

Een langere levensduur kan zondermeer worden gevraagd door de eisen in onder andere de protocollen aan te scherpen en representatieve duurzaamheidseisen voor de toe te passen drainagematten, drainageleidingen en bentonietmatweefsels op te stellen.

Bij de beoordeling van een stortplaats moeten naast het gebruik van gecertificeerde materialen, gecertificeerde verleggers, een optimaal legplan onder ander met betrekking tot zettingen en doorvoerconstructies ook materiaal informatie worden opgevraagd. Alleen de folieleverancier kan aangeven welk PE type en grade is toegepast en of een levensduur van 100 jaar haalbaar is. Hetzelfde geldt voor de drainagematten, de drainageleidingen en de bentonietmatweefsels. Als de betreffende gegevens niet beschikbaar zijn, wordt aanbevolen metingen uit te voeren om de betreffende gegevens te verkrijgen.

Lasverbindingen in de kunststof afdichtingslaag zijn kritieke zones. De hoge temperatuur tijdens het lasproces in combinatie met afkoelspanningen maken dat ter plaatse van de las een deel van de levensduur reeds is verbruikt voor dat de folie wordt bedekt. Bovendien treden hier spanningsconcentraties op bij zettingsverschillen. Daarom wordt aanbevolen op regelmatige basis de meest kritieke delen van de bovenafdichting aan onderzoek te onderwerpen. Met name de lasverbindingen bij doorvoeren, tussen oude en nieuwe PE (folie)materialen en tussen verschillende typen PE materialen zouden steekproefsgewijs dienen te worden gecontroleerd op plaatsen waar grote zettingsverschillen optreden. Verder wordt

aanbevolen elke 10 jaar een beperkt aantal kritieke locaties bloot te leggen en te inspecteren.

Voor een bovenafdichting zijn HDPE, LLDPE en VLDPE folies bijna gelijkwaardig. De folies verschillen in chemische resistentie en in stijfheid en vloeispanning. Chemische resistentie wil zeggen dat de verweking en doorlatendheid voor organische stoffen toeneemt van HDPE naar VLDPE. De toename in doorlatendheid is van de orde van grootte van 2. De verschillen in vloeispanning en stijfheid zijn geringer. De vloeispanning van VLDPE is ca. 40 % lager dan die van HDPE. LLDPE ligt tussen HDPE en VLDPE.

Als laatste dient te worden opgemerkt dat de combinatie bentoniet met PET weefsels zou moeten worden vermeden. Als deze combinatie is toegepast, dient experimenteel te worden bepaald of de beoogde levensduur voor deze combinatie kan worden gerealiseerd.

Referenties

Projectvoorstel: "Vervangingstermijn van bovenafdichtingsconstructies", Offerte-nummer: F20090, DLO-Staring Centrum, 7 maart 2000.

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

J. Breen, "Duurzaamheid van lasverbindingen in kunststof milieufolies", Eindrapport, NGO/NIL, VF 99-41 (1999).

naam Enkadrain door Colbond Synthetics en onder de naam Secudran door Naue Fasern Technik.

Drainage matten vervaardigd uit herverwerkte PE schuimvlokken wordt geleverd door Schmitz Kunststoff Recycling.

Zie in Geotextiles and Geomembranes 18(2-4) 2000 bijvoorbeeld: C.B. Lake, R.K. Rowe, Geotextiles and Geomembranes 18 (2000) 77.

"Specifier's guide 2000", Geotechnical fabrics report, December 1999, Vol. 17 (9).
"Deponiebau", Naue Faserntechnik, Stand 08/99 (1999).

L.E.M. van de Walle, "Flexible landfill covers and barrier liners", Geosynthetics, Application, Design and Construction, De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds), Balkema, Rotterdam (1996) 685.

"Protocollen voor het toepassen van kunststof geomembranen ten behoeve van bodembescherming, Deel I Materialen", TNO rapport, Div499.1097, herziening 1999.

Y.G. Hsuan, Geotextiles and Geomembranes 18 (2000) 1.

M. Degenbeck, Müll und Abfall 1 (2000) 7.

H.H. Kausch, Polymer fracture", 2nd ed., Springer, Berlin (1987).

T.S. Ingold, "The geotextiles and geomembranes manual", Elsevier, Oxford 1994).

Informatie PE folie materiaal Dow.

Informatie GSE liners.

Informatie Agru.

R.M. Koerner, D.E. Daniel, "Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps", ASCE, Reston (1997)

Persoonlijk informatie I.D. Peggs.

W. Müller, BAM, "Sind Kunststoffdichtungsbahnen mit und ohne Leckdetektion als Deponieoberflächenabdichtung für Altdeponien technisch vertretbar?"

Persoonlijke informatie R.K.M. Holtus

"Längzeitbeständigkeit von Geokunststoffen", Naue Faserntechnik, Stand 10/99 (1999).

D. Boels, "Vervangingstermijn van bovenafdichtingsconstructies"; Literatuuronderzoek, 4 augustus 2000.

M.W. Cadwallader, "The relation of high pressure OIT to oven aging for HDPE liners", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed), Balkema, Rotterdam (1990).

L.Courard, J.M. Rigo, "Oxidative induction time", Geosynthetics, Application, Design and Construction, De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds), Balkema, Rotterdam (1996) 667.

X. Lu, N. Brown, J. Materials Sci. 25 (1990) 29.

R.M. Koerner, Y.G. Hsuan, A.E. Lord, "Stress cracking behavior of HDPE geomembranes and its prevention", GRI report #9 (1993).

Y.G. Hsuan, R.M. Koerner, J. Geotechnical Geoenvironmental Eng. (1998) 532.

J. Breen, J. Schut, J.A. ter Laak, European Geosynthetics Conf (1996) 715

Aanhangsel 1 Oxidatiebestandheid

In hoofdstuk 4 wordt aangegeven op welke wijze een conservatieve levensduur bepaling kan worden verkregen uitgaande van een 1-puntsmeting op basis van een OIT of een expositie in lucht bij verhoogde temperatuur. In deze APPENDIX wordt nader ingegaan op de levensduur voorspellingsmethode en wordt een voorbeeld getoond om de levensduur te bepalen.

De variabelen bij het oxidatieproces zijn:

- zuurstofconcentratie
- temperatuurverloop
- uitloging
- aanwezigheid van als katalysator werkende componenten of ander versnellende omstandigheden..

De zuurstofconcentratie van een product in een omgeving waar een snelle circulatie van lucht is, mag op 21 % worden gesteld. Om een significante degradatie in 1 m² van een 1 mm dikke PE folie te bewerkstelligen is ca. 20 g zuurstof, dus ca. 100 l lucht nodig. Dit lijkt misschien veel maar uitgaande van een degradatieperiode onder praktijkomstandigheden van jaren is de consumptie per dag gering⁶.

Als het geotextiel of het geomembraan is afgedekt door een droge laag grond, waarin zich geen zuurstofconsumerende processen voordoen, moet worden verondersteld dat dit geotextiel of geomembraan constant is blootgesteld aan een zuurstofconcentratie van 21 %. Onder de bovenafdichting, in een stort, maar ook onder water kan de zuurstofconcentratie lager zijn dan 21 %.

Nu dient wel te worden opgemerkt dat snelheid, waarmee het oxidatieproces verloopt, niet evenredig is met de zuurstofconcentratie. De oxidatiesnelheid neemt meer of minder dan evenredig af met afnemende zuurstofconcentratie afhankelijk van het reactiemechanisme.

Onder praktijkomstandigheden is altijd sprake van een temperatuurverloop. In een versnelde test wordt echter veelal uitgegaan van een constante hoge temperatuur. Het oxidatieproces bestaat uit een aantal thermisch geactiveerde stappen. Als voor alle thermisch geactiveerde stappen dezelfde activeringsenergie, E_{act} , geldt en er door de temperatuurverhoging in de versnelde test geen uitputting plaatsvindt, geldt voor de versnellingsfactor, f , van het oxidatieproces uitgevoerd bij T_{lab} ten opzichte van die bij $T_{praktijk}$ onder praktijkomstandigheden:

⁶ In laboratoriumexperimenten uitgevoerd in afgesloten volumens, waarbij een snelle oxidatie wordt bewerkstelligd, kan wel uitputting van de zuurstofconcentratie optreden.

$$f(T_{lab}, T_{praktijk}) = e^{\frac{E_{act}}{R} \left(\frac{1}{T_{praktijk}} - \frac{1}{T_{lab}} \right)}$$

waarbij E_{act} de activeringsenergie is en R de gasconstante. De temperaturen dienen in deze relatie in graden Kelvin te worden ingevoerd. Helaas blijken die hierboven genoemde voorwaarden, zelden op te gaan en worden kromme lijnen gevonden als de versnellingsfactor wordt uitgezet tegen de temperatuur.

In figuur I.1 wordt de tijd tot falen getoond voor PP garens versus de expositietemperatuur in lucht. Er is in deze figuur voor de leesbaarheid gekozen om de temperatuur in plaats van de reciproke temperatuur uit te zetten. Oorzaken van het kromme verloop van de logaritme van de versnellingsfactor met de reciproce temperatuur zijn onder andere, de temperatuurafhankelijke efficiëntie van de stabilisatoren⁷, de migratie en verdamping van stabilisatoren, veranderingen in de kunststof matrix en uitputting van zuurstof. In principe kunnen al deze factoren worden gekwantificeerd, maar in de normen en de beoordelingsrichtlijnen is ingeval van een 1-puntsbepaling gekozen voor het aanhouden van een conservatieve waarde voor de toe te passen gemiddelde activeringsenergie voor oxidatie. Voor een niet-ingewijde levert dit schijnbaar controversiële levensduurvoorspellingen op. In tabel I.1 worden enige resultaten vermeld. Zo zegt de norm dat 14 dagen overeenkomt met 25 jaar, terwijl in referentie [21], op basis van een voor de betreffende kunststof bepaalde activeringsenergie, een expositie van 14 dagen met meer dan 800 jaar overeenkomt.

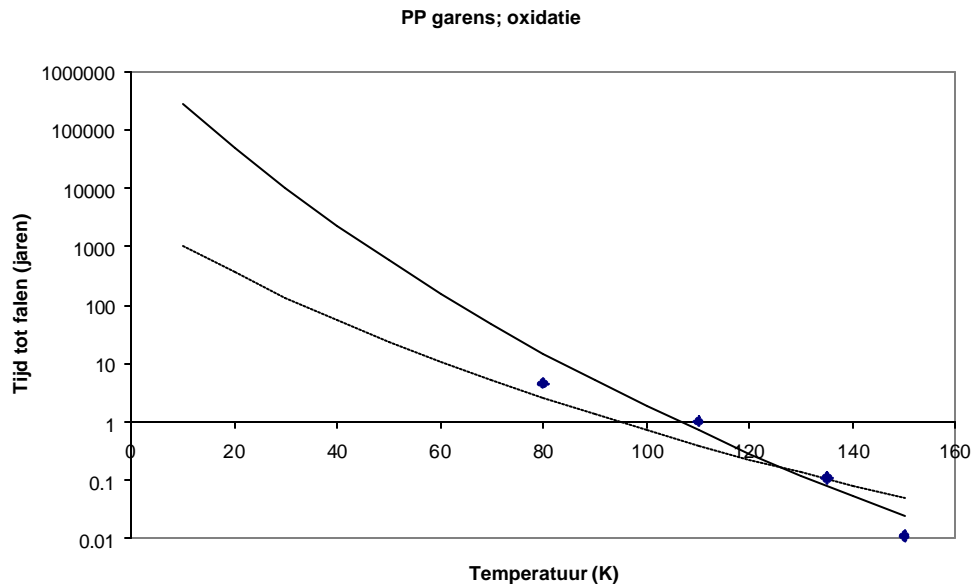


Fig. I.1 Tijd tot falen versus expositietemperatuur voor PP garens die worden toegepast in drainagematten [22]. De getrokken lijn representeert een activeringsenergie van 100 kJ/mol en de gestippelde lijn van 60 kJ/mol.

⁷ HALS stabilisatoren zijn efficiënter bij lagere temperatuur.

Tabel I.1 Levensduurvoorspellingen uit de literatuur.

Materiaal	Conditie	Periode	Levensduur praktijk
PP	110 °C (prEN 13438)	14 (28*) dagen	25 jaar
PE	100 °C (prEN 13438)	28 (56*) dagen	25 jaar
PP [22]	150, 135, 100, 80 °C	> 5 jaar	> 400 jaar
PP [21]	110 °C	14 dagen	> 800 jaar
PE [28]	55, 65, 75, 85 °C	25 maanden	> 200 jaar
PE [21]	100 °C	28 dagen	800 jaar

* In toepassing als bodemversterkingsproduct.

Onder uitloging wordt verstaan het migreren van stabilisatoren naar het oppervlak en het vervolgens verdampen of oplossen van de stabilisatoren in de omgeving. Dit fenomeen wordt bevorderd door circulatie van lucht en of stroming van water. Door gebruik te maken van polymere stabilisatoren wordt de migratiesnelheid en hiermee de uitloging sterk vertraagd. In de bovenafdichting van een stortplaats kan alleen bij de hemelwaterdrainage sprake zijn van een bevordering van de uitloging.

Het effect van uitloging kan worden meegenomen in de thermische oxidatie door het proefstuk voorafgaand aan de expositie in lucht bij verhoogde temperatuur gedurende ca. 1 week onder te dompelen in kokend demiwater en het demiwater regelmatig te verversen.

Het oxidatieproces in kunststoffen kan worden versneld door onder andere de aanwezigheid van meerwaardige metaalionen maar ook door de aanwezigheid van oxiderende stoffen. Zo kunnen peroxiden en zuren, zoals salpeterzuur, de oxidatie van kunststoffen zeer snel laten verlopen. In een bovenafdichting van een stortplaats wordt verondersteld dat deze stoffen alleen in zeer lage en dus onschadelijke concentratie aanwezig zijn.

Aanhangsel 2 Spanningscorrosie en langzame scheurgroei

Spanningscorrosie is een fenomeen dat niet wordt geacht voor te komen in de bovenafdichtingsfolie van een stortplaats. Het testen van de weerstand tegen spanningscorrosie moet worden gezien als het testen van de weerstand tegen langzame scheurgroei. Een gangbare methode om de langzame scheurgroei te testen is bij kunststof buizen door middel van barstdrukmetingen. Van HDPE materialen, die worden toegepast in geomembranen en buizen, zijn deze gegevens veelal bekend. Enige meetresultaten aan Dowlex 2342M worden getoond in figuur II.1. Bij een spanning van 4 MPa wordt geen falen gevonden binnen 10000 uur (14 maanden) bij 80 °C. Uitgaande van de relatie van Brown (zie hoofdstuk 4; paragraaf spanningscorrosie en langzame scheurgroei) mag worden verwacht dat geen langzame scheurgroei optreedt binnen 400 jaar in het niet beschadigde geomembraan vervaardigd van deze HDPE grade.

Naast krassen en andere beschadigingen dient lassen te worden gezien als een vorm van beschadigen. Met name extrusielasverbindingen kunnen korte tijden (< 100 uur) tot scheurvorming vertonen bij 60 °C in een spanningscorrosief milieu⁸ [3].

De onderzochte wiglassen tussen de foliebanen onderling vertoonden bij 60 °C in een spanningscorrosief medium geen langzame scheurgroei binnen 1000 uur [29].

Het toegepaste spanningscorrosieve milieu wordt geacht de langzame scheurgroei met minimaal een factor 30 te versnellen ten opzichte van die in een niet-spanningscorrosief waterige milieu [3]. Langzame scheurvorming ter plaatse van optimaal aangebrachte wiglassen tussen foliebanen in een bovenafdichting, die niet in contact komen met spanningscorrosieve media, zou dan pas na enige honderden jaren mogen worden verwacht.

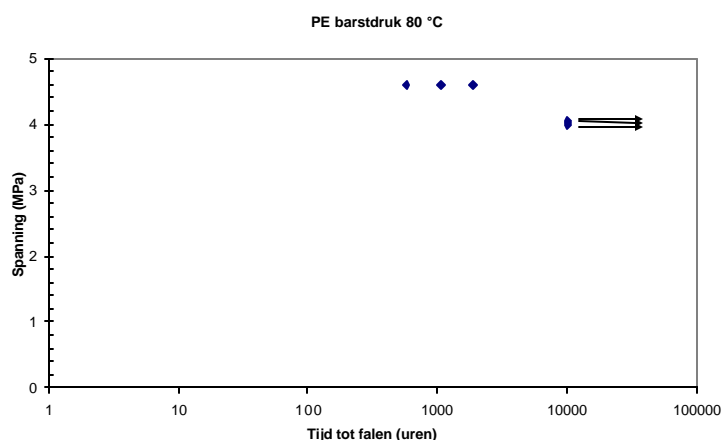


Fig. II.1 Dowlex 2342 barstdruk resultaten bij 80 °C in water.

⁸ Het spanningscorrosieve milieu is hier een waterige oplossing van een oppervlakte actieve stof.

Aanhangsel 3 Chemische resistentie en hydrolyse

Onder chemische resistentie wordt met name de afname van mechanische eigenschappen door zwelling verstaan. PE en PP materialen kunnen een aanzienlijke zwelling vertonen door opname van gechloreerde organische verbindingen. Door zwelling neemt de sterkte en stijfheid van deze kunststoffen af. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de hemelwaterdrainagemat en het geomembraan in de bovenafdichting met deze zwelling veroorzakende stoffen in aanraking komen. Ook het gasdrainagesysteem in de stort wordt geacht nooit met hoge concentraties van zwelling veroorzakende stoffen in aanraking te komen.

Er treedt geen levensduur verkorting op door een tijdelijke zwelling van een niet op trek belast geomembraan of vlies zoals wordt toegepast om een drainagemat of een betonietmat. Echter zwelling van de kern van een drainagemat kan resulteren in een grotere indrukking onder de aanwezige gronddruk en dus een afname van de waterafvoercapaciteit. De indrukking is bovendien permanent. Dat wil zeggen dat nadat de zwelling veroorzakende stoffen door bijvoorbeeld diffusietransport zijn verdwenen, nog steeds de bewerkstelligde indrukking resteert. Buizen, die verweken, kunnen onder invloed van een uitwendige druk worden samengedrukt en hiermee hun afvoercapaciteit verliezen.

Hydrolyse treedt op bij PA en PET. Als de pH-waarde van de omgeving waarin PET weefsels of vliezen langdurig worden toegepast hoger wordt dan 9, dient de duurzaamheid van deze weefsels en vliezen apart te worden gekwantificeerd. Verschillende kleisoorten hebben een pH-waarde die hoger is dan 9. PA vertonen bij lage pH hydrolyse ($\text{pH} < 5$).

Als drainagematten of betonietmatten met PA of PET materiaal worden toegepast, dient de pH van de omgeving te worden bepaald en zonodig de duurzaamheid van deze materialen apart te worden gekwantificeerd voor de voorkomende omstandigheden. Dit kan volgens de KIWA beoordelingsrichtlijn 22001.

