

EIGENSCHAPPEN BENTONIETMAT OP AVI-BODEMAS BLIJVEN ZEER LANGDURIG STABIEL

Thomas Egloffstein
ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH, D-76229 Karlsruhe

Andries Steerenberg
Enviro Quality Control bv, Maarssen

Samenvatting:

In een geluidswal aan de A12 van Den Haag naar Utrecht is in 650.000 ton vuilverbrandingslakken (AVI-bodemassas) gebruikt. AVI-bodemassas mag volgens het Bouwstoffenbesluit als categorie II-bouwstof worden toegepast. Om de omgeving te beschermen tegen het uitloggen van de AVI-bodemassas werd deze door een bovenafdichting voorzien, bestaande uit een bentonietmat en daaroverheen een geomembraan. De bentonietmat ligt direct op de AVI-bodemassas. Om de toestand en de eigenschappen van de bentonietmat evenals de mogelijke veranderingen daarin door het langdurige contact met de AVI-bodemassas te onderzoeken, werden er tweemaal opgravingen gedaan: respectievelijk twee jaar en vijf jaar na de bouw. Er werden monsters van de bentonietmat genomen en in het laboratorium onderzocht. Daaruit bleek dat er binnen deze tijdsperiode geen veranderingen waren opgetreden en dat het bentoniet en was zoals bij inbouw een natuurlijk natriumbentoniet die nog steeds een zeer geringe waterdoorlatendheid heeft.

1 INLEIDING

Om een nieuwbouwwijk (Veldhuizen) tussen De Meern en Vleuten aan de A12 tussen Den Haag en Utrecht tegen geluidsoverlast te beschermen, werd in 1999 en 2000 een 1500 m lange geluidswal gebouwd. In twee bouwfases werd er 650.000 ton vuilverbrandingslakken (AVI-bodemassas) in verwerkt. De geluidswal is 10 m hoog. Aan de basis is hij 34,5 m breed, aan de bovenkant 5 m. De verwerking van de vuilverbrandingslakken vond plaats als categorie II-bouwstof volgens het Bouwstoffenbesluit (CUR 1999). Uit het oogpunt van milieubescherming vereist het Bouwstoffenbesluit bij toepassing van de categorie II-bouwstof AVI-bodemassas een combinatieafdichting, bestaande uit een minerale afdichting, bijvoorbeeld een bentonietmat, en een geomembraan over de AVI-bodemassas. De afstand tussen de hoogste grondwaterstand en de onderkant van de AVI-bodemassas dient minstens 50 centimeter te bedragen. De AVI-bodemassas wordt na verwijdering van de metaal- en de non ferrofracties gebroken tot een 0-40 mm materiaal. Daarna wordt gedurende 6 weken de AVI-bodemassas in de open lucht verouderd, en na bemonstering en keuring overeenkomstig de BRL 2307 op de bouwplaats geleverd.

In de geluidswal van Veldhuizen werd voor het isoleren van de AVI-bodemassas een combinatie-afdichting gebruikt die bestaat uit een bentonietmat (Bentofix BFG 7000) en een daar overheen liggende, tweezijdig geprofileerde Carbofol PE-HD geomembraan van 2,0 mm dikte. Als beschermingslaag voor het geomembraan, en ter afwatering van het regenwater dat door de opgebrachte teelaardelaag heensijpelt, werd een mechanisch versterkt vlies Secutex R 404/PP gebruikt. Om de stabiliteit van de 1,5 m dikke teelaardelaag te waarborgen en de hellingafwaarts gerichte krachten te compenseren (helling = 1:2 aan de weggkant, helling = 1:1,5 aan de woonkant) werd een polyester geogrid van het type Secugrid 120/40 R6 ingebouwd. Het geogrid werd in de bovenkant van de wal verankerd.

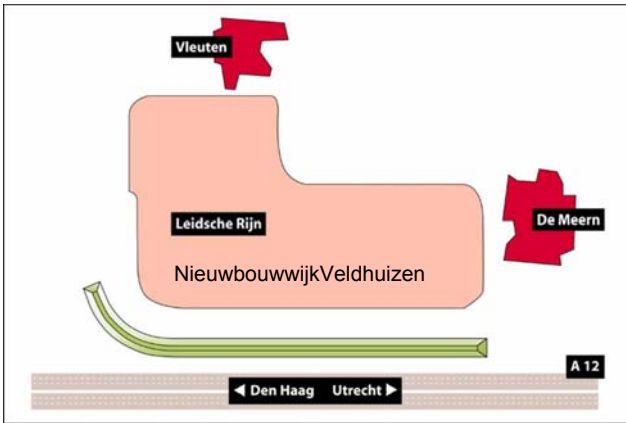
De toe te passen bentonietmat moest voldoen aan was CUR-aanbeveling 49, en het geomembraan moest voldoen

aan de BRL 538. Op de afdichtingsconstructie, de drainage- en het geogrid werd een 1,5 m dikke laag teelaarde opgebracht.

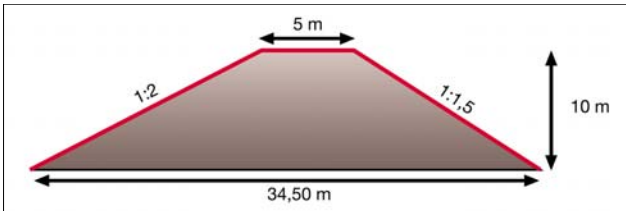
Om te onderzoeken of de ingebouwde bentonietmat beantwoordt aan de eisen van CUR-aanbeveling 49 (1997), werd in oktober 2001 (2 jaar na de aanleg) en nogmaals in juni 2004 (5 jaar na de aanleg) het geluidsscherm opgegraven en werden monsters uit de bentonietmat genomen. De resultaten van het onderzoek van het bentoniet uit die bentonietmat worden hieronder uit de doeken gedaan.



Afbeelding 1. Geografische ligging van de geluidswal A12



Afbeelding 2. Geluidswal bij nieuwbouwwijk veldhuizen



Afbeelding 3. Schematische doorsnede geluidswal

doorlatendheidseis rond $k \approx 10^{-11}$ m/s gehaald zou worden, werd daarom de bentonietmassa per oppervlakte tot 7.300 g/m^2 verhoogd. Met deze zware natriumbentonietmat werden de eisen van CUR aanbeveling 49 probleemloos bereikt (circa 8-11 mm/200d, zie punt 4.7). Een vereiste voor het op langere termijn behalen van dit doorlatendheids criterium is echter dat de waterdoorlatendheid niet groter wordt, bijvoorbeeld als gevolg van ionenuitwisseling.



Afbeelding 4. Opbouw van afdichtingsconstructie

2. DE GESTELDE EISEN AAN DE BENTONIETMAT

De bentonietmat werd direct op de vuilverbrandingslakken verlegd. Daarom bestaat het draagweefsel van de gebruikte bentonietmat en ook het dekvlies uit chemicaliënbestendig PP.

Het totale gewicht van de bentonietmat werd op grond van de strenge eisen aan de waterdoorlatendheid ten opzichte van het in dergelijke situaties gebruikelijke bentoniet verhoogd tot een gewicht van 7.800 g/m^2 waarvan 7.300 g/m^2 bestond uit natuurlijk natriumbentoniet uit Wyoming (in poedervorm). Het montmorillonietgehalte bedraagt circa 90%. Het zwelvolume volgens ASTM 5890 moet $> 25 \text{ ml/2g}$ bedragen en de waterdoorlatendheid als flux $< 20 \text{ mm/200 d}$.

De randvoorwaarden ter vaststelling van de flux uit CUR-aanbeveling 49 worden hieronder kort beschreven.

Bij een belast van 25kPa op het proefstuk en een waterkolom van 100 cm mag de flux 20 mm in 200 dagen niet overschrijden. De doorlatendheidsproeven worden uitgevoerd met backpressure bij 300 kPa celdruk, en daaruit volgend met 275 kPa bovenwaterdruk en 265 kPa onderwaterdruk. De proef wordt zo lang gedaan tot de laatste meetwaarde niet meer dan 25% afwijkt van de gemiddelde waarde van de drie laatste metingen. De flux wordt berekend volgens de formule:

$$\text{Flux} = \frac{Q \cdot 17280000 \cdot 10}{A \cdot t} \text{ Tk [mm/200d]}$$

Waarin:

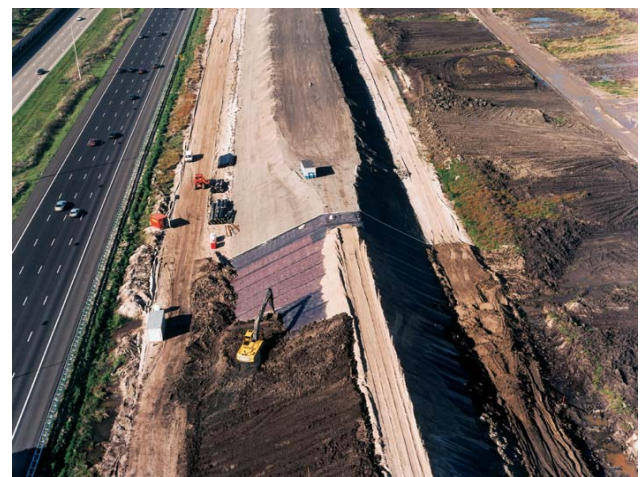
Q = hoeveelheid doorgelaten vloeistof [ml]

A = doorsnee oppervlak van het proefstuk [cm^2]

t = tijd van de meting [s]

Tk= omgevingstemperatuur, gecorrigeerd tot 10 C

Deze waterdoorlatendheidseis is zeer streng en komt bij een dikte van het proefstuk van ongeveer 1 cm overeen met een doorlatendheidswaarde van $k = 1,16 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$. Gemiddeld zware natriumbentonietmatten (met circa 3-5 kg bentoniet/m²) bereiken in de regel doorlatendheidswaarden van $k \approx 1 - 3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$. Om zeker te zijn dat de



Afbeelding 5. Aanleg geluidswal tijdens de bouwfase in 1999

3 UITGEVOERDE OPGRAVINGEN

Zoals hierboven al geschetst werd de geluidswal in oktober 2001, dus twee jaar na voltooiing, en in juni 2004, dus vijf jaar na voltooiing, nog een keer uitgegraven. Bij de opgraving in 2001 werden drie monsters bentonietmatten en een monster bodemas in het laboratorium onderzocht. Het nemen van monsters bij de opgraving in 2004 verliep echter moeizaam. Aangezien er intussen op de achterkant van de geluidswal meer grond opgebracht was (tot 4 m) en het gevaarlijk was om bij de steile helling (1:1,5) in een zo diepe sleuf monsters te nemen, kon er slechts één nieuw monster genomen worden. Monsternamen aan de kant van de snelweg was niet toegestaan.

De monsters werden direct na hun opgraving luchtdicht verpakt en naar het ICP-laboratorium gebracht, waar ze werden onderzocht op de volgende parameters:

- watergehalte volgens DIN 18121
- wateropnamecapaciteit volgens CUR/DIN 18132
- zwelvolume volgens ATM 5890

- methyleenblauwwaarde (VDG P69)
- kationenuitwisselingscapaciteit en uitwisselbare kationen volgens DIN ISO 11260
- chemische samenstelling van de AVI-bodemas, vanwege mogelijke invloed daarvan op de ionenuitwisseling van de minerale laag
- bepaling van de waterdoorlatendheid als flux volgens CUR-aanbeveling 49.



Afbeelding 6. Eerste ontgraving in 2001



Afbeelding 7. Ontgravinglocatie van de drie monsters



Afbeelding 8. Monsternamen bentonietmat

4 LABORATORIUMONDERZOEK

4.1 Bepaling van het watergehalte (DIN 18121)

Direct na het binnenbrengen van de monsters werd het watergehalte van het bentoniet volgens DIN 18121 bepaald, door droging in de oven bij 105 C.

Tabel 1. Watergehalte [gew.%]

Monster	A1-2 (2001)	A2-2 (2001)	A3-2 (2001)	A1-2 (2004)
w	90,0	98,0	99,4	95,1

Toelichting op de resultaten:

Vergeleken bij vroegere opgravingen van bentonietmatten leverden al deze bentonietmatmonsters gemiddelde tot hoge watergehalten op. Het bentoniet was goed verzadigd en zacht van substantie.

4.2 Wateropnamecapaciteit volgens Enslin/Neff (CUR/DIN 18132)

De wateropname na 24 uur werd bepaald volgens de CUR-norm, in aansluiting bij DIN 18132.

Tabel 2. Wateropnamecapaciteit [gew.%]

Monster	A1-2 (2001)	A2-2 (2001)	A3-2 (2001)	A1-2 (2004)
W _A	707,1	724,7	701,8	701,9

Toelichting op de resultaten:

De wateropnamecapaciteit van de vier onderzochte bentonietmatmonsters blijkt zeer hoog te zijn. De waarden liggen ter hoogte van die van een hoogwaardig natriumbentoniet. Ter oriëntatie: de waarden voor calciumbentoniet liggen in de regel tussen circa 200 – 300 gewichtsprocent, die voor natriumbentoniet tussen circa 400 – 700 gewichtsprocent. De wateropname die werd bereikt bij deze proef bedraagt ≥ 700 gewichtsprocent.

4.3 Zwelvermogen (vrije zwellings)

De vrije zwellings van de bentoniet werd bepaald volgens ASTM D 5890. Hierbij werd 2 g bentoniet, gedroogd bij 105 C en in een fijne molen tot poeder gemalen, in 90 ml gedestilleerd water in een 100 ml staande cilinder met 0,5 ml-schaalverdeling gedaan. Men strooit daarbij elke 0,1 g van het monster in hoogstens 30 seconden in het water en wacht tot het poeder volledig bezonken is. Vervolgens wordt de volgende portie erin gestrooid, enzovoorts. Na beëindiging van de proef wordt de cilinder tot 100 ml aangevuld, en na 24 uur wordt het volume van het intussen opgezwollen bentoniet eveneens in ml afgelezen. Het zwelvermogen (swell index) wordt aangegeven in ml/2g.

Tabel 3. Zwelvermogen [ml/2g]

Monster	A1-2 (2001)	A2-2 (2001)	A3-2 (2001)	A1-2 (2004)
24 h	33,5	32,0	30,0	29,0

Toelichting op de resultaten:

Het zwelvermogen als criterium voor het gehalte aan opzwellbare kleimineralen en de ionenverdeling levert voor alle vier de monsters hoge waarden op, die boven de eisen van de kwaliteitscontrole liggen (≥ 25 ml). De gemeten waarden komen overeen met die van een hoogwaardig natriumbentoniet.

4.4 Methyleenblauwwaarde (VDG P 69)

Bij deze test wordt de methyleenblauwopname van het bentoniet volgens VDG P 69 respectievelijk ATM C 837 bepaald, in milligrammen per 1 gram bentoniet. Die methyleenblauwopname (MB-methode, druppelmethode oftewel 'halo-methode') is een titratieproces waarbij men tot aan de kleurverandering (het zogenaamde 'halo') titreert en meet welke hoeveelheid van de kleurstof methyleenblauw (MB) tot op het moment van kleurverandering is verbruikt.

Tabel 4. Methyleenblauwwaarde [mg MB/g bentoniet]

Monster	A1-2 (2001)	A2-2 (2001)	A3-2 (2001)	A1-2 (2004)
mg MB/g	385	360	365	362,5
Gew.% Montm.	94,7	88,6	89,8	89,2

Toelichting op de resultaten:

De methyleenblauwopname van alle onderzochte bentonietmonsters ligt ter hoogte van 360 tot 385 mg/g bentoniet. Dit komt overeen met circa 88,6 tot 94,7 gewichtsprocent montmorillonietgehalte vergeleken met een zeer zuivere standaardbentoniet uit Wyoming. De kwaliteitscontrole op het werk verlangt MB \geq 300 mg MB / g bentoniet en geeft voor de bentoniet een montmorillonietgehalte van circa 90% aan, wat na de hier uitgevoerde proeven bevestigd kan worden.

4.5 Bepaling van de kationenverhouding in de bentoniet

Eén van de belangrijkste vragen bij opgegraven bentonietmatten is de vraag naar de kationenverhouding en de ionenverdeling in het bentoniet. Die gegevens geven aan of er ionenuitwisseling heeft plaatsgevonden en in hoeverre die gevorderd is. De hoeveelheid kationen die zo gebonden zijn dat uitwisseling mogelijk is (alkaliën Na en K, aardalkaliën Ca en Mg) waarvan de som in mmol (eq)/100 g bij benadering overeenkomst met de kationenuitwisselingscapaciteit (KAK_{pot}), werd in 2001 volgens de methode Müller-Vonmoos & Kahr (1982) bepaald, en in 2004 volgens DIN ISO 11260.

Tabel 5. Kationenverhouding in de bentoniet [mmol (eq)/100 g]

Monster	A1-2 (2001)		A2-2 (2001)		A3-2 (2001)	
	mmol(eq)/100g	%	mmol(eq)/100g	%	mmol(eq)/100g	%
Ca	8,7	13,0	6,7	10,6	4,4	5,7
Mg	12,8	19,2	14,8	23,5	11,5	14,9
K	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,7
Na	45,2	67,8	41,5	65,9	60,6	78,7
Totaal	66,7	100,0	63,0	100,0	77,0	100,0

Monster	A1-2 (2004)	%
Ca	7,5	8,8
Mg	12,1	15,9
K	1,4	1,8
Na	55,3	72,5
Totaal	76,3	100,0

Toelichting op de resultaten:

De som van de uitwisselbare kationen ligt bij de vier onderzochte monsters tussen 63,0 mmol(eq)/100 g en 77,0 mmol(eq)/100 g en derhalve in een range die te verwachten is voor een hoogwaardig bentoniet. Natrium is met een aandeel van circa 66 tot 79% in de totale ionenverdeling het overwegende kation, en tegelijkertijd

hetgeen dat de eigenschappen van de bentoniet bepaalt. Deze resultaten verschillen niet significant van eerdere onderzoeken op bentonietmatmonsters op het werk. Normaal gesproken komt de som van de uitwisselbare kationen natrium, kalium, calcium en magnesium vrijwel overeen met de kationenuitwisselingscapaciteit. Deze ligt bij de hoogwaardige bentonieten die worden gebruikt voor minerale afdichtingslagen in de regel bij circa 60 -80 mmol(eq)/100 g. Een meetbare, dat wil zeggen significant boven de natuurlijke variatie in ionensamenstelling uitkomende verandering heeft sinds de inbouw van de bentonietmatten niet plaatsgevonden.

4.6 Elueerbare kationen in de AVI-bodemass

Om een waarde te kunnen hanteren als houvast voor het aantal onderzochte uitwisselbare kationen in het bentoniet die uit de vuilverbrandingslakken zouden kunnen migreren, werd een monster AVI-bodemass volgens DIN 38414 geëluëerd. In het eluaat werden de ionen Ca, Mg, K en Na onderzocht. De gemeten concentraties van de vier kationen zijn in tabel 4.6-1 weergegeven, naast de pH-waarde, de geleidingsvermogen en het vochtgehalte.

Tabel 6. Resultaten AVI-bodemass

Parameter	Eenheid	AVI-bodemass
Zuurgraad, pH	-	9,01 (24,3°)
Geleidingsvermogen	μ S/cm	1265
Vochtgehalte	Gew.-%	10,5
Calcium	mg/l / mmol(eq)/100 g	218,0 / 10,88
Magnesium	mg/l / mmol(eq)/100 g	0,62 / 0,05
Natrium	mg/l / mmol(eq)/100 g	42,2 / 1,84
Kalium	mg/l / mmol(eq)/100 g	19,5 / 0,49

Toelichting op de resultaten:

Van de vier uitwisselbare kationen die bij bentoniet een belangrijke rol spelen, komt calcium in de onderzochte AVI-slakken het meest voor, op grote afstand gevolgd door natrium, kalium en magnesium. De bij 4.5 bepaalde ionenverdeling in de bentoniet geeft bij vergelijking met het resultaat van de AVI-slakken ruimte voor de conclusie dat die niet door de onderliggende AVI-bodemass beïnvloed is. Dat wil zeggen dat er geen relevante ionenuitwisselingsprocessen op gang gekomen zijn.

4.7 Bepaling van de waterdoorlatendheid als flux volgens CUR-aanbeveling 49

De doorlatendheidsproeven zijn uitgevoerd op proefstukken van 100 mm doorsnede in triaxiaalcellen volgens de voorschriften in CUR-aanbeveling 49. De randvoorwaarden voor deze beproeving zijn al onder punt 2 beschreven.

Tabel 7. Resultaten waterdoorlatendheid als flux [mm/200 d]

Monster	A1-2 (2001)	A2-2 (2001)	A3-2 (2001)	A1-2 (2004)
flux instroom	8,9	10,6	7,6	8,9
flux uitstroom	8,9	10,7	7,8	8,4

Toelichting op de resultaten:

De gemeten doorlatendheidswaarden zijn zeer gering en beantwoorden allemaal probleemloos aan de CUR-vereisten van 20 mm in 200 dagen. De resultaten komen overeen met die van kwaliteitscontrole op het werk op nieuwe bentonietmatten. De gemeten fluxwaarden bij een monsterdikte van 1 cm komen overeen met een

doorlatendheid van ongeveer $k \approx 4 - 6 \cdot 10^{-12}$ m/s volgens DIN 18130.

5 SAMENVATTING EN CONCLUSIES

De eisen die Nederland aan de bovenafdichting stelt voor milieuvriendelijke toepassing van vuilverbrandingslakken (AVI-bodemas) zijn hoog. Behalve een volgens de BRL toegestane 2 mm dikke geomembraan uit HDPE was ook een mineraal afdichtingslaag nodig (combinatieafdichting), waarvoor ook een volgens het Bouwstoffenbesluit een bentonietmat toepast mocht worden. Om te voldoen aan de eis aan de waterdoorlatendheid (flux < 20 mm/200 d) uit CUR-aanbeveling 49, was het nodig om een zware natriumbentonietmat met een hoog bentonietgehalte te gebruiken.

Voor het hier beschreven project aan de A12 bij De Meern werd een Bentofix BFG 7000 met 7.300 g poedervormig natriumbentoniet uit Wyoming gebruikt. De bentonietmat werd direct op de AVI-bodemas gelegd. Om aan te tonen dat de eigenschappen van de minerale afdichtingslaag niet veranderd waren, werden in 2001 en in 2004, oftewel twee en vijf jaar na aanleg, opgravingen uitgevoerd. Er werden monsters genomen en de bentonietmatten werden in het laboratorium onderzocht. Bij de monsternamen was het bentoniet goed verzadigd en plastisch. Het watergehalte lag tussen circa 90 en 100 gewichtsprocent. Aangezien de bentonietmat door een geomembraan beschermd wordt tegen van boven toestromend hemelwater, kan het relatief hoge watergehalte van het bentoniet alleen maar verklaard worden als wateropname uit de ondergelegen AVI-bodemas. Die opname kan capillair of in de vorm van waterdamp plaatsvinden. Bij waterdamptransport is de condensvorming door seizoensbepaalde temperatuurschommelingen een belangrijke factor. Er kon geen invloed van de AVI-slakken op de ionenverhouding in het bentoniet worden vastgesteld, wat wil zeggen dat er geen ionenuitwisseling aan te tonen was. Alle uitgevoerde proeven wezen ook na 5 jaar geen verschil uit met de eigenschappen van nieuwe bentonietmatten.

Op grond van de onveranderde watergehalte-waarden tussen de eerste en de tweede opgraving kan aangenomen worden dat er zich wat betreft het watergehalte in de bentoniet een evenwichtstoestand heeft ontwikkeld. De bentonietmat wordt door het bovenliggende geomembraan beschermd tegen invloeden van het doorsijpelend hemelwater. Een ionenuitwisseling kon derhalve alleen van onderen, uit de AVI-bodemas, komen. Convectieve waterbewegingen (bijvoorbeeld door capillaire opstijging van water) zijn op grond van de veronderstelde evenwichtstoestand tussen het watergehalte van het bentoniet en de omgevingsvochtigheid niet te verwachten. Aangezien er direct contact is tussen AVI-bodemas en bentoniet kunnen ionenuitwisselingsprocessen ook zonder waterstromingen plaatsvinden. Vanwege hun lading, de ionenconcentratie en de Brownse molecuulbewegingen zijn de aanwezige ionen hiertoe ook zonder stromingsgradiënten in staat. Gezien de voorliggende testresultaten is dat echter niet het geval, want anders waren er na 5 jaar tijd meetbare veranderingen in de ionenverdeling te zien geweest. Daarom wordt aangenomen dat de poriënruimte van de AVI-bodemas niet zodanig van water verzadigd is dat ionen die loskomen uit de AVI-bodemas tussen het poriënwater in de slakken en dat in het bentoniet door het drager geotextiel van de bentonietmat kunnen weggelopen. Voor een tijdelijk waarneembare ionenuitwisseling, zoals men dat bij de toepassing van bentonietmatten zonder

daaroverheen liggende geomembraan kent (van enkele maanden tot maximaal 2 jaar, Egloffstein 2000), zou de aanwezigheid van zo'n capillairwaterzooom een voorwaarde zijn. Daarom wordt aangenomen dat de onveranderde toestand van de bentoniet die in de uitgevoerde proeven is vastgesteld onder deze randvoorwaarden nog zeer langdurig stabiel blijft.

zwischen dem Porenwasser der Schlacke und dem Porenwasser des Bentonits über das Trägergeotextil der Bentonitmatte hinweg wandern können. Das Vorhandensein eines solchen Kapillarwassersaumes wäre für einen zeitlich überschaubaren Ionenaustausch, wie man ihn beim Einsatz von Bentonitmatten ohne darüberliegender Kunststoffdichtungsbahn kennt (mehrere Monate bis max. 2 Jahre, Egloffstein 2000), erforderlich. Aus diesem Grund wird angenommen, dass der in den durchgeführten Untersuchungen festgestellte unveränderte Einbauzustand des Bentonits unter diesen Randbedingungen noch über einen sehr langen Zeitraum stabil bleibt.

6 LITERATUUR:

- CUR Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (1999): Aan het werk met het „Bouwstoffen Besluit“ Een handreiking voor het werken met het Bouwstoffenbesluit. Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. C-R-O-W kenniscentrum voor verkeer vervoer en infrastructuur, Sdu Uitgevers, NL.
- CUR Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving. Aanbeveling 49 (1997): BENTONIETMATTEN IN BODEMBESCHERMEDE VOORZIENINGEN. BEOORDELING GESCHIKTHEID.
- CUR Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving. Aanbeveling 50 (1997): BENTONIETMATTEN IN BODEMBESCHERMEDE VOORZIENINGEN. PRODUCTIE EN VERWERKING.
- Egloffstein, Th. (2000): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtung von Deponien“. Dissertation. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3, Karlsruhe 2000.
- LAGA Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – Stand 6. November 1997. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- MÜLLER-VONMOOS & KAHR, G. (1982): Bereitsstellung von Bentoniten für Laboruntersuchungen. Institut für Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich, April 1982. NAGRA Technischer Bericht 82-04.