

Zettingen corrigeren door onderhogen.

dr. B.G.H.M. Wichman

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat

RWS Dienst Weg- en Waterbouwkunde
projectleider geotechniek

ir. E.J. Huiden



BAM Grondtechniek
hoofd engineering

1. Inleiding

In het westen van Nederland, treden na aanleg van wegen vaak grote zettingen op. In het bijzonder in het overgangsgebied van aardebaan naar kunstwerk, zoals een viaduct, treden verschilzettingen op, die leiden tot periodiek onderhoud, variërend van het uitvullen van het asfalt tot een volledige reconstructie. Omleiding van het verkeer voor dit onderhoud is vaak ongewenst. Om deze problemen te verminderen wordt de techniek 'onderhogen' ontwikkeld. 'Onderhogen' is het gecontroleerd injecteren van lichtgewicht suspensie in de ondergrond en in het weglichaam, met als doel zettingverschillen aan maaiveld te verminderen. Het voordeel van deze techniek is dat het verkeer nagenoeg niet gehinderd wordt. De suspensie moet na uitharden voldoende stevigheid bezitten en zo licht mogelijk zijn. De belasting op de ondergrond moet namelijk zo min mogelijk toenemen. Onderhogen wordt ontwikkeld in het kader van het DWW-project Stimulering Innovatie in de Infrastructuur (Si²). Het was een van de 5 kansrijk geachte onderwerpen die onderdeel uitmaakten van het zogenaamde Heeren Huys accord (zie [1]).

RWS Directie Zuid-Holland is voor de DWW de opdrachtgever van de hier beschreven proeven met een klein weglichaam, een boom en een gedeelte van de N11. HBG heeft bijgedragen in de vorm van ontwerp en analyse. Alvorens deze proeven uit te voeren zijn er in opdracht van de DWW verkennende berekeningen gedaan m.b.v. Plaxis en zijn er injectieproeven uitgevoerd. Tevens werd er literatuuronderzoek gedaan en werd de ervaring van HBG Civiel Grondtechniek met eerdere proeven op eigen terrein in 1990 benut.

2. Proeven voorafgaand aan proef met de N11.

2.1 *Injectieproef bij Abcoude*

Verschillende injectietechnieken zijn onderzocht op een testterrein bij Abcoude. Er werd los in de bodem geïnjecteerd, maar ook in geotextiel kousen. Een suspensie met een variabele fractie EPS werd op verschillende diepten in een 5m dikke veenlaag geïnjecteerd. Materiaal met een EPS fractie van 30% bleek nog verwerkbaar m.b.v. twee verschillende injectieprocedures. De maaiveldrijzing was aanzienlijk, n.l. 30% van het geïnjecteerde groutvolume. Injectie op enkele meters diepte bleek mogelijk, waarbij maar af en toe uitbraak naar maaiveld optrad. De suspensie lijkt zich door openingen in de bodemstructuur te verspreiden. Daarnaast zijn er 6 geotextiel kousen begraven onder een 1,5 m dik zandbed en gevuld met onder meer genoemd mengsel. Na ontgraven werd 70% van het geïnjecteerde volume in de kousen teruggevonden. De vulling van de kous was niet helemaal gelijkmatig. De kennis opgedaan met deze proeven is gebruikt voor proeven met het onderhogen van een klein weglichaam en een boom (puntlast).

2.2 Proef met klein weglichaam bij HI Ambacht

In het najaar van 2001 zijn door HBG proeven uitgevoerd in een 35 m lang wegdeel van een 4 meter brede calamiteitenweg langs de A15 nabij Hendrik Ido Ambacht. Dit wegdeel vertoonde lokaal een maximale zetting van 120 mm. Er is lichtgewicht suspensie los in de bodem geïnjecteerd op 3 m diepte onder het asfalt op de scheiding van een kleilaag en een veenlaag, d.m.v. schuin onder de weg geplaatste injectielansen. Er is in meerdere charges geïnjecteerd, waarbij ruimschoots voldaan werd aan de eis dat de helling van de rijzingen van het asfalt zich zou beperken tot 1:50. De suspensie bestond uit water, cement, bentoniet en 30% van het volume EPS korrels. De weg bleef vrij toegankelijk en er was geen schade aan het asfalt zichtbaar.

De benodigde hoeveelheid materiaal was 3 maal het volume van de opdrukking. Hierbij werd het diepste punt van de weg 200 mm opgetild. Nadat de nazakking was gestopt resulteerde 160 mm. De vereiste eindhoogte was 120 mm. In het oktober nummer van geotechniek 2002 is deze proef nader toegelicht (zie [2]). Voor meer details zie [3]. Boringen in en naast het wegdek en ontgravingen in de berm, toonden plaatvormige structuren van suspensie die een hoek maken van 30 tot 45 graden met de horizontaal en waarbij soms uitbraak naar maaiveld was opgetreden.

2.3 Proef met optillen boom (puntlast).

Op een derde locatie zijn proeven uitgevoerd met het injecteren van suspensie in geotextiel kousen met een lengte van 8 m. De 2x4 kousen lagen in een raster met een onderlinge afstand van 2 m. Het doel was een boom minstens 250 mm op te tillen, zonder de stabiliteit van de boom in gevaar te brengen en zonder noemenswaardige aantasting van de wortelpruik. Dit is zeer goed gelukt. Het voordeel van injecteren in kousen is dat de maaiveldrijzingen meer gelokaliseerd zijn en er in principe geen suspensie naar maaiveld komt. Als de kousen volledig gevuld zijn hebben ze een diameter van 800 mm. De boom is 300 mm opgedrukt, waarbij 3 graden hellingsverandering is geconstateerd. De overall effectiviteit was 40%. Bij het vullen van de beide kousen in het midden was de effectiviteit 80%. De kousen waren niet waterdicht en de verschildruk in de kous t.o.v. de grond was maximaal 1,4 Bar. De eindhoogte na zakking van de boom is 240 mm. In het oktober nummer van geotechniek 2002 is deze proef nader toegelicht (zie [2]).

2.4 Conclusies.

Injectie in kousen is effectiever dan los in de grond injecteren. Ook treedt er minder uitbraak naar maaiveld op. Op basis van deze twee proeven is een rekenmodel ontwikkeld, t.b.v. het berekenen van de opdrukking als gevolg van de geïnjecteerde hoeveelheden.

Als in slappe ondergrond wordt geïnjecteerd, blijkt er een significante samendrukking van de grond op te treden, waarbij de grond zijdelings wordt opgespannen. Dit geeft voor deze proeven een verlies van minstens 50% van het geïnjecteerde volume. Als de kousen zijdelings zijn opgesloten is dit effect kleiner en het rendement dus groter.

3. Proef met onderhogen van gedeelte van N11.

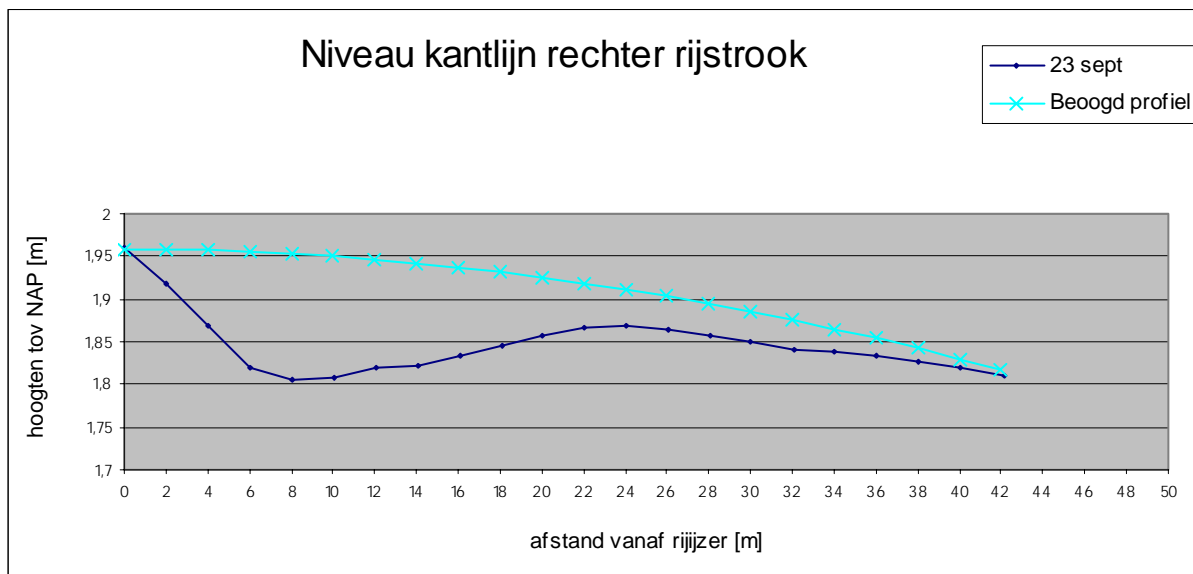
3.1 Ontwerp

Het betreffende gedeelte van de N11 is een 50 meter lang deel van de noordbaan direct ten westen van het viaduct over de Oostvaart bij Hazerswoude (zie figuur 1).



Figuur 1. Het te onderhogen gedeelte van de noordelijke rijbaan van de N11. De kromming van de rechterkantstreep duidt op een kuil in het asfalt.

De bovenkant van het kunstwerk ligt op NAP+2 m, het oude maaiveld ligt op NAP-1,5 m. Ten gevolge van zakking van de ondergrond is een kuil ontstaan in het wegdek, met het diepste punt op 8 m vanaf het viaduct. Om een vloeiend alignement terug te krijgen moet over een lengte van 50 meter worden onderhoogd, met als maximale opdrukking 141 mm (op het diepste punt van de rechterkantstreep van de rechter rijstrook). Figuur 2 geeft de gewenste opdrukking (nadat de nazakking is voltooid).



Figuur 2. Wegdekhogten op 23 september 2002 en het beoogde wegdekprofiel nadat de nazakking is voltooid.

De werkwijze bij aanleg van de weg is mede van belang voor de verklaring van de resultaten van het onderhogen. Op het betreffende wegvak is een voorbelasting in zand aangebracht in twee fasen tot 6,5 m dik. Een jaar later is de voorbelasting uitgebreid in noordelijk richting. De scheidingslijn tussen de oude en nieuwe voorbelasting loopt over het hart van de noordbaan. Voor versnelling van de consolidatie zijn verticale drains toegepast. Twee jaar daarna werd het gehele zandlichaam tot aan NAP-1,50m ontgraven, waarbij 2,5 m aanvulzand onder maaiveld bleef liggen. Vervolgens is een 2 meter dikke laag van EPS blokken aangebracht met 1 m zand daarop. Tot slot werd het wegdek, bestaande uit van boven naar onderen: 50 mm ZOAB, 3x STAB (50 mm+2x55 mm) en een fundering

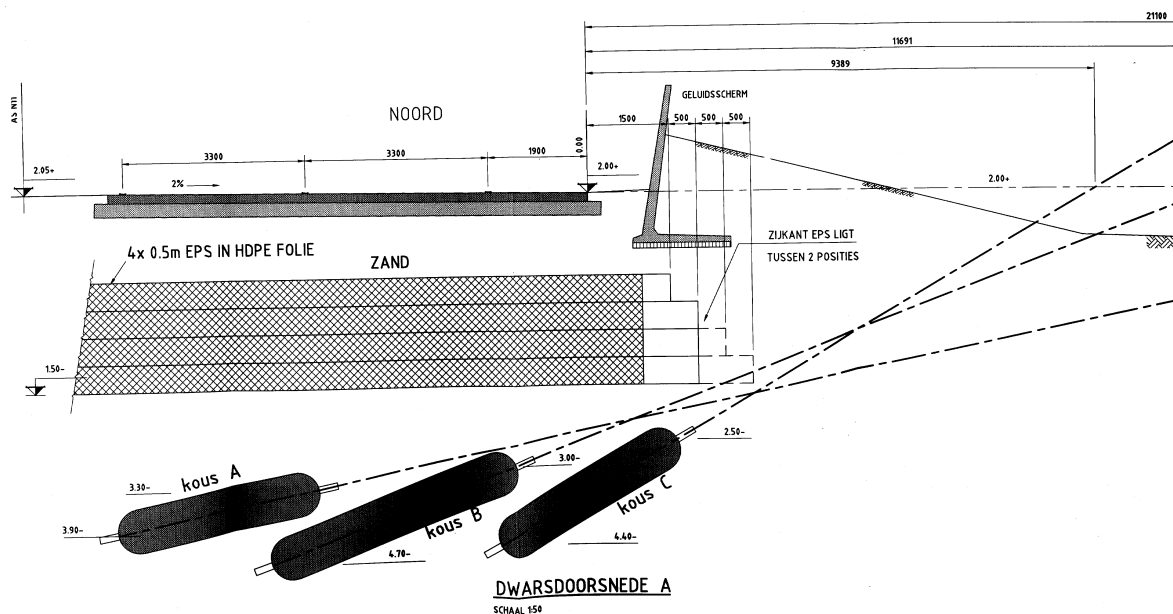
van 250 mm betongranulaat, aangebracht. De ondergrond onder het oude aanvulzand bestaat voornamelijk uit organische klei tot op NAP -11,5 m.

Het programma van eisen voor het onderhogen omvatte onder meer de volgende aspecten:

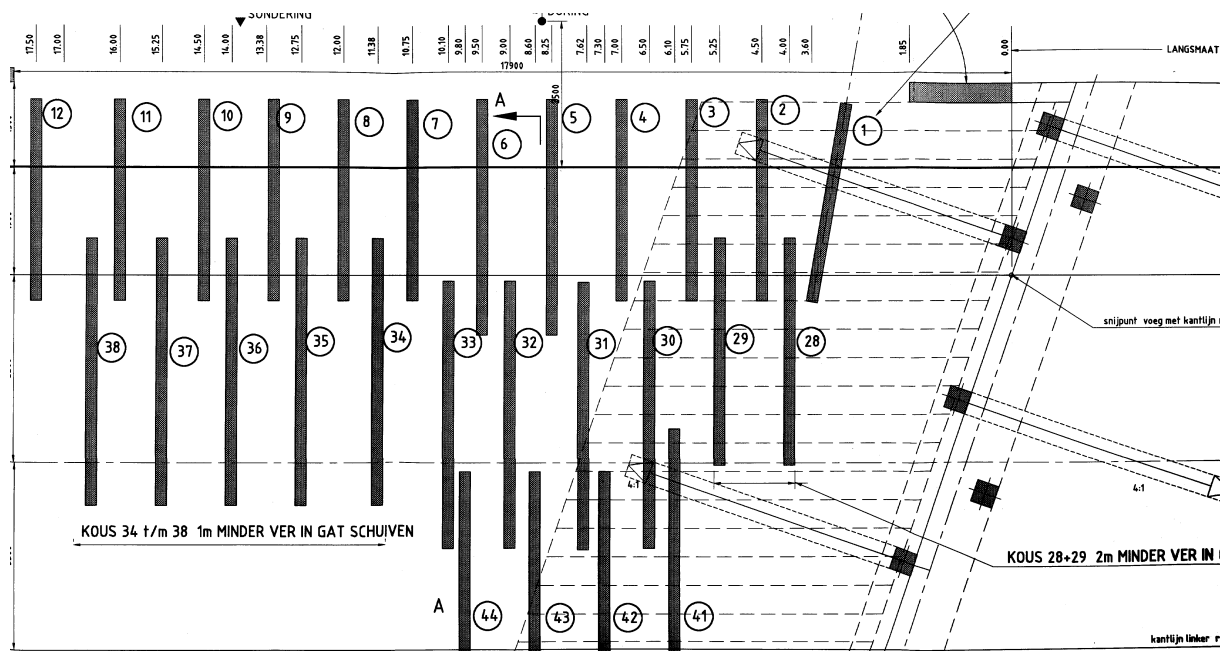
1. ontwerp: dichtheid vulmateriaal (kleiner dan 1000 kg/m³), levensduur materialen (groter dan 50 jaar), nogmaals onderhogen moet mogelijk blijven. Verder eisen t.a.v. beoogd wegprofiel, draagkracht wegfundering en functie stootplaat. Uit het ontwerp moet blijken dat na onderhogen de zakkingsnelheid niet ongunstiger wordt dan bij conventioneel uitvullen. Daarnaast mag de waterhuishouding en de ontwatering van het asfalt niet ongunstig worden beïnvloed.
2. hinder voor de omgeving: onder meer het aantal snelheidsbeperkingen en tijdelijke wegafzettingen moet tot het minimum worden beperkt.
3. eisen t.a.v. monitoring en te nemen maatregelen bij afwijkingen.
4. eisen t.a.v. uitvoering: het wegdek moet voldoen aan de standaard eisen, geldend voor een autosnelweg (zie [4]) t.a.v. hellingen en oneffenheden in wegdek. Verder mogen er geen scheuren ontstaan, dan wel de scheurwijdte mag niet toenemen met meer dan een aantal millimeters.
5. eisen aan het project op termijn: 3 maanden na injecteren zal de consolidatie van de grond t.g.v. onderhogen naar verwachting voltooid zijn.
6. Toetsing draagkracht wegfundering d.m.v. valdeflectiemetingen vooraf en achteraf.
7. Veiligheid palen onder landhoofd.

De kousen zijn geplaatst in 3 rijen, onder de EPS-laag (zie figuur 3). Hiertoe werden er vanuit de noordelijke berm gaten geboord, waarin de opgevouwen kousen zijn geplaatst. De kousen zijn gemaakt van rond geweven geotextiel (Polyester doek met een treksterkte in lenterichting van 100kN/m en in omtreksrichting 200 kN/m) met een diameter 800 mm na vulling. Binnenin de kous bevindt zich de injectiebuis. De kousen zijn niet waterdicht. Aan de kop en staarteinden van de kousen bevindt zich een zware klemconstructie.

Afhankelijk van de beoogde opdrukking zijn de hart op hart afstanden tussen de kousen gevarieerd, zoals te zien in figuur 4.



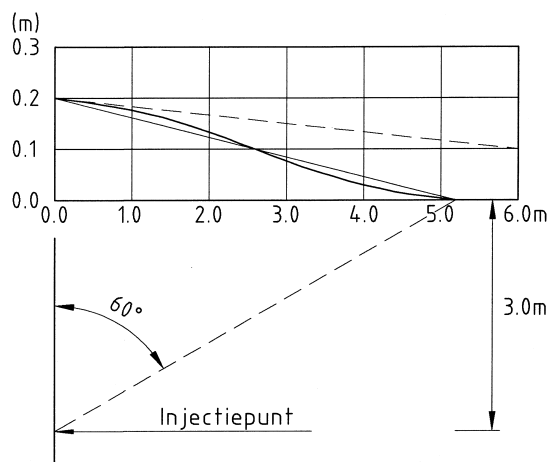
Figuur 3. De posities van de kousen in dwarsdoorsnede van de noordbaan van de N11.



Figuur 4. De posities van de kousen in bovenaanzicht van noordbaan N11 (scan is niet compleet).

Aangezien de rechterrijstrook de meeste zetting vertoonde, zijn daar de meeste kousen geplaatst. De kousen C zijn gedeeltelijk onder de noordberm geplaatst, om een gelijkmatige opdrukking van het asfalt te verkrijgen.

De opdrukking is berekend met een rekenmodel, zoals afgeleid uit het resultaat van de voorgaande proef met het kleine weglichaam. In de kousen zijn hiertoe fictieve injectiepunten h.o.h. 1m verondersteld. Vanuit een injectiepunt is de spreiding van de opwaartse deformaties onder een hoek van 60° t.o.v. de verticaal. De vorm van de opdrukking is een omwentelingslichaam van een rechte lijn, met daarop gesuperponeerd een sinuslijn (zie figuur 5). De opdrukking is nul, daar waar de spreiding 60° is.



Figuur 5. Radiale doorsnede van opdrukkingsprofiel t.g.v. een injectiepunt op 3 m diepte.

De inhoud van het omwentelingslichaam is gelijk gesteld aan de hoeveelheid injectiemateriaal, gecorrigeerd met een aantal verliesfactoren.

- Factor 0,9 voor samendrukking EPS in suspensie en waterverlies door kous
- Laagdikte van 0,05 m als initieel benodigd volume om de grond horizontaal op te spannen. Dit wordt in rekening gebracht d.m.v. de factor: beoogde opdrukking/(beoogde opdrukking+0,05).
- Factor 0,77 voor de zakkings van het terrein tijdens de productieperiode.
- Factor 0,8 voor de nazakking (gedurende 3 maanden) nadat de injectiewerkzaamheden gereed zijn.

Zodoende varieert de effectiviteit van 5% bij 5 mm opdrukking tot 38% bij 105 mm opdrukking. M.b.v. dit rekenmodel is de configuratie van kousen geoptimaliseerd door de berekende opdrukking te vergelijken met de gewenste. Om de effectiviteit te vergroten is voorzien dat de dichtbij elkaar gelegen kousen (1,25 m. h.o.h.) om en om zullen worden gevuld. In tweede instantie worden de tussengelegen kousen gevuld. Om het effect van deze injectievolgorde in rekening te brengen is in het rekenmodel de laagdikte van 0,05 m i.v.m. horizontaal opspannen van de grond aangepast, zodanig dat het rendement voor de in eerste instantie te vullen kousen grofweg 2 maal zo klein was als voor de in tweede instantie te vullen tussenliggende kousen. In totaal moet 97,7 m³ geïnjecteerd worden om alle kousen optimaal te vullen. Er wordt tevens gestuurd op een maximaal toelaatbare druk van 2,7 bar, i.v.m. de sterkte van de kous.

3.2 Uitvoering

De bouwplaats was toegankelijk via het weiland. Grote transporten vonden plaats met een afzetting van de rechter rijstrook (3x gedurende 3 uur). In verband met de veiligheid is uit voorzorg de maximum snelheid ter plekke beperkt tot 70 km/uur.

Er zijn 47 injectiebuisen geplaatst, door eerst een gat te boren met een diameter van 180 mm, deze te vullen met bentoniet slurry en dan de injectiebuis met hieromheen de geplooidde kous in te schuiven (zie figuur 6). Dit heeft 7 dagen in beslag genomen. Ten gevolge van het boren is het diepste punt van de kuil in het asfalt 15 mm gezakt, zodat in totaal 141 mm moet worden onderhoogd. Dit is 35 mm meer dan voorzien in het plan van aanpak. De resterende 20 mm is de zetting die is opgetreden tussen 5 maart 2002 (= hoogtemeting waarop het ontwerp is gebaseerd) en de opnieuw gemeten hoogteligging bij de start van de werkzaamheden.



Figuur 6. Het inbrengen van een kous in een boorgat onder het weglichaam. Rechts is de groutankermachine die de boorgaten heeft gemaakt.

Daarna zijn de kousen in 5 dagen geïnjecteerd. Alvorens te injecteren is de injectiebuis 1 m getrokken zodat de injectieopening aan de onderkant van de buis vrijkwam en daarna werd er 100 liter bentoniet ingepompt, om de injectiebuis vol te zetten met zacht blijvend materiaal. Het vulmateriaal bestond uit de volgende bestanddelen per charge van 430 liter:

- 283 liter bentoniet suspensie (40 kg bentoniet op 938 liter water)
- 50 kg hoogovencement (CEM III)
- 1 zak EPS van 130 liter.

Dit levert 300 liter CB + 130 liter EPS = 430 liter per charge.

Beoogd was om met 3 pompen gelijktijdig (3 kousen met elk een pomp en een afsluiter) te injecteren. Dit bleek niet altijd mogelijk, omdat niet alle kousen even groot zijn, sommige kousen kapot gingen, dan wel dat de druk in een vroegtijdig stadium te hoog opliep. Met het doel de benodigde druk in de kousen te beperken, zijn later met 3 pompen 6 kousen gelijktijdig gevuld. Dit door per paar kousen om en om 430 liter te injecteren. Per aanvoerslang werd een spruitstuk gebruikt waarop 2 afvoerslangen met afsluitkraan.



Figuur 7. Het vullen van de kousen. De grout wordt aangevoerd door aan de injectiebuizen aangesloten slangen.

Er zijn diverse injectiepatronen gevolgd: “op lijn dwars over de rijstroken”, als “rechthoek” en “op rij naast elkaar”. De hypothese was dat het rendement van het vullen van de kousen tussen reeds gevulde kousen groter zou zijn, net als het geval was geweest bij het voorgaande experiment met het onderhogen van de boom. Er is begonnen met de kousen 2, 41 en 49 onder de stootplaat, om zo de ondergrond op te spannen, zodat de injectie van de kousen 3, 30 en 42 effectiever zou zijn. Uiteindelijk bleken de effecten aan maaiveld bij het aldus vullen van deze kousen veel kleiner te zijn dan verwacht (minstens factor 5). Daarna is verder gegaan met het vullen van die kousen waarboven de meeste opdrukking nodig is.

De hoeveelheden verwerkt materiaal zijn gegeven in Tabel 1.

| Dag | Geïnjecteerde kousen | Hoeveelheid (m ³) | Bijzonderheden |
|----------------|---|-------------------------------|--|
| 30 september | 2, 41, 49 | 6,4 | Alleen s'middags geïnjecteed |
| 1 oktober | 3, 30, 42, 5, 32, 44, 7, 34, 9 | 14,9 | Lange werkdag |
| 2 oktober | 36, 38, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 | 11,7 | |
| 3 oktober | 39, 45, 46, 40, 47 | 5,4 | Trage productie door snel oplopende druk |
| 4 oktober (vr) | 22, 23, 24, 25, 26, 27, 45, 12, 13, 14 | 7,9 | |
| 7 oktober (ma) | 1, 2, 28, 44, 4, 31, 6, 33, 5, 4, 8, 10 | 11,8 | |
| 8 oktober | 35, 36, 37, 11, 10 | 5,3 | 95% van kousen (gedeeltelijk) gevuld, scheurbreedte in asfalt onacceptabel, einde werk |
| TOTAAL | | 63,4 | |

Tabel 1: Overzicht van de geïnjecteerde hoeveelheden per werkdag.

De kousen C bleken tijdens het vullen het meest problematisch te zijn: van de 27 zijn er slechts 4 gevuld volgens plan, 5 stuks konden niet volgens plan worden gevuld, omdat ze vóór het bereiken van de grensdruk van 2,7 bar kapot gingen. Voor de resterende 18 kousen kon de geplande hoeveelheid nog niet geïnjecteed worden voor het bereiken van de grensdruk van 2,7 bar.

Van de 20 kousen A en B zijn er 11 volgens plan geïnjecteed, 2 kousen gingen kapot bij een druk lager dan 2,7 bar, voordat de geplande hoeveelheid was geïnjecteed. Bij de overige 7 kousen is het injecteren gestopt vanwege het bereiken van de 2,7 bar druk.

Op 8 oktober zijn de injectiewerkzaamheden gestaakt, omdat de scheurwijdte van enkele oude scheuren in het midden van de rechter rijstrook onacceptabel werd. In totaal is er 63,4 m³ geïnjecteed van de geplande 97,7 m³.

3.3 Monitoring

Voorafgaande aan, tijdens en na het onderhogen is het wegdek niveau frequent gemeten m.b.v. een tachymeter. Aan de hand van tenminste 3 vaste punten bepaalt de tachymeter zijn eigen positie, waarna hij op basis van enkele kenmerkende punten op het wegdek, het raster van meetpunten zelf bepaalt. De bijhorende richtingen worden door de computer opgeslagen en kunnen steeds opnieuw worden opgeroepen, waarna de hoogtemeting plaatsvindt. Het wegdek kan vrij blijven en het verkeer kan blijven rijden. De tachymeter bevond zich op een 2 meter hoge paal, die was vastgezet op het landhoofd. In de noordelijke berm en op een nabij gelegen geluidsscherm zijn op enkele raaien reflectoren geplaatst t.b.v. van het volgen van de deformaties. Om deze laatste metingen te doen was een tweede tachymeter nodig. Op het wegdek werd er van rechts naar links gemeten op rand asfalt, rechterkantstreep, midden rechterrijstrook, as noordbaan, midden linker rijstrook en kantstreep linkerrijstrook, met hart op hart afstanden van 2 meter. Daarnaast is er op enkele raaien op de zuidbaan gemeten. Aan de hand van de metingen kon de injectievolgorde en de te injecteren hoeveelheden worden bijgestuurd.

In aanvang zijn enkele controlemetingen m.b.v. een total station uitgevoerd. De nauwkeurigheid van de tachymeter varieert van 1 mm op 10 meter afstand tot 5 mm op 40 meter afstand. De conclusie is dat een tachymeter een aardig alternatief is voor een total station. Daarnaast is na het injecteren gedurende 3 maanden m.b.v. de tachymeter het wegdek niveau gemeten.

Ter controle van de stabiliteit van het landhoofd en het talud onder het viaduct zijn 4 piketten aan de teen van het talud geplaatst met h.o.h. afstand van 2 meter. Verder is aan de zijkant de spleet tussen het landhoofd en viaductplaat opgemeten.

Het wegdek is dagelijks visueel gecontroleerd op het ontstaan van nieuwe scheuren of breder worden van al bestaande scheuren.

Om de invloed van onderhogen op de draagkracht van de wegfundering vast te stellen zijn valdeflectiemetingen uitgevoerd: voorafgaande aan het plaatsen van de kousen en na beëindiging van de werkzaamheden. De rechter rijstrook werd 2 weken na het onderhogen gemeten, de linker rijstrook 3 weken na het onderhogen.

Ter controle van het volumegewicht zijn van het mengsel enkele proefstukken gemaakt voor beproeving in het laboratorium.

3.4 Resultaten.

Zoals vermeld in paragraaf 3.2 is om verschillende redenen van de beoogde 97,7 m³ slechts 63,4 m³ geïnjecteerd. De gemeten opdrukking bleef achter bij de verwachting, zowel direct na het injecteren als nadien. Figuur 8 toont de opdrukking van de rechterkantstreep van de rechter rijstrook aan het einde van de injectieperiode (8 oktober), en op enkele tijdstippen nadien. Op 4 november is de wegdekhogte vrijwel gelijk aan die op 23 september (na de boorwerkzaamheden). In de twee maanden nadien is het wegdek niveau niet verder meer gedaald, en is een stabiele situatie ontstaan. De maximale opdrukking die tijdens de injectiewerkzaamheden werd gehaald is 40 mm (op 8 oktober t.o.v. het niveau op 30 september). Beoogd was 141 mm. Bij het injecteren van de verschillende clusters van nabij gelegen kousen bleef de gemeten opdrukking ook duidelijk achter bij de door het rekenmodel voorspelde (factor 3 tot 5), bij de daadwerkelijk geïnjecteerde hoeveelheden. Meerder keren bleek 's morgens nog slechts de helft te resteren van de opdrukking van de vorige werkdag. Dit duidt op een snelle consolidatie van de omringende grond.

De hellingen van het wegdek bleven binnen de toegestane marges.

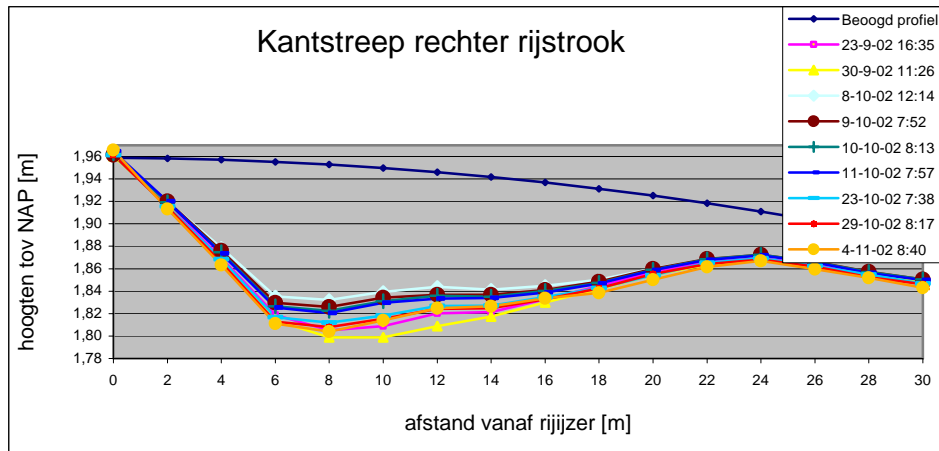
De metingen in de noordelijke berm laten zien dat deze iets daalt (10 mm) en wat naar buiten beweegt (20 mm). Hetzelfde geldt voor het geluidsscherm. De metingen aan de piketten in de teen van het talud onder het viaduct laten een horizontale verplaatsing in oostelijke richting van 20 mm zien.

Visuele inspectie van het wegdek t.a.v. scheuren laat zien dat er voor het onderhogen een scheur aanwezig was halverwege de rechter rijstrook, 8 meter uit het rijijzer, over een lengte van 2 meter.

Deze scheur is vrijwel dicht en er is geen hoogteverschil aanwezig. Op 2 oktober werd een lichte toename van de scheurlengte waargenomen. Op 4 oktober begint een tweede scheur zich te tonen. Op 8 oktober werd de scheurbreedte van 30 mm onacceptabel t.a.v. de veiligheid van de weggebruikers en werd met injecteren gestopt. De scheuren zijn direct gerepareerd.

Een vergelijking van de valdeflectiemetingen vooraf en achteraf laat zien dat de draagkracht van de wegfundering niet is aangetast. De metingen in de nabijheid van de scheuren zijn echter slecht te interpreteren.

T.a.v. de stabiliteit van het landhoofd is de breedte van de spleet tussen landhoofd en viaductplaat niet veranderd. Verder zijn de verplaatsingen van de piketten onder het landhoofd zodanig dat verwacht kan worden dat de palen onder het landhoofd geen ontoelaatbare deformaties hebben ondergaan.



Figuur 8. Wegdekhogten na injectieperiode en op enkele tijdstippen nadien, samen met hoogte direct voor boren en beoogde wegdekhogte. Ter vergelijking zijn gegeven het beoogde profiel en de meting van 23 september voorafgaande aan de injectie.

3.5 Analyse.

Een belangrijke oorzaak voor het feit dat er minder geïnjecteerd is dan werd beoogd is dat de kousen C (deels gelegen onder de berm) niet geheel konden worden gevuld, voornamelijk door het vroegtijdig barsten van de kousen. De gemeten drukken zijn met name voor kousen C hoger dan verwacht. De waarschijnlijke oorzaak hiervan is dat ten gevolge van het gewicht van de forse berm de gronddruk hoger is dan op grond van de aanwezigheid van de EPS laag verwacht werd. De kousen bevinden zich grotendeels in (berm)zand, met het onderste deel in de onderliggende kleilaag. Voor zijwaartse expansie in zand is een druk nodig van 4 bar, voor de opwaartse expansie 2 à 3 bar, afhankelijk van 2D-effecten tijdens het vullen. In de zachte organische klei is de lokale weerstand niet groter dan 1 Bar. De kous moet voldoende sterk zijn om dit verschil en tegendruk van de omringende grond te kunnen opvangen. De kousen A en B (geheel onder het wegdek) blijken sterk genoeg te zijn om de zijwaartse en opwaartse expansie mogelijk te maken, de kousen C echter niet. Dit verklaart het feit dat bij 18 van de 27 kousen C de grensdruk van 2,7 bar werd bereikt voordat de kousen geheel gevuld waren. Verder werd er bij het maken van de boorgaten een keer prikkeldraad aangetroffen. De tijdens het injecteren gemeten deformaties blijken een factor 3 kleiner te zijn dan die zoals voorspeld met het rekenmodel uitgaande van de werkelijk geïnjecteerde hoeveelheden. Er is gezocht naar mogelijke verklaringen. Een reden kan zijn dat er meer filtratie door het kousweefsel optreedt dan verwacht. Dit omdat de drukken vrij hoog waren. Er zijn laboratoriumproeven uitgevoerd om dit te onderzoeken. De conclusie is dat zeker 30% van het volume verloren gegaan is t.g.v. filtratie van water door het doek. Dit water kon snel worden afgevoerd via het aanvulzand en de verticale drains. Een tweede reden voor de geringe opdrukking is de grotere samendrukking van de EPS-korrels. In het mengsel is bij atmosferische druk het volume hiervan 30%, terwijl dit bij een druk van 3 bar afneemt tot 7,5%.

Dit betekent dat de factor 0,9 waarin deze twee effecten verdisconteerd zijn, naar beneden moet worden bijgesteld tot 0,54.

Een derde reden voor de geringe opdrukking is de snelle consolidatie van de omringende grond. Voor het ontwerp was het effect van consolidatie van de omringende grond verdisconteerd in de factoren 0,77 voor zakkings tijdens de productietijd en 0,8 voor nazakking gedurende 3 maanden. In totaal geeft dit een factor van 0,62. Uit het gemeten zettingsverloop tijdens de productietijd volgt echter dat de factor 0,77 eerder 0,5 moet zijn. Daarnaast is de nazakking groter dan verwacht, immers de behaalde maaiveldrijzing van 4 cm is tot nul gedaald na 1 maand en blijft zo gedurende de twee maanden daarna. De consolidatie verloopt sneller dan verwacht t.g.v. de aanwezigheid van de verticale drains. Een vierde reden voor de geringe opdrukking is het zijwaarts verplaatsen van de noordelijke berm. Het lijkt er op dat een deformatie langs een oud glijvlak in de onderliggende grond is opgetreden. Dit

glijvlak was ontstaan bij de eerder vermelde gefaseerde voorbelasting van de grond bij aanleg. De kousen C liggen bijna haaks op dit glijvlak en kunnen de afschuivende wig uit elkaar drukken. Daarnaast was de opdrukking t.g.v. de gebrekkige vulling van de kousen C (deels onder de berm) minder dan in het midden onder het wegdek. Dit leidde mede tot problemen t.a.v. scheurvorming. Een vijfde reden is de samendrukking van de 2 meter dikke laag van EPS blokken (materiaal EPS20). Indien de druk op dit EPS ongeveer 100 kPa bedraagt, dan wordt het EPS significant ingedrukt (5% rek).

3.6 Leerpunten

* Aangezien er aanzienlijk volumeverlies optreedt t.g.v. de consolidatie en zijdelings wegduwen van de omringende slappe grond, zullen indien mogelijk de kousen in de aardebaan van zand worden geplaatst.

* Om het zijdelings wegduwen van de berm te voorkomen kunnen langere kousen worden geplaatst die dienen als trekstangen. Een combinatie met korte kousen zorgt dan voor de fijnregeling van het te injecteren volume.

* Om uitpersen van water te voorkomen zullen de kousen voorzien worden van een of meerdere waterdichte liners.

* Er zullen kousen van sterker materiaal worden gebruikt, waarbij ook gekeken wordt naar kleinere diameters (0,5 m).

* Er zullen meerdere (minstens 5) kousen tegelijk worden gevuld, omdat dit een lagere druk vereist en een grotere en gelijkmatiger opdrukking geeft. Dit blijkt ook uit verkennende centrifugeproeven (zie [5]). Uit deze verkennende centrifugeproeven blijkt ook dat de benodigde druk in de kousen ook op kleinere diepte nog steeds aanzienlijk is, ook als er meerdere kousen gelijktijdig worden gevuld.

* Gezien de grote samendrukking van EPS en de betere verwerkbaarheid van alleen cement/bentoniet, is besloten voortaan alleen cement/bentoniet te injecteren. Dit heeft een volumegewicht van 1135kg/m³. Dit is nog steeds significant lichter dan het alternatief: extra asfalt.

* Bij een volgende proef met een weglichaam is het van belang vooraf de voorgeschiedenis van de weg bij aanleg goed te kennen. Dit belangrijk voor de bepaling van de opbouw van de grond onder het weglichaam en eventuele bezwijkcirkels.

4. Vervolg

Het concept: meerdere kousen gelijktijdig vullen vanuit een mobiele installatie met kousen in zandig weglichaam en met sterkere kous, zal dit najaar worden beproefd. Hierbij wordt er geïnjecteerd in een zandlichaam dat de vorm heeft van een weglichaam. Er zullen 4 typen kousen worden beproefd, met verschillende diameters op verschillende diepten. De kousen worden nadien uitgegraven ter inspectie. Er is overwogen om schuimbeton te injecteren. Proeven hiermee gaven echter aan dat het moeilijk is het juiste volumegewicht te maken. Een volumemeting tijdens injecteren is onmogelijk vanwege de aanwezigheid van luchtbellen.

Ter voorbereiding van de veldproef zijn centrifugeproeven aan de TUD uitgevoerd, waarbij verschillende aantallen expanders gelijktijdig zijn geïnjecteerd. Hieruit volgt dat er minstens 5 expanders tegelijk moeten worden gevuld, wil men een maximale (1 dimensionale) opdrukking verkrijgen. De benodigde druk was voor 1 expander 399 kPa en in de middelste van 5 expanders 256 kPa. Deze laatste druk is altijd nog significant hoger dan de 1-D verticale gronddruk. Hiermee zal rekening worden gehouden bij de veldproef.

5. Conclusies

Het product onderhogen is nog steeds in ontwikkeling en dit heeft meerdere verrassende wendingen laten zien. Hoewel de uitkomsten anders waren dan verwacht, kan de proef als geslaagd worden beschouwd. Er zijn voldoende verbeterpunten gesignaleerd om het concept te handhaven. Centrifugeproeven ondersteunen de gevonden resultaten. De monitoring m.b.v. een tachymeter werkt goed. Onderzoek naar sterkere kousen is noodzakelijk.

Referenties

1. Si2: drie workshops over innovatie in de lijninfrastructuur (april 2000), DWW Publicatienummer W-DWW-2000-039.
2. Wichman, B.G.H.M. 2002, Zettingen compenseren door onderhogen. Geotechniek no. 4, oktober 2002, pp. 70-72.
3. Wichman, B.G.H.M. 2002, First results of settlement correction of road embankments without traffic interruption. Proc. 4th Int. Conf. on Ground Improvement Techniques, 26-28 March 2002, Kuala Lumpur. ISBN 981-04-5823-1, pp.745-751.
4. Bronnen: 'Groot onderhoud aan snelwegen-onderhoudsadvisering asfaltbetonverhardingen' DWW; DWW-wijzers 48 en 48a; Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen' AVV.
5. Wichman, B.G.H.M. & H.G.B. Allersma 2003, Centrifuge modelling of soil upheave by expanding tubes. Proc. Of XIIIth European Conference on Soil mechanics and Geotechnical Engineering, TC17, Ground Improvement.