



Onderhogen: van idee tot uitvoering

kader: stimuleringsprogramma innovatie in de infrastructuur
17 februari 2005

DWW-2005-011

ISBN nummer: 90-369-5580-7

.....

Colofon

Uitgegeven door: RWS Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Informatie: dr. B.G.H.M. Wichman; ir. L.E.B. Saathof
Telefoon: 015-2518417; 015-2518378
Fax: 015-2518555

Uitgevoerd door: auteur: dr. B.G.H.M. Wichman

Datum: 31 januari 2005

Inhoudsopgave

Samenvatting	7
1 Achtergrond	9
1.1 Behoeftte aan ophogen van onderaf	9
1.2 De tijd is rijp voor onderhogen	10
1.3 Plaats Onderhogen in het Stimuleringsprogramma Innovatie in de Infrastructuur	10
1.4 Afbakening project onderhogen	10
1.5 Betrokken partijen	11
2 Uitwerking idee: programma van eisen	13
2.1 Wat is onderhogen?	13
2.2 Functionele eisen	13
2.3 Technische eisen	13
2.4 Aanpak project onderhogen	13
3 Verkenning technieken	17
3.1 Literatuurstudie	17
3.2 Verkennende Eindige Elementen berekeningen	17
3.3 Injectietechnieken	17
3.4 Beproeving injectietechnieken (voorjaar 2001)	18
3.5 Conclusies ten behoeve van ontwerp	19
4 Ontwerpfase	21
4.1 Voorbereiding	21
4.2 Uitvoeringswijzen: 2 proeven in veld (najaar 2001)	21
4.2.1 Proef met klein weglichaam bij Hendrik Ido Ambacht	21
4.2.2 Proef met optillen van een boom (puntlast)	22
4.3 Bruikbare elementen uit ontwerp	24
4.4 Haalbaarheid opschaling proeven	24
5 Uitvoering ontwerp	25
5.1 De locatie	25
5.2 Eisen aan het ontwerp: risico verdeling opdrachtnemer/opdrachtgever	26
5.3 Het ontwerp	27
5.4 De proef met onderhogen N11 (najaar 2002)	30
5.4.1 Doelstelling proef	30
5.4.2 Uitvoering	30
5.4.3 Resultaten	32
5.4.4 Analyse	33
5.4.5 Aanvullende elementproeven	34
5.5 Conclusies	35
5.6 Mogelijke verbeteringen ontwerp en uitvoering	35

6	Optimalisatie ontwerp	37
6.1	Het aangepaste ontwerp	37
6.2	Beproeving aangepast ontwerp	37
6.2.1	Proef op Maasvlakte in talud Slufterdijk (najaar 2003)	37
6.2.2	Proeven in geocentrifuge TU Delft (einde 2002-begin 2003)	38
6.2.3	Proeven met schuimbeton vulling	40
6.2.4	Beproeving verbeterde materialen voor kousen	40
6.3	Probleempunten	41
7	Analyse	43
7.1	Analyse in de diepte: Eindige Elementen berekeningen	43
7.1.1	Mogelijkheden Plaxis	43
7.1.2	Mogelijkheden modellen Universiteit van Karlsruhe	44
7.1.3	Second opinion GeoDelft	46
7.1.4	Begrijpen we nu wat meer?	46
7.2	Gewenste aanpak resterende probleempunten	46
8	Conclusies	49
8.1	Waar staan we nu?	49
8.2	Welke eisen zijn haalbaar gebleken?	49
8.3	Huidige toepassingsmogelijkheden onderhogen	49
8.4	Wat kunnen we nog meer bereiken?	49
9	Toekomst onderhogen	51
9.1	Kansen voor onderhogen	51
9.2	Wanneer is onderhogen rendabel?	51
9.3	Implementatie binnen RWS projecten	52
9.4	Andere toepassingen van onderhogen	52
9.5	Kennisoverdracht	52
9.6	Wie zal in de toekomst onderhogen oppakken?	52
	Literatuurlijst	53

Samenvatting

Dit rapport bevat een overzicht van de activiteiten uitgevoerd binnen het project onderhogen, in het kader van Si², het stimuleringsprogramma in de infrastructuur. Het project werd opgestart einde 1999 en wordt nu afgerond met deze eindrapportage.

Het rapport beschrijft tevens het proces dat is doorlopen om te komen van het idee onderhogen tot daadwerkelijke uitvoering op praktijkschaal. Beschreven wordt wat onderhogen is, namelijk door het injecteren in de ondergrond het maaiveld optillen, en wat de toepassingsmogelijkheden met de huidige stand van de techniek zijn.

Tevens wordt gekeken naar toekomstige ontwikkelingen.

Er is een literatuurlijst opgenomen van alle relevante rapporten en publicaties.

1 Achtergrond

1.1 Behoefte aan ophogen van onderaf

Een bekend verschijnsel voor iedere automobilist zijn de hoogteverschillen in het wegdek, waardoor de vering van de auto zwaar wordt aangesproken (zie figuur 1). Voor vrachtauto's geeft dit onaanvaardbare problemen, waardoor deze gedwongen worden als eerste hun snelheid aan te passen. Deze hoogteverschillen in het wegdek worden voor een belangrijk deel veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen van het weglichaam, met name bij aansluitingen op kunstwerken. De huidige praktijk is om deze ongelijkmatigheden uit te vlakken. Hierbij wordt de rijbaan afgesloten en wordt het asfalt deels weggefreed en opnieuw aangebracht. Dit geeft een aanzienlijke hinder voor het verkeer, met name op drukke rijkswegen. Dienstkringen hebben sinds geruime tijd de behoefte om stootplaten van onderaf op te tillen, door de holle ruimte onder de stootplaat op te vullen met materiaal. Men heeft dat in het verleden hier en daar ook geprobeerd, tot nu toe helaas zonder succes.



Figuur 1 Kuilen in wegdek oostelijke rijbaan van de N3 bij Papendrecht

Meer in het algemeen is er de laatste decennia een behoefte ontstaan om zettingscorrecties uit te voeren van verzakte objecten, zoals huizen, monumentale bomen etc. Deze behoefte is gegroeid, daar de techniek dit inmiddels mogelijk maakt voor aanvaardbare kosten. In de jaren 90

heeft het compenserend grouten bij boortunnels in Nederland een grote vlucht genomen.

1.2 De tijd is rijp voor onderhogen

De behoefte is dus gegroeid om op te hogen van onderaf, waarbij objecten hun functionaliteit grotendeels behouden. In Nederland is voor deze oplossing de term “onderhogen” bedacht, m.n. door prof. Schuiling (Universiteit van Utrecht). In de jaren 90 zijn door meerdere partijen enkele veldproeven uitgevoerd om de haalbaarheid van onderhogen te onderzoeken. Conclusie is dat de technische oplossing voor het onderhogen van wegen inmiddels binnen handbereik ligt. Het grote voordeel van onderhogen is dat het verkeer nagenoeg niet wordt gehinderd. De kosten van onderhogen t.o.v. die van het uitvlakken van asfalt zijn echter aanzienlijk. Uit berekeningen blijkt dat onderhogen voor drukke Rijkswegen economisch rendabel kan zijn, mits filekosten worden meegenomen in de afweging.

Rijkswaterstaat is zich zeer bewust van de steeds nijpender fileproblematiek en werkt aan mogelijkheden om bestaande wegen beter te gebruiken. Er is door AVV een computerprogramma, genaamd MTR, ontwikkeld waarmee filekosten kunnen worden berekend, als gevolg van verkeersmaatregelen, zoals wegafzettingen.

Rijkswaterstaat denkt aan mogelijkheden om een deel van de filekosten bij de Dienstkringen in rekening te brengen, om zo te stimuleren dat er zo min mogelijk verkeershinder ontstaat als gevolg van wegwerkzaamheden. Het meenemen van filekosten bij de afweging van onderhogen versus traditioneel uitvlakken van wegen lijkt de toekomst te hebben.

1.3 Plaats Onderhogen in het Stimuleringsprogramma Innovatie in de Infrastructuur

Onderhogen wordt ontwikkeld in het kader van het DWW-project Stimulering Innovatie in de Infrastructuur (Si²). Het was één van de vijf kansrijk geachte onderwerpen die deel uitmaakten van het zogenaamde Heeren Huys akkoord [1]. Dit akkoord werd gesloten in het kader van drie workshops met vertegenwoordigers van overheid, aannemerij, TU Delft, GTI's en ingenieursbureaus. Het Si²-project wordt binnenkort afgerond.

1.4 Afbakening project onderhogen

Onderhogen is in het kader van Si² verder ontwikkeld voor twee concrete situaties:

- het corrigeren van kuilen in het wegdek in de overgangszone naar een kunstwerk, zoals een viaduct of onderdoorgang, waarbij het verkeer nagenoeg niet wordt gehinderd. Deze toepassing is in nauwe samenwerking met RWS Zuid Holland ontwikkeld.
- het optillen van verzakte bomen van grote natuurhistorische waarde, waardoor de wortelpruik op voldoende hoogte boven het grondwater blijft, om rotting van de wortelpruik en vervolgens omvallen van deze bomen tegen te gaan. Deze toepassing is in nauwe samenwerking met

Omegam (was destijds ingenieurbureau van de stad Amsterdam) ontwikkeld.

1.5 Betrokken partijen

De projectgroep Si²-onderhogen heeft de volgende leden:

Rijkswaterstaat DWW	dr. B.G.H.M. Wichman ing. J.G. Bastiaans (vanaf april 2002) ir. L.E.B. Saathof (vanaf april 2002) ir. J.D. van Duijvenbode (2000-april 2002)
BAM Grondtechniek Omegam, later DWR Rijkswaterstaat Zuid Holland	ir. E.J. Huiden ing. C.A.G. Hogenes ing. E.W. Hennevanger (vanaf september 2001) J.P.J. Brulot (2000-november 2002)

Incidentele leden:

Crux Engineering B.V. Rijkswaterstaat Zuid Holland	dr. ir. A.E.C. van der Stoel ing. D.H. Smits
---	---

Met medewerking van:

Dienstkring de Zuid Hollandse waarden	ing. D.S.R. van Hese C.A. Kiep (heden elders werkzaam) E.J. van Tweel (heden elders werkzaam)
Uitvoeringsbureau Noord West W.J.P. Vermeulen	J. Groothedde (heden: RWS Utrecht)

2 Uitwerking idee: programma van eisen

.....

2.1 Wat is onderhogen?

Onderhogen binnen ons projectkader is het gecontroleerd injecteren van een lichtgewicht suspensie in de ondergrond en in het weglichaam, vanuit een positie naast de weg, met als doel zettingsverschillen 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. De lichtgewicht suspensie bestaat uit cement/bentoniet slurry met hier optioneel aan toegevoegd lichtgewicht korrels. Injectie van de slurry in cilindervormige expanders is vaak noodzakelijk.

2.2 Functionele eisen

Er zijn twee functionele eisen die bij nadere uitwerking consequenties hebben voor de te realiseren vlakheid van het wegdek: comfort en veiligheid. Het onderhogen vervult een belangrijke rol bij het realiseren van deze eisen. Tevens mag de stijfheid en draagkracht van de wegconstructie en de grondwaterstroming in het weglichaam of in de omgeving van de weg door het onderhogen niet nadelig worden beïnvloed.

Tevens zijn eisen t.a.v. hinder voor de omgeving, milieueisen en eisen t.a.v. duurzaamheid van belang.

2.3 Technische eisen

De langsvlakheid wordt gemeten met de ARAN en uit de meetwaarden worden parameters bepaald, waaronder de IRI-waarden. Dit is een maat voor de langsvlakheid van een 100 meter lang weggedeelte.

Tevens zijn er technische eisen t.a.v. dwarsvlakheid, zoals rijspoordiepte, verkanting en scheurvorming.

Ook zijn er eisen gesteld aan het gewicht en stijfheid na uitharden van het vulmateriaal.

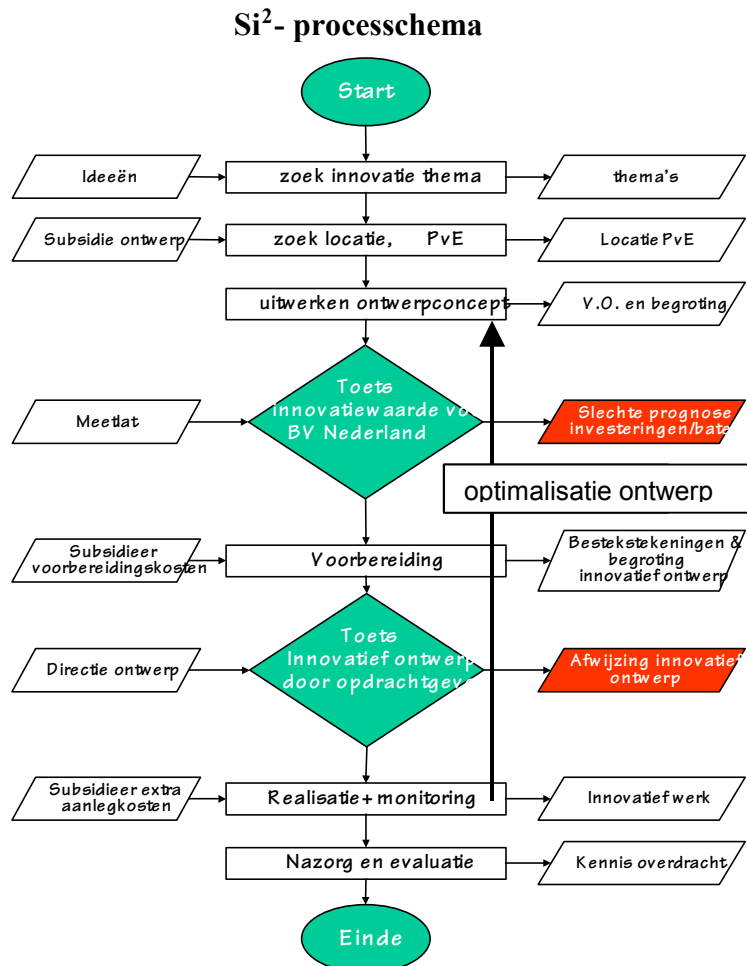
E.e.a. is concreet uitgewerkt als programma van eisen voor de proef met onderhogen van de N11 in paragraaf 5.2.

2.4 Aanpak project onderhogen

In de beginfase van het project onderhogen is een eerste opzet gemaakt van een programma van eisen. Met deze eisen in gedachten zijn de beschikbare technieken geïnventariseerd, waarbij in eerste instantie

prioriteit is gegeven aan de eisen t.a.v. gewicht, verwerkbaarheid en stijfheid vulmateriaal en de gelijkmatigheid van de opdrukking. Het proces dat in het project onderhogen is doorlopen is weergegeven in figuur 2.

De eerste stap in deze figuur werd genomen tijdens de laatste Si2-workshop op 11 november 1999, waar de kansrijke innovatie-richtingen



Figuur 2 Procesgang van project onderhogen

werden gekozen.

De volgende stap, het uitwerken van het ontwerpconcept, wordt behandeld in hoofdstuk 3 Verkenning technieken. De toets van de innovatieve waarde is uitgevoerd op twee manieren:

- door samen met RWS Directie Zuid Holland op zoek te gaan naar geschikte locaties. Er waren vele potentiële locaties en er bleek veel goodwill aanwezig bij de Dienstkringen.
- in het kader van een innovatieprijsvraag is door DWW in 2001 de eerste prijs toegekend aan het project onderhogen.

Alvorens het ontwerp daadwerkelijk op uitvoering getoetst kon worden waren er een aantal veldproeven noodzakelijk. Deze worden behandeld in hoofdstuk 4 Ontwerpfase. Hoofdstuk 5 gaat in op de uiteindelijke

uitvoering van het ontwerp op locatie N11 bij Hazerswoude. Het opdrukken van het wegdek was echter maar tot op zekere hoogte geslaagd, wat een nadere analyse (zie par. 5.4.4 en 5.4.5) en een optimalisatie van het ontwerp met beproeving (zie hoofdstuk 6) nodig maakte. Dit is in figuur 1 aangegeven met een pijl van realisatie naar uitwerken ontwerpconcept, d.w.z. dat er vrij fundamentele zaken moesten worden aangepast. Hoofdstuk 7 geeft een overzicht van de theoretische analyses die op verschillende momenten tijdens het project werden uitgevoerd.

Tijdens het project zijn er regelmatig evaluaties uitgevoerd samen met o.m. RWS Directie Zuid Holland en Omegam.

Dit rapport is een eindrapportage, met hierin geschetst het proces dat doorlopen is en een overzicht van de uitgevoerde werkzaamheden en het bevat een lijst met de betreffende rapporten en publicaties.

3 Verkenning technieken

3.1 Literatuurstudie

In 2000 is er een literatuurstudie uitgevoerd. De belangrijkste conclusies hieruit waren dat de mogelijkheden om, d.m.v. het injecteren van groutmengsels in de ondergrond, de zetting van objecten te compenseren een grote vlucht heeft genomen. Gebouwen zijn tot 20 cm omhoog getild. Monitoring volgens de observational method speelt hierbij een cruciale rol. Het ontwerp t.a.v. te injecteren locaties en hoeveelheden wordt in het algemeen op een semi-empirische wijze verkregen. Testveldjes om de rekenmethoden te toetsen zijn gebruikelijk. Eindige Elementen berekeningsmodellen worden nog niet veel toegepast. Er kunnen t.b.v. zettingscorrectie zowel dikkere als vloeibare groutmengsels worden geïnjecteerd. Het gedrag van de grond is hierbij duidelijk verschillend.

Toepassingen van lichtgewicht slurrymengsels met hieraan toegevoegd lichte korrels werden niet gevonden; evenmin werd injectie in expanders gevonden. Deze twee zaken zijn kenmerkend voor het onderhogen.

3.2 Verkennende Eindige Elementen berekeningen

Met behulp van het Eindige Elementen programma Plaxis is het gedrag van de grond rondom 1 of meerdere expanders onderzocht. Hieruit blijkt dat er pas significante verticale opdrukking optreedt wanneer de grond zijdelings is opgesloten, d.w.z. over voldoende breedte wordt geïnjecteerd. Bij expansie van slechts 1 expander treedt er in eerste instantie plaatselijk zelfs een zakking op van het maaiveld. Er zal dus op meerdere plaatsen tegelijk moeten worden geïnjecteerd. Het is in de berekeningen duidelijk te zien dat er een zijdelingse opspanning van de omringende grond optreedt, met bijbehorende verdichting en in geval van een bodem bestaande uit klei met generatie van wateroverspanningen. In tweede instantie komt de grond omhoog, waarbij de deformaties aan de randen van de opdrukking vooral zijwaarts zijn gericht.

E.e.a werd gerapporteerd in [2] en [3].

3.3 Injectietechnieken

In het kader van het project onderhogen zijn er twee hoofdvarianten toegepast: injectie los in de grond of in geotextiel kousen. BAM Grondtechniek had voor het los in de grond injecteren in eerste instantie 4 verschillende injectietechnieken ontworpen, die ook zijn beproefd (zie paragraaf 3.4). Hieraan vooraf gaand is de uitvoeringstechniek onderzocht en zijn pompproeven uitgevoerd om de optimale mengverhouding van EPS-korrels of argexkorrels en

cement/bentoniet slurry vast te stellen en de gewenste grootte van de injectieopeningen in de injectielansen. T.a.v. het vullen van de kousen waren er in eerste instantie twee opties: vullen vanaf de voorkant (bij aansluiting injectiebuis op kous) waarbij de slurry in de kous van voren naar achteren stroomt of vullen vanaf de achterkant, waarbij de slurry in de kous van achteren naar voren stroomt.

3.4 Beproeving injectietechnieken (voorjaar 2001)

De verschillende injectietechnieken zijn onderzocht op een testterrein bij Abcoude. Te Abcoude zijn beide hoofdvarianten uitgetest: er werd los in de bodem geïnjecteerd, maar ook in geotextiel kousen. Een suspensie met een variabele fractie EPS-korrels ("piepschuim"-korrels) of argex-korrels werd op verschillende diepten in een 5 m dikke veenlaag los in de grond geïnjecteerd. Materiaal met een korrelfractie van 25% van het geïnjecteerde groutvolume bleek nog verwerkbaar volgens 2 verschillende injectieprocedures. Het verpompen van slurry met EPS korrels verliep gemakkelijker dan van slurry met argex-korrels. De maaiveldrijzing was aanzienlijk, namelijk 30% van het geïnjecteerde groutvolume. Injectie op enkele meters diepte bleek mogelijk, maar er trad af en toe uitbraak naar maaiveld op. De suspensie lijkt zich door openingen in de bodemstructuur te verspreiden, wat nadien ook bleek uit inspectie na ontgraving.

Op een ander gedeelte van het testveld zijn 6 plat gevouwen geotextiel kousen (al dan niet met waterdichte binnenliners en met een spreidingsbreedte van 0,6 m) begraven onder een 1,5 m dik zandbed. Een aantal kousen zijn gevuld met het genoemde mengsel, maar ook is een mengsel met argex korrels i.p.v. EPS-korrels gebruikt. Figuur 3 toont een vooraanzicht van deze proef.



Figuur 3 Vooraanzicht van proef met vullen van expanders in zandterp.

Enkele kousen zijn vanaf de voorzijde gevuld, andere vanaf de achterzijde. Dit had enige invloed. De vulling van de kousen vanaf de voorzijde was minder gelijkmatig. Na ontgraven werd 70% van het

geïnjecteerde volume in de kousen teruggevonden. Mogelijke oorzaken zijn: uitzweten van slurry door kouswand, samendrukken van EPS-korrels of wateropname van de argex korrels.

BAM Grondtechniek (destijds geheten: HBG Civiel Grondtechniek) heeft in [4] t/m [7] deze proeven beschreven. De metingen aan maaiveld zijn beschreven in [8].

3.5 Conclusies ten behoeve van ontwerp

In [6] zijn op basis van de resultaten van de beproevingen te Abcoude keuzes gemaakt t.b.v. een volgend project. De belangrijkste conclusies zijn dat zowel injectie in de kous als los in de bodem gelijkwaardige opties zijn, die beide goed werken. De druk/schuifsterkte van de verharde mengsels is voldoende, als we dit vergelijken met de omringende grond (klei/veen). Het lijkt haalbaar om de injectiebuizen vooraf te plaatsen en deze vervolgens te injecteren. Er is een voldoende sterke klemconstructie op de expanders ontworpen t.b.v. een volgend project (zie figuur 4).



Figuur 4 Gevulde expander met klemconstructie.

4 Ontwerpfase

4.1 Voorbereiding

Een mogelijke locatie waar onderhogen zou kunnen worden toegepast is de N3 bij Papendrecht, bij de westelijke afrit naar Papendrecht, direct naast een fietseronderdoorgang. Hier was een hinderlijke kuil in het wegprofiel aanwezig. Er is een schetsontwerp gemaakt t.b.v. het op de gewenste hoogte brengen van het wegdek. Uit dit ontwerp volgde dat er voldoende ruimte aanwezig was om de gewenste injecties uit te voeren en dat onderhogen in principe mogelijk is. De techniek van het onderhogen was echter toen nog niet voldoende beproefd om de sprong naar onderhogen op deze locatie te maken. Vandaar dat er eerst twee veldproeven op kleinere schaal zijn uitgevoerd.

Ten behoeve van deze proeven is grondonderzoek uitgevoerd en zijn laboratoriumproeven gedaan, is een studie gedaan naar de gewenste monitoring (zonder hinder voor verkeer), er zijn eisen aan het ontwerp geformuleerd en ten slotte zijn ontwerpen gemaakt voor beide locaties mede op basis van de bevindingen te Abcoude (zie [14]). Kenmerken van de ontwerpmethodes zijn een te kiezen spreidingshoek van de opdrukking t.g.v. een te injecteren punt (bol), een omwentelingsparaboloïde als vorm van de opdrukking en een verliesfactor t.g.v. zetting (w.o. consolidatie). Aan de randen van het raster met injectiepunten werd rekening gehouden met een lager rendement qua opdrukking.

De eisen die aan het ontwerp zijn gesteld betreffen met name de grootte en gelijkmatigheid van de opdrukking.

Het uitgevoerde grond- en laboratoriumonderzoek is gerapporteerd in [9], [10] en [11].

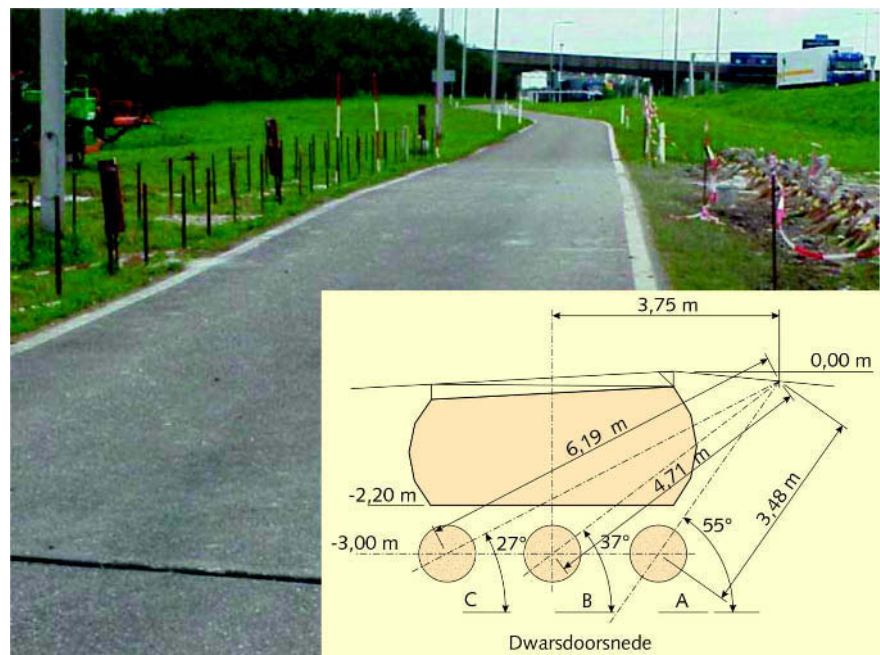
De gekozen monitoringsmethode was computergestuurde tachymetrie, waarbij het wegdek vrij kan blijven en het verkeer kan blijven rijden tijdens het meten. Voor het meten van de verplaatsingen van en rond de boom is gebruik gemaakt van reflectoren.

4.2 Uitvoeringswijzen: 2 proeven in veld (najaar 2001)

4.2.1 Proef met klein weglichaam bij Hendrik Ido Ambacht

In het najaar van 2001 zijn door HBG proeven uitgevoerd onder 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 (rechts in figuur 5). Figuur 5 geeft een situatieschets.



Figuur 5 Overzicht van weggedeelte nadat injectie is voltooid, met doorsnede van injectiepunten onder wegdek.

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, in verband met het heelhouden van de asfaltverharding. De computergestuurde tachymetrie bleek snel en goed te werken (nauwkeurigheid ± 2 mm). De weg bleef vrij toegankelijk en er was geen schade aan het asfalt zichtbaar. Op sommige plaatsen trad er in de berm uitbraak naar maaiveld op. Op een drietal plaatsen in de berm zijn waterspanningen in de ondergrond gemeten. De waterspanning liep significant op op een aantal meters afstand van het diepste punt van de weg, waar het meest is geïnjecteerd en zakte daarna weer. Dit duidt er op dat de ondergrond ten gevolge van de injecties consolideert.

De suspensie bestond uit water, cement, bentoniet en 30% van het volume EPS korrels.

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.

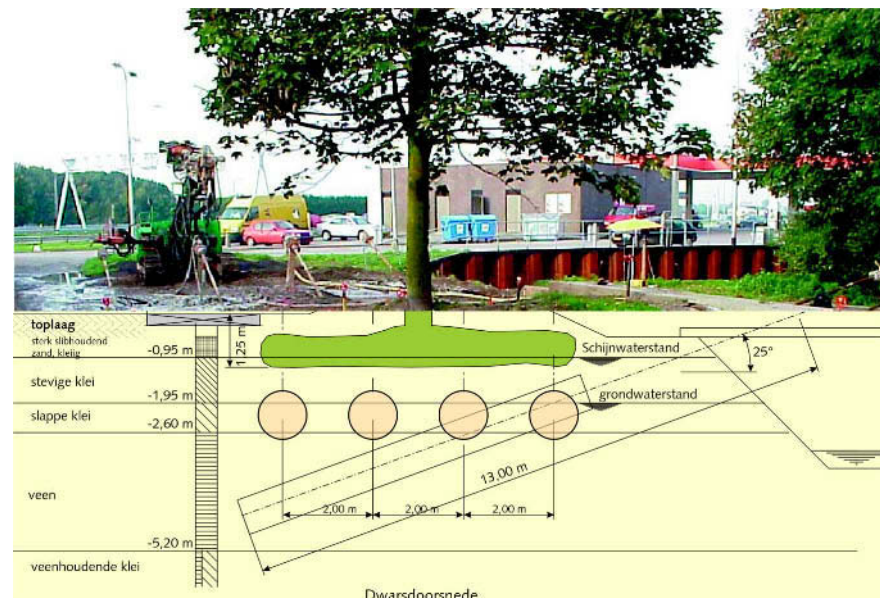
De vereiste eindhoogte was 120 mm. In het oktober nummer van geotechniek 2002 is deze proef nader toegelicht (zie [12]). Voor meer details zie [13]. Boringen in en naast het wegdek en ontgravingen in de berm, toonden plaatvormige structuren van suspensie die een hoek maken van 30 tot 45 graden met de horizontaal.

De proefresultaten zijn gerapporteerd in [15].

4.2.2 Proef met optillen van een 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 gezonde boom minstens 250 mm op te tillen, zonder de stabiliteit van de boom in gevaar te brengen en zonder noemenswaardige aantasting van de wortelprui. Figuur 6 geeft een situatieschets.



Figuur 6 Overzicht van boom na injectie, met doorsnede van het raster van expanders.

Dit is zeer goed gelukt. Het voordeel van injecteren in kousen is dat de maaiveldrijzingen meer gelokaliseerd zijn en er weinig suspensie naar maaiveld komt. Als de kousen volledig gevuld zijn hebben ze een diameter van 800 mm. De gebruikte suspensiesamenstelling is gevarieerd, variërend van alleen cement/bentoniet slurry, deze slurry met ca. 30% EPS korrels of slurry met 30% EPS en een paar procent argex korrels. De argex korrels werden toegevoegd om te onderzoeken of het opwellen van slurry langs de injectiebuis verminderde. Dit was niet het geval. Het kousmateriaal had in omtreksrichting een treksterkte van 200 kN/m¹ en in langsrichting 100 kN/m¹.

De boom is 300 mm opgedrukt, waarbij 3 graden hellingsverandering is geconstateerd. De overall effectiviteit, d.w.z. volume van de opdrukking gedeeld door geïnjecteerd volume maal 100%, was 40%. Bij het vullen van de beide kousen in het midden was de effectiviteit 80%, nadat injectie in de buitenste kousen al had plaatsgevonden. De kousen waren niet waterdicht en de verschilddruk tussen de slurry in de kous t.o.v. de grond was maximaal 1,4 Bar. De kousen hebben zich redelijk gelijkmatig ontvouwen, ook in stijve klei, zoals gebleken uit ontgraving en inspectie achteraf. De eindhoogte na zakking van de boom is 240 mm. De conditie en standzekerheid van de boom na injectie waren goed (zie [16]).

In het oktober nummer van geotechniek 2002 is deze proef nader toegelicht (zie [12]). De resultaten zijn beschreven in [15].

4.3 Bruikbare elementen uit ontwerp

Uit de metingen aan maaiveld kon de vorm van de opdrukking als gevolg van een locale injectie worden afgeleid (zie figuur 10). De verbindingslijn tussen het injectiepunt en de plaats aan maaiveld waar nagenoeg geen opdrukking plaatsvindt, toont een duidelijk gedefinieerde openingshoek met de verticaal.

Tevens is inzicht gekregen in de mate van consolidatie tijdens de injectieperiode en nadien. Het rendement van de opeenvolgende injecties is berekend. Het blijkt dat aan het begin de injecties aanzienlijk minder rendement hebben dan later, wanneer de grond al enigszins is opgespannen (factor 5 verschil). Het genoemde grotere rendement van de kousen in het midden geeft aan dat er ook opsluiting van de grond optreedt. Aan de hand van de metingen en eenvoudige berekeningen is een inschatting gemaakt van het horizontaal opspannen van de grond. Dit is benut bij de volgende praktijkproef N11. Uit de proeven blijkt dat het injecteren in kousen leidt tot veel minder uitbraken naar maaiveld, minder verstoppingen tijdens het injecteren, een groter effectiviteit en een meer lokale opdrukking. Binnen een tijdsbestek van enkele dagen kan ook meerdere keren in dezelfde kous worden geïnjecteerd. Het blijkt inderdaad goed te werken om de kous vanaf de andere zijde dan waar de injectiebuis uit de kous steekt te injecteren.

Bij injectie los in de grond is meer “fine tuning” mogelijk.

Mengsels met korrelfractie van rond de 30% EPS bleken goed te injecteren, mits in het begin een smeerbeed van cement/bentoniet slurry werd aangelegd.

4.4 Haalbaarheid opschaling proeven

De haalbaarheid van opschaling werd positief ingeschat op basis van de volgende bevindingen:

- Het werken met injectie in expanders geniet de voorkeur.
- De gemeten (verschil)drukken in de expanders t.o.v. de ondergrond zijn beperkt in dit project met een ondergrond van klei en veen. Dit betekent dat ook de trekkracht op het weefsel beperkt is, waardoor de kous niet is stuk gegaan.
- Expanders van 8 meter lengte hebben zich redelijk gelijkmatig gevuld, ondanks de kruispunten in het raster van expanders en de aanwezigheid van een stijve kleilaag. Vulling vanaf de andere zijde dan waar de injectiebuis uit de expander steekt blijkt goed te werken. De gewenste oprekkingen zijn gehaald en waren voldoende gelijkmatig.
- Het rendement van de opdrukking was acceptabel (40%) en de nazakking was niet meer significant na 3 maanden.
- De stabiliteit van de boorgaten, afgevuld met bentoniet was ruim voldoende. Het uitzweten van het doek bleek beperkt te zijn.

5 Uitvoering ontwerp

5.1 De locatie

Het betreffende gedeelte van de N11 is een 50 m lang deel van de noordkant direct ten westen van het viaduct over de Oostwaarts bij Hazerswoude (zie figuur 7).



Figuur 7 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 m worden onderhoogd, met als maximale opdrukking 141 mm (op het diepste punt van de rechterkantstreep van de rechter rijstrook). In [17] is de werkwijze bij aanleg van de weg beschreven, die mede van belang is voor het verklaren achteraf van het beperkte resultaat van de proef. Het vermoeden bestaat dat er een oud schuifvlak onder de weg, ontstaan tijdens de aanleg bij verbreding van het weglichaam, heeft gezorgd voor scheurvorming in het asfalt. Alvorens met onderhogen werd gestart was al een smalle langscheur zichtbaar. Ook aan de andere zijde van het viaduct, waar niet werd onderhoogd, was een langsscheurtje zichtbaar. In eerste instantie werd hier geen belang aan toegekend.

De opbouw van het weglichaam en ondergrond is als volgt, van boven naar beneden: 210 mm wegverharding, 1 m zand, 2 m EPS blokken, een laag resterend ophoogzand en dan tot op -11,5 m organische klei. Op -11,5 m NAP start het pleistocene zand. De freatische lijn ligt ongeveer 1 m beneden het oude maaiveld (op NAP -2,5 m).

De locatie was bereikbaar via een landbouwweggetje. Echter zwaar materieel moest via de N11 worden aangevoerd en leidde tot enkele tijdelijke rijstrookafzettingen. De berm aan de noordzijde is 15 m breed en heeft een flauw talud. Er was zodoende voldoende werkruimte aanwezig.

Ook de stabiliteit van het weglichaam in dwarsrichting werd op grond hiervan als voldoende ingeschat.

5.2 Eisen aan het ontwerp: risico verdeling opdrachtnemer/opdrachtgever

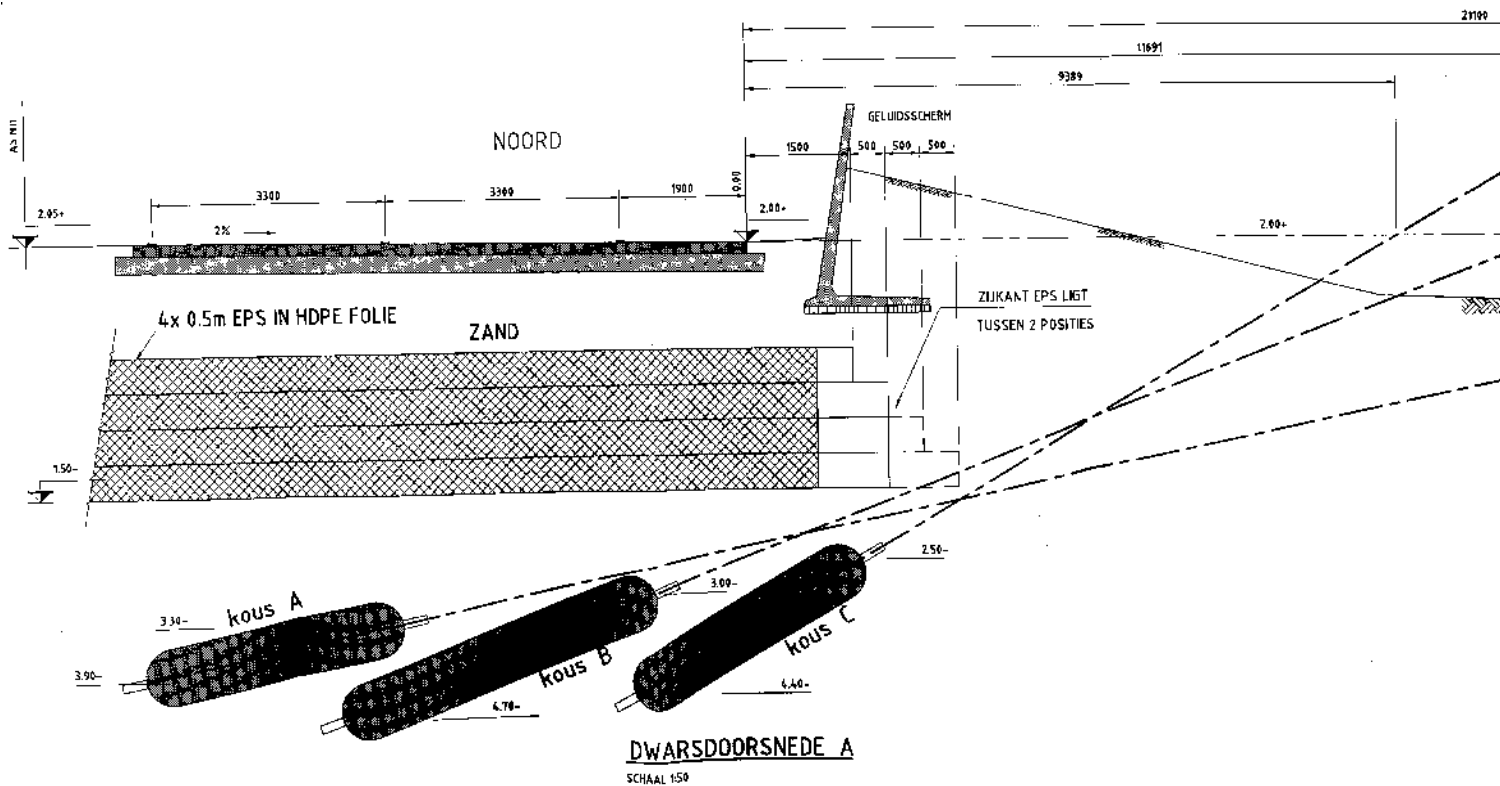
Het programma van eisen voor het onderhogen omvatte onder meer de volgende aspecten:

1. Ontwerp: dichtheid vulmateriaal (kleiner dan 1000 kg/m^3), levensduur materialen (groter dan 50 jaar), nogmaals onderhogen moet mogelijk blijven. Verder eisen t.a.v. beoogd wegprofiel (zie figuur 11), 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 rijstrookafzettingen 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 [18]) 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 (w.o. wegprofiel na 3 maanden).
6. Toetsing draagkracht wegfundering d.m.v. valdeflectiemetingen vooraf en achteraf.
7. Veiligheid palen onder landhoofd.

Het volledige programma van eisen werd als bijlage 6 toegevoegd aan de Overeenkomst met HBG Civiel Grondtechniek (nu BAM Grondtechniek), met nummer DWW-2195. In artikel 14, overige voorwaarden, uit genoemde contract werd de risicoverdeling tussen opdrachtnemer en opdrachtgever vastgelegd. In het plan van aanpak, zoals opgesteld door de opdrachtnemer, zijn bovenstaande eisen meegenomen. In verband met de veiligheid is uit voorzorg de maximum snelheid ter plekke beperkt tot 70 km/uur.

5.3 Het ontwerp

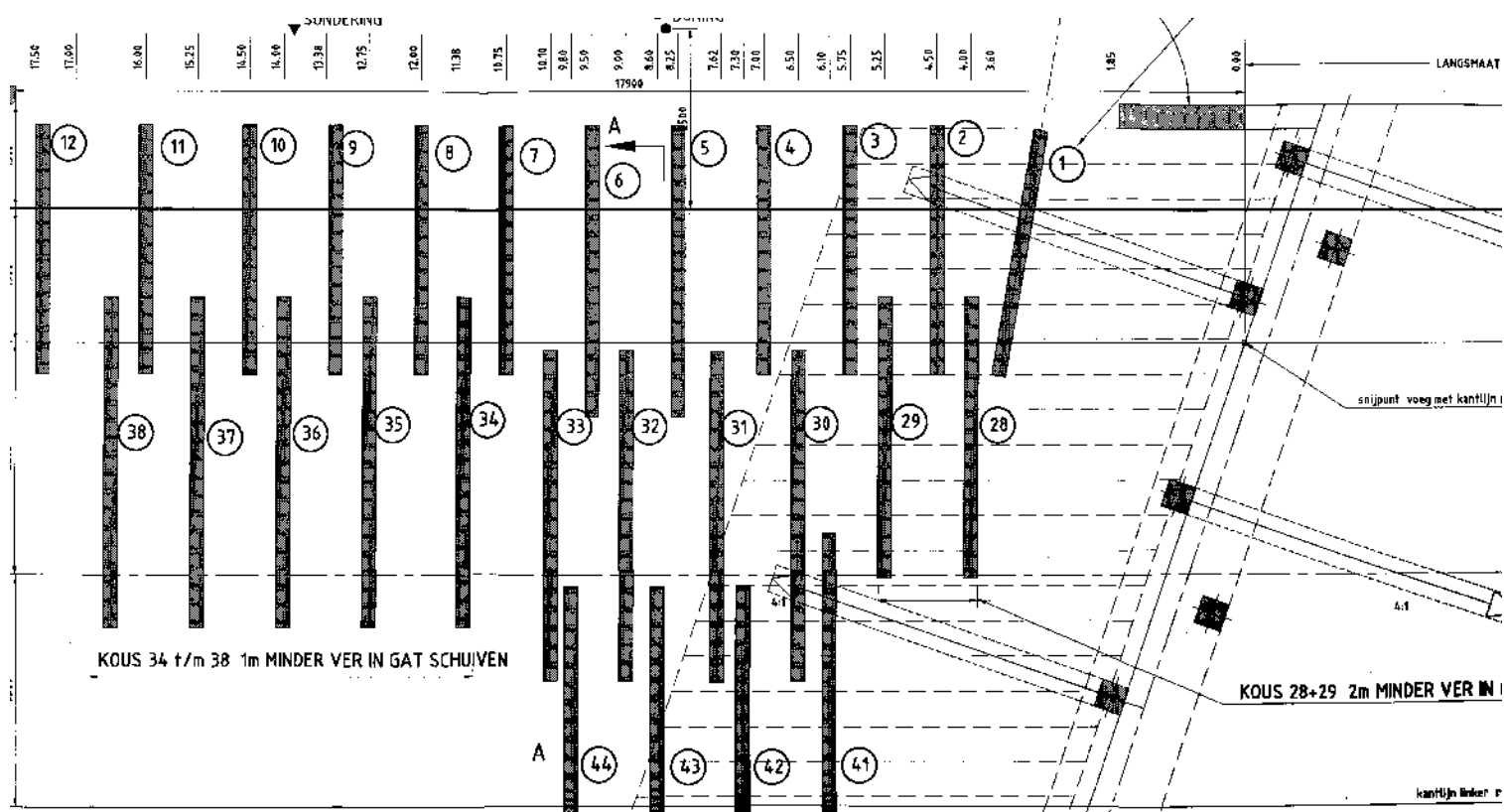
De kousen zijn geplaatst in 3 rijen, onder de EPS-laag (zie figuur 8). Hiertoe werden er vanuit de noordelijke berm gaten geboord, waarin de opgevouwen kousen zijn geplaatst.



Figuur 8 De posities van de kousen in dwarsdoorsnede van de noordbaan van de N11

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. De kousen zijn 4 of 5 m lang. 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 9. De minimale afstand tussen de kousen is 1,25 meter. De bovenste rij kousen zijn kousen C.

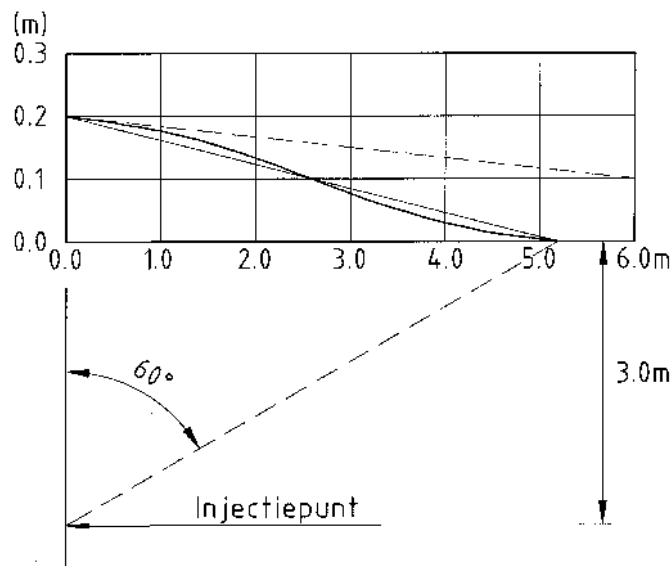


Figuur 9 De posities van de kousen in bovenaanzicht van de noordbaan van de N11

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. Het vulmateriaal bestond uit de volgende bestanddelen per charge van 430 liter:

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

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. 1 meter verondersteld. Per injectiepunt wordt er in totaal $0,5 \text{ m}^3 (=0,8^2 \cdot \pi / 4 \cdot 1)$ geïnjecteerd. Vanuit een injectiepunt is de spreiding van de opwaartse deformaties onder een hoek van 60° t.o.v. de verticaal (zie figuur 10). De vorm van de opdrukking is een omwentelingslichaam van een rechte lijn, met daarop gesuperponeerd een sinuslijn (zie figuur 10). De opdrukking is nul, daar waar de spreiding 60° is.



Figuur 10 Radiale doorsnede van het opdrukkingsprofiel ten gevolge van 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: $\text{beoogde opdrukking} / (\text{beoogde opdrukking} + 0,05)$.
- Factor 0,77 voor de zakking 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 twee maal zo klein was als voor de in tweede instantie te vullen tussenliggende kousen.

In totaal moet $97,7 \text{ m}^3$ 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 en de weerstand van de grond. Voor meer detail zie [19].

5.4 De proef met onderhogen N11 (najaar 2002)

5.4.1 Doelstelling proef

De doelstelling van de proef was het toetsen op praktijkschaal van de ontwikkelde techniek en ontwerpmethode voor onderhogen, met als neven doelstellingen het herstellen van het vloeiend alignement van het betreffende weggedeelte, zoals in figuur 13, en het voldoen aan het genoemde programma van eisen.

5.4.2 Uitvoering

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 expander, d.w.z. injectiebuis met hieromheen de geplooid kous in te schuiven (zie figuur 11). Dit is goed verlopen, ondanks de lengte tot 25 meter van de boorgaten.



Figuur 11 Het inbrengen van een expander in een boorgat onder het weglichaam. Rechts is de groutankermachine die de boorgaten heeft gemaakt.

Vervolgens 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. Daarna zijn de kousen in 5 dagen geïnjecteerd (zie figuur 12). 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 is gerealiseerd door per paar kousen om en om 430 liter te injecteren.

Per aanvoerslang werd een spuitstuk gebruikt waarop twee afvoerslangen met afsluitkraan.



Figuur 12 Het vullen van de expanders. De grout wordt aangevoerd door de aan de injectiebuisen 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.

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 m^3 geïnjecteerd van de geplande 98 m^3 .

De monitoring is als volgt uitgevoerd:

Voorafgaande aan, tijdens en na het onderhogen is het wegdek niveau frequent gemeten m.b.v. een tachymeter. Aan de hand van tenminste drie 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 redelijk 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. In [17], [20] en [21] is de proef in meer detail beschreven.

5.4.3 Resultaten

Zoals vermeld in paragraaf 5.4.2 is 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 13 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 wegdekhoogte vrijwel gelijk aan die op 23 september (na de boorwerkzaamheden, op enkele kousen na). 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 duidelijk achter bij de door het rekenmodel voorspelde (factor 3 tot 5), ook met de daadwerkelijk geïnjecteerde hoeveelheden. Meerdere 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, versneld door de aanwezigheid van verticale drains.

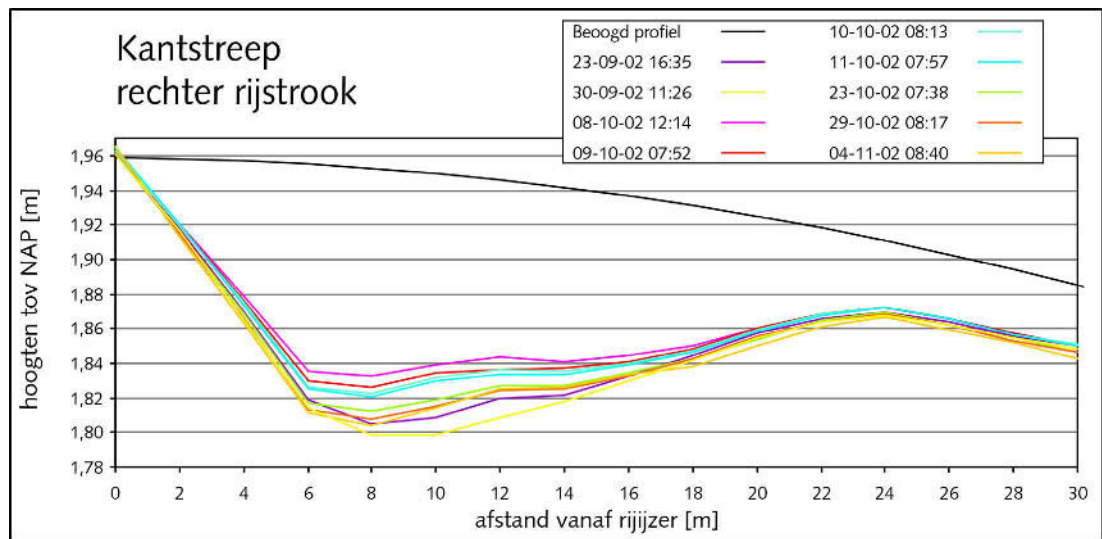
De hellingen van het wegdek bleven binnen de toegestane marges.

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.

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

Bij aanvang is deze scheur 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.



Figuur 13 Wegdekhoogten na de injectieperiode en op enkele tijdstippen nadien. Ter vergelijking zijn gegeven het beoogde profiel en de metingen van 23 en 30 september voorafgaande aan de injectie.

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. Voor meer details zie [21].

5.4.4 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 in 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 (zie paragraaf 5.4.5). 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 resterende aanvulzand en de verticale drains in het terrein. 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 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 lokaal ongeveer 100 kPa bedraagt, dan wordt het EPS significant ingedrukt (5% rek).

Voor meer details zie [21].

5.4.5 Aanvullende elementproeven

Op basis van de proefresultaten bij de N11 is ingeschat dat de druk in de kousen t.o.v. de grotendeels zandige ondergrond heeft gelegen tussen de 1, 5 en 2,5 Bar. De uitfiltratie via het doek van de slurry is in een speciale laboratoriumopstelling getest. Deze opstelling bestond uit een buis met een diameter van 384 mm en 800 mm hoog, met aan de onderzijde een geotextiel doek op een laagje zand. Deze buis werd gevuld met 90 liter cement/bentoniet slurry. Aan de bovenzijde werd een luchtdruk, resp. 3,5 en 1,5 Bar voor beide proeven, aangebracht. De uitfiltratie werd gedurende ca. 25 uur gemeten. In [21] zijn deze proeven gerapporteerd. Het waterverlies blijkt groot te zijn, met name bij de onderste schijf van 100 mm hoog (50 tot 60% van het aanvangsvolume).

5.5 Conclusies

De test op praktijkschaal bij de N11 heeft een aantal tekortkomingen aan het licht gebracht van zowel de schematisatie en het ontwerp, als de technische realisatie. Het gemeten gedrag, waar onder de geringe opdrukking, kon achteraf worden verklaard met een aantal mogelijke oorzaken.

Er zijn een groot aantal leer- en verbeterpunten gevonden, zie par. 5.6.

5.6 Mogelijke verbeteringen ontwerp en uitvoering

- * 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 worden voorzien van een of meerdere waterdichte liners, of ze kunnen eventueel worden gecoated.
- * 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 par. 6.2.2). Deze toonden aan 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 slurry zonder korrelmateriaal, zoals cement/bentoniet te injecteren. Deze cement/bentoniet slurry heeft een volumegewicht van 1135kg/m^3 . 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 is belangrijk voor de bepaling van de opbouw van de grond onder het weglichaam en eventuele bezwijkcirkels.
- * Tevens is het van belang om de boorgaten, benodigd voor het plaatsen van de kousen, op te vullen met materiaal dat snel genoeg uithardt, zodat er zo min mogelijk zakkingen optreden.

6 Optimalisatie ontwerp

6.1 Het aangepaste ontwerp

Het ontwerp en de uitvoering kunnen worden aangepast zoals aanbevolen in paragraaf 5.6. Een aantal van deze aanbevelingen is opgepakt door op een geschikte locatie de werking van onderhogen in een zandig weglichaam te onderzoeken. Tevens zijn er centrifugeproeven uitgevoerd.

Het ontwerp werd als volgt aangepast: beperk de benodigde druk in de expanders door meerdere expanders gelijktijdig te vullen, expanders met grotere barstdruk gebruiken (kleinere diameter of sterker doek, of inklemming verbeteren aan kop en staart), waterdichte liners in expanders, meerdere injectieopeningen over de gehele lengte van de expander. Het injectiemateriaal bestaat uit cement/bentoniet slurry. Er is ook gekeken naar de verwerkbaarheid van schuimbetonmengsels (zie paragraaf 6.2.3). Het ontwerpmodel is uitgebreid met berekeningen van de benodigde injectiedrukken en de vereiste sterkte van het doek (zie paragraaf 6.2.1).

6.2 Beproeving aangepast ontwerp

6.2.1 Proef op Maasvlakte in talud Slufterdijk (najaar 2003)

In een zandlichaam op het terrein van baggerdepot de Slufter werden 19 kousen geplaatst op 2,0 m...4,0 m beneden maaiveld, op variabele afstand van een talud, onder een helling van 1:10. Er zijn 3 soorten kousmateriaal gebruikt, met diameters variërend van 0,5 tot 0,8 m. Er zijn ook expanders met een kegelvormig uiteinde getest. Voorafgaande aan het onderhogen is grondonderzoek uitgevoerd (zie [22]).

Onderzocht werd de relatie tussen druk en geïnjecteerd volume, de barstdruk, het ontplooiën van de kous en of de sterkte van het doek dit toelaat, de vorm van de kousen na het volpersen, meting maaivelddeformatie a.g.v. het boren en a.g.v. het injecteren (gelijkmatigheid opdrukking), effect van nabijheid talud aan kopse kant, toetsing van eerder ontwikkeld ontwerpmodel. Om het ontwerpmodel te toetsen is een prognose gemaakt van de opdrukking en de benodigde injectiedrukken. Tevens is ingeschat of het doek sterk genoeg is om de trekkracht die ontstaat t.g.v. het verschil in tegendruk van de omringende grond op te vangen. Deze zaken zijn beschreven in het plan van aanpak [23].

De resultaten zijn als volgt:

De Ø0,5 m Hueskerkousen op 2 m diepte hebben zich goed ontvouwen en zijn vrijwel geheel gevuld. Deze kousen zijn in een latere fase

gebarsten. Bij inspectie na ontgraving bleek dat deze kousen redelijk cilindervormig waren (zie figuur 14).



Figuur 14 *Gevulde Hueskerkousen na ontgraving.*

De Ligtermoetkousen op 2 m diepte waren minder sterk en hebben zich voor 60 tot 80% gevuld. De gebreide Ameskousen met de kegelvormige uiteinden konden zich niet vullen t.g.v. het knappen van de binnenliners en de hoge doorlatendheid van het breisel. De grotere diameter kousen op 3 en 4 m diepte vulden zich nauwelijks. De waterdichte binnenliners hebben niet optimaal gefunctioneerd, m.n. op grotere diepte. Deze liners blijken zich onvoldoende te ontvouwen en daardoor voortijdig te knappen. De opdrukking boven de kousen op 2 meter diepte blijkt niet die vorm te hebben die werd berekend, want er is een duidelijk zichtbaar bezwijkvlak ontstaan aan de staartzijde van de gevulde kousen, waarbuiten de opdrukking gering was. De drukken die gemeten werden bleken met name aan het begin van het injecteren veel groter te zijn dan verwacht: het ontplooiën van de kousen in zand gaat moeilijker dan verwacht. Het plooiën van de kousen om de injectiebuis vooraf gebeurt handmatig en kan nauwelijks meer worden verbeterd. De geïnjecteerde kousen bleken min of meer ellipsvormig, met de brede as horizontaal. Dit in tegenstelling tot de verwachtingen zoals beschreven in het plan van aanpak. Voor meer gegevens zie [24].

6.2.2 Proeven in geocentrifuge TU Delft (einde 2002-begin 2003)

Er zijn centrifugeproeven uitgevoerd op redelijk goed verdicht zilverzand, met de expanders op een diepte die je na opschaling in de praktijk kunt verwachten (2,5 m). Figuur 15 laat de expanders zien na ontgraving aan het einde van de proef met 5 expanders.



Figuur 15 Centrifugeproef met 5 expanders, na ontgraving.

Er is een vergelijking gemaakt van proeven waarbij 1, 3, 4 of 5 expanders tegelijkertijd werden gevuld. Tevens is een proef gedaan waarbij de expanders zich nabij een talud bevonden. Voor één van de expanders (meestal die in het midden) werd de druk tijdens het vullen gemeten.

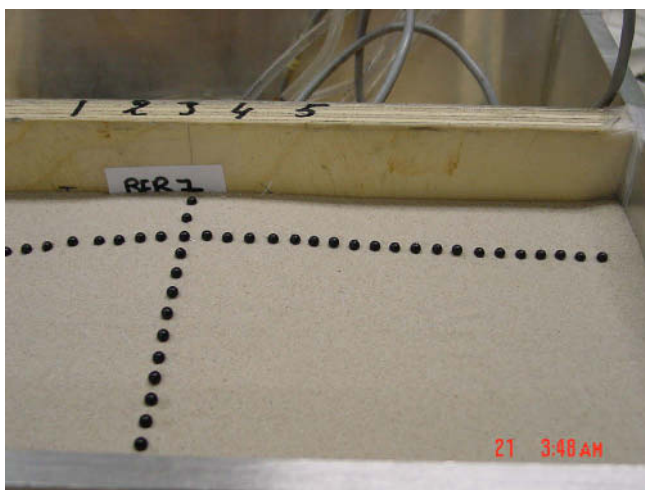
De resultaten (zie figuur 16) laten zien dat er een gelijkmatige en zuiver verticale opdrukking kan worden verkregen als er minstens 5 expanders h.o.h. 1 m, diep 2,5 m, worden gevuld. Aan de randen van de opdrukking zijn de verplaatsingen duidelijk zijwaarts gericht. Dit neemt geleidelijk vanaf het midden naar de zijkanten toe. De nabijheid van een talud geeft een versterking van dit effect, en de verplaatsingen worden ook groter dan daar waar geen talud aanwezig is.

De gemeten opdrukking tijdens het vullen is consistent met het gemeten verloop van de druk, d.w.z. dat bij een snelle stijging van de injectiedruk de opdrukking minder snel toeneemt en dat bij een geringe stijging van de injectiedruk de opdrukking juist sneller toeneemt. Er is hieruit een conceptueel vervormingsmodel afgeleid, waarin de interactie tussen de expanders is beschreven.

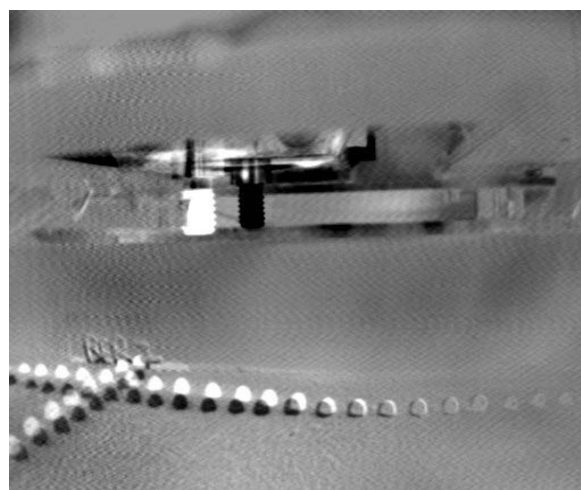
Naarmate het aantal expanders groter wordt, neemt de injectiedruk in het midden minder snel toe, na een aanvankelijk eender verloop.

Er treden duidelijk drie dimensionale effecten op. De lengte van de expanders (opgeschaald 3 meter) is nog niet voldoende om over grotere lengte een twee dimensionale opdrukking te krijgen. Met numerieke berekeningen kan het vervormingsmodel verder onderbouwd worden. De proeven zijn beschreven in [25].

Het ontwerpmodel van BAM Grondtechniek werd gebruikt om de centrifugeproeven na te rekenen en om zodoende een predictie voor de proeven op Slufterlocatie te maken.



a)



b)

Figuur 16 Test met 5 expanders: a) Positie van de markeringen op het zandoppervlak; b) Visualisatie van de verplaatsingen door het van elkaar aftrekken van twee plaatjes.

6.2.3 Proeven met schuimbeton vulling

In het voorjaar van 2003 zijn er proeven uitgevoerd t.a.v. de verwerkbaarheid van schuimbeton onder hoge druk, omdat schuimbeton de volgende voordelen in zich heeft: het is een lichtgewicht materiaal zonder korrels, waardoor de kansen op verstoppingen veel kleiner zijn en om op veel plaatsen tegelijk te kunnen injecteren is een mobiele installatie met grote capaciteit, zoals gebruikt bij schuimbeton, wenselijk. De proeven bestonden onder meer uit het volpersen van 6 rechtopstaande cilinders met schuimbeton met drukken van 1,5 en 3 bar. Na uitharden werd onder meer het volumieke gewicht over de hoogte bepaald. Dit volumieke gewicht was echter veel hoger dan verwacht, wat mogelijk verklaard kan worden door een gebrekkige menging van het schuim over het volume. Tevens was het uitgangsvolumegewicht van het schuimbeton onder atmosferische druk moeilijk in te stellen op de haalbaar geachte waarde van 400 kN/m^3 .

Conclusie is dat het schuimbeton niet direct geschikt is vanwege de moeilijkheden bij het werken onder hoge drukken.

6.2.4 Beproeving verbeterde materialen voor kousen

In nauwe samenwerking met de fabrikanten heeft BAM Grondtechniek (voorheen HBG Civiel Grondtechniek) een aantal monsters van sterker kousmateriaal beproefd. Het betreft zowel monsters van Ames Europe (trial met Dyneema garen en konische kop en staart), Huesker (sterker in omtreksrichting) en Ligtermoet (opties voor waterdichte sterkere liners). Thans (december 2004) is deze ontwikkeling nog niet afgerond.

Binnenkort zullen er door BAM Grondtechniek enkele kousen onder in een zandbed worden beproefd.

Tevens is door TNO oriënterend onderzoek gedaan naar de coatbaarheid van expanders die zijn gemaakt van kunststof textielen (zie [26]). De conclusie was dat coaten in principe kan, met voldoende waterdichtheid, echter de wrijving tussen de plooiën bij het ontvouwen van de expander vormt misschien een probleem.

De hier genoemde kousen zullen ook gebruikt worden voor het innovatieve INSIDE-project expanding columns.

6.3 Probleempunten

Resterende probleempunten t.a.v. de kousen zijn op de korte termijn:

- * het ontvouwen van de expanders,
- * een voldoende sterkte van de kousen en
- * een voldoende waterdichtheid van de kousen.

Binnenkort zullen er door BAM Grondtechniek enkele kousen onder in een zandbed worden beproefd.

In hoofdstuk 7 wordt ingegaan op mogelijkheden om het ontwerpmodel te verfijnen.

7 Analyse

7.1 Analyse in de diepte: Eindige Elementen berekeningen

7.1.1 Mogelijkheden Plaxis

De in paragraaf 6.2.2. beschreven centrifugeproeven zijn door GeoDelft nagerekend met Plaxis 2D versie 8. Er is onderzocht of op een verantwoorde wijze grote volumerekken kunnen worden opgelegd en doorgerekend. D.m.v. de optie “applying volumetric strain in volume clusters” kunnen na enige optimalisatie in een paar stappen volumerekken gerealiseerd worden van 1800% m.b.v. een “updated mesh” berekening. Het materiaal in het expanderende cluster is hierbij lineair elastisch. Dit is gedaan voor zowel één als meerdere expanders, en ook met expanders nabij een talud. De benodigde rekentijd is acceptabel (15 minuten).

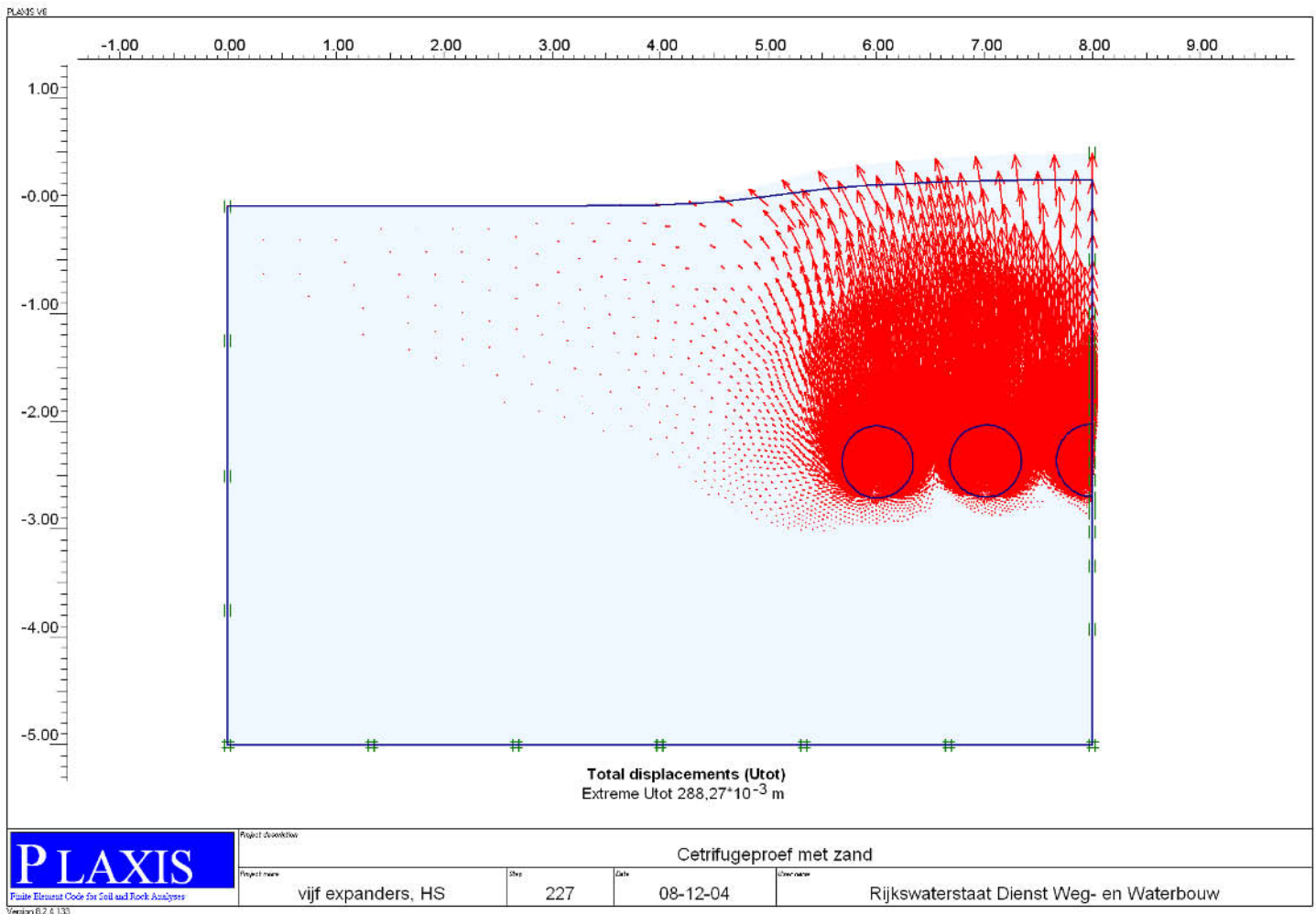
De berekeningen zijn uitgevoerd voor goed verdicht zand, met de materiaalmodellen Mohr Coulomb en Hardening Soil. De Mohr Coulomb parameters zijn goed afgestemd met die van het Hypoplasticity model van de Universiteit van Karlsruhe (zie paragraaf 7.1.2). De berekende vervormingspatronen en de verdeling van schuifspanningen komen kwalitatief goed overeen met de centrifugeproef resultaten in een dwarsdoorsnede in het midden door de expander. Figuur 17 laat het vervormingspatroon zien voor 5 expanders, waarbij de te spiegelen rechterhelft is getoond.

De berekende grootte van de drukken is echter significant kleiner dan die uit de centrifugeproeven. Dit omdat de expanders in de centrifugeproef een 3 dimensionale opdrukking geven, gezien de beperkte lengte van de expanders. De bevindingen van GeoDelft zijn gerapporteerd in [27].

Conclusie is dat m.b.v. Plaxis 2D kan worden beoordeeld of de vervormingen voldoende verticaal zijn, gegeven een patroon van expanders op een zekere diepte, eventueel nabij een talud.

Tevens zijn de vervormingspatronen in de diepte goed bruikbaar en kan er in principe gerekend worden aan het verloop van wateroverspanningen opgewekt door de injectie in expanders.

Berekeningen met Plaxis 3 D waarbij grote volumerekken worden opgelegd en waarbij met “updated mesh” wordt gerekend zijn vooralsnog niet mogelijk.



Figuur 17 Vervormingen uit Plaxis-simulatie van proef met 5 expanders.

7.1.2 Mogelijkheden modellen Universiteit van Karlsruhe

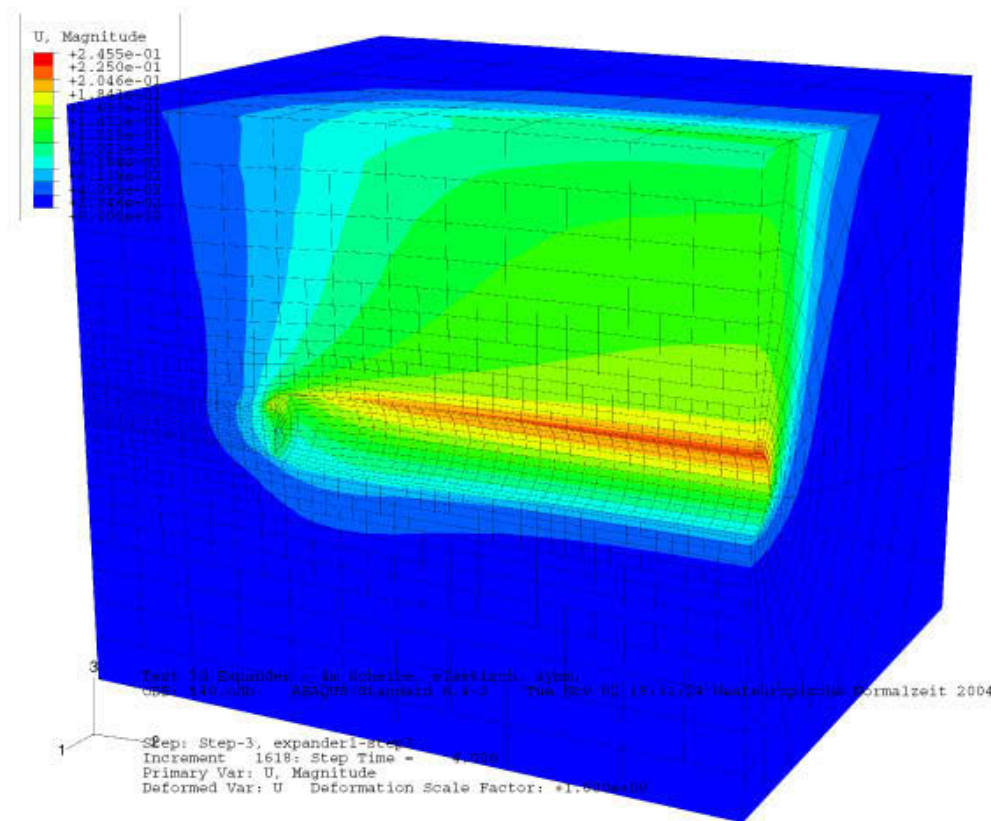
Door de Universiteit van Karlsruhe zijn met de Eindig Elementen Code Abaqus zowel in 2D als 3D berekeningen uitgevoerd. Er is gewerkt met de materiaalmodellen Mohr Coulomb en Hypoplasticity voor zand en Visco-hypoplasticity voor zachte klei.

Met deze modellen zijn de centrifugeproeven uit paragraaf 6.2.2. doorgerekend. De benodigde volumerekken konden na enige optimalisatie zonder problemen worden opgelegd. De expanders werden geschematiseerd m.b.v. fluid elements, waarbij een uniforme druk aan de randen van de cilindervormige vloeistof clusters werd opgelegd. De twee dimensionale berekeningen met Hypoplasticity met zowel los als goed verdicht zand geven een opdrukking die qua grootte redelijk overeen komt met de gemiddelde opdrukking uit de centrifugeproeven. De vorm van deze opdrukking is echter wel enigszins anders: bij de centrifugeproeven is deze vorm wat platter en de opdrukking loopt wat minder snel naar nul aan de randen. De in de centrifugeproeven waargenomen drukverschillen tussen de expanders konden kwalitatief goed worden verklaard, echter de grootte van de drukken was in deze 2 D berekening ongeveer de helft van die in de centrifugeproeven.

Er is ook een 2 D berekening gemaakt met 1 expander op 3,5 m diepte in zachte klei, waarbij na expansie de opeenvolgende consolidatie werd berekend. De drainerende randen rechts, links en onderin bevonden zich op voldoende grote afstand van de expander. Het materiaalmodel was Visco-hypoplastic en de doorlatendheid werd gevarieerd van 10^{-9} m/s tot 10^{-6} m/s. Een consolidatietijd van 128 dagen bij een doorlatendheid van 10^{-9} m/s lijkt redelijk.

Een 3D Hypoplasticity-berekening met een 8 meter lange expander op 2,5 diepte in verdicht zand, bestaande uit een cilindervormig cluster van fluid elements, laat zien dat de expansie veel gemakkelijker verloopt in het midden van de expander. Om de expansie in een geotextiel kous na te bootsen is gewerkt met een zogenaamde "fictitious hinge-plane", bestaande uit een stijf elastisch membraan. Ten koste van grote trekspanningen in het membraan was het mogelijk om de expander nagenoeg geheel te laten expanderen (zie figuur 18). Het vlak rechts in deze figuur is een symmetrievlak.

ABAQUS



Figuur 18 Deformaties na volledige vulling voor 3 D expander model.

De uiteindelijk benodigde druk was 2 tot 3 maal zo groot als in de 2 D berekening en komt zodoende in de buurt van de drukken in de centrifugeproef. De berekeningen uitgevoerd aan de Universiteit van Karlsruhe zijn gerapporteerd in [28]. De benodigde rekentijd op het

mainframe voor dergelijke 3D berekeningen is aanzienlijk (60 tot 100 uur).

7.1.3 Second opinion GeoDelft

GeoDelft heeft een second opinion gegeven op het door de BAM Grondtechniek gehanteerde ontwerpmodel, en heeft tevens een beoordeling gemaakt van de noodzaak te werken met geavanceerde materiaalmodellen, zoals Hypoplasticity (zie [27]). Het door BAM gehanteerde ontwerpmodel is sterk empirisch en kan niet zonder meer gebruikt worden om een willekeurige onderhoging door te rekenen. Om de aannamen in dit ontwerpmodel te onderbouwen (zoals de spreidingshoek en vorm van de opdrukking) kunnen met Plaxis 2D berekeningen worden gemaakt, hoewel het Plaxis 2D model de injectiedruk 2 tot 3 keer onderschat t.o.v. de 3 D situatie. De voordelen van het hypoplasticity model zijn volgens GeoDelft niet evident.

7.1.4 Begrijpen we nu wat meer?

De berekening van de Universiteit van Karlsruhe aan een 8 meter lange expander in zand laat goed zien hoe groot de druk moet zijn om de expander nagenoeg geheel te ontvouwen. Er ontstaat een grote trekspanning in het doek. Het initiële ontvouwen van het geplooid doek in zand, zoals bij de proef op de Slufter locatie (zie paragraaf 6.2.1), is niet te modelleren. Hierbij traden erg hoge begindrukken op.

De uiteindelijke vorm van de expanders uit de berekeningen is enigszins afgeplat. Dit is het sterkst zichtbaar bij de berekening met 1 expander, waarbij de expander het meest is geëxpandeerd in horizontale richting. Dit werd ook waargenomen op de Slufter locatie.

De uitgevoerde 2 D berekeningen nabij een talud geven een goed beeld van de horizontale vervormingen (ook over de diepte). Deze kennis kan gebruikt worden bij het beoordelen van bijvoorbeeld de stabiliteit van de palen onder het landhoofd van een viaduct en de stabiliteit van het talud onder het viaduct.

De berekeningen geven ook aan waar zich eventueel schuifvlakken kunnen vormen, echter de berekeningen laten geen discontinuïteiten zien op deze plekken. Bij de Slufterproef is wel zo'n discontinuïteit waargenomen in de vorm van een glijvlak (boven de expanders aan de staartkant, ver weg van het talud).

Vooralsnog is er geen Eindig Elementen Model dat op eenvoudige wijze en met een acceptabele rekentijd gebruikt kan worden om een ontwerp te maken van een onderhoging van een weg. Het ontwerpmodel van BAM Grondtechniek kan gekalibreerd worden m.b.v. berekeningen met een Eindig Elementen Model, naast de onontbeerlijke bijstelling van het ontwerp tijdens het onderhogen zelf (volgens de "observational method").

7.2 Gewenste aanpak resterende probleempunten

Er zal geduld moeten worden betracht, alvorens de Eindige Elementen Modellen zover ontwikkeld zijn dat een volledig 3 dimensionaal ontwerp kan worden doorgerekend. De benodigde grote volumerekken en het benodigde aantal expanders (tientallen) kunnen niet zonder meer met Plaxis 3D worden gesimuleerd.

Indien een te onderhogen weglichaam een verhoogde ligging heeft t.o.v. het maaiveld, moet nog onderzocht worden of injectie in de slappe ondergrond onder het weglichaam het gewenste resultaat kan hebben. Vooralsnog heeft het plaatsen en injecteren van expanders in het weglichaam zelf de voorkeur, mits op voldoende hoogte boven de slappe ondergrond vanwege belastingspreiding en op voldoende diepte onder de wegverharding vanwege schade aan het asfalt. Een diepte van de expanders om en nabij de 2,5 meter lijkt wenselijk, gebruik makend van expanders met een maximale diameter van 0,5 meter. Berekeningen met Plaxis 2 D zijn wenselijk om het deformatiepatroon voor een potentiële locatie te toetsen. Gewaakt moet worden voor het ontstaan van glijvlakken.

Daarnaast zijn er een aantal uitvoeringstechnische problemen nog te overwinnen, zoals beschreven in paragraaf 6.3.

8 Conclusies

.....

8.1 Waar staan we nu?

In het proces schema uit figuur 2, paragraaf 2.4, is een optimalisatieslag aangegeven. Op enkele probleempunten na, die vooral van uitvoeringstechnische aard zijn, is het nieuwe ontwerpconcept gereed en kan toegepast worden voor een nieuwe potentiële (proef)locatie.

8.2 Welke eisen zijn haalbaar gebleken?

Dezelfde eisen die in 2002 gesteld zijn aan het onderhogen van een gedeelte van de N11 kunnen blijven gehandhaafd voor een volgend project.

8.3 Huidige toepassingsmogelijkheden onderhogen

Onderhogen is mogelijk voor verzakte weglichamen en objecten (zoals bomen). De breedte van de te corrigeren verzakking mag niet te groot worden, wil men vanaf één zijde van de weg injecteren. Tevens moet er gelet worden op voldoende werkruimte in de berm. Tevens moet vooraf de invloed van onderhogen op de ligging van mogelijk aanwezige kabels en leidingen worden bepaald.

Wat betreft het onderhogen van bomen, moet er nog een optimalisatieslag t.a.v. de benodigde werkruimte rondom de boom worden uitgevoerd.

Voor weglichamen met verhoogde ligging is injectie in expanders die geplaatst zijn in het weglichaam wenselijk. Injectie in een ondergrond van klei en veen is voor wegen met een niet verhoogde ligging een goede mogelijkheid. Om zeker te zijn van succes zal de sterkte van de expanders nog verder moeten worden vergroot.

8.4 Wat kunnen we nog meer bereiken?

In het kader van het innovatieve project INSIDE-expanding columns is berekend dat het kousenmateriaal nog verder moet worden versterkt. In het kader van dat project kunnen we op korte termijn resultaten verwachten.

9 Toekomst onderhogen

.....

9.1 Kansen voor onderhogen

Er zijn diverse locaties waar onderhogen in de toekomst wellicht soelaas kan bieden, zoals de N3 bij Papendrecht, diverse plaatsen in de A4 tussen Leiden en Hoofddorp en de A16 ten zuiden van Rotterdam.

9.2 Wanneer is onderhogen rendabel?

De kosten voor onderhogen zijn (december 2004):

EUR 200/m² tot EUR 500/m², uitgaande van de huidige inzet van personeel, materieel en materialen.

De kosten voor de N11 waren EUR 291,-/m² (in 2002).

De kostenposten van alternatieven zijn (prijsspeil 2002):

1. reconstructie van een verharding: EUR 45,-/m²
2. frezen en asfalteren van een weggedeelte van 500 m²: EUR 15,-/m²
3. filekosten: EUR 100.000,-/dag voor drukke wegen (zoals bepaald voor de N3 met het computerprogramma MTR, zie paragraaf 1.2).
4. kosten gemoeid met omleidingen: soms zeker zoveel als de totale uitvoeringskosten, naar schatting EUR 10.000,-.

Kostenvergelijking:

De totale kosten van het onderhogen van de N11 waren: EUR 153.000,- incl. BTW voor een oppervlak van 10,5x50 m².

Dit bedrag vergelijken met de som van A, B en C:

A. het frezen en asfalteren, kosten: 10,5mx50mxEUR 15,-/m² = EUR 7.875,-, of reconstructie, kosten: 10,5mx50mxEUR 45,-/m² = EUR 23.625,- (indien dit een klein weggedeelte betreft kost het meer dan dit bedrag);

B. filekosten: EUR 100.000,-;

C. kosten gemoeid met omleidingen: EUR 10.000,-.

Dus:

EUR 153.000,- versus EUR 117.875,- (frezen en asfalteren) of

EUR 153.000,- versus EUR 133.625,- (reconstructie)

Deze kosten vergelijking is nog niet gunstig genoeg. Als het onderhogen nog verder geoptimaliseerd wordt tot EUR 200,-/m², wat kan voor grotere weggedeelten dan 10,5x50 m², dan is de kostenvergelijking als volgt:

10,5mx50mxEUR 200,-/m² = EUR 105.000,- versus respectievelijk EUR 117.875,- voor frezen en asfalteren of EUR 133.625,- voor reconstructie.

Aanbevolen wordt om de filekosten en kosten voor omleidingen nog eens goed te bekijken voor een aantal potentiële locaties.

9.3 Implementatie binnen RWS projecten

In geval van een project met een RAW-bestek kan het programma van eisen t.a.v. onderhogen, zoals eerder beschreven voor de N11, worden opgenomen in het bestek. De risicoverdeling opdrachtgever/opdrachtnemer moet van tevoren goed worden vastgelegd.

In geval van een design&built en eventueel maintainance contract is het van belang vooral de functionele eisen en de eisen t.a.v. duurzaamheid in het programma van eisen op te nemen.

In beide gevallen zal een maat moeten worden opgenomen voor de maximaal toelaatbare verkeershinder (eventueel uitgedrukt in filekosten).

9.4 Andere toepassingen van onderhogen

Onderhogen zou een optie kunnen zijn om verzakte buizen en leidingen te corrigeren, indien het ongewenst is dat er een (diepe) bouwput ontstaat.

9.5 Kennisoverdracht

Dit eindrapport en eerdere DWW-rapporten zullen worden opgenomen op de V&W site kennisplein. Alle poothoofden en diverse betrokkenen ontvangen een exemplaar van dit eindrapport.

Tevens zijn diverse publicaties in vakbladen en proceedings te raadplegen. Op termijn, nadat de expanders de gewenste eigenschappen hebben, zal er een presentatie ten behoeve van de Dienstkringen worden gegeven.

9.6 Wie zal in de toekomst onderhogen oppakken?

Het initiatief om te onderhogen ligt in principe bij de markt. Op dit moment is er een monopolist: BAM Grondtechniek. Rijkswaterstaat zal op haar beurt onderhogen kunnen meenemen bij projecten als optie om de verkeershinder te beperken.

Literatuurlijst

- [1] Si²: drie workshops over innovatie in de lijninfrastructuur (DWW, april 2000, Publicatienummer W-DWW-2000-039).
- [2] Verkennende Plaxis-berekeningen onderhogen (7 maart 2000), memo van B.G.H.M. Wichman t.a.v. projectgroep en Vervolg verkennende Plaxis-berekeningen onderhogen (28 maart 2000), memo van B.G.H.M. Wichman t.a.v. projectgroep.
- [3] Si²: compenseren van zettingen d.m.v. onderhogen, verkennende Plaxis-berekeningen aan expanderende lichamen in de slappe ondergrond (DWW, 28 februari 2001, Publicatienummer W-DWW-2001-014), auteur: B.G.H.M. Wichman.
- [4] Innovatieproject 'Onderhogen', projectplan proeven Abcoude (HBG Civiel Grondtechniek, 28 februari 2001, Nr. 999512).
- [5] Innovatieproject 'Onderhogen', Draaiboek proeven Abcoude Definitief (HBG Civiel Grondtechniek, 18 januari 2001, project 999512), auteur E.J. Huiden.
- [6] Innovatieproject 'Onderhogen', Verslag productiegegevens Proeven Abcoude (HBG Civiel Grondtechniek, 25 april 2001, project 999512), auteur E.J. Huiden.
- [7] Innovatieproject 'Onderhogen', Verslag meetresultaten Proeven Abcoude (HBG Civiel Grondtechniek, 3 juli 2001, project 999512), auteur E.J. Huiden.
- [8] Briefrapport betreffende proef "onderhogen", proefvak Abcoude (Fugro Ingenieursbureau, 30 mei 2001, opdrachtnummer N-0965).
- [9] Rapport betreffende grondonderzoek A15 en A16 te Hendrik Ido Ambacht (Fugro Ingenieursbureau, 8 mei 2001, opdrachtnummer D-10266).
- [10] Rapport betreffende grond- en laboratoriumonderzoek met parameter bepaling RWA15 te Hendrik Ido Ambacht (Fugro Ingenieursbureau, 3 oktober 2001, opdrachtnummer D-10266).
- [11] Rapport betreffende calamiteitenweg A15 te Hendrik Ido Ambacht (Fugro Ingenieursbureau, 20 december 2001, opdrachtnummer D-10530).
- [12] Wichman, B.G.H.M. 2002, Zettingen compenseren door onderhogen. Geotechniek no. 4, oktober 2002, pp. 70-72.
- [13] 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.
- [14] Innovatieproject 'onderhogen; Draaiboek proef A15_A16, definitief (HBG Civiel Grondtechniek, 5 juli 2001, project 999512), auteur E.J. Huiden
- [15] Innovatieproject 'onderhogen', verslag resultaten injecteren Proeven bij A15/A16, deel 1 met apart de bijlagen (22 november 2001) en deel 2 (6 maart 2002), HBG Civiel Grondtechniek, project 999512, auteur E.J. Huiden.
- [16] Het liften van een boom, Hendrik Ido Ambacht (New York boomadvies, mei-november 2001, projectnummer 01256).

-
- [17] Wichman, B.G.H.M. en E.J. Huiden. 2003, Zettingen corrigeren door onderhogen. Geotechniek no. 7 Special geotechniekdag (oktober 2003), pp. 12-20.
- [18] Bronnen: 'Groot onderhoud aan snelwegen-onderhoudsadvisering asfaltbetonverhardingen' DWW; DWW-wijzers 48 en 48a; Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen' AVV.
- [19] N11, Onderhogen bij kunstwerk N11.11, Plan van aanpak, (HBG Civiel Grondtechniek, 2 september 2002, projectnummer 999521/RA 6053), auteur: E.J. Huiden.
- [20] Huiden, E.J. and B.G.H.M. Wichman (2003) Onderhogen, zettingen elimineren zonder verkeersoponhoud Civiele Techniek no.4 2003.
- [21] N11, Onderhogen bij kunstwerk N11.11, Verslag proeven (HBG Civiel Grondtechniek, 31 januari 2003, projectnummer 999521/F2186), auteur E.J. Huiden.
- [22] Briefrapport betreffende grondonderzoek en advies Slufterdijk Maasvlakte (Fugro Ingenieursbureau, 22 augustus 2003, opdracht nummer M01114000).
- [23] Onderhogen; Proeven bij Slufter, Plan van aanpak, (HBG Civiel Grondtechniek, 22 september 2003, no. 999522), auteur E.J. Huiden.
- [24] Onderhogen; Proeven bij slufter, Verslag proefresultaten (HBG Civiel Grondtechniek, 8 januari 2004, no. 999524/F2201), auteur: E.J. Huiden.
- [25] Onderhogen van zandbed in geocentrifuge, Geocentrifugeproeven TU Delft (RWS DWW rapport, 12 juli 2004, no. DWW-2004-060), auteur: B.G.H.M. Wichman.
- [26] Oriënterend onderzoek naar de coatbaarheid van expanders die zijn gemaakt van kunststof textielen (TNO polymeertechnologie, 17 juni 2004, rapport no. 42/04.011338/sec), auteur A.M. Agterberg.
- [27] Geocheck Onderhogen, inventarisatie, ontwikkeling en vergelijking methodes (GeoDelft, november 2004, projectnummer 416610-0005 v 02), auteur R. van der Meij.
- [28] Report on feasibility study-Phase 1, (Universiteit van Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, 19 december 2003, Ref. DWW "Onderhogen" project, our order no. 1009), auteur P. Kudella.
- Report –Phase 2, (Universiteit van Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, 7 juni 2004, Ref. DWW "Onderhogen" project, our order no. 1009), auteur P. Kudella.
- Report-Phase 3/1, (Universiteit van Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, 25 november 2004, Ref. DWW "Onderhogen" project, our order no. 1009), auteur P. Kudella.