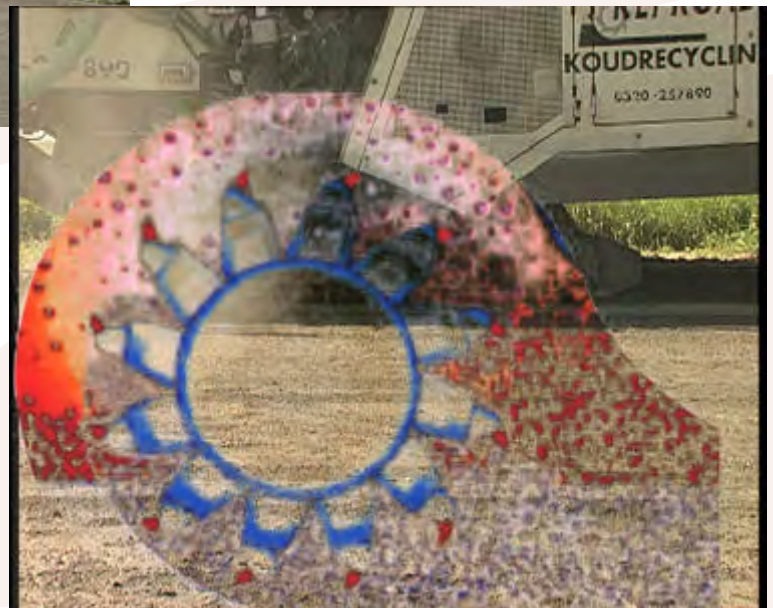


***Immobilisatie / stabilisatie  
van een 'oude'  
vliegascementstabilisatie  
met cement***



Provincie Noord-Brabant



 **KOAC · NPC**



Kenmerk : V00.0672/pvb d.d. 10 oktober 2005

Offertenummer en datum : o000150/pvb/yvz d.d.29 juni 2000

Titel rapport : Immobilisatie / stabilisatie van een 'oude' vliegascement-stabilisatie met cement.

Status rapport : Eindrapportage

Aantal pagina's : 61

Bijlagen : 4

Naam opdrachtgever : Provincie Noord-Brabant, Afdeling Infrastructuur, afdeling Bedrijfsbureau

Adres : Brabantlaan 1

Plaats : 5216 TV 's-Hertogenbosch

Naam contactpersoon : de heer ing. H.A.J. Hairwassers

Contactpersoon KOAC·NPC : P.W. van der Bruggen

Contactpersoon TNO Industrie en Techniek : ir. J.P. Brouwer

Werkgroepleden : dr.ir. J.W. Frénay (voorzitter) ENCI B.V.  
dr.ir. J. Blaakmeer ENCI B.V. (heden Beamix)  
ing. H.A.J. Hairwassers Provincie Noord-Brabant  
ing. S.B. van Hartskamp Provincie Noord-Brabant  
E.W.M. Jansen Provincie Noord-Brabant  
ir. J.P. Brouwer TNO Industrie en Techniek  
P.W. van der Bruggen KOAC·NPC B.V.

Auteurs rapport : P.W. van der Bruggen en ir. J.P. Brouwer

### **Autorisatie**

Naam: P.W. van der Bruggen  
KOAC·NPC B.V.

Datum: 12 oktober 2005

Handtekening:

Informatie over dit rapport kan worden opgevraagd bij de heer ing. H.A.J. Hairwassers van Provincie Noord-Brabant (HHairwassers@Brabant.nl)

## Samenvatting

Het project behelst de reconstructie van een in 1981 aangelegde wegfundering bestaande uit cementgebonden poederkoolvliegias. Het betreft een 500 m lang wegvak van de provinciale weg N268, Dinteloord – Stampersgat. De bestaande 200 mm dikke fundering bleek bij periodieke inspectie in 1999 gedesintegreerd door een gebrekkige drainage en een (te) lage druksterkte van het funderingsmateriaal. Op initiatief van de Provincie Noord-Brabant heeft een technische werkgroep van deskundigen de opties voor de reconstructie beoordeeld t.a.v. kosten en milieueffecten. Deze opties waren: verwijderen van de vliegascementstabilisatie, de fundering voorzien van abc-maatregelen, het immobiliseren / stabiliseren met cement. De derde optie is gekozen, vervolgens uitgewerkt en tijdens de aanleg begeleid vanuit de werkgroep.

T.b.v. de receptuurontwikkeling zijn monsters van de betreffende funderingslagen verzameld. Op basis van karakteriseringonderzoek aan deze monsters is een mengsel 0/40 mm samengesteld van de in situ gefreesde vliegascement (200 mm), onderliggend zandbed (30 mm) en de schone asfaltlagen (150 mm). Dit mengsel heeft een gunstige korrelverdeling. Voor de receptuurontwikkeling is cement toegevoegd (gehalten tussen 4 en 12%(m/m)). Optimaal bleek een gehalte van 7%(m/m) Portlandcement (CEM I 32.5R). Van het verharde materiaal zijn de civieltechnische eigenschappen bepaald, zoals proctordichtheid, vochtgehalte, volumieke massa en druksterkte (ontwikkeling in de tijd). De druksterkte voldeed aan de minimumeis van 2,3 MPa die volgde uit het wegbouwkundige ontwerp van de wegfundering in combinatie met een scheurremmende laag en een asfaltdeklaag, bij de geprognoseerde verkeersbelasting. Deze belasting omvat o.a. de maximumaslast, verkeersintensiteit en ontwerplevensduur voor de weg.

Gelet op het milieuhygiënisch onderzoek zijn proefstukken onderzocht op uitloging conform NEN 7345 (diffusietest voor vormgegeven materiaal), bij een ouderdom van 28 dagen, gedurende 64 dagen. Bij de toegepaste receptuur voldeed de aldus gemeten uitloging aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit. Daarnaast zijn enkele monsters conform NEN 7343 (kolomproef) beproefd als 'worst case' (de uitloging van korrelvormig materiaal zal hoger zijn dan van vormgegeven materiaal). T.a.v. de uitloogeisen bleek molybdeen de meest kritische component voor dit onderzoek. Het cementgehalte van 7%(m/m) wordt feitelijk door deze uitloogeis opgelegd. Gebleken is dat de Mo-uitloging wordt beïnvloed door pH-verandering in de tijd, zoals door carbonatatie, door de bewaarcondities van de proefstukken en door de geleidelijke binding tussen vliegias en cement.

Het vooronderzoek bij immobilisatie / stabilisatie is relatief tijdrovend door de voorgeschreven uitlogingstestmethodiek (conform Bouwstoffenbesluit). Bij grootschalige civieltechnische projecten hoeft dit bij een goede voorbereiding en planning niet cruciaal te zijn. Van groot belang is een goede en tijdige communicatie tussen specialisten en het bevoegde gezag. Communicatie is een kritische succesfactor.

Voor het ontwerp en de aanleg van de weg is bijzondere aandacht geschonken aan het tegengaan van reflectiescheuren in de asfaltdeklaag. Beheerste scheurvorming door het tijdig kerven van de cementgebonden fundering en het beschermen tegen vochtverlies (lees: uitdrogingskrimp) blijken cruciaal. Als extra voorzorgsmaatregel is een 20 mm scheurremmende en hechtende laag hechtend (d.m.v. een kleeflaag) aangebracht tussen fundering en asfaltpakket. De aanleg is in situ uitgevoerd met behulp van een frees-/mengmachine, type Wirtgen 2500. Bij de aanleg zijn diverse metingen uitgevoerd, o.a. cementdosering, mengkwaliteit, vochtgehalte, verdichtingsgraad en laagdikte. De resultaten voldeden aan de gestelde eisen.

Ruim twee jaar na de succesvolle aanleg van het proefvak is een monitoringprogramma uitgevoerd, waarbij de weg is geïnspecteerd t.a.v. de oppervlaktecondities. Er zijn geen reflectiescheuren in het asfalt waargenomen. Daarnaast zijn boorkernen van het funderingsmateriaal d.m.v. diffusieproeven onderzocht t.a.v. de uitloging en is de druksterkte bepaald van het funderingsmateriaal. Geconcludeerd is dat het funderingsmateriaal voldoet aan de gestelde civieltechnische en milieuhygiënische eisen.

## Inhoudsopgave

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Samenvatting</b> .....                                  | <b>3</b>  |
| <b>1 Inleiding</b> .....                                   | <b>7</b>  |
| <b>2 Wegconstructie</b> .....                              | <b>9</b>  |
| <b>3 Civieltechnisch vooronderzoek</b> .....               | <b>12</b> |
| 3.1 Monsterneming .....                                    | 12        |
| 3.2 Karakterisering materialen.....                        | 13        |
| 3.2.1 Onderzoeksmethode .....                              | 13        |
| 3.2.2 Onderzoeksresultaten.....                            | 14        |
| 3.2.3 Receptuurontwikkeling.....                           | 15        |
| 3.3 Wegbouwkundig ontwerp .....                            | 21        |
| 3.3.1 Verificatieberekeningen .....                        | 21        |
| 3.3.2 Beheersen van scheurvorming in de wegfundering ..... | 22        |
| 3.3.3 Resumé op basis van de analyses.....                 | 25        |
| <b>4 Uitloogonderzoek</b> .....                            | <b>26</b> |
| 4.1 Uitvoering uitloogproeven .....                        | 26        |
| 4.1.1 Uitloogproeven en het Bouwstoffenbesluit .....       | 26        |
| 4.1.2 De kolomproef .....                                  | 27        |
| 4.1.3 De diffusieproef.....                                | 27        |
| 4.2 Resultaten.....  | 28        |
| 4.2.1 Opzet onderzoek .....                                | 28        |
| 4.2.2 Eerste serie uitloogproeven.....                     | 29        |
| 4.2.3 Tweede serie uitloogproeven .....                    | 30        |
| 4.2.4 Derde serie uitloogproeven .....                     | 32        |
| 4.3 Verklaring uitlooggedrag molybdeen .....               | 32        |
| 4.3.1 Probleemschets .....                                 | 32        |
| 4.3.2 Analyse .....  | 33        |
| 4.3.3 Oplossingsrichtingen .....                           | 35        |
| 4.3.4 Extra diffusieproeven .....                          | 36        |
| 4.3.5 Nadere analyse kolomproeven .....                    | 36        |
| <b>5 Aanleg demonstratieproject</b> .....                  | <b>38</b> |
| 5.1 Aanleg algemeen.....                                   | 38        |
| 5.2 Onderzoeksresultaten.....                              | 39        |
| 5.2.1 Korrelverdeling.....                                 | 39        |
| 5.2.2 Vochtgehalte.....                                    | 39        |
| 5.2.3 Cementgehalte .....                                  | 40        |
| 5.2.4 Korrelverdeling.....                                 | 41        |
| 5.2.5 Mengkwaliteit .....                                  | 42        |
| 5.2.6 Verdichtingsgraad.....                               | 43        |

|                     |  |           |
|---------------------|--|-----------|
| 5.2.7               | Laagdikte .....  | 44        |
| 5.2.8               | Kerven .....   | 45        |
| 5.2.9               | Vlakheid .....   | 46        |
| 5.2.10              | Druksterkte en dikte .....   | 48        |
| 5.3                 | Diffusieproeven op praktijkmonsters .....                              | 49        |
| <b>6</b>            | <b>MONITORING .....</b>  | <b>51</b> |
| 6.1                 | Na circa 1 jaar .....  | 51        |
| 6.1.1               | Algemeen .....   | 51        |
| 6.1.2               | Conclusie milieuhygiënische monitoring. ....                           | 51        |
| 6.1.3               | Visuele inspectie .....  | 52        |
| 6.1.4               | Conclusie civieltechnisch onderzoek druksterkte stabilisatielaag. .... | 52        |
| 6.2                 | Na circa 2 jaar .....  | 53        |
| 6.2.1               | Algemeen .....   | 53        |
| 6.2.2               | Conclusie monitoring .....   | 55        |
| <b>7</b>            | <b>Conclusies .....</b>  | <b>56</b> |
| 7.1                 | Civieltechnische aspecten .....  | 56        |
| 7.2                 | Milieuhygiënische aspecten .....                                       | 57        |
| <b>8</b>            | <b>Aanbevelingen .....</b>   | <b>58</b> |
|                     | <b>Referenties algemeen .....</b>                                      | <b>59</b> |
|                     | <b>Referenties project .....</b>                                       | <b>59</b> |
| <b>Bijlage I:</b>   | <b>Bestek</b>  |           |
| <b>Bijlage II:</b>  | <b>Onderzoeksresultaten civieltechnisch onderzoek</b>                  |           |
| <b>Bijlage III:</b> | <b>Onderzoeksresultaten uitloogonderzoek</b>                           |           |
| <b>Bijlage IV:</b>  | <b>Onderzoeksresultaten aanleg demonstratieproject</b>                 |           |

## 1 Inleiding

Eind jaren 70 en begin jaren 80 is in Nederland veel onderzoek verricht naar nuttige toepassingen voor poederkoolvliegias van kolengestookte elektriciteitscentrales. Eén van de toepassingen betreft het gebruik van vliegias in cementgebonden wegfunderingen als alternatief voor zandcementstabilisaties. Als één van de grootste demonstratieprojecten is een proefvak aangelegd in de provinciale weg Dinteloord-Roosendaal (N268) nabij Dinteloord, in de provincie Noord-Brabant. Daarbij is gebruik gemaakt van poederkoolvliegias afkomstig van de Amercentrale te Geertruidenberg. Het proefvak had een lengte van ongeveer 500 m en een breedte van ongeveer 8,7 m.

Bij inspectie van de weg in 1999 bleek reconstructie van de weg noodzakelijk. Het asfalt bevatte over grote delen scheuren, voornamelijk langsscheuren. Bij nadere inspectie bleek dat de fundering uit het betreffende proefvak grotendeels gedesintegreerd was. Verklaringen hiervoor waren de slechte drainage ter plaatse en het gebruik van mogelijk een relatief laag cementgehalte in de fundering bij aanleg.

Uit kolomproeven (NEN 7343) bleek, dat de oude fundering niet voldeed aan de uitloogeisen volgens het Bouwstoffenbesluit. Deze uitloogeisen waren nog niet van kracht op het moment dat het proefvak werd aangelegd. Uit de recente kolomproeven bleek dat de uitloging van de componenten Mo, V en Se kritisch was ten opzichte van de eisen uit het Bouwstoffenbesluit.

In principe waren drie opties voorhanden als oplossing van het probleem.

- De eerste optie was verwijdering van de fundering gevolgd door storten, waarbij een geheel nieuwe fundering zou moeten worden aangelegd.
- De tweede optie bestond uit het aanbrengen van isolatiemaatregelen, om de oude fundering als categorie-2 bouwstof volgens het Bouwstoffenbesluit toe te mogen passen. Deze optie is niet verder onderzocht.
- De derde optie tenslotte, bestond uit het opbreken en opnieuw binden (immobiliseren/stabiliseren) van de oude fundering, teneinde een nieuwe fundering te construeren die voldoet aan de uitloognormen voor categorie-1 bouwstoffen uit het Bouwstoffenbesluit.

Deze derde optie bleek het meest aantrekkelijk vanwege de meest gunstige verhouding milieueffect/kosten (milieurendement). Bovendien wilde de Provincie Noord-Brabant graag ervaring opdoen met toepassing van immobilisatieprocessen in de wegenbouw. Dit project bood daarvoor gezien de schaal een uitstekende gelegenheid.

In dezelfde periode 1998-2001 voerden ENCI en TNO Industrie en Techniek een groot gezamenlijk onderzoeksproject uit (Prinuceb) met aandacht voor immobilisatieprocessen. De Provincie Noord-Brabant had zitting in de klankbordgroep van het deelproject over immobilisatie en meldde het project bij ENCI/TNO Industrie en Techniek aan als mogelijk demonstratieproject. In oktober 1999 werd een consortium gevormd, waarbij ENCI de bindmiddelenkennis inbracht, TNO Industrie en Techniek milieuhygiënische kennis leverde en de Provincie Noord-Brabant zowel civieltechnische als milieuhygiënische expertise inbracht. Als vierde partij werd KOAC·NPC te Vught aangetrokken vanwege haar materiaaltechnische en wegbouwkundige expertise. Het consortium begeleidde het civiel- en milieutechnische laboratoriumonderzoek, de aanleg en evaluatie van het demonstratieproject.

Opdrachtgever van dit consortium was het management van de Afdeling Infrastructuur van de Provincie Noord-Brabant. Daarnaast droeg het consortium zorg voor de communicatie rond het demonstratieproject.

In dit rapport wordt de 'oude' en 'nieuwe' opbouw van de constructie en het laboratoriumonderzoek naar de ontwikkeling van het immobilisatieproces voor de 'oude' vliegASFundering beschreven. Tevens wordt verslag gedaan van de ervaringen tijdens de aanleg. Ook de economische aspecten komen aan de orde.

Tenslotte worden conclusies gedaan en aanbevelingen getrokken.

Samenstelling van de leden van de werkgroep van het consortium:

- |                                    |                           |
|------------------------------------|---------------------------|
| - ing. H.A.J. Hairwassers          | Provincie Noord-Brabant   |
| - ing. S.B. van Hartkamp           | Provincie Noord-Brabant   |
| - E.W.M. Jansen                    | Provincie Noord-Brabant   |
| - dr. ir. J.W. Frénay (voorzitter) | ENCI B.V.                 |
| - dr. ir. J. Blaakmeer             | ENCI B.V. (heden Beamix)  |
| - ir. J.P. Brouwer                 | TNO Industrie en Techniek |
| - P.W. van der Bruggen             | KOAC•NPC B.V.             |



## 2 Wegconstructie

Het betreffende proefvak is als onderdeel van een serie proefvakken in de provinciale weg nabij Dinteloord (N 268) in de provincie Noord-Brabant in 1981 aangelegd. Het betreffende proefvak had een lengte van ongeveer 500 m en een breedte van ongeveer 8,7 m. In figuur 1 wordt de opbouw van de 'oude' constructie getoond.



*Figuur 1: 'Oude' constructie.*

Bij de aanleg was vliegascementstabilisatie vervaardigd door 6%(m/m)(16 kg/m<sup>2</sup>) cement toe te passen. Ten opzichte van het specifieke oppervlak van de poederkoolvlieg was het cementgehalte relatief laag.

Bij het laboratoriumonderzoek resulteerde dit in een druksterkte van gemiddeld 2,9 MPa (N/mm<sup>2</sup>) na 28 dagen verharden onder laboratoriumomstandigheden, 20 °C en ten minste 95% RV. De asfaltconstructie vertoonde in 1999 veel schade en was daardoor dringend toe aan vervanging. De verharding vertoonde veel langsscheuren. De vliegascementstabilisatie bleek bij onderzoek nagenoeg volledig gedesintegreerd. Reden hiervan was zeer waarschijnlijk het lage cementgehalte evenals de inkassing in een slecht doorlatende ondergrond van kleiachtig materiaal. Er was geen drainage aanwezig. Als gevolg hiervan lag de stabilisatie regelmatig met de 'voeten' in het water.

Bij de reconstructie werd de laag teerhoudend asfalt, als gevolg van een recente milieuwetwijziging, niet meer toegepast. De overige asfaltlagen werden hergebruikt.

De keuze voor het immobiliseren werd vooral ingegeven door het gunstige milieurendement in relatie tot de kosten.

Er kon worden gekozen uit de volgende opties:

### 1 STORTEN

De fundering opbreken, afvoeren en storten. Aanbrengen van een nieuwe fundering bestaande uit menggranulaat, dik 250 mm of vergelijkbaar. De kosten bedragen circa € 79,00 per m<sup>2</sup> verharding inclusief milieuheffing en transport.

### 2 ISOLEREN (IBC)

De buitenste 500 mm van de bestaande fundering wordt verwijderd en verspreid over de rest van het oppervlak van de fundering. Daarna wordt ter plaatse een 'schone schouder' aangebracht van bijvoorbeeld 250 mm dik asfaltgranulaatcement met 3% cement. De schone schouder wordt gelijktijdig met de rest van de fundering gestabiliseerd. Hierbij worden vanwege het lage cementgehalte, en dus zeer waarschijnlijk een relatief lage druksterkte, geen voorzieningen getroffen om scheurdoorgroei naar het asfalt te voorkomen of te beperken. De aanlegkosten bedragen circa € 34,00 per m<sup>2</sup> verharding. Bij dit alternatief moet de verharding jaarlijks een monitoring ondergaan. Om veiligheidsredenen wordt uitgegaan van het gebruik van de ARAN. De kosten hiervan variëren sterk, afhankelijk van de lengte van het meetvak.

Bij een meetvaklengte van 500 meter, zoals in dit project, zijn de jaarlijkse kosten circa € 1,10 per m<sup>2</sup>. Bij een levensduur van 20 jaar kost isoleren in totaal: € 34,00 + (20 maal € 1,10) = circa € 56,00 per m<sup>2</sup>. (bij een projectlengte van 5 km loopt dit sterk terug naar € 34,00 + (20 maal € 0,20) = circa € 38 per m<sup>2</sup>).

Weliswaar wordt de categorie 2 bouwstof ingepakt, maar dit moet voortdurend worden gecontroleerd. Daarnaast zijn (in beperkte mate) primaire grondstoffen nodig voor de schone schouders. Deze optie is verder niet onderzocht.

### 3 IMMOBILISEREN

Immobiliseren is het chemisch of fysisch binden van verontreinigingen. Om voor dit project te komen tot een verantwoorde immobilisatie bleek 7% cement nodig, zie in de volgende hoofdstukken. Vanwege het hoge cementgehalte waren voorzieningen noodzakelijk om scheurdoorgroei naar het asfalt te beperken of te voorkomen. De stabilisatie werd gekerfd. Om de circa 4 meter werd er in dwarsrichting gekerfd evenals in het midden van de constructie in langsrichting. Op deze wijze werden platen gecreëerd van circa 4,00 bij 4.35 meter. De stabilisatie werd overlaagd met een scheurremmende laag: Interpave. De asfaltdikte is bij het isoleren en immobiliseren gelijk echter 20 mm STAB bij het isoleren werd vervangen door 20 mm Interpave bij het immobiliseren. De totale kosten bedragen circa € 41,00 per m<sup>2</sup> verharding.

Om te komen tot een adequate en verantwoorde immobilisatie zijn onderzoeken noodzakelijk. De extra onderzoekskosten bedragen voor het civieltechnische gedeelte circa € 10.000 en voor het milieuhygiënische gedeelte circa € 27.000.

De onderzoekskosten bedragen circa € 9,00 per m<sup>2</sup> verharding. Dit geldt uiteraard voor een werk van de omvang van het proefvak. Bij grotere werken moet met circa € 10.000 extra kosten rekening worden gehouden. Dit betreft onderzoeks- en begeleidingskosten.

De kosten per m<sup>2</sup> dalen door de omvang van het werk.

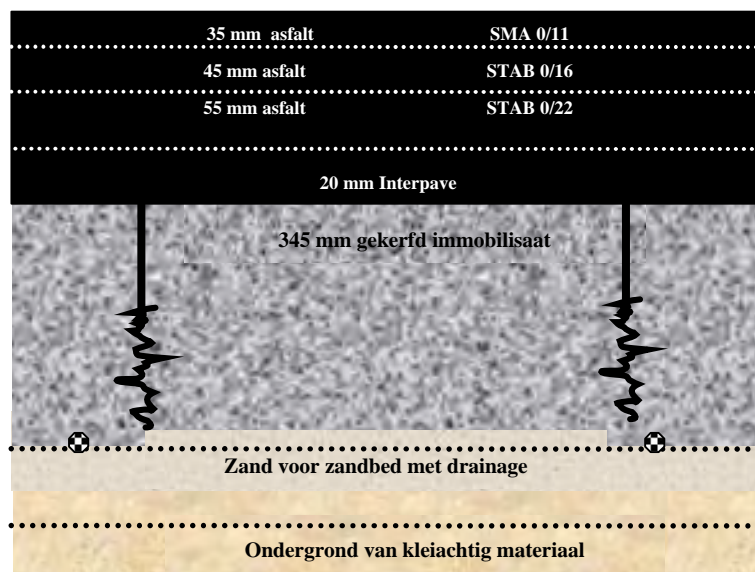
Er is rekening gehouden met een lange voorbereidingstijd, benodigd voor het milieuhygiënisch onderzoek, van minimaal 6 maanden.

Alle genoemde kosten zijn exclusief BTW, zeer indicatief en betrekking hebbende op het beschreven proefvak, voor het prijspeil van 2001.

Samenvattend zijn de indicatieve totaalkosten van de te reconstrueren (of te storten) wegfundering per m<sup>2</sup>:

|    |                              |         |
|----|------------------------------|---------|
| 1. | Storten                      | € 79,00 |
| 2. | Isoleren                     | € 56,00 |
| 3. | Immobilisatie / stabilisatie | € 50,00 |

De nieuwe constructie werd als volgt opgebouwd (inclusief een drainage voor waterafvoer, aangebracht in het zandbed):



Figuur 2: 'Nieuwe' constructie.

### 3 Civieltechnisch vooronderzoek

#### 3.1 Monsterneming

De Provincie Noord-Brabant heeft in 2000 besloten om de N 268 te reconstrueren. De wegconstructie zou worden hergebruikt waarbij een bewerking noodzakelijk was. De aanwezige verhardingsmaterialen zouden worden gefreesd en in een gebonden, geïmmobiliseerde, toepassing worden hergebruikt. De vrijkomende gefreesde materialen zouden in een optimale verhouding worden samengevoegd en gebonden met cement.

De monsterneming van de materialen werd door Provincie Noord-Brabant uitgevoerd. Bij de monsterneming was het van belang representatieve monsters te nemen.

Ten behoeve van het onderzoek waren materialen nodig, afkomstig uit de verschillende verhardingslagen van de 'oude' constructie en het onderliggende zandbed.



*Foto 2: Laagsgewijze monsterneming t.b.v. vooronderzoek.*

Bij de monsterneming werd het materiaal per laag gefreesd met behulp van een kleine freesmachine, type Wirtgen W1000F (zie foto 2). Hiervoor werd de firma Reproad ingeschakeld. Op deze manier konden monsters worden verkregen die representatief waren voor het materiaal dat later, bij de daadwerkelijke aanleg, met een grote frees werd verkregen.

Het wegvak van 500 meter lengte werd ten behoeve van de monsterneming in vier gelijke vakken verdeeld. Uit ieder vak werd ter grootte van circa 3 m<sup>2</sup> materiaal van de constructie door middel van de genoemde frees laagsgewijs gefreesd. Uit het verkregen granulaat van iedere laag werd een representatief monster genomen. Ten slotte is de bovenste laag van drie centimeter van het onderliggende zandbed met behulp van een schep bemonsterd.

De monstergrootte en codering van de verschillende materialen waren als volgt:

|                                       |              |           |        |
|---------------------------------------|--------------|-----------|--------|
| - Asfaltgranulaat bovenlaag           | 250 kilogram | codering: | laag 1 |
| - Asfaltgranulaat van twee onderlagen | 250 kilogram | codering: | laag 2 |
| - Vliegascementstabilisatie           | 400 kilogram | codering: | laag 3 |
| - Zand voor zandbed                   | 250 kilogram | codering: | laag 4 |

De monsters werden verpakt in plastic zakken en voor onderzoek aangeboden aan KOAC·NPC te Vught.

De monsters waren gecodeerd als 1-1 t/m 4-4, zijnde monster vak 1-laag 1 t/m monster vak 4-laag 4.

Het asfaltgranulaat en granulaat van de vliegascementstabilisatie zijn volledig hergebruikt. Het zand is bemonsterd omdat door het in situ frezen van het materiaal een klein gedeelte van het zand moest worden meegenomen om zekerheid te hebben dat de vliegascementstabilisatie over de volledige hoogte werd gefreesd. Daarnaast bleek het mogelijk door het bijmengen van zand de korrelverdeling van het mengsel te optimaliseren.

## **3.2 Karakterisering materialen**

### *3.2.1 Onderzoeksmethode*

Het karakteriseren van de bemonsterde materialen werd uitgevoerd volgens de Standaard RAW Bepalingen 2000. Omdat de voorschriften niet geheel zijn opgesteld voor de genoemde toepassing is zo goed als mogelijk aansluiting gezocht bij de procedure die is opgesteld voor het civieltechnische onderzoek voor 'asfaltgranulaatcement'. Het onderzoek volgens proef 144 ter karakterisering van de materialen bestond uit het bepalen van de korrelverdeling volgens proef 6.1 en 6.3 en het bepalen van het vochtgehalte volgens proef 5. Beide eigenschappen werden per monster en per laag/materiaal vastgesteld. Uit de verkregen resultaten kon tevens een indruk worden verkregen in hoeverre het proefvak over de lengte van 500 meter een homogene opbouw bezat.

Volgens de voorschriften moet de korrelverdeling worden bepaald door het materiaal achtereenvolgens droog, nat en droog te zeven. Het granulaat van de 'vliegascementstabilisatie' was echter dusdanig zwak dat een intensieve (langdurige) zeving een verfijning van het granulaat tot gevolg zou hebben die in de praktijk niet zou optreden. Daarom werd gekozen voor een korte 'droge' machinale zeving en een controle van de zeving met de hand.

### 3.2.2 Onderzoeksresultaten

Navolgend zijn de gemiddelde onderzoeksresultaten gegeven. Voor de volledige onderzoeksresultaten, individueel en per vak, wordt naar bijlage 2 verwezen.

#### A. Vochtgehalte in %(m/m) van de aangevoerde materialen volgens proef 5.1 (Standaard RAW Bepalingen 2000)

|  |      |
|--|------|
| Freesasfaltgranulaat (laag 1)                    | 3.3  |
| Freesasfaltgranulaat (laag 2)                    | 8.1  |
| Granulaat van vliegascementstabilisatie (laag 3) | 30.1 |
| Zand (laag 4)                                    | 8.7  |

Het vochtgehalte in het freesasfalt wordt veroorzaakt door het water dat wordt gebruikt bij het frezen.

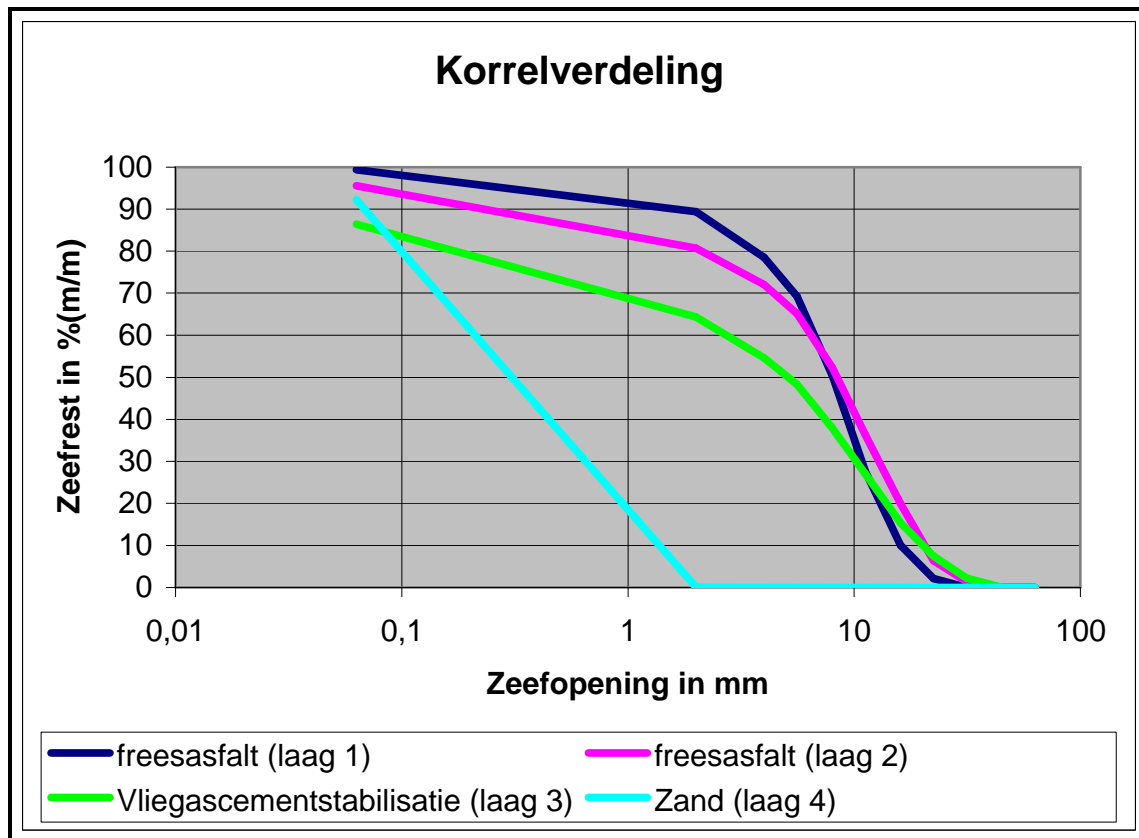
Opvallend is het hoge vochtgehalte van de derde laag (granulaat van vliegascementstabilisatie). Zeer waarschijnlijk is de slechte drainage van het zandbed en het grote absorberende vermogen (opzuiging) van de vliegascementstabilisatie de oorzaak. Het vochtgehalte van het zand is een aannemelijk vochtgehalte.

#### B. Korrelverdeling in %(m/m) volgens proef 6.0 RAW 2000

Voor het verkrijgen van een goede mengselsamenstelling, een optimale korrelopbouw, is het noodzakelijk de korrelverdeling (-opbouw) van de afzonderlijke materialen te weten.

Tabel 1: Korrelverdeling afzonderlijke materialen.

| Op zeef<br>NEN 2560 | Freesasfalt<br>granulaat<br>(laag 1) | Freesasfalt<br>granulaat<br>(laag 2) | Granulaat van<br>vliegascementstabilisatie<br>(laag 3) | Zand<br>(laag 4) |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|------------------|
| C 63                | 0.0                                  | 0.0                                  | 0.0  | 0.0              |
| C 45                | 0.0                                  | 0.0                                  | 0.0  | 0.0              |
| C 31.5              | 0.0                                  | 1.4                                  | 2.2  | 0.0              |
| C 22.4              | 2.1                                  | 6.4                                  | 7.5  | 0.0              |
| C 16                | 10.1                                 | 19.9                                 | 15.3   | 0.0              |
| C 11.2              | 27.6                                 | 36.3                                 | 27.0   | 0.0              |
| C 8                 | 50.4                                 | 52.3                                 | 37.9   | 0.0              |
| C 5.6               | 69.2                                 | 65.1                                 | 48.3   | 0.0              |
| C 4                 | 78.5                                 | 72.0                                 | 54.6   | 0.0              |
| 2 mm                | 89.4                                 | 80.7                                 | 64.3   | 0.1              |
| 1 mm                | -                                    | -                                    | 69.7   | 0.4              |
| 500 µm              | -                                    | -                                    | 73.1   | 1.2              |
| 250 µm              | -                                    | -                                    | 76.0   | 11.1             |
| 125 µm              | -                                    | -                                    | 81.4   | 65.2             |
| 63 µm               | 99.4                                 | 95.6                                 | 86.4   | 92.2             |
| < 63 µm             | 0.6                                  | 4.4                                  | 13.7   | 7.8              |



Figuur 3: Grafiek korrelverdeling afzonderlijke materialen.

Het asfaltgranulaat van beide lagen is goed gegradeerd en vertoont onderling slechts kleine verschillen.

Het granulaat van de vliegascementstabilisatie is erg fijn ten opzichte van het asfaltgranulaat. Tevens bevat het een grote hoeveelheid fijne delen: 13.7%(m/m) < 63 µm.

Het zand is normaal gegradeerd en voldoet aan de eisen gesteld aan zand voor zandbed.

### 3.2.3 Receptuurontwikkeling

Uit de korrelverdelingen van de individuele monsters (zie bijlage 2) werd per materiaal de gemiddelde korrelverdeling van monsters berekend. Vervolgens werd er met de gemiddelde korrelverdeling van de materialen een korrelverdeling van een mengsel van de materialen berekend. Deze werden getoetst aan de 'vereiste' korrelverdeling van het mengsel zoals in de Standaard RAW Bepalingen 1995 genoemd in tabel T28.01.

Op het moment van het vooronderzoek werd proef 144, 'Samenstelling van gebonden asfaltgranulaat', van de Standaard RAW Bepalingen 1995 herzien. De proef diende te worden verbeterd omdat er grote verschillen werden gevonden tussen de op het laboratorium gevonden druksterktes en de druksterktes in het veld. Vaak moest naar aanleiding van het vooronderzoek een te hoog cementgehalte worden toegepast wat leidde tot (te) hoge sterktes in het veld.

Een concept proefomschrijving voor Standaard RAW Bepalingen 2000 was gereed en werd gehanteerd.

Bij de mengselberekening werd uitgegaan van de dichtheid van het materiaal in situ en volledige dikte van de ongefreesde materialen zoals deze in de 'oude' constructie aanwezig waren. Ook werden de laagdiktes van de desbetreffende lagen gebruikt in de berekening. Uit beide parameters konden de verhoudingen aan massahoeveelheden van de vrijkomende materialen worden berekend.

Tabel 2: *Uitgangsmaterialen.*

| <b>Materiaal</b>                 | <b>aangenomen dichtheid in situ<br/>kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Laagdikte<br/>mm</b> |
|----------------------------------|--|-------------------------|
| Freesasfaltgranulaat laag 1      | 2.300  | 35                      |
| Freesasfaltgranulaat laag 2      | 2.300  | 115                     |
| Vliegascementstabilisatie laag 3 | 1.300  | 200                     |
| Zand laag 4                      | 1.700  | 30                      |

De monsters van bovengenoemde materialen werden in het laboratorium in onderstaande verhoudingen gemengd wat resulteerde in onderstaande uitlevering:

Tabel 3: *Uitlevering*

| <b>Uitlevering per m<sup>3</sup></b> |                                       |                         |                           |                           |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Materiaal</b>                     | <b>Dichtheid<br/>kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Laagdikte<br/>mm</b> | <b>Gehalte<br/>%(m/m)</b> | <b>Hoeveelheid<br/>kg</b> |
| Freesasfaltgranulaat                 | 2.300                                 | 150                     | 52.6                      | 857                       |
| Vliegascement-<br>stabilisatie       | 1.300                                 | 200                     | 39.6                      | 646                       |
| Zand                                 | 1.700                                 | 30                      | 7.8                       | 127                       |
| Cement CEM I 32.5R                   | Nader te bepalen in het vooronderzoek |                         |                           |                           |
| Water                                | Nader te bepalen in het vooronderzoek |                         |                           |                           |

Ten behoeve van de receptuurontwikkeling werden in het laboratorium mengsels gemaakt met 4%(m/m), 6%(m/m), 8%(m/m), 10%(m/m) en 12%(m/m) cement, toegevoegd aan 100%(m/m) droog mengsel van het granulaat. Dit is een breed scala aan cementgehaltenes, gekozen uit milieuoverwegingen. Immers, mogelijk waren relatief hoge cementgehaltenes noodzakelijk voor het immobiliseren van de uitlogende componenten. Van alle mengsels werden de maximale proctordichtheid en het optimum vochtgehalte vastgesteld. Hiervoor werden de proeven 5.1 en 5.2, de proctorproef en éénpuntsproctorproef, met elkaar gecombineerd.



Proef 5.1, de 'normale' proctorproef, echter in de verzwaarde uitvoering, werd toegepast waarbij de apparatuur van de éénpuntsproctorproef werd gebruikt.

In een CBR-vorm (cilinderdiameter 152.4 mm) werd het materiaal in vijf gelijke lagen verdicht. De verdichtingslagen 1 t/m 4 werden verdicht met 56 slagen. Laag 5 werd na 2 maal 20 slagen op het materiaal verdicht door vervolgens 20 slagen te geven op een stalen plaat (methode éénpuntsproctorproef).

Het materiaal aan de bovenzijde van de cilinder behoefde hierdoor niet te worden afgestreken.

Het volume van het materiaal werd door middel van meten vastgesteld.

De verzwaarde proctorproef omvat de volgende verschillen t.o.v. de normale uitvoering:

*Tabel 4: Verschillen in proctorverdichting.*

| <b>Handeling</b>                   | <b>'Normale' uitvoering<br/>(in CBR-vorm)</b> | <b>'Verzwaarde' uitvoering</b> |
|------------------------------------|---|--------------------------------|
| Aantal verdichtingslagen           | 3   | 5                              |
| Aantal slagen per verdichtingslaag | 56  | 56                             |
| Valhoogte verdichtingshamer        | 305 mm  | 457 mm                         |
| Massa verdichtingshamer            | 2.50 kg                                       | 4.54kg                         |

Voor iedere bepaling werd nieuw materiaal genomen omdat het materiaal tijdens het verdichten verfijnde.

De proefstukken, voor het onderzoek naar het benodigde gehalte aan cement door middel van de bepaling van de druksterkte en het uitloogonderzoek, werden vervaardigd met het optimum vochtgehalte, verminderd met 3% vocht. De reden voor het toepassen van een lager vochtgehalte dan het optimumvochtgehalte was dat bij de aanleg in de praktijk ook met een lager vochtgehalte zou worden gewerkt.

Van de vervaardigde proefstukken, circa 12 stuks per mengsel, werden de volgende eigenschappen bepaald:

- druksterkte in 3-voud na 7 dagen verharden
- druksterkte in 3-voud na 28 dagen verharden
- druksterkte in 3-voud na 91 dagen verharden
- uitloging

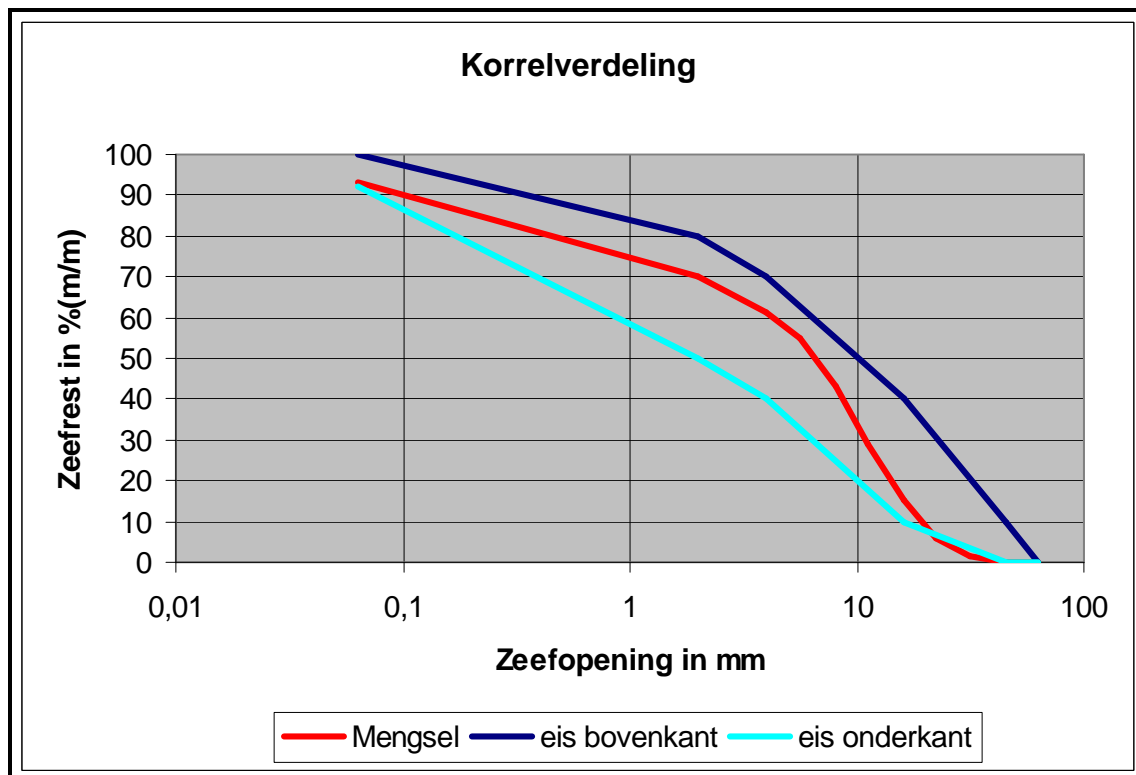
Het benodigde cementgehalte voor het verkrijgen van de gewenste druksterkte werd vastgesteld door middel van interpolatie. Gestreefd werd naar een cilinderdruksterkte van 2.0 MPa bij een ouderdom van 28 dagen onder laboratorium omstandigheden.

Per mengsel zijn twee proefstukken aangeboden voor het milieuhygiënische onderzoek.

Het milieuhygiënische onderzoek werd uitgevoerd door TNO Industrie en Techniek, zie hoofdstuk 4.

Tabel 5: Korrelverdeling mengsel.

| Korrelverdeling in %(m/m) samengesteld mengsel |   |                               |
|--|---|-------------------------------|
| Op zeef<br>NEN 2560                            | Mengsel bestaande uit freesafaltgranulaat laag 1, freesafaltgranulaat laag 3, granulaat vliegascementstabilisatie en zand | Eisen<br>Cumulatief in %(m/m) |
| C 63   | 0.0   | 0.0                           |
| C 45   | 0.0   | 0.0 – 10.0                    |
| C 31.5   | 1.4   |                               |
| C 22.4   | 5.7   |                               |
| C 16   | 15.2  | 10.0 – 40.0                   |
| C 11.2   | 28.9  |                               |
| C 8  | 42.9  |                               |
| C 5.6  | 54.9  |                               |
| C 4  | 61.5  | 40.0 – 70.0                   |
| 2 mm   | 70.3  | 50.0 – 80.0                   |
| 63 µm  | 93.3  | 92.0 – 100.0                  |
| < 63 µm  | 6.7   |                               |



Figuur 4: Grafiek korrelverdeling mengsel.

Tabel 6: Resultaten van de proctorproef.

| <b>Verband tussen vochtgehalte en dichtheid van aardebaan- of funderingsmateriaal (proctorproef)</b> |  |  |
|--|--|--|
| <b>Codering monster</b>  | <b>Optimum vochtgehalte in % (m/m)</b> | <b>Maximale proctordichtheid in kg/m<sup>3</sup></b> |
| Mengsel met 4%(m/m) cement   | 12                                     | 1763   |
| Mengsel met 6%(m/m) cement   | 12                                     | 1767   |
| Mengsel met 8%(m/m) cement   | 12                                     | 1757   |
| Mengsel met 10%(m/m) cement  | 12                                     | 1793   |
| Mengsel met 12%(m/m) cement  | 12                                     | 1758   |

Het optimum vochtgehalte van de mengsels is bij elk cementgehalte vastgesteld op 12%(m/m). Van de 5 verschillende mengsels zijn vervolgens proefstukken vervaardigd met 9%(m/m) vocht. Uit iedere serie proefstukken zijn 2 proefstukken geselecteerd voor het uitloogonderzoek, 3 proefstukken voor de 7-daagse druksterkte, 3 proefstukken voor de 28-daagse druksterkte en 3 proefstukken voor de 91-daagse druksterkte. Tevens zijn er enkele proefstukken als reserve bewaard.

Tabel 7: Vervaardigde proefstukken.

| <b>Cementgehalte in % (m/m)</b> | <b>Vochtgehalte in % (toegevoegd)</b> | <b>Gemiddelde natte dichtheid in kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Gemiddelde droge dichtheid in kg/m<sup>3</sup></b> |
|---------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| 4                               | 9.0                                   | 1917  | 1759  |
| 6                               | 9.0                                   | 1927  | 1768  |
| 8                               | 9.0                                   | 1926  | 1767  |
| 10                              | 9.0                                   | 1947  | 1787  |
| 12                              | 9.0                                   | 1903  | 1746  |

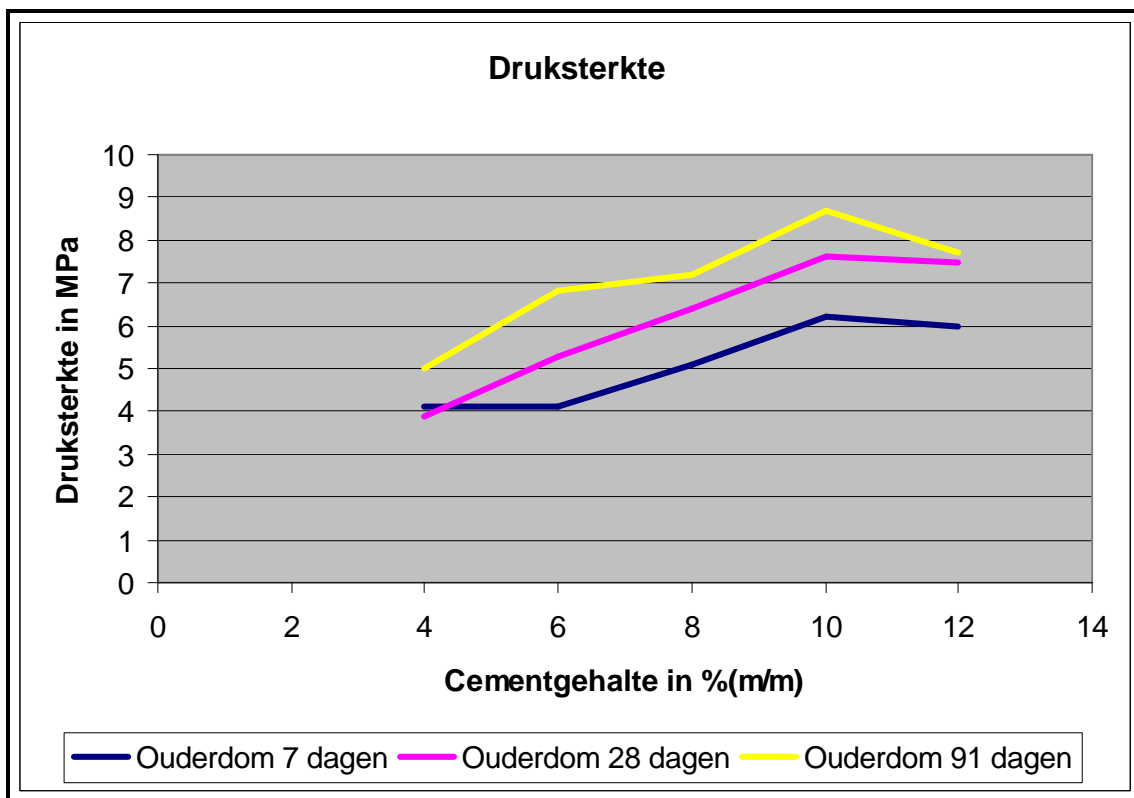
Tabel 8: Druksterkte proctorcilinders.

| <b>Gemiddelde druksterkte en volumieke massa</b> |                           |   |                            |   |                            |   |
|--|---------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|---|
| <b>Cementgehalte % (m/m)</b>                     | <b>na 7 dagen verhard</b> |   | <b>na 28 dagen verhard</b> |   | <b>na 91 dagen verhard</b> |   |
|  | <b>Druksterkte MPa</b>    | <b>Volumieke massa kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Druksterkte MPa</b>     | <b>Volumieke massa kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Druksterkte MPa</b>     | <b>Volumieke massa kg/m<sup>3</sup></b> |
| 4  | 4.1                       | 1910                                    | 3.9                        | 1877                                    | 5.0                        | 1873                                    |
| 6  | 4.1                       | 1900                                    | 5.3                        | 1900                                    | 6.8                        | 1910                                    |
| 8  | 5.1                       | 1907                                    | 6.4                        | 1917                                    | 7.2                        | 1927                                    |
| 10   | 6.2                       | 1923                                    | 7.6                        | 1940                                    | 8.7                        | 1927                                    |
| 12   | 6.0                       | 1910                                    | 7.5                        | 1913                                    | 7.7                        | 1873                                    |

Volgens de Standaard RAW Bepalingen 2000 is het gewenste cementgehalte het cementgehalte dat benodigd is om bij een ouderdom van 28 dagen een cilinderdruksterkte van 2.0 MPa (richtwaarde) te verkrijgen. Dit benodigde cementgehalte kan door middel van interpolatie worden afgeleid.

Bij 6%(m/m) cementgehalte, in het vooronderzoek toegepast, bedraagt de 28-daagse druksterkte gemiddeld 5.3 MPa. Dit is al voldoende om civieltechnisch aan de ontwerpsterkte van 4.6 MPa te voldoen. Bij dit civieltechnisch benodigde percentage zijn geen bijzondere maatregelen tegen scheurdoorgroei nodig.

Bij de aanleg is uitgegaan van 7%(m/m) cement. Dit iets hogere gehalte is noodzakelijk voor het immobiliseren. Hierdoor wordt uitloging voldoende voorkomen en zo kan worden voldaan aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit. Dit hoge cementgehalte maakt het nodig om maatregelen te treffen tegen scheurdoorgroei in het asfalt.



Figuur 5: Grafiek druksterktes.

### 3.3 Wegbouwkundig ontwerp

#### 3.3.1 Verificatieberekeningen

Voor de provinciale weg N268 zijn de verkeersprognoses en ontwerpisen als volgt:

- ontwerplevensduur ten minste 15 jaar
- verkeersintensiteit 2.300 motorvoertuigen per etmaal waarvan 13% vrachtverkeer
- vrachtverkeer bestaat voornamelijk uit transport van bieten (tijdens de jaarlijkse campagne)
- verkeersgroei gemiddeld 2.0% per jaar
- per rijstrook 2.6 miljoen aan equivalente 100 kN-aslasten tijdens de gebruikperiode
- wegbreedte 8.7 m en stijfheid van de natuurlijke ondergrond 100 MPa

Voor een aangehouden max. aslast van 160 kN is de laagopbouw volgens figuur 2 gecontroleerd via berekeningen. Daarbij zijn voor de modellering de volgende aannamen gedaan:

- de 345 mm dikke cementgebonden funderingslaag wordt direct na aanleg voorzien van een kerfpatroon (kerfdiepte 50%, plaatafmetingen ten hoogste 4.5 x 4.0 m<sup>2</sup>) zodat de opgebouwde spanningen door opgelegde vervormingen (temperatuur, uitdrogingskrimp) relatief laag blijven. Zo zal mogelijke scheurvorming gecontroleerd plaatsvinden. Inputgegevens volgens het KOAC•NPC onderzoek: E-modulus 5.755 MPa, buigtreksterkte 0.70 MPa. Voor de 'rekenwaarde' van de druksterkte is verondersteld 5.1 MPa.
- 20 mm laag Interpave – een hooggemodificeerde laag zandasfalt van Dura Vermeer - fungeert als scheurremmende interlay, met E = 2.500 MPa

Verder is verondersteld dat de cementgebonden fundering – om vochtverlies te beperken – binnen een etmaal na aanleg wordt voorzien van de vochtremmende laag, bijv. een bitumenhoudende deklaag (sproeibitumen of asfaltlaag), besproeiing met water, of afdekken met een kunststoffolie (folie ten minste twee etmalen handhaven).

Met het meerlagenpakket BISAR / Pavers zijn verificatieberekeningen uitgevoerd t.a.v.:

- optredende buigtrekrek aan de onderzijde van het asfaltpakket
- buigdrukspanning (gelet op verbrijzeling) aan bovenzijde van de fundering
- buigtrekspanning aan de onderzijde van de fundering
- stuik (drukrek) op het grensvlak fundering – natuurlijke ondergrond
- gevoeligheid voor reflectiescheurvorming: 150 mm als minimumasfaltdikte is voldoende conform de aanpak van RWS-DWW voor asfalt met een cementgebonden fundering.

Overigens is de dikte van het asfaltpakket in werkelijkheid verhoogd met 5 mm (45 i.p.v. 40 mm STAB 0/16). T.a.v. de E-modulus is geen rekening gehouden met een lagere waarde door de optredende krimp-scheuren, met een gunstig effect op de rekken en spanningen in de fundering.

Conclusie is dat de wegconstructie in constructief opzicht voldoet bij de opgegeven belastingen van het verkeer en de verwachte opgelegde vervormingen vanuit de cementgebonden fundering. Achtergronden zijn vermeld in het KOAC•NPC rapport 'Constructievoorstel N640 met immobilisaatfundering', rapportnr. E01026, 21 febr. 2001.

Maatgevend voor het ontwerp blijkt de buigtrekspanning in de wegfundering. Deze bedraagt bij de optredende verkeersbelasting 0.25 MPa, aanzienlijk lager dan de toetswaarde van 0.70 MPa bij een ouderdom van 28 dagen. Op basis van dit resultaat is de constructieve veiligheidsfactor meer dan 2.7. Omdat de buigtreksterkte evenredig is met (druksterkte)<sup>2/3</sup> van het funderingsmateriaal, mogen we voor de proctordruksterkte verkleinen met factor van ca. 4.4: immers  $(4.4)^{2/3} = \text{ca. } 2.7$

De minimumdruksterkte bij een veiligheidsfactor van 2.0 is dan  $2 \times 5.1 / 4.4 = \text{ca. } 2.3$  MPa. Voor dit project worden in lijn met de systematiek in de Standaard RAW 2000 aangehouden als minimumdruksterkte (per proefstuk, bij ten minste drie proefstukken per charge):

- labcondities: ten minste 4.6 MPa (ontwerpwaarde vooronderzoek, zie paragraaf 3.2)
- in situ condities: ten minste 2.3 MPa

De sterkteontwikkeling zal langer doorlopen dan bij zandcement, door de puzzolane werking van het vliegascement bindmiddel.

Om een voldoende druksterkte (proctorcilinders) van het immobilisaat te bereiken zijn – voorafgaande aan het vooronderzoek – een aantal eisen geformuleerd.

Voor de korrelopbouw geldt daarbij:

- de fractie 1-2 mm moet zijn ten minste 10 vol. %
- fracties > 63 micrometer moet zijn ten minste 60-70 vol. %
- drogestofgehalte van het mengsel min. 75 – 80% (aardvochtig, mix-in-place verwerking)

De paragrafen 3.1 en 3.2 geven aan dat het beoogde mengsel ruimschoots voldoet aan deze eisen, evenals aan de minimumdruksterkte.

### 3.3.2 *Beheersen van scheurvorming in de wegfundering*

De vraag is of de relatief hoge cementgehalten (6-8%) – zoals voorgesteld bij het vooronderzoek - nog wel leiden tot een scheur'vrije' wegconstructie en scheur'vrije' asfaltdeklaag. In de praktijk wijst men nl. vaak op het risico van reflectiescheuren in het asfaltpakket. Aan de hand van een voorbeeld van een gestabiliseerde laag zal worden geïllustreerd welke de belangrijkste parameters zijn die het scheurgedrag bepalen, en welke maatregelen de scheurreflectie kunnen tegengaan.

#### **Korrelopbouw**

Van de N268 wordt de bestaande 200 mm dikke vliegascementstabilisatie in situ gefreesd en vervolgens gemengd met de bestaande 30 mm zand en 150 mm asfaltdeklaag. De gemiddeld droge dichtheid van het mengsel met 7%(m/m) Portlandcement (CEM I 32.5R) is 1760 kg / m<sup>3</sup> (door interpolatie).

Verder volgt uit het vooronderzoek (paragraaf 3.2):

- dit mengsel heeft een continue korrelopbouw 0/40, met 15.2% groter dan 16 mm en 6.7% kleiner dan 63 micrometer (zie ook tabel 5).
- zeefcurve conform NEN 5950:1995 tussen de grenslijnen A en B (iets dichter nabij B) voor betonmengsels met een max. korreldiameter van 31.5 mm. Curve B betreft de ideale korrelpakking, en het gebied A-B betreft mengsels met een relatief lage waterbehoefte en een goede verdichtbaarheid.

### **Beoordeling cementgehalte in relatie tot uitdrogingskrimp**

Het cementgehalte van 7%(m/m) in dit voorbeeld is hoog ten opzichte van mengsels voor gestabiliseerde lagen en asfaltgranulaatcement (de Standaard RAW 2000 schrijft voor minimum druksterkten na 7 en 28 dagen, wat vaak leidt tot cementgehalten van ca. 4-6%(m/m)). De cumulatieve zeefkurve van dit mengsel met 7%(m/m) cement lijkt op die van betonmengsels met aanmerkelijk hogere cementgehalten. Echter bij beton met 325 kg cement per m<sup>3</sup> is het cementgehalte ruim 13%(m/m). Daarnaast is het gehalte lager dan gebruikelijk is voor stabilisaties van zandcement (veelal 8-12%(m/m) cement en watergehalten tussen 7.5 en 12.5%). Bovendien is bij hetzelfde %(m/m) het cementgehalte in kg/m<sup>3</sup> in zandcement 10-25% hoger door de hogere volumieke massa.

Bij zandcement met voldoende grove zandfractie (maximumkorrel is 2 tot 3 mm) is de (gemeten) eindkrimp 0.4 - 0.6 promille. Bij stabilisatie van homogene zanden met cement is een eindkrimp van wel 1.5 promille mogelijk. Vergelijk de uitdrogingskrimp van ongewapend beton, die is 0.3 - 0.5 promille. Na een jaar is de krimp 0.2-0.3 promille.

Voor een beperkte uitdrogingskrimp zijn van belang, een relatief lage waterbehoefte en een goede verdichtbaarheid. Een hogere druksterkte (lees: de wens om een dichtere structuur te creëren die de uitloging van chemische componenten beperkt) van de stabilisatielaag wordt in de regel verwezenlijkt door verhogen van het cementgehalte onder ongeveer gelijkblijvend vochtgehalte. Dit is mogelijk omdat het optimale vochtgehalte bij hoger cementgehalte nauwelijks verandert. Een dergelijk wijziging van het cementgehalte gaat meestal niet gepaard met verhoogde uitdrogingskrimp. De krimp treedt derhalve zeer geleidelijk op: na ca. 5-10 jaar wordt de eindkrimp bereikt.

Samenvattend is het aannemelijk dat de eindkrimp van het stabilisatiemengsel niet meer zal bedragen dan 0.3-0.4 promille en wel om de volgende redenen:

- cementdosering %(m/m) is nagenoeg de helft van beton met een vergelijkbare korrelopbouw en het mengsel is relatief droog (aardvochtige consistentie),
- de korrelopbouw is gunstig en de grote maximumkorreldiameter beperkt zowel de behoefte aan 'cementlijm' als de eindkrimp,
- het mengsel heeft een 28-daagse druksterkte die hoger is dan van zandcement en iets lager van die van ongewapend beton,
- uitgangspunt is dat de nabehandeling (bescherming tegen vochtverlies) zeer zorgvuldig is.

### **Mechanisme van scheurvorming in een gestabiliseerde laag**

#### **Verkorting in langsrichting (krimp, temperatuurkrimp)**

Inherent aan cementgebonden bouwstoffen is de uitdrogingskrimp, die in het algemeen de chemische krimp (door het hydratatieproces van cement met water) verre overtreft. Daarom mag het effect van de chemische krimp voor de wegbouwkundige toepassing van het immobilisaat als verwaarloosbaar klein worden beschouwd. Van het stabilisatiemengsel is de eindkrimp ca. 0.3 – 0.4 promille. In een stabilisatielaag kan ook nog verkorting optreden door temperaturdaling.

Onder winterse omstandigheden kan de verkorting – bij een aanlegtemperatuur van gemiddeld 20°C – naar schatting ten hoogste  $10 \times 20 = 200 \times 10^{-6} = 0.000200 \times 1000 = 0.2$  promille zijn. Deze verkorting kan de ingekerfde fundering gemakkelijk opnemen.

De stabilisatielaag wordt in situ gerealiseerd. Omdat de verkorting van de funderingslaag deels zal worden verhinderd (door wrijving met de ondergrond), ontwikkelen zich hierin trekspanningen. Het al dan niet optreden van scheurvorming, hangt in belangrijke mate af van de breukrek van de bouwstof. Zo is de breukrek van zandcement ca. 0.10-0.15 promille en van beton ongeveer 0.10 - 0.20 promille.

Voor de stabilisatielaag zijn de gunstige effecten:

- de verkorting neemt slechts langzaam toe (door krimp en thermische verkorting) en wordt daarbij vervormingsgestuurd opgelegd. Zo krijgt het materiaal tijd om te relaxeren en daarmee scheurvorming te voorkomen.
- het grove toeslagmateriaal bestaat deels uit (relatief slap) asfaltgranulaat: daarmee heeft de stabilisatielaag een relatief lage E-modulus wat de trekspanningen bij opgelegde vervorming reduceert, zonder de breukrek te doen verminderen. Overigens blijkt bij zandcement een toenemend cementgehalte niet te leiden tot een lagere breukrek.
- voortgaande binding (puzzolane werking van vliegashoudend cement en vrije kalk) zal aanvankelijk de druksterkte significant verhogen (tot ca. 90-180 dagen na aanleg) wat zal kunnen leiden tot een verminderde krimpvervorming.

### **Buigvervorming door gradiënten (krimp, temperatuur)**

Gradiënten door uitdrogingskrimp treden alleen op kort na aanleg: dit leidt tot buigtrekspanningen aan de bovenzijde van de fundering. Het is daarom van groot belang de funderingslaag direct na aanleg te beschermen tegen vochtverlies.

De funderingslaag kan ook een temperatuurgradiënt over de laagdikte ondervinden door zoninstraling op de asfaltdeklaag. Dit zou leiden tot opbolling van de funderingsplaat maar deze wordt in voldoende mate tegengewerkt door het eigen gewicht van de ca. 345 mm dikke stabilisatielaag. Daardoor ondervindt de laag aan de onderzijde buigtrekspanningen.

Door de kerfafstand te beperken tot ten hoogste 4.0 m zal de verhinderde krimpvervorming leiden tot lokale scheurvorming. Het is aannemelijk dat ca. 25% van de eindkrimp zich uit als scheuren in de kerven. Uiteraard treedt er bij deze krimpvervorming ook microscheurvorming op in het funderingsmateriaal tussen de kerven. Bij voldoende wrijving tussen fundering en onderlaag zal dan de scheurwijdte ca.  $0.1 \times 10^{-3} \times 4.000 = 0.4$  mm zijn. Bij een gelijkmatige temperatuurverlaging van 10°C is verondersteld dat 25% van de thermische verkorting zich 'uit' in de kerf. Dan wordt de totale scheurwijdte ca.  $0.4 + 0.25 \times 10 \times 10^{-6} \times 10 \times 4.000 = 0.4 + 0.1 = 0.5$  mm. Als na enige tijd de hygrische krimp grotendeels heeft plaatsgevonden zal de variatie in scheurwijdte in de kerf beperkt blijven tot ca. 0.1 mm (+ / -).



### **Aandrijvende krachten voor scheurreflectie vanuit de fundering naar de asfaltdeklaag**

Invloedparameters zijn: stijfheid van de funderingslaag, de asfaltdekking (niet-gescheurde asfaltdikte) en de scheurtaaiheid van het asfaltmengsel.

Naarmate de cementgebonden funderingslaag stijver is, is een dikker asfaltpakket vereist. De minimumasfaltdikte kan worden gereduceerd door inzet van een tussenlaag (vgl. Interpave). Uit constructief oogpunt is een goede hechting tussen asfalt en de onderliggende laag gunstig. Daarbij leidt een hogere stijfheid van die laag tot een kleinere trekrek in het asfalt (onderzijde asfaltlaag). Deze hechting is gerealiseerd door het aanbrengen van een kleeflaag op de funderingslaag en de scheurremmende tussenlaag.

### *3.3.3 Resumé op basis van de analyses*

Uit materiaalkundige en wegbouwkundige analyses in paragraaf 3.2 kan worden geconcludeerd:

- de uitdrogingskrimp van de cementgebonden stabilisatielaag ligt lager en de breukrek ligt hoger dan die van zandcement-mengsels met vgl. cementgehalten. De eindkrimp wordt geschat op max. 0.4 promille
- de materiaaleigenschappen en het wegbouwkundig ontwerp rechtvaardigen dat zich geen of zeer geringe scheurvorming in de stabilisatie tussen de kerfpatronen zal voordoen, mits de gemiddelde aanlegtemperatuur < 30°C is en de juiste nabehandlungsprocedures (verdichten en afwerken, beschermen tegen vochtverlies, kerven, goede wrijving fundering-ondergrond, goede hechting fundering-asfalt etc.) worden nageleefd. De applicateur van de scheurremmende tussenlaag heeft bevestigd (correspondentie van 9 nov. 2000) dat scheurvorming in het asfalt t.g.v. de voorziene verkorting van stabilisatielaag bij een juiste uitvoering van de voorgestelde maatregelen, op lange termijn nagenoeg kan worden uitgesloten.
- uit verificatieberekeningen blijkt dat de in figuur 2 gepresenteerde laagopbouw voldoet aan de gestelde wegbouwkundige eisen. Nodig is een druksterkte (proctorcilinders) van ten minste 2.3 MPa (per in situ proefstuk) na 28 dagen verharding.
- duurzaamheid van funderingsmateriaal bij herhaalde belastingen (vorst-dooi, droog-nat) wordt voldoende geacht bij een goede (en niet te fijne) korrelgradering en bij een druksterkte van ten minste 2.0 MPa, tijdens de ontwerplevensduur. Bovendien bevindt de fundering zich ruimschoots boven de grondwaterspiegel.

Verder is van belang om bij elk vooronderzoek – a.h.v. analyses van het ingangsmateriaal – te toetsen of er chemische componenten in het mengsel zijn, die kunnen leiden tot versterking van de cementbinding, zoals organische stof (bijv. fulvo- en humuszuur) en oplosbaar fosfaat. RAW proef 23.2 kan hiervoor een indicatie geven.

Voor de uitvoering van de fundering (immobilisatielaag) moeten de veiligheids- en gezondheidsrisico's in kaart zijn gebracht, via een zgn. Veiligheids- en Gezondheidsplan. Dit plan moet een beoordeling geven van de blootstellingsrisico's (arbeidshygiëne) voor de ingangsstoffen en voor de verwerking ervan tijdens de aanleg van de wegfundering.

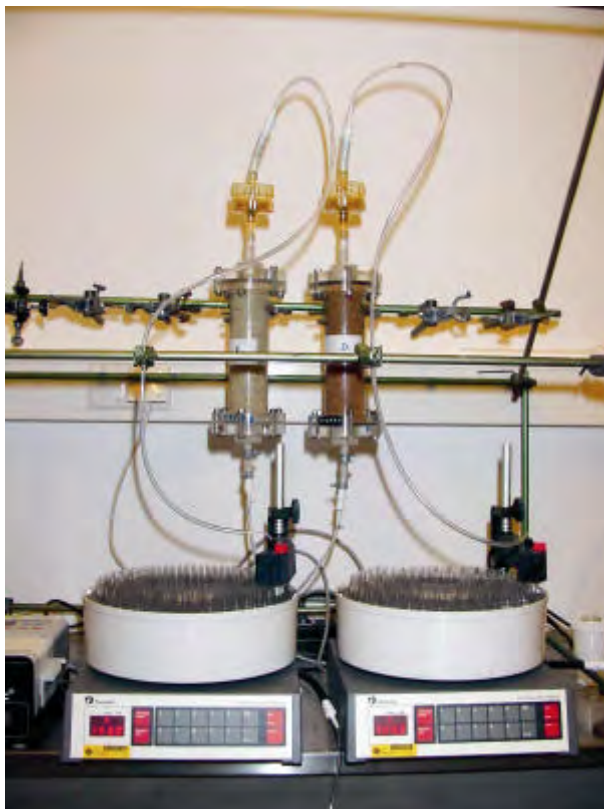
## 4 Uitloogonderzoek

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het uitloogonderzoek aan de proefstukken beschreven. De resultaten van de uitloogproeven moeten in overeenstemming zijn met de eisen uit het Bouwstoffenbesluit.

### 4.1 Uitvoering uitloogproeven

#### 4.1.1 *Uitloogproeven en het Bouwstoffenbesluit*

In het kader van het Bouwstoffenbesluit zijn twee typen uitloogproeven van belang, te weten de kolomproef en de diffusieproef. De kolomproef wordt gebruikt voor bepaling van de uitloging van niet vormgegeven bouwstoffen, terwijl de diffusieproef wordt gebruikt voor bepaling van de uitloging van vormgegeven bouwstoffen. De reden om deze twee typen materialen met verschillende uitloogproeven te testen is, dat de uitloging via verschillende mechanismen verloopt. Bij granulaire materialen zal bij toepassing in de praktijk water door het materiaal kunnen percoleren, terwijl dat bij vormgegeven materialen niet het geval zal zijn; bij vormgegeven materialen kan uitloging alleen plaatsvinden via diffusieprocessen in de poriën van de bouwstof. Dit betekent, dat bij vormgegeven materialen het effect van fysische afscherming een belangrijke



factor is in de totale uitloging. De uitloogproeven zijn in een aantal NEN-normen beschreven (NEN 7340 serie). De resultaten van de laboratorium uitloogproeven worden via in het Bouwstoffenbesluit voorgeschreven formules omgerekend naar een milieubelasting van iedere component, waarbij rekening wordt gehouden met zaken als bevochtiging, temperatuur en ook de dimensies bij de praktijktoepassing. Deze milieubelasting (immissie, I) mag de in het Bouwstoffenbesluit voorgeschreven grenswaarde (maximaal toelaatbare immissie, mti) voor geen enkele component overschrijden. Afhankelijk van het aantal onderzochte monsters uit een partij moeten hierbij zekerheidsfactoren worden gehanteerd, om er zeker van te zijn dat de proefresultaten niet door toevallige variaties onder de mti vallen.

Foto 3: *Kolomproef.*

#### 4.1.2 De kolomproef

De kolomproeven zijn uitgevoerd volgens NEN 7343. Bij de kolomproef wordt het uitgangsmateriaal door breken, malen en verdelen verkleind, waarbij een monster van  $\pm 0.5$  l met een maximale korrelgrootte van 4 mm wordt verkregen. Het aldus geprepareerde monster wordt in een kolom met een diameter van 5 cm gebracht. Door de kolom wordt in ca. 3 weken tijd met een constant debiet een hoeveelheid aangezuurd demiwater gepompt van 10 maal de massa van het monster. De vloeistof/vaste stof verhouding, oftewel de L/S verhouding, is dan dus 10 l/kg. Het demiwater is met salpeterzuur aangezuurd tot pH=4.

Het uit de kolom tredende water is in dit onderzoek in twee fracties opgevangen, namelijk bij L/S=1 en bij L/S=10 l/kg. Ten behoeve van de chemische analyses zijn de twee fracties doorgaans proportioneel gemengd. In enkele gevallen zijn de fracties echter apart geanalyseerd. De mengeluaten zijn door Iwaco geanalyseerd op de relevante componenten.

De gemeten concentraties worden voor alle componenten omgerekend naar emissiewaarden in mg/kg, dat wil zeggen de uitgeloopte hoeveelheid van een component per kg uitgangsmateriaal. Deze emissies bij L/S=10 ( $E_{L/S=10}$ ) van alle componenten vormen het uiteindelijke meetresultaat van de kolomproef. De verkregen emissiewaarden in mg/kg bij LS=10 worden omgerekend naar immissiewaarden voor een categorie 1 bouwstof bij een toepassingshoogte van 0.35 m ( $I_{cat 1, 0.35m}$ ); deze immissiewaarden worden getoetst aan de maximaal toelaatbare immissies volgens het Bouwstoffenbesluit.

#### 4.1.3 De diffusieproef

De diffusieproeven zijn binnen dit onderzoek uitgevoerd volgens NEN 7345, echter in een aantal gevallen met een aangepast tijdschema. Bij de diffusieproef wordt een intact proefstuk in een bak geplaatst, welke wordt gevuld met een bepaalde hoeveelheid vooraf met salpeterzuur aangezuurd demiwater (pH=4). Het water wordt op gezette tijden verversed en bemonsterd. De resulterende watermonsters van elke fractie worden op de te onderzoeken componenten geanalyseerd (de analyses zijn in dit geval uitgevoerd door Iwaco). Uit de resultaten van de analyses kan het uitloggedrag als functie van de tijd worden bepaald. De meetresultaten worden daartoe via een complexe, statistisch onderbouwde regressie analyse gecorrigeerd voor afwijkingen van de theoretisch verwachte tijdsafhankelijkheid van de uitloging. Het uiteindelijke resultaat van de proef is een rekenkundige emissie na 64 dagen ( $\epsilon_{64}$ ) voor iedere geanalyseerde component. Dit is de hoeveelheid van een component welke in 64 dagen uitloopt per  $m^2$  buitenoppervlak van het proefstuk, waarbij dus een correctie op de meetwaarde is toegepast. Deze rekenkundige emissie wordt gebruikt om de uitloging van de betreffende component in de praktijk voor een categorie 1 bouwstof (immissie,  $I_{cat 1}$ ) te berekenen via in het Bouwstoffenbesluit voorgeschreven formules. In dit onderzoek is veelvuldig een verkort verversingsschema toegepast ten opzichte van de voorschriften volgens NEN-7345, dit om tijd te besparen (de duur van de volledige proef is 64 dagen). De resultaten zijn geëxtrapoleerd naar 64 dagen, volgens in de norm voorgeschreven methoden. Hoewel zo'n verkorte proef niet voor een officiële keuring kan worden gebruikt, is het een goed bruikbare methode in ontwikkelingstrajecten.

## 4.2 Resultaten

### 4.2.1 Opzet onderzoek

Na de uitvoering van het karakteriseringsonderzoek op monsters vliegascement granulaat, asfaltgranulaat en zand uit het proefvak van de Noordlangeweg (N268) zijn in juli 2000 door KOAC·NPC 5 series cementgebonden proefstukken aangemaakt op basis van Portlandcement (CEM I 32.5R). In alle 5 series proefstukken zijn de verhoudingen vliegas/asfaltgranulaat/zand gelijk gehouden, en is het cementgehalte gevarieerd (4, 6, 8, 10 en 12% t.o.v. toeslag). Van iedere serie zijn 12 proctorcilinders met een diameter en hoogte van 150 mm aangemaakt, waarvan een aantal is gebruikt voor het bepalen van druksterktes. Uit enkele van deze Proctorcilinders zijn door KOAC·NPC kernen met een diameter van 100 mm geboord. De kernen zijn doormidden gezaagd tot een hoogte van  $\pm 75$  mm. De aldus vervaardigde proefstukken zijn door middel van de diffusieproeven onderzocht, waarbij telkens een bovenkant en een onderkant uit verschillende cilinders zijn gebruikt (dus twee halve cilinders in iedere diffusieproef). Op die manier zijn met de praktijk vergelijkbare monsters geprepareerd, immers ook bij keuringsonderzoek zullen kernen worden geboord uit de aangelegde fundering. Tevens zijn de monsters door reductie van de afmetingen beter hanteerbaar.

De resten van de uitgeboorde cilinders zijn gebruikt om via breken/malen/verdelen monsters voor de kolomproeven te prepareren.

Hoewel het materiaal zal worden toegepast als vormgegeven bouwstof zijn in het onderzoek behalve diffusieproeven ook kolomproeven uitgevoerd. Zoals in 4.1.1 uiteengezet dienen kolomproeven voor bepaling van de uitloging uit niet vormgegeven bouwstoffen. De reden om toch kolomproeven uit te voeren is, dat daarmee een bovengrens van de uitloging wordt verkregen, terwijl de uitvoering van kolomproeven een aanzienlijke besparing op tijd en kosten betekent ten opzichte van de diffusieproef. Dus indien de uitloging volgens kolomproeven aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit voldoet, hoeft eigenlijk geen diffusieproef meer te worden uitgevoerd. Een andere reden voor het uitvoeren van kolomproeven is, dat daarmee informatie wordt verkregen over de toepasbaarheid van het materiaal wanneer het wordt opgebroken en niet opnieuw gebonden, wat interessante informatie kan zijn voor toepassing in de tweede levensfase. Uiteraard kan het materiaal in de tweede levensfase na opbreken ook opnieuw worden gebonden met cement, zodat het altijd weer opnieuw toepasbaar zal zijn in een zelfde toepassing.

Het onderzoek is in een aantal fasen uitgevoerd. In de eerste serie experimenten zijn twee recepturen beproefd in verkorte diffusieproeven en kolomproeven. Op basis van de resultaten zijn in een tweede serie experimenten volledige diffusieproeven uitgevoerd met wederom twee recepturen, evenals extra kolomproeven. Op basis van de tussenresultaten bleek het noodzakelijk enkele extra uitloogproeven uit te voeren.

Uit de resultaten van de door de Provincie Noord-Brabant uitgevoerde partijkeuring [9] op het gestabiliseerde vliegascement, zoals dat momenteel in de weg aanwezig is, blijkt dat de componenten antimoon, molybdeen en vanadium kritisch zijn in het licht van het Bouwstoffenbesluit. In de uitloogproeven is vooral aan deze componenten aandacht besteed, evenals tin en seleen als potentieel kritische componenten.

#### 4.2.2 Eerste serie uitloogproeven

Op basis van de resultaten van de druksterkte metingen (tabel 8) zijn in eerste instantie proefstukken met 4 en 8% cement op uitloging beproefd in verkorte diffusieproeven en kolomproeven. Deze proefstukken zijn op een ouderdom van 13 dagen door KOAC·NPC uitgeboord, en op een ouderdom van 17 dagen ingezet in de uitloogproeven. De uitloogproeven zijn dus met relatief jonge proefstukken uitgevoerd (normaal is een ouderdom van 28 dagen); de reden hiervoor was een vertraging in de planning bij de aanmaak van de proefstukken. De diffusieproeven zijn uitgevoerd tot en met een tijdsduur van 25 dagen. De emissies na 64 dagen ( $E_{64}$ ) zijn bepaald door extrapoleren van de gemeten emissies, onder aanname van een diffusie gecontroleerde uitloging. De resultaten staan vermeld in tabel 9. Daarin staan zowel de emissie ( $E_{64}$ ) als de immissie ( $I_{cat1}$ ) voor de meest kritische componenten, evenals de maximaal toelaatbare immissie (mti) volgens het Bouwstoffenbesluit. De volledige gegevens van deze proeven staan in bijlage III.

Tabel 9: Resultaten eerste serie verkorte diffusieproeven.

|    | 4% cement                           |                                      | 8% cement                          |                                      | Eis Bsb<br>mti ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) |
|----|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
|    | $E_{64d}$<br>$\text{mg}/\text{m}^2$ | $I_{cat1}$<br>$\text{mg}/\text{m}^2$ | $E_{64}$<br>$\text{mg}/\text{m}^2$ | $I_{cat1}$<br>$\text{mg}/\text{m}^2$ |   |
| Sb | 0.66                                | 6.9                                  | 0.59                               | 6.2                                  | 39  |
| Se | 0-0.12                              | 1.3                                  | 0-0.12                             | 1.3                                  | 15  |
| Sn | 0-1.8                               | 19                                   | 0-1.8                              | 19                                   | 300                                       |
| V  | 12                                  | 120                                  | 9.6                                | 100                                  | 2400                                      |
| Mo | 7.7                                 | 81                                   | 3.0                                | 32                                   | 150                                       |

Uit deze resultaten blijkt dat voor alle kritische componenten de immissie  $I_{cat1}$  lager is dan de mti, en dat beide mengsels dus voldoen aan het Bouwstoffenbesluit. In tabel 10 staan de resultaten vermeld van de kolomproeven met deze mengsels.

Tabel 10: Resultaten eerste serie kolomproeven.

|    | 4% cement                            |   | 8% cement                            |   | Eis Bsb<br>mti ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) |
|----|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|---|
|    | $E_{LS=10}$<br>$\text{mg}/\text{kg}$ | $I_{cat1, h=0.35m}$<br>$\text{mg}/\text{m}^2$ | $E_{LS=10}$<br>$\text{mg}/\text{kg}$ | $I_{cat1, h=0.35m}$<br>$\text{mg}/\text{m}^2$ |   |
| Sb | 0.014                                | 0   | 0.018                                | 0   | 39  |
| Se | 0-0.018                              | 0   | 0-0.018                              | 0   | 15  |
| Sn | 0-0.030                              | 0-0.052                                       | 0-0.030                              | 0-0.013                                       | 300                                       |
| V  | 0.45                                 | 65  | 0.58                                 | 230   | 2400                                      |
| Mo | 0.75                                 | <b>340</b>                                    | 1.4                                  | <b>700</b>                                    | 150                                       |

**Vet** = overschrijding mti (norm Bsb)

Uit tabel 10 blijkt, dat de uitloging van Mo in de kolomproeven de mti uit het Bouwstoffenbesluit overschrijdt. Opvallend is dat het proefstuk met 8% cement zelfs een hogere Mo uitloging heeft dan het proefstuk met 4% cement. Vooral nog is onduidelijk of de waargenomen variatie binnen de experimentele nauwkeurigheid voor Mo valt, of dat er een andere oorzaak is voor het waargenomen gedrag; hierop wordt in hoofdstuk 4.3 teruggekomen. Opvallend is, dat ook V een hogere uitloging lijkt te hebben bij 8% cement.

#### 4.2.3 Tweede serie uitloogproeven

Op basis van de resultaten van de eerste serie proefstukken is ervoor gekozen om in de tweede serie diffusieproeven uit te gaan van proefstukken met 4% cement, aangezien deze in de diffusieproeven voldeden aan het Bouwstoffenbesluit. In deze tweede serie zijn de diffusieproeven gedurende de volledige voorgeschreven duur van 64 dagen uitgevoerd. In één van de proeven is het volledige pakket van 19 anorganische parameters volgens het Bouwstoffenbesluit geanalyseerd, terwijl in de andere proef alleen de kritische parameters zijn meegenomen. Tevens zijn twee kolomproeven uitgevoerd, waarvan één met ene proefstuk met 4% en één met 6% cement. De reden voor de keuze van 6% cement was, dat naar aanleiding van de eerste analyses van de kolomproeven bleek dat de uitloging bij 8% cement verwaarloosbaar was; de bedoeling was om uitsluitsel te krijgen of de Mo-uitloging in de kolomproef nu wel of niet afneemt met het cementgehalte. De volledige resultaten van de uitloogproeven zijn te vinden in bijlage III.

Tabel 11: Resultaten tweede serie (volledige) diffusieproeven.

|                 | 4% cement                          |                                     | 6% cement                         |                                     | Eis Bsb<br>mti (mg/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                 | E <sub>64d</sub> mg/m <sup>2</sup> | I <sub>cat1</sub> mg/m <sup>2</sup> | E <sub>64</sub> mg/m <sup>2</sup> | I <sub>cat1</sub> mg/m <sup>2</sup> |                                     |
| Sb              | 0.54                               | 5.7                                 | 0.27 *                            | 2.8                                 | 39                                  |
| Se              | 0.33                               | 3.5                                 | 0.33*                             | 3.5                                 | 15                                  |
| Sn              | 0.22                               | 2.3                                 | 0.23                              | 2.4                                 | 300                                 |
| V               | 17                                 | 180                                 | 22                                | 230                                 | 2 400                               |
| Mo              | 13                                 | 137                                 | 17                                | <b>179</b>                          | 150                                 |
| As              |                                    |                                     | 2.7                               | 28                                  | 435                                 |
| Cd              |                                    |                                     | 0.0075                            | 0.079                               | 12                                  |
| Ni              |                                    |                                     | 6.0                               | 63                                  | 525                                 |
| Cr              |                                    |                                     | 18                                | 190                                 | 1 500                               |
| Pb              |                                    |                                     | 6.0                               | 63                                  | 1 275                               |
| Cu              |                                    |                                     | 2.4                               | 25                                  | 540                                 |
| Hg              |                                    |                                     | 0.026                             | 0.27                                | 4.5                                 |
| Br              |                                    |                                     | 1.5                               | 2.5                                 | 90                                  |
| Cl              |                                    |                                     | 2 000                             | 3 400                               | 30 000                              |
| SO <sub>4</sub> |                                    |                                     | 1 300                             | 2 200                               | 45 000                              |
| F               |                                    |                                     | 3.8                               | 6.4                                 | 14 000                              |
| Zn              |                                    |                                     | 0.38                              | 4.0                                 | 2 100                               |
| Ba              |                                    |                                     | 52                                | 550                                 | 6 300                               |
| Co              |                                    |                                     | 0.23                              | 2.4                                 | 300                                 |

**Vet** = overschrijding mti (norm Bsb)

Opvallend is, dat de resultaten van de diffusieproeven aantonen dat de uitloging van Mo kritisch is t.o.v. de eis uit het Bouwstoffenbesluit. Dit is in tegenspraak met de resultaten van de eerdere (verkorte) diffusieproeven (zie tabel 11); de uitloging lijkt een factor 2 hoger te liggen. De uitloging van de overige componenten uit het Bouwstoffenbesluit ligt ruim onder de uitloogeisen (mti).

De resultaten van de kolomproeven staan vermeld in tabel 12. Hieruit blijkt dat niet alleen de uitloging van Mo maar ook van Se de Bsb-eis overschrijden. De overschrijding van Mo is een factor 3 à 4 maal de norm. De uitloging lijkt wat lager bij 6% dan bij 4% cement, echter waarschijnlijk is dit het gevolg van experimentele variaties en kan worden gesteld dat de uitloging vrijwel even hoog is.

Tabel 12: Resultaten tweede serie kolomproeven.

| Component       | 4% cement                   |   | 6% cement                   |   | Eis Bsb<br>mti (mg/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-------------------------------------|
|                 | E <sub>LS=10</sub><br>mg/kg | I <sub>cat1, h=0.35m</sub><br>mg/m <sup>2</sup> | E <sub>LS=10</sub><br>mg/kg | I <sub>cat1, h=0.35m</sub><br>mg/m <sup>2</sup> |                                     |
| Sb              | 0.024                       | 3.3   | 0.019                       | 0   | 39                                  |
| As              | 0-0.020                     | 0   |                             |   | 435                                 |
| Ba              | 1.4                         | 350   |                             |   | 6 300                               |
| Cd              | 0-0.0010                    | 0   |                             |   | 12                                  |
| Cr              | 1.8                         | 1 100   |                             |   | 1 500                               |
| Co              | 0-0.030                     | 0   |                             |   | 300                                 |
| Cu              | 0.073                       | 0   |                             |   | 540                                 |
| Hg              | 0.00047                     | 0   |                             |   | 4.5                                 |
| Pb              | 0-0.050                     | 0   |                             |   | 1 275                               |
| Mo              | 1.1                         | <b>530</b>                                      | 0.92                        | <b>430</b>                                      | 150                                 |
| Ni              | 0-0.050                     | 0   |                             |   | 525                                 |
| Se              | 0.10                        | <b>39</b>                                       | 0.10                        | <b>39</b>                                       | 15                                  |
| Sn              | 0-0.030                     | 0-0.025   | 0-0.030                     | 0-0.079   | 300                                 |
| V               | 1.2                         | 1 000   | 0.85                        | 580   | 2 400                               |
| Zn              | 0-0.050                     | 0   |                             |   | 2 100                               |
| Br              | 0-0.20                      | 0   |                             |   | 90                                  |
| Cl              | 130                         | 12 000  |                             |   | 30 000                              |
| F               | 2.6                         | 670   |                             |   | 14 000                              |
| SO <sub>4</sub> | 430                         | 29 000  |                             |   | 45 000                              |

**Vet** = overschrijding mti (norm Bsb)

#### 4.2.4 Derde serie uitloogproeven

Vanwege de tegenvallende resultaten met betrekking tot de Mo-uitloging is besloten een derde proef uit te voeren met een proefstuk met 6% cement, gebaseerd op de verwachting dat de uitloging van Mo af zou nemen ten gevolge van het hogere cementgehalte wat immers tot een dichtere structuur van het proefstuk leidt. De resultaten staan vermeld in tabel 13.

Tabel 13: Resultaten derde diffusieproef.

|    | 6% cement                   |                              | Eis Bsb                  |
|----|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
|    | $E_{64d}$ mg/m <sup>2</sup> | $I_{cat1}$ mg/m <sup>2</sup> | mti (mg/m <sup>2</sup> ) |
| Se | 0.57                        | 6.4                          | 15                       |
| V  | 21.9                        | 231                          | 2400                     |
| Mo | 15.1                        | <b>158</b>                   | 150                      |

**Vet** = overschrijding mti (norm Bsb)

Uit tabel 13 blijkt wederom een (zij het een geringe) overschrijding van de uitloging van Mo.

Tevens lijkt de uitloging van Se behoorlijk hoger dan in de eerdere proeven.

Vanwege de onverwachte en tegenvallende resultaten met betrekking tot de uitloging van vooral Mo zijn de gegevens van de proeven aan een nadere analyse onderworpen. Deze wordt nader uitgewerkt in paragraaf 4.3.

### 4.3 Verklaring uitlooggedrag molybdeen

#### 4.3.1 Probleemschets

In het kader van het onderzoek naar de immobilisatie van vliegascement zijn proefstukken vervaardigd uit granulaat van vliegascement, asfaltgranulaat en zand, waarbij het cementgehalte is gevarieerd. Een aantal proefstukken is in diffusieproeven onderzocht op uitloging. Uit de resultaten blijkt dat de uitloging van molybdeen (en tevens van enkele andere componenten) niet eenduidig is gecorreleerd aan het cementgehalte. In de eerste serie (verkorte) diffusieproeven is bij cementgehalten van 4% en 8% een tamelijk lage molybdeen uitloging gemeten, waarbij het proefstuk met 8% cement een aanzienlijk lagere molybdeen uitloging liet zien dan het proefstuk met 4%. In een tweede serie (volledige) diffusieproeven met mengsels met 4% cement was de molybdeen uitloging aanzienlijk hoger dan in de eerste proeven. De gemiddelde molybdeen uitloging kwam zelfs hoger uit dan de maximaal toelaatbare uitloging (mti) volgens het Bouwstoffenbesluit. In de derde (volledige) diffusieproef met 6% cement was de uitloging van molybdeen vrijwel even hoog als in de diffusieproeven met 4% cement. De resultaten zijn (omgerekend naar immissies) samengevat in tabel 14. Ter illustratie zijn daarin tevens de immissies voor V, Sb, Se en Sn gegeven.



Tabel 14: Resultaten diffusieproeven.

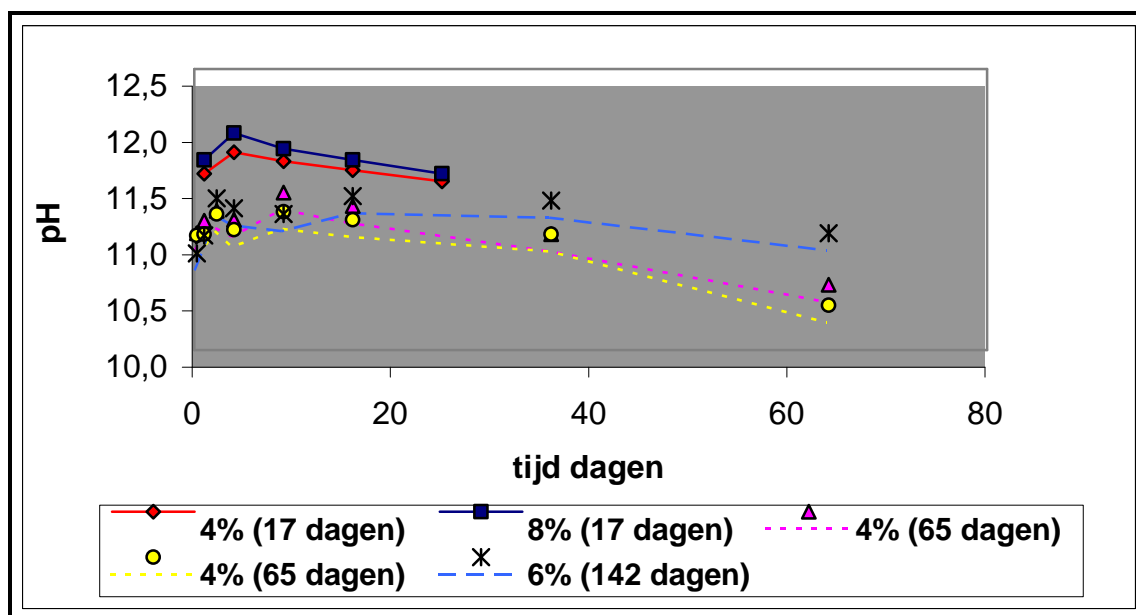
|                             | Cement<br>gehalte | Immissie mg/m <sup>2</sup> |      |     |      |     |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|------|-----|------|-----|
|                             |                   | Mo                         | V    | Sb  | Se   | Sn  |
| 1 <sup>e</sup> serie (aug)  | 4%                | 74                         | 130  | 6.9 | <1.3 | <19 |
|                             | 8%                | 34                         | 102  | 6.2 | <1.3 | <19 |
| 2 <sup>e</sup> serie (sept) | 4%                | 137                        | 179  | 5.7 | 2.3  | <19 |
|                             | 4%                | 179                        | 231  | 4.1 | 3.5  | <18 |
| 3 <sup>e</sup> serie (dec)  | 6%                | 158                        | 231  | NA  | 6.4  | NA  |
| mti volgens Bsb             |                   | 150                        | 2400 | 3.9 | 15   | 300 |

#### 4.3.2 Analyse

De proefstukken welke in de diffusieproeven zijn onderzocht, waren tegelijk aangemaakt maar op verschillende momenten in de diffusieproeven ingezet:

|                      |             |                                |
|----------------------|-------------|--------------------------------|
| 1 <sup>e</sup> serie | (4% en 8%)  | ingezet na 17 dagen verharden  |
| 2 <sup>e</sup> serie | (2 maal 4%) | ingezet na 65 dagen verharden  |
| 3 <sup>e</sup> serie | (6%)        | ingezet na 142 dagen verharden |

Uit de resultaten, gepresenteerd in tabel 14 lijkt te volgen dat de uitloging van molybdeen, vanadium en seleen toeneemt naarmate de proefstukken ouder worden. Om hiervoor een verklaring te vinden zijn de in de diffusieproeven gemeten pH's met elkaar vergeleken. De pH's zijn grafisch weergegeven in figuur 5.



Figuur 5: Gemeten pH-profielen in de diffusieproeven.

Uit figuur 5 blijkt duidelijk, dat in de eerste serie proeven de pH een halve tot een hele pH-eenheid hoger was dan in de latere proeven. De meest waarschijnlijke verklaring voor de pH-daling in de tijd is, dat er voortgaande reacties plaatsvinden tussen cement en vliegias.

Dit wordt veroorzaakt doordat het vliegias puzzolaan is, en dus kan reageren met calciumhydroxide dat bij de hydratatie van cement vrijkomt. Dit komt tot uitdrukking in de toename van de druksterkte in de periode na 28 dagen uitharden (zie tabel 8); bij 4% cement vindt een toename plaats van 3.9 naar 5.2 MPa tussen 28 en 91 dagen.

Behalve door de reactie van vliegias met calciumhydroxide kan er ook een pH-daling plaatsvinden door het optreden van carbonatatiereacties. In de praktijktoepassing zal het effect van carbonatatie gering zijn, maar in de labproefstukken zal er wel degelijk een zekere mate van carbonatatie op kunnen treden, omdat de proefstukken welke in de latere series zijn ingezet niet in de klimaatkamer zijn bewaard.

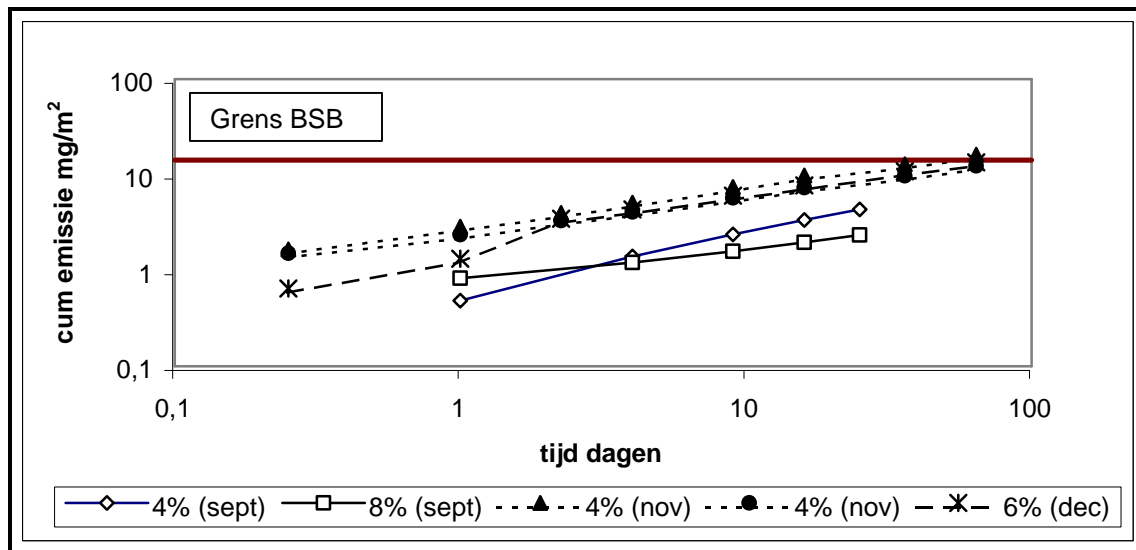
In de latere proeven blijkt het proefstuk met 6% cement (serie december) aan het eind flink hogere pH's te vertonen dan de proefstukken met 4% cement (serie september); dit komt door het hogere cementgehalte.

Door de reactie van het vliegias met calciumhydroxide wordt zowel de pH als de calciumconcentratie verlaagd, waardoor de oplosbaarheid van molybdeen toeneemt. Hiervoor zijn twee mogelijke oorzaken (zie bijvoorbeeld referentie 4): enerzijds zal meer calciummolybdaat in oplossing kunnen gaan door de lagere calciumconcentratie. Het in oplossing gaan van calciummolybdaat is namelijk een evenwichtsreactie, waarbij het product van de calcium- en molybdaatconcentratie constant is. Anderzijds zal door de verlaagde pH het mineraal ettringiet gedeeltelijk worden afgebroken. Molybdeen kan door gedeeltelijke vervanging van sulfaat in ettringiet gebonden zijn, dus wanneer ettringiet wordt afgebroken kan molybdeen vrijkomen. Deze verklaring wordt gestaafd door de gemeten uitloging van vanadium en seleen, welke een zelfde soort afhankelijkheid van de pH vertonen als molybdeen. Mogelijk zijn ook vanadium (cq vanadaat) en seleen (cq selenaat) gedeeltelijk gebonden in gesubstitueerde ettringiet fasen. Ook dit is bekend uit de literatuur (zie o.a. referenties 4, 5).

De conclusie is, dat door veroudering van de proefstukken de uitloogbaarheid van molybdeen is toegenomen. Dit heeft een chemische oorzaak, namelijk een daling van de pH. Dit effect is kennelijk sterker dan de toename van de tortuositeit (een maat voor de ondoordringbaarheid) van het proefstuk met 6% cement t.o.v. het proefstuk met 4% cement.

Het is op grond hiervan waarschijnlijk dat bij proefstukken van gelijke ouderdom de molybdeen uitloging afneemt bij een toename van het cementgehalte.

Tenslotte worden ter illustratie de rekenkundige molybdeen emissies, welke zijn gemeten in de proeven, weergegeven in figuur 6. Hieruit valt op te maken dat de lagere emissies in de eerste proeven niet het gevolg zijn van de extrapolatiemethodiek van de verkorte proeven; de concentraties in de eluaten zijn over de hele linie lager.



Figuur 6: Rekenkundige emissies molybdeen in diffusieproeven.

#### 4.3.3 Oplossingsrichtingen

Op grond van het bovenstaande is het aannemelijk, dat proefstukken met 6% cement bij een ouderdom van (ongeveer!) 28 dagen aan de uitlooeisen van het Bouwstoffenbesluit zullen voldoen. Immers, de uitloging zal lager zijn dan het onderzochte oudere proefstuk, welke net niet voldeed.

Door het toevoegen van kalk aan het immobilisaat kan de molybdeen uitloging omlaag worden gebracht. Hierdoor worden immers zowel de pH als de calciumconcentratie verhoogd. Dit betekent echter wel de toevoeging van een extra ingrediënt, die de productie van de bouwstof (mix-in-place) compliceert.

Een simpeler methode om de uitloging te verlagen is het toepassen van een verhoogd cementgehalte. Aangezien 6% cement net niet voldoende is, zal een gehalte van 8% cement wel voldoende zijn om aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit te voldoen. Om deze stelling te onderbouwen / verifiëren is het gewenst extra diffusieproeven uit te voeren met proefstukken met 8% cement en van 28 dagen oud.

#### 4.3.4 Extra diffusieproeven

Op basis van de analyse van de uitloging van Mo is besloten extra diffusieproeven (duplo's) uit te voeren met proefstukken met 8% cement, en van 28 dagen oud. De resultaten van deze proeven staan in tabel 15.

Tabel 15: Resultaten extra diffusieproeven, proefstukken met 8% cement.

|          | 8% cement – proefstuk A               |  | 8% cement – proefstuk B               |  | Eis Bsb mti (mg/m <sup>2</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|----------------------------------|
|          | E <sub>64d</sub> (mg/m <sup>2</sup> ) | I <sub>cat1</sub> (mg/m <sup>2</sup> ) | E <sub>64d</sub> (mg/m <sup>2</sup> ) | I <sub>cat1</sub> (mg/m <sup>2</sup> ) |                                  |
| Se       | 0.22                                  | 2.3                                    | 0.25                                  | 2.6                                    | 15                               |
| V        | 12                                    | 130                                    | 13                                    | 140                                    | 2400                             |
| Mo       | 7.4                                   | 78                                     | 5.5                                   | 58                                     | 150                              |
| pH-range | 11.3-11.7                             | -                                      | 11.4-11.7                             | -                                      | -                                |

De uitloging blijkt ruimschoots te voldoen aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit. De pH ligt in dezelfde ordegrootte als tijdens de eerste serie. Hiermee is het probleem van de molybdeen-uitloging dus opgelost.

#### 4.3.5 Nadere analyse kolomproeven

In tabel 16 staan de resultaten van de kolomproeven vermeld (in termen van de gemeten emissies). Hierbij staan tevens de pH-waarden vermeld. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van de kolomproeven ten behoeve van het keuringsonderzoek op het uitgangsmateriaal vermeld.

Tabel 16: Resultaten kolomproeven.

|                             | Cement gehalte | pH   |       | E <sub>LS=10</sub> mg/kg |      |       |         |        |
|-----------------------------|----------------|------|-------|--------------------------|------|-------|---------|--------|
|                             |                | LS=1 | LS=10 | Mo                       | V    | Sb    | Se      | Sn     |
| 1 <sup>e</sup> serie (aug)  | 4%             | 12.5 | 12.0  | 0.75                     | 0.45 | 0.014 | 0-0.018 | 0-0.03 |
|                             | 8%             | 12.2 | 11.9  | 1.4                      | 0.58 | 0.018 | 0-0.018 | 0-0.03 |
| 2 <sup>e</sup> serie (sept) | 4%             | NA   | 11.7  | 1.1                      | 1.2  | 0.024 | 0.10    | 0-0.03 |
|                             | 6%             | NA   | 11.8  | 0.92                     | 0.85 | 0.019 | 0.10    | 0-0.03 |
| 61.2 - 64.2                 | -              | 11.0 | 11.1  | 0.46                     | 3.4  | 0.086 | 0.024   | 0-0.20 |
| 65.2 - 68.2                 | -              | 10.1 | 11.2  | 0.78                     | 4.3  | 0.19  | 0.037   | 0-0.20 |
| 69.2 - 72.2                 | -              | 11.0 | 11.6  | 0.93                     | 3.2  | 0.10  | 0.060   | 0-0.20 |

Bij de cementgebonden producten ligt de pH met waarden rond de 12 hoger dan in de diffusieproeven.

De variatie in de pH is beduidend minder dan in de diffusieproeven, waardoor de verschillen in uitloging in de kolomproeven kleiner zijn. De reden voor de geringere verschillen is dat het materiaal gemalen is, en dus een groot contactoppervlak heeft. Daardoor kan het beter in evenwicht komen met het uitloogwater.

Opmerkelijk is overigens dat de pH bij de cementgebonden materialen (serie 1) gaande van LS=1 naar LS=10 lijkt te dalen. Dit zou kunnen wijzen op de voortgaande reactie tussen vliegashoudend cement en cement.

De uitloging Mo uit de cementgebonden producten is van dezelfde orde grootte als van het oorspronkelijke materiaal. Dit is opmerkelijk, daar de pH in het oorspronkelijke materiaal bijna een volle eenheid lager is. Bedacht moet worden dat het effect van de pH op de uitloging van molybdeen zich voordoet bij cementgebonden materialen. Dit kan een aanwijzing zijn voor de hypothese, dat het molybdeen in cementgebonden materialen wordt opgenomen in het mineraal ettringiet, wat bij lagere pH instabiel wordt.

Wel lijkt de uitloging van V en Sb toe te nemen bij daling van de pH.

Opgemerkt wordt dat anno 2004 voornemens bestaan om de uitloogeis voor molybdeen te verruimen. Dit betekent dat in vergelijkbare gevallen met lagere cementgehalten kan worden gewerkt.

## 5 Aanleg demonstratieproject

### 5.1 Aanleg algemeen

Tijdens de aanleg zijn door de combinatie met de aannemers Wegenbouwmij J. Heijmans B.V., Koninklijke Wegenbouw Stevin B.V., BAM-NBM Wegenbouw Zuid B.V. en Rasenberg Wegenbouw B.V. en de onderaannemers Reproad (voor het frezen, mengen en stabiliseren) en Dura Vermeer B.V. (voor het leveren en aanbrengen van de Interpave), en door KOAC·NPC onderzoeken uitgevoerd. Deze onderzoeken waren nodig om vast te stellen of het geproduceerde mengsel in overeenstemming is met het uitgevoerde laboratorium onderzoek.

Allereerst werd de bestaande constructie gefreesd. Dit werd als volgt uitgevoerd:

- Als eerste werd de deklaag van het asfalt weggefreed. Hierbij werd vermeden dat er teerhoudend materiaal uit de eronder liggende laag werd meegefreed. Het granulaat werd tijdelijk in depot geplaatst.
- Vervolgens werd de teerhoudende tweede laag gefreesd. Omdat dit materiaal niet meer mag worden hergebruikt in het kader van de huidige wet- en regelgeving werd dit materiaal afgevoerd naar een be- en verwerkingsinrichting voor de verwijdering van teer (PAK) uit de keten.
- De twee onderlagen van het asfalt werden ter plaatse gefreesd. Vervolgens werd hierop het granulaat van de bovenlaag uitgespreid en het geheel, inclusief de bestaande vliegascementstabilisatie en 30 mm. van het zandbed, doorgefreed.



- Het materiaal werd vervolgens verdicht met een dynamische trilwals. De laatste walsgang was statisch. Daarna werd in één gang het cement uitgespreid en gemengd. Vervolgens werd het materiaal met een dynamische wals verdicht en geprofileerd. Het kerven van de stabilisatie werd daarna uitgevoerd, rekening houdend dat de stabilisatie nog niet verhard was. Voor het verkrijgen van een goede verdichting en het voorkomen van uitdroging werd regelmatig water gesproeid gedurende twee etmalen, zie ook paragraaf 3.3.

Foto 4: Freesmachine en doseerplaat

## 5.2 Onderzoeksresultaten

Navolgend zijn de gemiddelde onderzoeksresultaten gegeven. Voor de volledige onderzoeksresultaten, individueel en per vak, wordt naar Bijlage 4 verwezen.

### 5.2.1 Korrelverdeling

Bij de monsterneming van het materiaal, benodigd voor het vooronderzoek, is speciaal gelet op de representativiteit. Omdat de machine voor het frezen van de constructie in het werk, bij aanleg, afweek van de machine voor het frezen voor het verkrijgen van monstermateriaal, werd de korrelverdeling vastgesteld van het gefreesde materiaal. Deze korrelverdeling werd vergeleken met de korrelverdeling verkregen bij het vooronderzoek. Een correctie van het benodigde cementgehalte als gevolg van een afwijkende korrelverdeling was hierdoor mogelijk maar niet noodzakelijk. De korrelverdeling van het materiaal in de baan voldeed aan de gestelde RAW-eisen.

Tabel 17: Korrelverdeling.

| <b>Korrelverdeling granulaat (zonder cement) in %(m/m)</b> |                               |                                      |                           |
|--|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| <b>Op zeef<br/>NEN 2560</b>                                | <b>Aanleg<br/>(gemiddeld)</b> | <b>Vooronderzoek<br/>(gemiddeld)</b> | <b>Eis<br/>(RAW 2000)</b> |
| C 63   | 2.7                           | 0.0                                  | 0.0                       |
| C 45   | 10.9                          | 0.0                                  | 0.0 – 10.0                |
| C 16   | 28.5                          | 15.2                                 | 10.0 – 40.0               |
| C 4  | 57.1                          | 61.5                                 | 40.0 – 65.0               |
| 2 mm   | 59.4                          | 70.3                                 | 50.0 – 75.0               |
| 63 µm  | 91.9                          | 93.3                                 | 92.0 – 100.0              |
| < 63 µm  | 8.1                           | 6.7                                  | 0.0 – 8.0                 |

### 5.2.2 Vochtgehalte

Het vochtgehalte van het gefreesde materiaal werd bepaald om vast te stellen of het in die hoedanigheid goed te verdichten was. Een te hoog vochtgehalte zou kunnen leiden tot verweking en er zouden daardoor problemen met de verdichting kunnen opleveren. Indien nodig zou het een en ander kunnen worden bijgesteld.

Tabel 18: Vochtgehalte.

| <b>Bepaling van het vochtgehalte in %(m/m)</b> |      |
|--|------|
| Gemiddeld                                      | 13.9 |

Het vochtgehalte is voldoende hoog voor het verkrijgen van een goede verdichting. Het vochtgehalte is enigszins hoger dan het optimum vochtgehalte uit het vooronderzoek. Het optimum vochtgehalte bedroeg 12.0%(m/m). Dit verschil wordt veroorzaakt door het feit dat de vliegascement in de baan meer tijd heeft gekregen vocht te absorberen dan het materiaal op het laboratorium. De plasticiteit (verwerkbaarheid) was gelijk bij een verschil in vochtgehalte.

Ter voorkoming van uitdroging tijdens de uitvoering, de gemiddelde etmaal temperatuur was 25-30°C, werd water over de al verdichte fundering gesproeid. Het water werd met behulp van een mesttank gedoseerd. Het doseren is met behulp van de gekozen methode enigszins ongecontroleerd. Er ontstonden plassen water op de fundering. Overtollig water liep op een aantal plaatsen van de baan in de berm. Nadelige invloeden van dit overtollige water zijn er niet



behoudens dat aan de zijkanten in de fundering enige verweking optrad en de fundering kwetsbaar is voor mechanische beschadiging bij dwarskerving door het gebruik van een mobiele kraan. Een zeer belangrijk voordeel is dat uitdroging en daardoor ongecontroleerde scheurvorming werd voorkomen.

Foto 5: *Bevochtigen*

### 5.2.3 Cementgehalte

In het vooronderzoek werd het gewenste cementgehalte vastgesteld op 7%(m/m). Omdat het cementgehalte milieuhygiënisch van zeer groot belang is voor de immobilisatie, werd de cementdosering tijdens de aanleg regelmatig gecontroleerd. Hiertoe werd een metalen plaat met opstaande rand, met een bekend oppervlak, onder de freesmachine geplaatst. Het cement werd gedoseerd (uitgespreid). De hoeveelheid cement op de plaat werd gewogen en vergeleken met de gewenste hoeveelheid.

Tabel 19: *Cementgehalte.*

| <b>Gedoseerd cementgehalte</b> |  |
|--------------------------------|--|
|                                | <b>Cementgehalte in kg/m<sup>2</sup></b> |
| Gemiddelde                     | 43.2                                     |
| Vereiste cementgehalte         | 40.0                                     |

Er is slechts een gering aantal metingen uitgevoerd. Op basis hiervan kan worden vastgesteld dat de spreiding groot is maar het gemiddelde voldeed aan de minimaal te doseren hoeveelheid.





Foto 6: *Bepaling cementgehalte met de doseerplaat.*

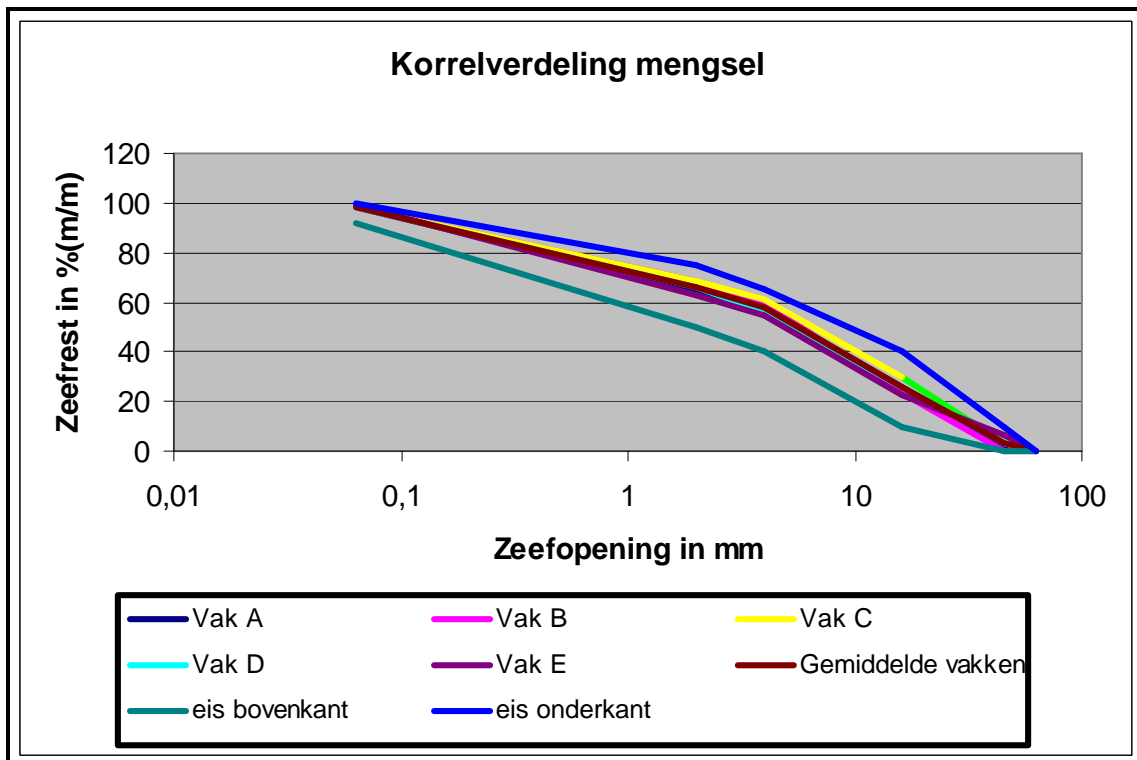
#### 5.2.4 Korrelverdeling

De korrelverdeling van het granulaire mengsel was al gecontroleerd. Omdat er voor het doormengen van het cement met het granulair mengsel nogmaals een freesgang noodzakelijk was, waardoor er een verdere verfijning van het granulaat tot de mogelijkheden behoorde, werd de korrelverdeling nogmaals vastgesteld.

Tabel 20: *Korrelverdeling in situ.*

| Korrelverdeling mengsel (met cement) in %(m/m) |                     |                     |
|--|---------------------|---------------------|
| Op zeef NEN 2560                               | Gemiddelde (aanleg) | Eis (zonder cement) |
| C 63   | 0.0                 | 0.0                 |
| C 45   | 3.0                 | 0.0 – 10.0          |
| C 16   | 25.4                | 10.0 – 40.0         |
| C 4  | 57.9                | 40.0 – 65.0         |
| 2 mm   | 66.1                | 50.0 – 75.0         |
| 63 µm  | 98.3                | 92.0 – 100.0        |
| < 63 µm  | 1.7                 | 0.0 – 8.0           |

Het doorfrozen van het cement heeft nauwelijks invloed gehad op de gradering van het mengsel. Opvallend is dat er zelfs een minder fijne gradering werd gevonden. De al begonnen hydratatie (binding) is hiervan zeer waarschijnlijk de oorzaak.



Figuur 7: Korrelverdeling mengsel

### 5.2.5 Mengkwaliteit

Het doormengen van het cement met het granulaire mengsel werd in situ uitgevoerd. Omdat de mengkwaliteit belangrijk is voor het verkrijgen van een homogeen mengsel, is besloten hierop een controle uit te voeren.

De mengkwaliteit kan als volgt worden gecontroleerd. Er worden monsters van het mengsel na doormenging van het cement genomen. Ieder monster wordt in tweeën gesplitst. Van het ene deel van het monster worden twee proefstukken vervaardigd. Het andere deel van het monster wordt op het laboratorium nagemengd waarna hiervan eveneens twee proefstukken werden vervaardigd. Van alle vervaardigde proefstukken wordt na 28 dagen verhard de druksterkte vastgesteld. De druksterkte van het nagemengde mengsel werd vergeleken met de druksterkte van het niet-nagemengde mengsel en uitgedrukt in een percentage waarbij de nagemengde monsters op 100% worden gesteld.

Indien de druksterkte van de 'nagemengde' proefstukken significant hoger is dan de druksterkte van de niet nagemengde monsters, zou dit een teken zijn dat de mengkwaliteit onvoldoende was. Dit zou leiden tot een percentage van minder dan 100%.

Een ongeveer gelijke druksterkte van de 'nagemengde' proefstukken ten opzichte van de niet 'nagemengde' proefstukken betekent een goed gemengd product in situ. Dit leidt tot een percentage van omstreeks 100%.

Tabel 21: Mengkwaliteit.

| <b>Mengkwaliteit</b> |    |
|----------------------|----|
| Gemiddeld            | 95 |

Een gemiddelde mengkwaliteit van 95% is goed. Het resultaat van vak D, een mengkwaliteit van 80%, en vak B, een mengkwaliteit van 86%, is duidelijk onder het gemiddelde en onvoldoende. In de voorschriften zijn geen eisen opgenomen voor deze eigenschap. Het onderzoek is uitgevoerd om een indruk van de mengkwaliteit te verkrijgen. Echter de druksterkten in de baan voldeden aan de gestelde eisen. Ook is het materiaal voldoende geïmmobiliseerd omdat er werd voldaan aan de gestelde eisen in het Bouwstoffenbesluit.

### 5.2.6 Verdichtingsgraad

Het benodigde gehalte aan cement werd in het vooronderzoek vastgesteld bij 100% verdichtingsgraad ten opzichte van de verzwaarde proctordichtheid. Omdat het benodigde cementgehalte onder andere afhankelijk is van de verdichtingsgraad, werden hiertoe in het werk controles uitgevoerd. De dichtheid in situ werd vastgesteld door middel van de zandvervangingsmethode en de nucleaire meetmethode. De dichtheid in situ werd gerelateerd aan de éénpuntsproctordichtheid waardoor een indruk werd verkregen van de verdichtingsgraad. De nucleaire methode werkt veel sneller dan de zandvervangingsmethode.

Tabel 22: Verdichtingsgraad d.m.v. nucleaire meting.

| <b>Verdichtingsgraad d.m.v. nucleaire meting</b> |  |                                       |  |                               |
|--|--|---------------------------------------|--|-------------------------------|
|  | <b>Droge dichtheid in situ in kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Vochtgehalte in situ in %(m/m)</b> | <b>Droge referentiedichtheid in kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Verdichtingsgraad in %</b> |
| Gemiddeld  | 1598   | 15.1                                  | 1619   | 99                            |

Tabel 23: Verdichtingsgraad d.m.v. zandvervangingsmethode.

| <b>Verdichtingsgraad d.m.v. zandvervangingsmethode</b> |  |                                       |  |                               |
|--|--|---------------------------------------|--|-------------------------------|
|  | <b>Droge dichtheid in situ in kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Vochtgehalte in situ in %(m/m)</b> | <b>Droge referentiedichtheid in kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Verdichtingsgraad in %</b> |
| Gemiddeld  | 1580   | 15.1                                  | 1619   | 97                            |

Tabel 24: Éénpuntsproctordichtheid.

| <b>Éénpuntsproctordichtheid (referentiedichtheid) in kg/m<sup>3</sup></b> |  |                               |
|---|--|-------------------------------|
|   | <b>Droge dichtheid in kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Vochtgehalte in %(m/m)</b> |
| Gemiddeld   | 1619                                       | 15.1                          |

De verdichtingsgraad, verkregen met behulp van de nucleaire meetmethode, is gemiddeld van een iets hoger niveau dan de verdichtingsgraad verkregen met de zandvervangingsmethode.

In de Standaard RAW 2000 worden eisen gesteld aan de verdichtingsgraad voor gebonden funderingen (asfaltgranulaatcement). Voor verhardingslagen van steenmengsels worden er bij een oppervlakte van groter dan of gelijk aan 3.000 m<sup>2</sup> de volgende eisen gesteld:

- per monster minimaal 98%
- gemiddeld minimaal 102%

Deze verdichtingsgraden zijn berekend ten opzichte van een 'normale' proctordichtheid.

De in tabel 22 en 23 genoemde verdichtingsgraden zijn berekend ten opzichte van een 'verzwaarde' proctordichtheid. Verdichtingsgraden berekend ten opzichte van een 'verzwaarde' proctordichtheid zijn lager dan verdichtingsgraden berekend ten opzichte van een 'normale' proctordichtheid. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verdichtingsgraden in het werk zeer waarschijnlijk voldoende zijn.

Gezien het hoge cementgehalte zal toch ruim aan de gestelde sterkte eis worden voldaan. De invloed van de verdichtingsgraad op het uitlooggedrag is verwaarloosbaar omdat het uitlooggedrag van een monster vooral wordt bepaald door de zuurgraad (pH) en in mindere mate door de dichtheid en/of sterkte.

Het vochtgehalte is enigszins hoger dan het optimum vochtgehalte uit het vooronderzoek. Het optimum vochtgehalte bedroeg 12.0%(m/m). Dit verschil wordt veroorzaakt door het feit dat de vliegascement in de baan meer tijd heeft gekregen vocht te absorberen dan het materiaal op het laboratorium. De plasticiteit (verwerkbaarheid) bleef onveranderd bij een verschil in vochtgehalte.

### 5.2.7 Laagdikte

In het bestek werd de laagdikte van de stabilisatie voorgeschreven. Deze laagdikte werd tijdens de uitvoering gecontroleerd. De laagdikte heeft vooral een constructietechnisch belang. De verharding is gedimensioneerd op basis van de in het bestek voorgeschreven diktes. De diktes in de vakken zijn op aselekt gekozen plaatsen gemeten.

Tabel 25: Laagdikte.

| Laagdikte in m |       |
|----------------|-------|
| Gemiddelde     | 0.38  |
| Freesdiepte    | 0.36  |
| Eis            | 0.345 |

De laagdikte is ruim voldoende. De dikte omschreven in het bestek bedraagt 345 mm (34.5 cm). Het meten van de dikte werd enigszins bemoeilijkt door een minder scherpe overgang tussen het gestabiliseerde lagenpakket en het zand.

### 5.2.8 Kerven

Door het toepassen van een hoog cementgehalte, noodzakelijk vanwege het immobiliseren en het voorkomen van uitloging van schadelijke stoffen, is de kans op ongecontroleerde scheurvorming en reflectiescheuren in het asfalt wat groter, zie paragraaf 3.3. Om ongecontroleerde scheurvorming in het immobilisaat en reflectiescheuren in het asfalt te voorkomen werd in het bestek voorgeschreven dat het immobilisaat kort na aanleg moest worden gekerfd.

Het kerven vond plaats op het tijdstip dat de fundering juist begaanbaar was en er zonder schade aan de fundering te veroorzaken kon worden gekerfd. Door het kerven werden rechthoekige platen gevormd met een breedte van 4.35 m (halve wegbreedte) en een lengte van 4.00 m. Daarnaast moest er een scheurremmende laag 'Interpave' of gelijkwaardig, een hoog gemodificeerd zandasfalt, binnen 24 uur worden aangebracht. 'Interpave' is een productnaam van Dura Vermeer. De kerfdiepte moest minimaal de helft van de laagdikte bedragen. De kerfdiepte werd bij aanleg gecontroleerd. Het kerven werd uitgevoerd door een kerfmes te bevestigen aan een kraan. Aan de giek werd een mes gemonteerd evenals aan de achterzijde van de kraan.

Tabel 26: Kerfdiepte.

| Kerven |              |                  |
|--------|--------------|------------------|
|        | Kerfafstand  | Kerfdiepte in mm |
| Eis    | Niet bepaald | > 170            |

De kerfdiepte van vak A en B is onvoldoende. De reden hiervoor is een te late aanvoer van de kerfapparatuur. De werkzaamheden werden onder tropische weersomstandigheden (circa 29 °C)



uitgevoerd. De hydratatie van cement met water verliep hierdoor snel. De stabilisatie was op dag 1, waarop vak A en B werden geproduceerd en verwerkt, te sterk geworden om met de kerfapparatuur nog voldoende diep in de stabilisatie te dringen. Daarnaast werd geconstateerd dat door de kraan, welke bij het kerven regelmatig in de berm moest gaan staan, leemhoudende grond uit de berm op de stabilisatie werd verspreid. Door het rijden vanaf de stabilisatie tot in de berm werden de randen van de stabilisatie plaatselijk licht beschadigd. In vak C, D en E werd een andere werkwijze gekozen waarbij de kraan niet meer in de berm werd gestationeerd. In dit tweede gedeelte van het werk, waarbij de kraan op de stabilisatie bleef staan, was dit probleem opgelost.

Foto 7: Kerven dwarsrichting.

Door een te late kerving ontstonden er direct naast de kerf geringe ruggetjes van opgedrukt los materiaal. Het losse materiaal werd door walsen aangedrukt waarna het oppervlak licht werd geprofileerd. De bovenzijde van de kerf werd hierdoor licht gevuld en dichtgedrukt. Na het aanbrengen van de 'Interpave' waren de ruggetjes na het verdichten in het asfalt zichtbaar. Hierdoor kan worden aangenomen dat de bovenzijde van de kerf weliswaar in geringe mate was gevuld met stabilisatie maar dat de kerf zijn functie had verloren. Na het aanbrengen van de Interpave zal de kerf zeer waarschijnlijk aan de bovenzijde over een geringe hoogte zijn gevuld met asfalt. In de toekomst zal moeten blijken of het kerven en het toepassen van Interpave voldoende is om scheurdoorgroei naar het asfalt te voorkomen of te beperken. Hiervoor zal periodiek een visuele inspectie aan het asfaltoppervlak worden uitgevoerd.



*Foto 8: Kerven lengterichting*

#### *5.2.9 Vlakheid*

In het bestek werden eisen gesteld aan de langs- en dwarsvlakheid van de stabilisatie. Deze werd bij de aanleg gecontroleerd. De vlakheid is van belang omdat op de stabilisatie een laagje Interpave van 20 mm dikte werd aangebracht. De aanwezige onvlakheden in de stabilisatie werden niet gecorrigeerd door het dunne laagje Interpave. De Interpave werd als een deken, met overal een gelijke dikte, op de stabilisatie aangebracht. Op de Interpave werden de overige lagen asfalt aangebracht. De onvlakheden werden door de overige asfaltenlagen wel gecorrigeerd.

Vak A en B werden iets te laat gekerfd waardoor er ruggetjes zijn ontstaan. Deze ruggetjes zijn na het nogmaals verdichten niet geheel verdwenen en komen dus niet ten goede aan de vlakheid. Vak C t/m E zijn na het kerven nogmaals licht geprofileerd en verdicht. De ruggetjes ontstaan door het kerven zijn hierdoor nagenoeg verdwenen en zijn in de onvlakheid niet meer terug te vinden.

Tabel 27: Vlakheid gemeten met een 3 meter lange rei.

| Vlakheid        |                 |                  |                 |                  |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Vak             | Afwijking in mm |                  |                 |                  |
|                 | Oostbaan lengte | Oostbaan breedte | Westbaan lengte | Westbaan breedte |
| A               | 18, 18 en 15    |                  | 13, 7 en 3      |                  |
| B               |                 |                  |                 |                  |
| C               | 12, 3 en 4      | 12, 3 en 4       | 12, 6 en 13     | 5, 8 en 5        |
| D               | 4, 7 en 8       | 4, 7 en 8        | 14, 12 en 8     | 14, 12 en 13     |
| E               | 2, 7 en 5       | 12, 5 en 7       | 8, 7 en 7       | 5, 7 en 6        |
| Eis individueel | < 15            |                  |                 |                  |

De vlakheid van de Oostbaan van de Vakken A en B is onvoldoende en voldoet niet aan de gestelde eis. De onvlakheid is ontstaan door het (te) laat kerven. Het hydratatieproces was al begonnen. Vak C t/m E zijn eerder gekerfd waarbij werd voldaan aan de vlakheidseis.



Foto 9: Meten vlakheid.

De gemiddelde vlakheid was ruim voldoende. Incidenteel was de onvlakheid te groot. De onvlakheden na het kerven waren door het walsen en profileren grotendeels verdwenen.

### 5.2.10 Druksterkte en dikte

In het vooronderzoek werd het gewenste cementgehalte vastgesteld op 7%(m/m). Het cementgehalte is van groot belang voor de immobilisatie (beperking van de uitloging) en de druksterkte na 28 dagen. Beide eigenschappen werden vastgesteld aan de hand van geboorde cilinders. Ook de laagdikte werd gecontroleerd aan de hand van deze cilinders.

Tabel 28: Druksterkte en dikte.

| <b>Druksterkte en dikte</b> |                    |                           |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------|
|                             | <b>Dikte in mm</b> | <b>Druksterkte in MPa</b> |
| Gemiddeld                   | 370                | 3.6                       |
| Eis                         | > 345              | > 2.0                     |
| Vooronderzoek               |                    | 5.9                       |

De dikte en druksterkte zijn ruim voldoende. De sterkte in situ is duidelijk minder dan de sterkte gevonden in het laboratorium. Door interpolatie van de druksterktes na 28 dagen verharden in het laboratorium van de mengsels met 6% en 8% cement kan een druksterkte van 5.9 MPa worden berekend.

De sterkte in situ na 28 dagen verharden bedroeg gemiddeld 3.6 MPa en voldoet aan de gestelde eis, zie paragraaf 3.3.



Foto 10: Bepaling druksterkte.



### 5.3 Diffusieproeven op praktijkmonsters

Op basis van de resultaten van het laboratorium onderzoek is geconcludeerd dat een cementgehalte van 7% ruim voldoende zou moeten zijn om aan alle eisen uit het Bouwstoffenbesluit te voldoen. Daarom is bij aanleg van het demonstratieproject van dit cementgehalte uitgegaan.

Na de aanleg van het demonstratieproject zijn door de Provincie Noord-Brabant (d.d. 11 september 2001) kernen geboord uit de nieuwe fundering (immobilisaat). Op 6 kernen zijn diffusieproeven uitgevoerd. De gemiddelde resultaten van de 6 proeven staan vermeld in tabel 29. In deze tabel staan tevens de gemiddelde resultaten van een tweetal proeven op het oorspronkelijke funderingsmateriaal (monsternamen 11 juni 2001). Om een indruk te geven van de spreiding in de meetresultaten staan in tabel 29 tevens de waarden van de relatieve standaarddeviatie voor iedere component vermeld. Bij componenten waarvoor de relatieve standaarddeviatie in alle proeven een waarde van 0% heeft waren de concentraties kleiner of gelijk aan de rapportagegrens van de analysetechniek.

Tabel 29: Resultaten diffusieproeven nieuw gebonden fundering.

| Component                  | e <sub>64</sub> mg/m <sup>2</sup> |       | l mg/m <sup>2</sup> |       | mti mg/m <sup>2</sup><br>(eis Bsb) | Rel. standaard deviatie |       |
|----------------------------|-----------------------------------|-------|---------------------|-------|------------------------------------|-------------------------|-------|
|                            | Oud                               | nieuw | oud                 | nieuw |                                    | Oud                     | nieuw |
| Antimoon (Sb)              | 0.96                              | 0.51  | 10                  | 5.4   | 39                                 | 50%                     | 28%   |
| Arseen (As)                | 4.0                               | 1.5   | 42                  | 16    | 435                                | 42%                     | 31%   |
| Cadmium (Cd)               | 0.086                             | 0.058 | 0.90                | 0.61  | 12                                 | 0%                      | 0%    |
| Nikkel (Ni)                | 4.3                               | 2.9   | 45                  | 30    | 525                                | 0%                      | 0%    |
| Chroom (Cr)                | 2.5                               | 6.1   | 26                  | 64    | 1500                               | 51%                     | 52%   |
| Lood (Pb)                  | 4.7                               | 2.9   | 49                  | 30    | 1275                               | 11%                     | 0%    |
| Koper (Cu)                 | 2.9                               | 1.2   | 30                  | 13    | 540                                | 58%                     | 0%    |
| Seleen (Se)                | 0.86                              | 0.19  | 9.0                 | 2.0   | 15                                 | 74%                     | 34%   |
| Tin (Sn)                   | 2.6                               | 1.7   | 27                  | 18    | 300                                | 0%                      | 0%    |
| Kwik (Hg)                  | 0.026                             | 0.019 | 0.27                | 0.20  | 4.5                                | 0%                      | 21%   |
| Bromide (Br-)              | 17                                | 12    | 29                  | 20    | 90                                 | 0%                      | 3.4%  |
| Chloride (Cl-)             | 15 000                            | 2 300 | 24 000              | 3 900 | 30 000                             | 83%                     | 72%   |
| Sulfaat (SO <sub>4</sub> ) | 6 000                             | 1 700 | 10 000              | 2 800 | 45 000                             | 58%                     | 25%   |
| Fluoride (F-)              | 43                                | 31    | 450                 | 330   | 14 000                             | 0%                      | 16%   |
| Vanadium (V)               | 24                                | 11    | 250                 | 110   | 2 400                              | 35%                     | 25%   |
| Zink (Zn)                  | 4.8                               | 3.0   | 50                  | 31    | 2 100                              | 13%                     | 3.5%  |
| Barium (Ba)                | 21                                | 42    | 220                 | 440   | 6 300                              | 10%                     | 35%   |
| Cobalt (Co)                | 2.6                               | 1.7   | 27                  | 18    | 300                                | 0%                      | 0%    |
| Molybdeen (Mo)             | 9.0                               | 2.7   | 94                  | 28    | 150                                | 48%                     | 49%   |

Zoals uit tabel 29 blijkt voldoet het nieuw gebonden materiaal ruimschoots aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit. De uitloging van Mo is zelfs nog een factor 2 lager dan in de laatste proeven op laboratoriummonsters met 8% cement. Verder valt op dat ook de oude fundering blijkt te voldoen aan de eisen van het Bouwstoffenbesluit. Echter, uit een vergelijking van de verschillen tussen het oude en het nieuwe materiaal blijkt dat voor de meeste componenten een behoorlijke reductie in de uitloging is bereikt. Uitzonderingen zijn de componenten Ba en Cr; voor deze componenten neemt de uitloging juist toe. Deze componenten zijn afkomstig uit het gebruikte cement. Benadrukt wordt dat de uitloging van deze componenten ver onder de grenzen uit het Bouwstoffenbesluit ligt.

## 6 MONITORING

### 6.1 Na circa 1 jaar

#### 6.1.1 Algemeen

Ruim een jaar na de aanleg van het proefvak zijn visuele inspecties verricht. Tevens is een beperkt milieuhygiënisch monitoringsprogramma uitgevoerd en is onderzoek verricht naar de eigenschappen van het stabilisatiemateriaal. Hiertoe zijn op 30 september 2003, 2 kernen geboord uit de stabilisatielaag en is de druksterkte bepaald.

De milieuhygiënische monitoring is bedoeld om na te gaan hoe hoog de uitloging nu in werkelijkheid is. Het materiaal is immers wel in de voorbereidingsfase op uitloging onderzocht in het laboratorium (waarbij gevonden is dat ruimschoots wordt voldaan aan alle uitloogeisen), maar het is niet duidelijk of de berekeningsmethoden uit het Bouwstoffenbesluit wel een goede vertaling naar de uitloging in de praktijk is. Omdat het milieueffect uiteraard bepaald wordt door de werkelijke uitloging en niet door een geëxtrapoleerd resultaat van een laboratoriumproef, is in dit demonstratieproject gekozen voor een beperkte monitoring.

Binnen het monitoringsprogramma zijn op diverse plaatsen via boringen grondmonsters genomen direct onder de weg (voor en na de aanleg). Deze monsters zijn geanalyseerd op de relevante zware metalen en anionen. Uit de verhoging van de gehalten ten opzichte van de nulsituatie kan de uitloogsnelheid uit de fundering worden teruggerekend. Bovendien is de verwachting dat de uitloging voornamelijk via diffusieprocessen naar de onderliggende (vochtige) bodem zal plaatsvinden en dat percolatie slechts een kleine rol zal spelen. Daarom is besloten de uitloging te monitoren aan de hand van de samenstelling van de bodem direct gelegen onder het betreffende proefvak.

#### 6.1.2 Conclusie milieuhygiënische monitoring.

Hoewel strikt gesproken de uitloging in de praktijk niet als een eis is opgenomen in het kader van het Bouwstoffenbesluit, zijn in dit demonstratieproject ca. 2 jaar na aanleg kernen op uitloging ingezet en mag worden geconcludeerd dat ruimschoots aan de uitloogeisen van het Bouwstoffenbesluit wordt voldaan.

Voor nadere resultaten ter zake wordt verwezen naar bijlage III.

### 6.1.3 Visuele inspectie

Op 1 mei 2002 en 30 september 2003 hebben visuele inspecties plaatsgevonden op de verharding van het demoproject immobilisatie Noordlangeweg.

Algemeen beeld:

- 1 In 2002 en 2003 is geconstateerd, dat het asfalt in de rijsporen nog een open structuur bezit. In 2003 is het aggregaat toch iets in het bitumen weggezakt, waardoor een lichte vorm van vet is ontstaan. Buiten de sporen is de structuur iets dichter als gevolg van vervuiling door kleideeltjes.
- 2 De verharding vertoont geen onvlakheid en geen scheurvorming.

Gedetailleerde schadebeelden:

In 2002 was alleen 15 meter randschade (scheur dicht bij kant verharding) geconstateerd.

Verder was de toestand van de berm zeer plaatselijk slecht (sporen en verzakkingen).

In 2003 was diezelfde 15 meter randschade toegenomen tot 20 meter. Daarnaast was zeer plaatselijk 1 of 2 meter lichte randschade ontstaan. Verder gelijke opmerkingen over de bermen als in 2002.

Conclusies:

- 1 De asfaltverharding is niet doorgescheurd ter plaatse van de gekerfde fundering. Als de constructie niet voldoet treedt een dergelijk mechanisme, reflectiescheurvorming, bijna altijd binnen enkele jaren op. Kennelijk is de gekozen oplossing (kerven en scheurremmende laag) goed geweest.
- 2 De zeer plaatselijke randschade is mogelijk te wijten aan een zwakke plek in fundering aan de zijrand. Bij het kerven in de dwarsrichting reed de trekker door tot in de berm om ook de laatste meter te kunnen kerven. Bij deze acties nam de trekker nogal eens grond mee, die bij terugkeer aan de rand vermengd werden met het immobilisaat. Gecombineerd met het effect van het naar de zijkant afstromende sproeiwater zou dit tot plaatselijk zwakke plekken kunnen leiden, waardoor de asfaltverharding daar onvoldoende ondersteuning krijgt.
- 3 De plaatselijk te lage berm is waarschijnlijk het gevolg van de geringe gronddekking op de zijrand van het immobilisaat (<15 cm). In natte omstandigheden wordt deze grond snel week.

### 6.1.4 Conclusie civieltechnisch onderzoek druksterkte stabilisatielaag.

In het vooronderzoek is het gewenste cementgehalte van het immobilisaat bepaald op 7%(m/m). Het cementgehalte is van zeer groot belang voor het immobilisatieproces en de druksterkte na 28 dagen.

Bij de uitvoering van het onderzoek naar de druksterkte van het stabilisatiemateriaal is gebruik gemaakt van de proefomschrijvingen als bedoeld in de Standaard RAW Bepalingen 2000.

Op basis van de resultaten mag worden geconcludeerd dat de druksterkte ruimschoots aan de gestelde eisen voor stabilisaties voldoen.

## 6.2 Na circa 2 jaar

### 6.2.1 Algemeen

Twee jaar na de aanleg van het proefvak (najaar 2003) zijn twee kernen geboord uit de fundering, welke zijn onderzocht in diffusieproeven. De resultaten hiervan (emissies en immissies) staan in tabel 30. Ter vergelijking zijn tevens de emissies gemeten vlak na aanleg (zie ook tabel 29). Tevens is van kernen de druksterkte bepaald.

Tabel 30: Resultaten diffusieproeven van boorkernen, 2 jaar na aanleg van de wegfundering.

| Component       | Kern 1  |  | Kern 2  |  | Mti<br>mg/m <sup>2</sup> | Emissie<br>E <sub>64</sub> kort na<br>aanleg<br>mg/m <sup>2</sup> |
|-----------------|---|--|---|--|--------------------------|---|
|                 | Emissie<br>E <sub>64</sub><br>mg/m <sup>2</sup> | Immissie<br>cat 1<br>mg/m <sup>2</sup> | Emissie<br>E <sub>64</sub><br>mg/m <sup>2</sup> | Immissie<br>cat 1<br>mg/m <sup>2</sup> |                          |   |
| Sb              | 0.29  | 3.0                                    | 1.4   | 14                                     | 39                       | 0.51  |
| As              | 1.5   | 16                                     | 6.8   | 71                                     | 435                      | 1.5   |
| Ba              | <30   | 320                                    | 20  | 210                                    | 6300                     | 42  |
| Cd              | <0.07   | 0.74                                   | <0.07   | 0.74                                   | 12                       | 0.058   |
| Cr              | 1.7   | 18                                     | 21  | 220                                    | 1500                     | 6.1   |
| Co              | <2.2  | 23                                     | <2.1  | 22                                     | 300                      | 1.7   |
| Cu              | <1.5  | 15                                     | 2.1   | 22                                     | 540                      | 1.2   |
| Hg              | <0.02   | 0.21                                   | <0.02   | 0.21                                   | 4.5                      | 0.019   |
| Pb              | <3.6  | 38                                     | <3.5  | 36                                     | 525                      | 2.9   |
| Mo              | 0.72  | 7.6                                    | 5.7   | 60                                     | 150                      | 2.7   |
| Ni              | <3.6  | 38                                     | <3.5  | 36                                     | 525                      | 2.9   |
| Se              | 0.14  | 1.5                                    | 0.46  | 4.8                                    | 15                       | 0.19  |
| Sn              | <2.2  | 23                                     | <2.1  | 22                                     | 300                      | 1.7   |
| V               | 6.0   | 63                                     | 20  | 210                                    | 2400                     | 11  |
| Zn              | <3.6  | 38                                     | <3.5  | 36                                     | 2100                     | 3.0   |
| Cl              | 260   | 430                                    | 8 300   | 14 000                                 | 30 000                   | 2 300   |
| SO <sub>4</sub> | 2800  | 4 800                                  | 5 900   | 9 900                                  | 45 000                   | 1 700   |
| Br              | <15   | 24                                     | <14   | 23                                     | 90                       | 12  |
| F               | <36   | 36                                     | <39   | 400                                    | 14 000                   | 31  |

Tevens zijn samenstellingen gemeten van de bodem onder de fundering, zowel direct na aanleg als na 2 jaar. De resultaten (gemiddelden van meerdere monsters) staan in tabel 31.

Tabel 31: Samenstelling van de bodem onder de fundering bij aanleg en na 2 jaar.

| Component | Samenstelling [mg/kg] |           |
|-----------|-----------------------|-----------|
|           | Na aanleg             | Na 2 jaar |
| Sb        | <3.0                  | <1        |
| As        | 2.1                   | <5        |
| Cd        | <0.20                 | <0.10     |
| Cr        | <5.0                  | 5.4       |
| Cu        | <2.0                  | 0.33      |
| Hg        | <0.030                | <0.1      |
| Pb        | <5.0                  | 1.4       |
| Mo        | <1.5                  | <1        |
| Ni        | 3.6                   | 2.1       |
| Se        | <5.0                  | <5        |
| Sn        | <2.0                  | <1        |
| V         | 7.7                   | 6.4       |
| Zn        | 7.4                   | 5.5       |
| Min olie  | 44                    | <10       |
| PAK       | <0.34                 | <0.14     |
| EOX       | <0.30                 | <0.1      |

Tabel 32: Druksterkte:

| Druksterkte in MPa |             |
|--------------------|-------------|
| Proefstuk gemerkt  | Druksterkte |
| 1 boven            | 5.5         |
| 1 onder            | 6.2         |
| 2 boven            | 3.4         |
| 2 onder            | 4.1         |
| Gemiddelde         | 4.8         |

### 6.2.2 *Conclusie monitoring*

Milieuhygiënisch:

Op basis van tabel 30 wordt geconcludeerd dat voor alle componenten wordt voldaan aan de eisen uit het Bouwstoffenbesluit. Een vergelijking van de emissies met de gemiddelde emissie van de kernen vlak na aanleg laat zien dat de emissies in dezelfde range liggen. Dit scheidt vertrouwen dat het materiaal ten aanzien van uitloging een gunstig langeduurgedrag vertoont.

Uit tabel 31 kan worden geconcludeerd dat geen meetbare toename van de concentratie van de gemeten componenten heeft plaatsgevonden.

Civieltechnisch:

De gemiddelde druksterke, 4.8 MPa na 2 jaar, is 133% van de gemiddelde druksterke, 3.6 MPa, na 28 dagen. Deze sterkte voldoet ruimschoots aan de eis van 2.0 MPa.

## **7 Conclusies**

### **7.1 Civieltechnische aspecten**

- Het gehele project kan als geslaagd worden beschouwd zowel t.a.v. de civieltechnische en milieuhygiënische resultaten, als ten aanzien van de economie van de gekozen techniek (immobilisatie/stabilisatie van een bestaande wegfundering).
- De monsterneming d.m.v. laagsgewijs frezen is een goede keuze geweest. Hierdoor wordt met de monsterneming goed aangesloten bij de praktijk.
- Voor het vooronderzoek moet voldoende tijd, in dit geval minimaal vier – zes maanden, worden ingeruimd. Het vooronderzoek moet uitgebreid zijn in verband met de eisen die volgen uit de vigerende milieuregelgeving (Bouwstoffenbesluit). Een keuze voor een breed scala aan cementgehalten is nodig.
- Een nauwe samenwerking tussen civieltechnici en milieuexperts is vereist om projecten betreffende immobilisatie/stabilisatie te laten slagen.
- Het frezen, het doseren van het cement en het mengen verliepen naar tevredenheid en ingrijpen tijdens de uitvoering was niet nodig. Het meten van het gedoseerde cement met behulp van de zogenaamde plaat verdient een nauwkeuriger alternatief.
- Het tijdstip en de methode van kerven zijn belangrijk. Het weer bepaalt sterk het tijdstip van kerven. Na het verdichten van de fundering dient het kerven zo snel mogelijk te geschieden. De methode van het kerven kan beter. Zagen is zeer waarschijnlijk een betere methode. Een al te veel verharde fundering bemoeilijkt het kerven en kan leiden tot een (te) geringe kerfdiepte.



## 7.2 Milieuhygiënische aspecten

- Binnen dit project is een kwalitatief goede bouwstof vervaardigd uit een reststof, namelijk een oude wegfundering van cementgebonden poederkoolvliegias. Het product voldoet ruimschoots aan de uitloogeisen uit het Bouwstoffenbesluit. De resultaten van dit project laten zien dat immobilisatie een goede optie kan zijn om een nuttig toepasbaar product te vervaardigen uit vliegias. Immobilisatie/stabilisatie kan een aantrekkelijke techniek zijn voor herstel van oude wegfunderingen.
- De gevolgde onderzoeks aanpak heeft zich bruikbaar bewezen voor ontwikkeling van grootschalige toepassingen. De eerste stap in een onderzoek is het nemen van voldoende representatieve monsters, en het karakteriseren daarvan. Op basis van de gegevens over de reststof en de eisen aan het product worden enkele recepturen vastgesteld, waarmee proefstukken worden aangemaakt in het laboratorium. Deze proefstukken worden zowel op civieltechnische eigenschappen als op uitloging onderzocht. Om het onderzoekstraject te bespoedigen kan in deze fase gebruik worden gemaakt van verkorte uitloogproeven (worstcase methoden) voor bepaling van de uitloging. Aan de hand van de resultaten wordt een definitieve receptuur vastgesteld, waarmee uitgebreidere proefnemingen worden uitgevoerd.
- Het vereiste cementgehalte is in dit project voornamelijk bepaald door de milieuhygiënische eisen (uitloogeisen) volgens het Bouwstoffenbesluit. De vereiste druksterkte is daardoor hoger dan eigenlijk noodzakelijk vanuit civieltechnisch oogpunt. Extra voorzorgsmaatregel om problemen met betrekking tot reflectiescheuren in het asfalt vanuit de fundering te voorkomen betreft het aanbrengen van een scheurremmende laag (bijvoorbeeld Interpave). Door het tijdig kerven van de fundering en een juiste nabehandeling kan het ontstaan van oncontroleerbare scheuren worden voorkomen.
- Immobilisatie kan een interessante optie zijn voor nuttige toepassing van reststoffen. Behalve vliegias kunnen ook uit andere anorganische reststoffen zoals sorteerzeefzand en baggerspecie, bouwstoffen worden vervaardigd. Een belangrijk voordeel van immobilisatie is, dat geen reststoffen overblijven; de behandelde reststof wordt volledig nuttig hergebruikt. Bij reinigingstechnieken blijven vaak restfracties over welke alsnog moeten worden gestort.
- Na beëindiging van de toepassingsduur kan het geïmmobiliseerde materiaal worden opgebroken en opnieuw (licht) worden gebonden met cement, en in dezelfde toepassing worden hergebruikt. Na een aantal van dergelijke levensfasen te hebben doorlopen zal het in het algemeen niet meer nodig zijn om cement toe te voegen, maar kan het materiaal worden gebruikt in granulaire vorm. Er is dan in de loop van de tijd voldoende cement toegevoegd om de uitloging sterk genoeg te reduceren. Wel zal de performance van de bouwstof na beëindiging van iedere levensfase opnieuw moeten worden vastgesteld.

- Uit het monitoringsprogramma (2 jaar na aanleg) is aan de hand van in situ monsters vastgesteld, dat de wegfundering voldeed aan alle getoetste eisen (civiel- en milieutechnisch).
- De voorgeschreven uitlogingsmethode is ten aanzien van Mo sterk afhankelijk van de pH-veranderingen in de tijd, zoals door carbonatatie, voortgaande hydratatie (vlieg-as en cement) en bewaarcondities van de proefstukken.

## **8 Aanbevelingen**

- De complexe milieuregelgeving vraagt een lange onderzoekstijd voor het bepalen van de receptuur en de uitloging van de bouwstof. Na de karakterisering van de bouwstoffen, het zoeken naar de juiste mengverhoudingen en het vaststellen van de referentiedichtheden, kunnen de proefstukken worden vervaardigd. Na vervaardiging moeten de cementgebonden proefstukken ten minste 28 dagen verharderen alvorens de diffusieproeven kunnen starten. Na de diffusieproef moeten de eluaten worden geanalyseerd. Het gehele traject vraagt een periode van ten minste 4-6 maanden. Het verdient aanbeveling om in de uitloogprocedure (BSB) een kortere periode dan 64 dagen aan te houden, omdat verkorte uitloogproeven via extrapolatie betrouwbare langetermijngegevens opleveren. Het blijkt mogelijk om korte termijn gegevens te extrapoleren naar 64 dagen.
- De huidige wijze van kerven van cementgebonden funderingen is niet optimaal. Doordat een mes door de funderingslaag wordt getrokken (gesneden) wordt materiaal opgedrukt en losgetrokken. Een alternatief voor het kerven is zagen.
- Door de verhinderde vervorming van cementgebonden immobilisaat (krimp, temperatuur) kunnen scheuren ontstaan. Ten behoeve van een beheerst scheurenpatroon is het noodzakelijk om tijdig te zagen of kerven. Hieraan zal aandacht moeten worden geschonken.
- Door het kerven van de fundering, het aanbrengen van een scheurremmende laag tussen het asfalt en de fundering of door het toepassen van een minimale asfaltdikte kan scheurdoorgroei vanuit het immobilisaat naar de asfaltverharding worden voorkomen.
- Bij dergelijke proefprojecten is het van groot belang om de onderzoeksresultaten goed te documenteren en aandacht te besteden aan kennisoverdracht. Het Centrum voor Immobilisatie (CIM) is daarvoor het aangewezen platform ([www.immobilisatie.nl](http://www.immobilisatie.nl)).

## Referenties algemeen

1. Stabiliseren met cement. *Betoniek* 7/4, 1986, 6 pp.
2. Ingepakt in cementsteen. *Betoniek* 11/24, 2000, 8 pp.
3. Cement in de grond. *Betoniek* 12/13, 2002, 10 pp.
4. Bouwstoffen door immobilisatie. CIM / CUR rapport 2002-5, sept. 2002, 103 pp.
- 5a. NEN 7343: Bepaling van de uitloging van anorganische componenten uit poeder- en korrelvormige materialen met de kolomproef, 1<sup>e</sup> druk, NEN, Delft, 1995.
- 5b. NEN 7345: Bepaling van de uitloging van anorganische componenten uit vormgegeven en monolithische materialen met de diffusieproef, 1<sup>e</sup> druk, NEN, Delft, 1995.
6. Sloot, H.A. van der - Comparison of the characteristic leaching behaviour of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behaviour in construction products during service life and recycling. *Cement and concrete research* 30(7), 2000, p. 1079-1096.
7. Bentz, D.P. – Modelling cement microstructure: pixels, particles and property prediction. *Materials and structures* (32), 1999, p. 187-195.
8. Van bagger naar bouwstof, video over een praktijkproject, (7 minuten), Tauw bv, Deventer, 2002.

## Referenties project

9. Jansen, E.W.M. – Partijkeuring Bouwstoffenbesluit asfalt en wegfunderingsmateriaal van provinciale weg Dinteloord – Oud-Gastel (PW 115). Bureau Milieumetingen, provincie Noord-Brabant, rapportnr. 1999-134-B-O, 1999.
10. Jansen, E.W.M. – Monsterneming asfalt, vliegascementstabilisatie en grond t.b.v. demonstratieproject immobilisatie (PW 115). Bureau Milieumetingen, provincie Noord-Brabant, rapportnr. 2000-082-B-O, nov. 2000, 5 pp. + Bijlagen.
11. Constructievoorstel N268 (voormalige N640) met immobilisaatfundering, rapportnr. E01026, KOAC•WMD, Apeldoorn, 21 februari 2001, 7 pp.
12. Brouwer, J.P., Bruggen, P.W. van der, Frénay, J.W., Hairwassers, H.A.J., Blaakmeer, J. - Reconstruction of a cement-stabilized flyash subbase. In: Proceedings 'Beneficial use of recycled materials in transportation application, Washington D.C., 13-15 Nov. 2001, p. 863-873

13. Brouwer, J.P., Bruggen, P.W. van der, Frénay, J.W., Jansen, E.W. – Leaching from an 18 year old cement-stabilized flyash roadbase. In: Prodeedings of Wascon 2003, Progress on the road to sustainability, San Sebastian (Spain), 4-6 June 2003, p. 187-196.
14. Hartkamp, S.B. van, Hairwassers, H.A.J., Frenay J.W. et al. Reconstruction of a cement-stabilized flyash roadbase. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Symposium on concrete roads, Istanbul, Turkey, 4-7 April 2004, 7 pp.
15. Hairwassers, H.A.J., Brouwer, J.P., Frenay J.W. - Duurzaam funderen door immobiliseren, Rapport CROW Workshop Wegbouwkundige Werkdagen, Ede, juni 2002, 6 pp.
16. Duurzaam funderen door immobiliseren, video over praktijkproject (10 minuten), provincie Noord-Brabant, Den Bosch, 2001.
17. Bolt, N., Heerkens, J., Hendriks, Ch.F., Swart, J.J. – Vliegias in met cement gestabiliseerde wegfunderingen, Wegen (819/820), febr. en maart 1984, p. 60-69 en 117-121.
18. Bolt, N. – Poederkoolvliegias in met cement gestabiliseerde wegfunderingen: project Dinteloord – Stampergat. KEMA rapport WSK/21766-2, Arnhem, mei 1984, 116 pp.
19. Bolt, N. Sloot, H.A. van der – Milieu-implicaties van vliegias in de wegebouw: evaluatie uitgevoerde projecten en voorstellen voor richtlijnen, KEMA/ECN, NOVEM rapport 71811-SBA-1, Arnhem, aug. 1988, 64 pp. (met aanvullende milieumetingen april 1989 en febr. 1990, door M.J.M. Stam)
20. Meij, R. – Gezondheidsaspecten (poederkool)vliegias, statusrapportnr. 50030086-KPS, KEMA, Arnhem, nov. 2000, 39 pp.
21. Reinhardt, H.W. – Beton als constructiemateriaal: eigenschappen en duurzaamheid. Hfst. 12 'Krimpen en zwellen', DUP, Delft, 1985, p 149-163.
22. Controlled low-strength materials (CLSM), ACI 229R-94, ACI Committee 229, Oct. 1994, 13 pp.
23. Leewis, M. - Gevolgen van scheurvorming in een zandcementstabilisatie voor het spanningsverloop in een asfaltdek, rapport 19718/8, Stichting BNC, Maastricht, april 1979, 20 pp. + Bijlagen.
24. Funderen met zandcement, VNC/SAG, Den Bosch, februari 1988, 28 pp.
25. Vliegveldverhardingen, Proceedings Workshop, CROW, Ede, 1983, p. 21 e.v.

26. Scheurremmende tussenlagen, OCW Mededelingen 3/1995, p. 3-10.
27. Bond, A.H. de - Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 1999, 362 pp. + Bijlagen.
28. Wesselborg, H.-H. – Braunkohlflugaschen fuer Verfestigungen im Strassenbau, Strasse + Autobahn, 2/1999, p. 85-93.
29. NEN-EN 14227-1:2004, Hydraulisch gebonden mengsels – Specificaties – Deel 1: Met cement gebonden mengsels van korrelvormige materialen.
30. Altenburg, T. – Verantwoord besparen op wegfundering: koude recycling aantrekkelijk bij totale rehabilitatie, Land + Water 4/1994, p. 84-87.
31. Bin-Shafique, SD. Et.al-Incorporating a fly-ash stabilised layer into pavement design, Geotechnical Eng., 157, GE4, 2004, p 239-249.