

Jetgroutfundering viaduct A27 in de polderconstructie van folie te Amelisweerd

Ing. Onno S. Langhorst
Movares Nederland BV
senior adviseur geotechniek



Ir. Barho J. Admiraal
Volker Staal en
Funderingen bv
bedrijfsdirecteur



Gijs M. Kaptein MSc
Movares Nederland BV
senior adviseur geotechniek



Ir. Gerard A van Zwieten
Volker Staal en
Funderingen bv
projectleider
funderingstechnieken



Inleiding

In 2003 is een nieuw ontwerp voor een autoviaduct over de verdiepte A27 opgesteld. Dit viaduct komt parallel aan het spoorviaduct te liggen. De bestaande situatie is in *figuur 1* weergegeven. De verdiepte ligging vormt door middel van een folieconstructie een polder. Een impressie van het nieuwe viaduct is weergegeven in *figuur 2*. Het nieuwe viaduct bestaat uit een stalen vakwerkbrug met een composiet rijvloer constructie om het



Figuur 1 – Bestaande situatie.

eigengewicht zo licht mogelijk te houden.

Indertijd werd onderkend dat de folieconstructie aanvullende eisen stelt aan het ontwerp. Een significante ontgraving zal al snel leiden tot een opbarst belasting voor de folie en een paalfundering door het folie is – vanzelfsprekend – niet mogelijk. Er is toen gekozen voor een fundering op staal met een aanlegniveau zo hoog mogelijk boven het folie. Het uitgangspunt bij dit ontwerp is dat de polder tijdens de aanlegfase met zand zou zijn aangevuld. Echter bij de verificatie van de grondslag blijkt dat een aanzienlijke hoeveelheid klei in de aanvulling is verwerkt. Uit nadere studie is gebleken dat menggrond is teruggebracht vanuit de oorspronkelijke bovengrond of van elders middels hydraulisch grondverzet zoals in *figuur 3* is weergegeven.

In ieder geval betrof het een inhomogeen mengsel van zand en klei, waarbij mogelijk hierbij een scheiding is opgetreden ten gevolge van het verschil in sedimentatiesnelheid tussen de grovere zanddelen en de fijne kleiige delen. Hierdoor is een sterk wisselende grondopbouw ontstaan met samendrukbare kleilenzen. Een harde conclusie is dat de

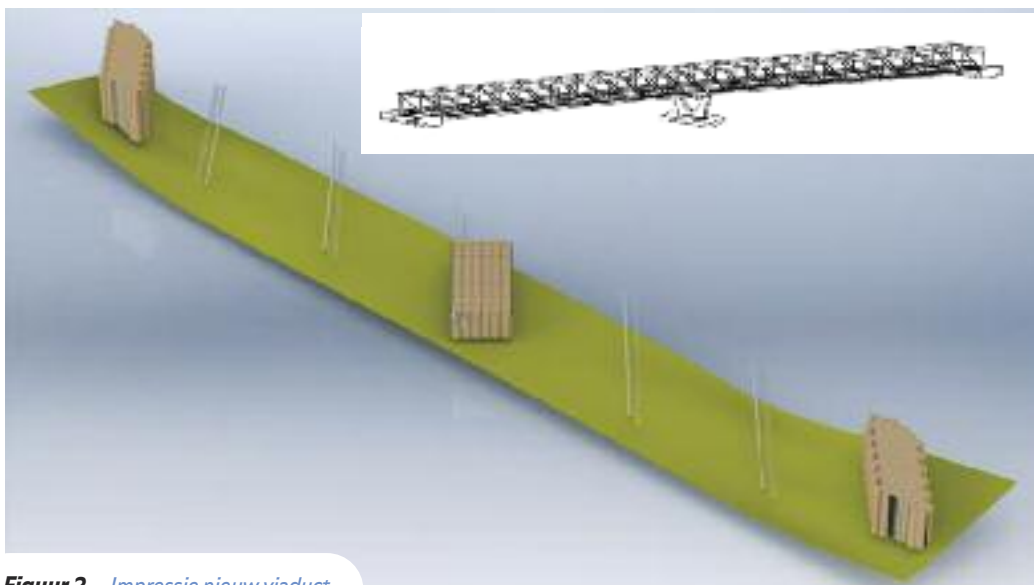
hoeveelheid kleilenzen dermate groot is dat het ontwerp van een fundering op staal voor het nieuwe viaduct zonder aanvullende maatregelen niet meer mogelijk is! Het bodemonderzoek is vervolgens uitgebreid naar 3 boringen en 10 sonderingen per steunpunt. Vanwege het risico dat het onderzoek de folie beschadigt zijn alle onderzoeken uitgevoerd tot 1 meter boven het aanlegniveau van de folie. In *figuur 4* zijn over de middenpijler doorsneden gemaakt, te weten I-I, II-II, III-III. De bruine vlakken in de dwarsprofielen zijn de kleilagen. In *figuur 4* is de grondopbouw weergegeven.

De folieconstructie ligt op 7,5m diep onder het huidige maaiveld en heeft betrekking op de bestaande situatie en is middels een klemconstructie waterdicht verbonden aan de onderbouw van het bestaande viaduct, zoals in *figuur 5* is weergegeven.

De vliesconstructie bestaat uit een PVC folie. De betonnen poer onder de middenpijler heeft een afmeting van 6m x 15m. Ter hoogte van de landhoofden bedragen de afmetingen van de betonnen poer 5m x 10m. Onder deze funderingen dienen maatregelen getroffen te worden opdat er voldoende draagvermogen en stijfheid gerealiseerd wordt om een statisch onbepaald brugdek te dragen. Het brugdek bestaat uit twee overspanningen met een totale lengte van circa 125m. Om voor een dergelijke constructie een fundering mogelijk te maken dient een grondverbetering uitgevoerd te worden omdat de grondopbouw sterk wisselend is met samendrukbare kleilenzen en zandlagen met lage conusweerstand.

Grondverbeteringstechnieken

De mogelijkheden van de grondverbeteringstechnieken zijn afhankelijk van de aangetroffen sterk variërende bodemopbouw. Bovendien dient de grondverbetering vanaf maaiveld te worden aangebracht omdat geringe ontgravingen al tot opbarsten kunnen leiden. Tevens speelt de bereikbaarheid een zeer grote rol om ter plaatse van de tussenberm van de rijksweg de werkzaamheden uit



Figuur 2 – Impressie nieuw viaduct.

Samenvatting

De spoorbaan Utrecht - Bunnik kruist de verdiepte rijksweg A27 met een spoorviaduct. Parallel aan dit spoorviaduct dient het huidige autoviaduct ook ingericht te worden voor spoorverkeer. Een daarnaast nieuw aan te leggen autoviaduct is daarom noodzakelijk. Gekozen is om deze te funderen op twee landhoofden en een middenpijler. De bijzonderheid is dat de A27 ter plaatse verdiept is aangelegd in een polderconstructie met een diepgelegen folie: het befaamde Amelisweerd-tracé. Onder de folie bevindt

zich een draagkrachtige zandpakket, maar na verificatie blijkt deze boven de folieconstructie te ontbreken. De grondslag bestaat uit klei- en losgepakte zandlagen, die een fundering op staal in eerste instantie ongeschikt maken. Gezocht is naar een grondverbeteringstechniek om dit alsnog mogelijk te maken. Het maken van een jetgroutmassief bleek de optimale oplossing te zijn. Dit is inmiddels met succes toegepast al bleek de ondergrond nog wel wat verrassingen te herbergen.

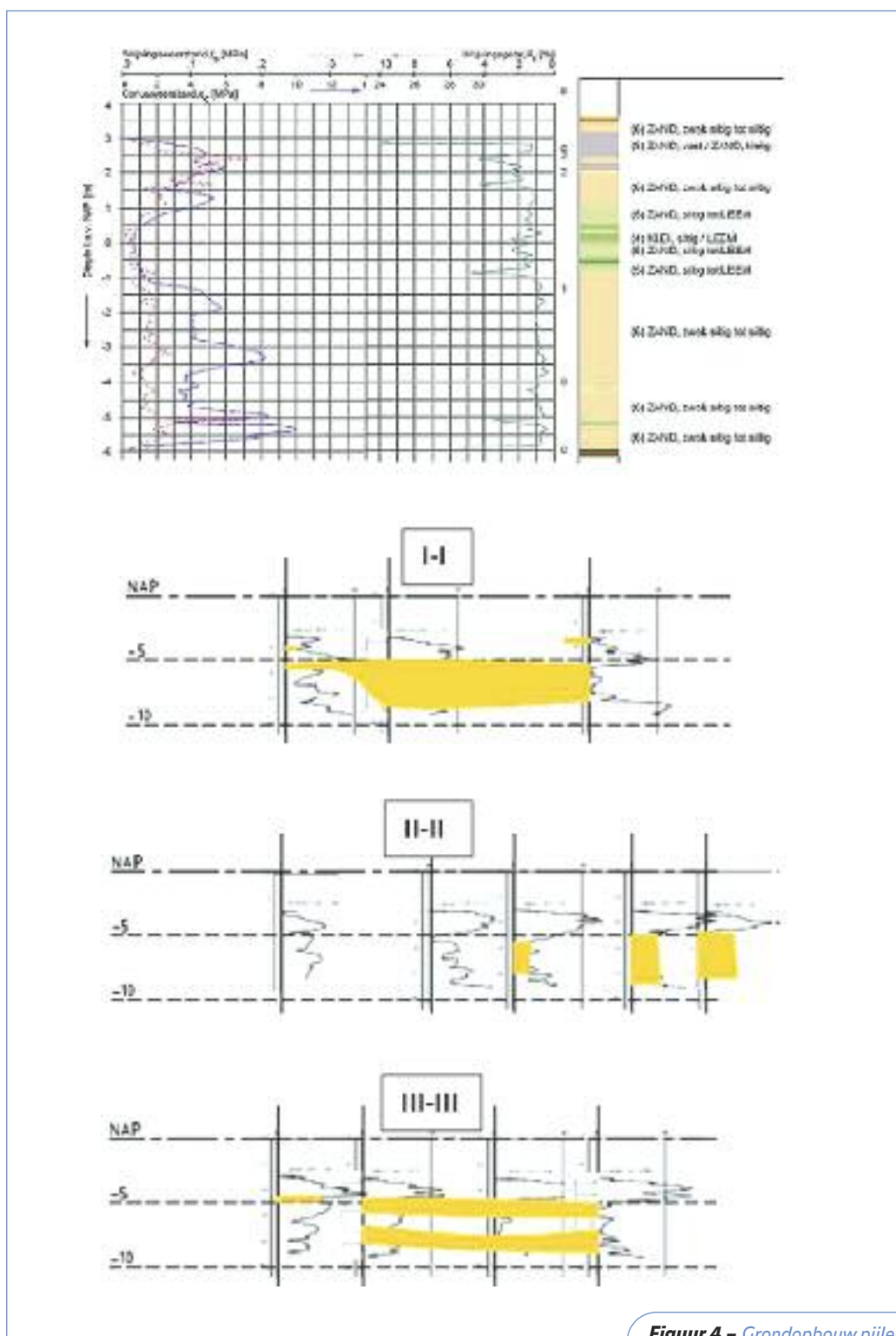


Figuur 3 – Hydraulisch grondverzet bij aanleg verdiepte ligging A27.

te kunnen voeren. Ook technische eisen zoals beperkte toename in krachten en rek in de folie, risico tot beschadigen van de folie, zettingen en zettingverschillen spelen een rol. In onderstaande tabel is een vereenvoudigde weergave van de afweging gemaakt ten aanzien van de mogelijkheden van grondverbeteringstechnieken. Zie tabel 1. Geconcludeerd kan worden dat op basis van de afwegingstabel jetgrouten een goede oplossingsrichting biedt.

Ontwerpaspecten

Ten gevolge van het jetgroutmassief worden de oplegkrachten dieper onder maaiveld overgebracht op de ondergrond. Dit heeft als voordeel dat het draagvermogen toeneemt en er minder samendrukbare lagen onder het aanlegniveau aanwezig zijn. Het nadeel van deze keuze is dat de grondspanningen ter hoogte van de folie minder gespreid zijn. Vanwege de kritieke functie van de folie is daarom gekozen om deze situatie met een 3D Eindige Elementen Model (EEM, Plaxis) berekening te beschouwen. In de EEM berekeningen is de klemconstructie zettingvrij gefundeerd en boven de folie bevindt zich een 1 m dikke grondlaag van onbekende samenstelling. Deze onbekende laag wordt in de berekeningen gevarieerd als zowel klei als zand. Onder de folie moet echter ook nog rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat er



Figuur 4 – Grondopbouw pijler.

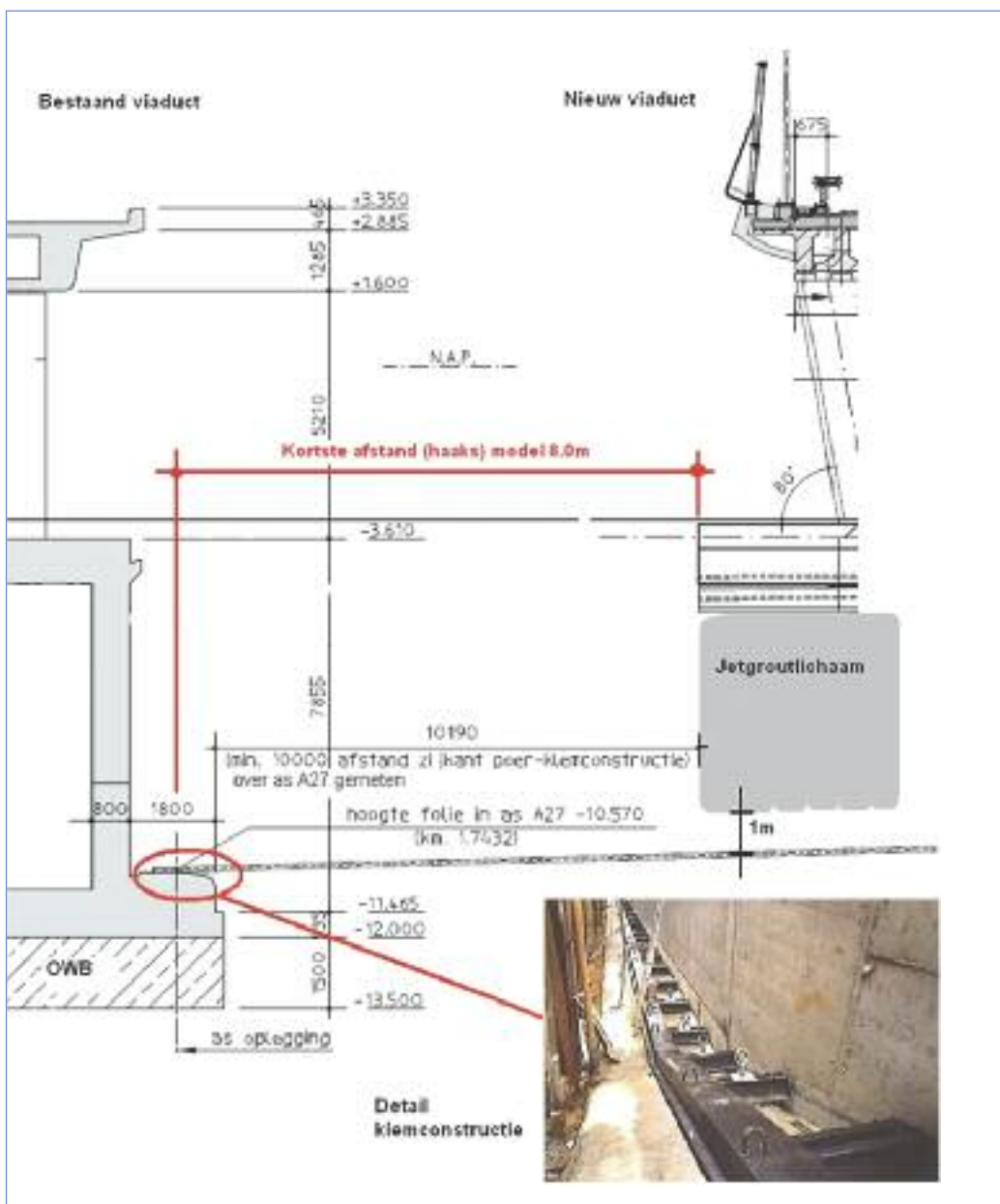
Tabel 1 Mogelijkheden van grondverbeteringstechnieken

Gangbare technieken	Toepasbaarheid	Constructief	Folie	Rijksweg	Kabels & leidingen	Horizontale drainage	Conclusie
	1	2	3	4	5	6	
Jetgrouten	+	+	+	+/-	+/-	-	+
Grondscheurend (fracturing)	+/-	-+	-	+/-	-	-	
Grondverdringend grouten (compaction)	+/-	-+	-	+/-	-	-	
Mechanische menging	-	+/-	+	+/-	+/-	-	+/-

- = slecht toepasbaar +/- = matig toepasbaar + = goed toepasbaar

- 1 In sterk wisselende bodemopbouw bestaande uit klei/veen/losgepakt zand;
- 2 Er dient een funderingsdruk van 100 kN/m² opgenomen te worden;
- 3 Grondverbeteringsmassief dient tot 1 m boven folie aangebracht te worden i.v.m. risico

- 4 Er dient rekening gehouden te worden met klein en licht materieel i.v.m. bereikbaarheid/toepasbaarheid in tussenberm van de rijksweg;
- 5/6 Dienen vooraf vrij gegraven en omgelegd te worden.



Figuur 5 – Geometrie polder en funderingen inclusief detail klemconstructie.

een sliblaag gevormd was ten tijde van het aanbrengen van de folie (in den natte), waarvan de dikte ca 0,1 m bedraagt.

Ook deze relatief dunne laag onder de folie is meegenomen als zijnde mogelijk zand dan wel slib. Deze variatie heeft geleid tot een viertal combinaties die doorgerekend zijn. Dit heeft tot doel enerzijds een prognose te krijgen van het draagvermogen en het zettinggedrag van de ondergrond en anderzijds om een idee te hebben van de maximale membraankracht. De te verwachten zetting ter plaatse van de middenpijler bedragen maximaal 5 à 6 cm (gedurende 6 jaar) en ter plaatse van de landhoofden circa 1 cm. In onderstaande figuur 6 zijn de vervormingen grafisch weergegeven ter plaatse van de middenpijler.

Een andere variabele die sterk van invloed is op de membraankracht is de wrijving tussen de folie en de grond. Uit [8] volgt dat de wrijvingshoek bij zand 22° bedraagt en bij zandige klei 20°. Uit [9] volgt een wrijvingshoek van 18° voor klei. Bij het bepalen van de maximale foliekracht zijn de uitersten gemodelleerd. Uit de analyses volgde een maximale rek toename in de uiterste grenstoestand van 4,9% onder de pijler en circa 0,3% ter plaatse van de inklemming. Voor het ontwerp is in overleg met Rijkswaterstaat bepaald dat de toename in rek tot 10% acceptabel zijn. Ter hoogte van de klemconstructie is een aanzienlijk beperktere rek toegelaten omdat de onzekerheden ten aanzien van de waterdichting onder toenemende rek hier erg groot zijn. Het resulterende ontwerp bevat een grote onzekerheid t.a.v. de te verwachten vervormingen doordat de onderste meter van de grond niet beproefd is. Derhalve dient het ontwerp van de bovenbouw te voorzien in deze onzekerheid. De stabiliteit onder de meest ongunstige bodemopbouw is in ieder geval gegarandeerd. Voor de bovenbouw, een statisch onbepaalde brug met drie steunpunten, is daarom voorzien dat het zettingsgedrag van het tussensteunpunt wordt gemonitord en dat het niveau van de opleggingen bijgesteld kan worden middels een vizelconstructie.

Jetgrouten

Inmiddels zijn de laatste jaren uitgebreide ervaringen opgedaan met jetgrouten, onder andere in het kader van de Noord/Zuidlijn te Amsterdam. Ook op vele andere projecten is jetgrouten toegepast en is een grote dataverzameling opgebouwd van sterktes, E-moduli, productieparameters (treksnelheid, rotatie, druk, debiet, etc) in relatie tot grondsoort en diameter.

Daarbij is onderscheid te maken in proces tussen één-, twee- en driefase(n) jetgrouten, voor- en nasnijden, cementgehalten, etc. Ten behoeve van

het beoogde funderingsmassief is de vereiste karakteristieke druksterkte van 100 kN/m² van ondergeschikt belang omdat in dergelijke grondopbouw, bestaande uit klei en losgepakt zand, relatief eenvoudig druksterkten behaald worden van 2000 tot 10.000 kN/m². De E-modulus verdient wel speciale aandacht omdat waarden van 1400 tot 1600 kN/m² moeilijker te realiseren zijn, met name in cohesieve lagen. Om dit te bereiken dient een cementgehalte te worden toegepast van ca. 300 kg/m³. Met 2-fasen groutkolommen (met toevoeging van lucht) kunnen grote diameters bereikt worden, maar is het nadeel dat zeer hoge wateroverspanningen in de ondergrond gegenereerd kunnen worden.

Dit kan leiden tot zettingen ter plaatse van het wegdek van de rijksweg en ongewenste spanningsverhogingen nabij de folie. Met behulp van 1-fase jetgrouten is het proces in deze situatie beter beheersbaar uit te voeren maar worden kleinere diameters bereikt. Een realistische diameter in zandgrond bedraagt ca. 1,1 à 1,3 m, in cohesieve grondsoorten is dit doorgaans ca. 50% minder. Bij het maken van een massief is het dus van belang om het verschil in diameters in de diverse lagen te beheersen en/of een jetgroutpatroon te kiezen waardoor mogelijke verschillen een beperkte invloed hebben op het risico van te geringe overlap en schaduwwerking.

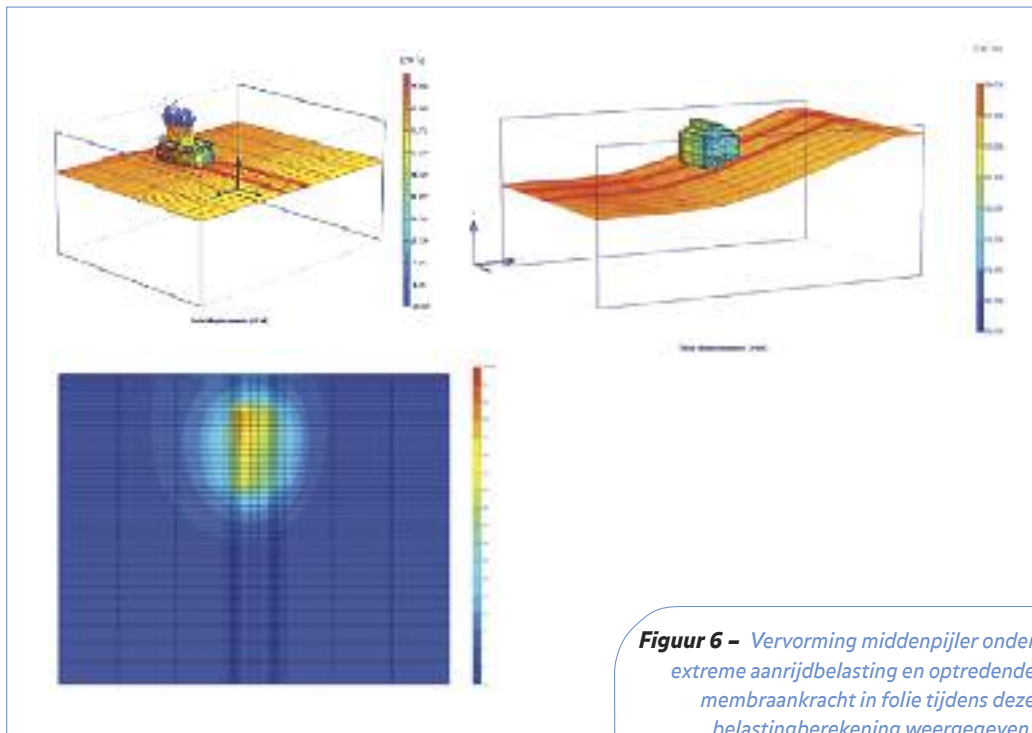
Van ontwerp naar jetgroutproef

Hierboven is aangegeven dat de grond de nodige variaties en onzekerheden geeft en dat daardoor nog geen eenduidige keuze in procesparameters kan worden gemaakt. Om deze redenen is besloten om eerst proefkolommen te fabriceren. Besloten is om deze ruim voorafgaand aan de grondverbetering uit te voeren. Dit is gedaan om het risico van stagnaties tijdens het werk te voorkomen. Het meten en beproeven van de jetgroutkolommen neemt enkele weken in beslag. Indien hieruit wijzigingen voor het ontwerp volgen geeft dit een extra onderbreking in de voortgang. Normaliter hoeft bij jetgrouten vaak enkel een diametercontrole plaats

te vinden. Voor deze toepassing is dit echter niet voldoende.

Daarnaast biedt het inpassen van een proefveld ook mogelijkheden om meer aspecten te onderzoeken, zoals risico zetting of rijzing omgeving. In juni 2011 is door VSF een uitgebreide jetgroutproef ter plaatse van het noordelijke landhoofd uitgevoerd. Hierbij zijn 6 afzonderlijke jetgroutkolommen en een mini massief bestaande uit 4 kolommen vervaardigd. Hierbij is gevarieerd in treksnelheid, groutsamenstelling, jetgroutmonitor en wel/niet

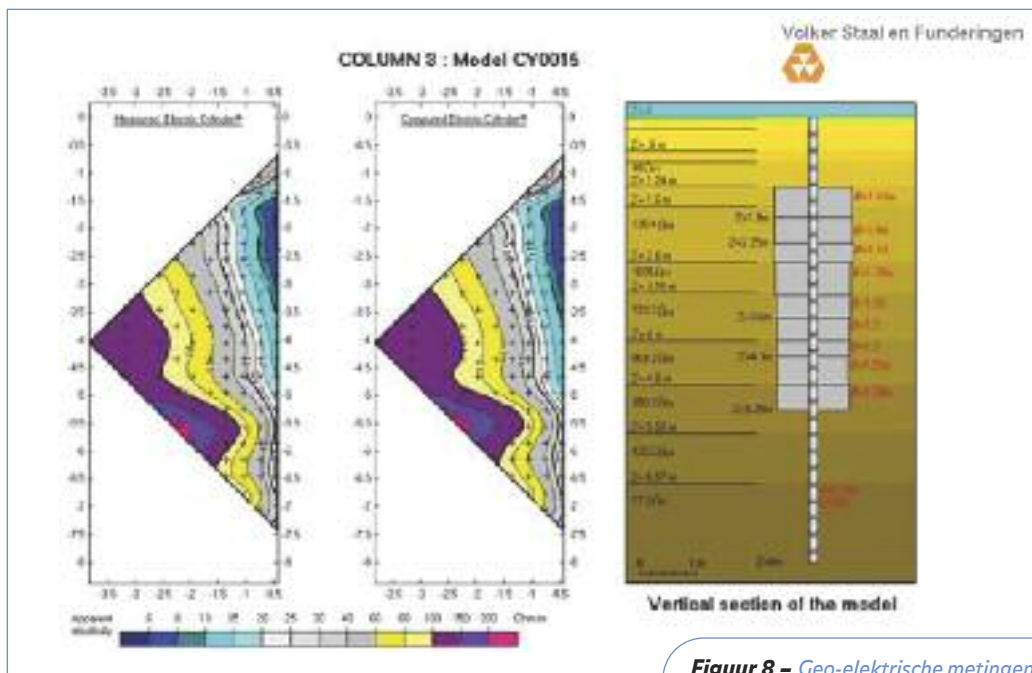
voorsnijden. Tijdens de proef zijn onder andere de diameter en variaties in diameter door middel van spinmetingen (zie figuur 7) en geo-elektrische metingen (zie figuur 8) in relatie met de grondslag onderzocht. Met de geo-elektrische meetmethode kan het diameterverloop over de gehele hoogte van een groutkolom in beeld worden gebracht. Door de bovenzijde van de kolommen vrij te graven zijn de meetmethoden worden gekalibreerd en vergeleken. Gemiddeld genomen komen de meetmethoden goed met elkaar overeen. De geo-elektrische meting geeft in de meeste gevallen een grotere



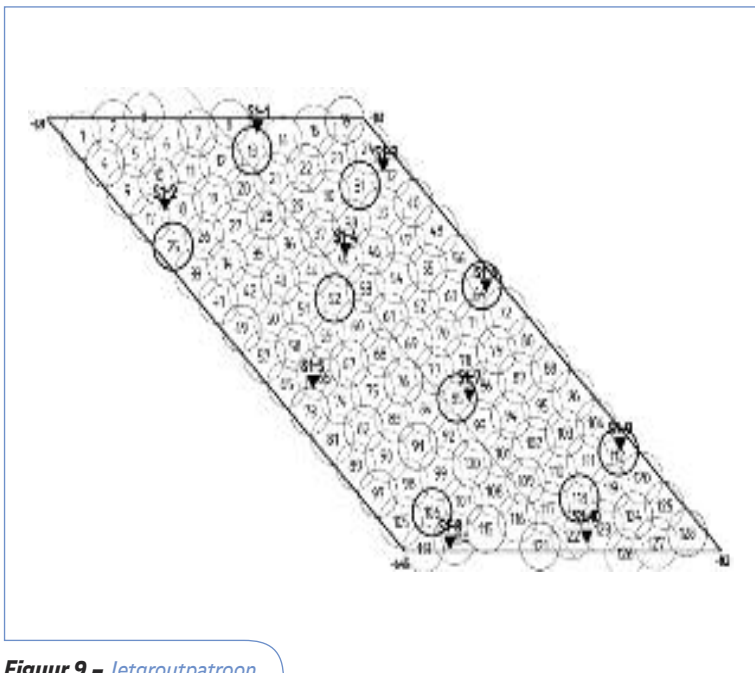
Figuur 6 – Vervorming middenpijler onder extreme aanrijdbelasting en optredende membraankracht in folie tijdens deze belastingberekening weergegeven.



Figuur 7 – Jetgroutproef spinmeting.



Figuur 8 – Geo-elektrische metingen.



Figuur 9 – Jetgroutpatroon.



Figuur 10 – Impressie van de uitvoering jetgrouten t.p.v. de tussenberm van A27.

diameter van circa 5 cm aan ten opzichte van de spinmeting. De geo-elektrische meting komt goed overeen met bovenkant van de diameters van de jetgroutkolommen. De waardes uit de spinmeting zijn dan ook een conservatieve veilige waarde. Een frequente toepassing van een dergelijke geo-elektrische meetmethode zal niet haalbaar en praktisch zijn, maar voor bijzondere toepassingen heeft het zeker meerwaarde. Dit geldt met name voor kolommen tot grote diepte of in sterk wisselende grondlagen.

Normaal gesproken verwacht men gereduceerde

diameters in cohesieve grond. Deze proef liet echter redelijk gelijke diameters zien in de klei- en zandlagen. De verklaring hiervoor is moeilijk te geven. Waarschijnlijk komt dit omdat de opgebrachte grond hydraulisch aangebracht is en vooral de klei nog nauwelijks verdicht is en de kleideeltjes nog weinig samenhang hebben ontwikkeld waardoor de grond makkelijk te versnijden en goed te mengen is. Zowel uit monsters van de retourspoe-ling als uit de verse kolommen middels kernboringen verkregen proefstukken zijn sterktes en E-moduli bepaald. Van de kernen bedraagt de

gemiddelde E-modulus bijna 4000 MPa met een acceptabele 17,5% onderschrijding van 1500 MPa. Binnen de ontwerpuitgangspunten is dit passend.

Risico's

De technische risico's zijn voor het betreffende jetgroutproces beschouwd en zijn vereenvoudigd weergegeven in tabel 2.

Uitvoering

Het ontwerp is verder in detail door de uitvoerende jetgroutaannemer VSF uitgewerkt. Het jetgrout-

Tabel 2 Technische risico's

Risico/falen	Direct gevolg	Oorzaak	Beheersmaatregelen
Onvolkomen heden in jetgrout massief	Zettingen te groot, draagkracht onvoldoende	- Jetgroutsterkte te laag, te grote variaties jetgroutsterkte, discontinuïteiten jetgroutmassief Ontbrekende grote jetgroutvolumes (schaduw werking, misboringen, etc) Te kleine diameters, te grote variaties Te grote afwijkingen in verticaliteit	Proefkolommen, controle sterkte eigenschappen, beperken insluitingen/gaten < 30% (Ontwerp jetgroutpatroon) Controle metingen uitvoering, flexibel bijsturen tijdens uitvoering
Folie	Beschadiging en lekkage	Jetdrukken, te diep boren, ongelijkmatige belastingspreiding	1 m boven folie blijven, fysieke begrenzing op jetgrout-machine, Plaxis beschouwing
Rijksweg	Zettingen / rijzing wegdek	Te grote wateroverspanning, drukopbouw in bodem t.g.v. verstopping boorgat	1-fase i.p.v. 2-fasen jetproces, visueel monitoren stroming retourvloeistof, bij verstopping direct jetgroutproces stoppen en boorgat vrijmaken/voorsnijden
Kabels & leidingen	Beschadiging, defect raken	Aanboren	Vrijgraven, tijdelijk omleggen
Horizontale drainage	Beschadiging, verstopt raken	Aanboren	Vrijgraven, tijdelijk omleggen



Figuur 11 – Beeldscherm GPS-navigatie voor funderingsmachine.

patroon is opgebouwd uit primaire jetgroutkolommen die als eerste worden vervaardigd. Daarna de secundaire en als laatste de tertiaire (vul) jetgroutkolommen. Richtdiameters van de primaire- en secundaire jetgroutkolommen bedragen 1,1 m en voor de tertiaire (vul) jetgroutkolommen 1,3 m. De kolommen worden in een driehoek stramien gepositioneerd waarbij de hart op hart afstand ca. 0,9 m bedraagt. De lengte van de jetgroutkolommen varieert van 4,04 m à 4,73 m ter plaatse van de middenpijler, 9,95 m à 7,68m ter plaatse van het landhoofd Noord tot 5,16 m à 6,21 m ter plaatse van het landhoofd Zuid. Bovendien verloopt de folieconstructie in diepte niveau. In *figuur 9* is het jetgroutpatroon van de landhoofden en pijler weer gegeven. Gedurende het werk zijn in vele primaire kolommen spinmetingen uitgevoerd ter controle. Dit om afwijkingen in diameters van de kolommen

te controleren. Ter plaatse van de middenpijler zijn daarop kleine aanpassingen doorgevoerd op de secundaire en tertiaire kolommen. Na vervaardiging van elk funderingsblok zijn kernboringen uitgevoerd als productcontrole. In *figuur 10* is een impressie gegeven van de uitvoeringswerkzaamheden ter plaatse van de pijler in de tussenberm van de A27.

Een geheel andere nieuwigheid is de toepassing van GPS-navigatie op de funderingsmachine voor de maatvoering. Zie *figuur 11*. Normaalgesproken worden piketten of een bouwraam met spandraden toegepast. Bij grote bouwputten of werken op het water is maatvoering een lastige en intensieve bezigheid. Bij jetgrouten valt dat over het algemeen enigszins mee, maar de vele machinebewegingen in combinatie met de retourstroming maken de kans op fouten wel groter. Om deze reden heeft VSF gekozen voor een GPS-systeem, waarbij de Autocad-gegevens worden ingelezen. Hiermee kan de machine van punt naar punt worden genavigeerd. Nametingen tonen aan dat dit sneller is en minimaal zo nauwkeurig als de eerder genoemde systemen, maar met minder faalrisico. In tabel 3 zijn de toegepaste en gemeten parameters samengevat.

Tot slot

Al met al kan worden geconcludeerd dat een bijzondere funderingsconstructie is gecreëerd om voldoende draagkracht te verkrijgen in inhomogene en geroerde grond boven een folieconstructie. Door de keuze van de opdrachtgever om dit in een bouwteam op te pakken is een samenwerking tot stand gekomen waar de kennis is gebundeld om tot een

optimaal resultaat te komen. Specialisten van Movares, Heijmans Beton- en Waterbouw en Volker Staal en Funderingen hebben zo in relatief korte tijd het ontwerp aangepast en in een snelle bouwtijd gerealiseerd. Bij het viaduct over de A27 is gebleken dat grondverbeteringstechniek in de vorm van jetgrouten een prima alternatief is om een fundering boven een folieconstructie te kunnen realiseren.

Literatuur

- [1] J.C.W.M. de Wit, P.J.Bogaards, O.S. Langhorst, B.J. Schat, R.D. Essler, J. Maertens, B.K.J. Obladen, C.F. Bosma, J.J. Sleuwaegen, H. Dekker: *Design and Construction of a metrostation in A'dam, challenging the limits of jetgrouting, Design and validation of validation of jetgrouting for the Central Station A'dam*, 14th European Conference on Soil Mechanics, Madrid, 2007.
- [2] B.J. Schat, A. Bots, O.S. Langhorst, *Innovative retaining wall with jetgrout for new metrotunnel underneath Amsterdam Central Station*. RECT te Toronto, 2007.
- [3] J.J. Sleuwaegen, H. Dekker: *Anwendung des Jetgrout Verfahrens unter dem Hauptbahnhof Amsterdam unter besonderen technischen und geologischen Randbedingungen*, 13e Darmstädter Geotechnik Kolloquium, Grundbautag Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [4] J.C.W.M. de Wit, P.J.Bogaards, O.S. Langhorst, B.J. Schat, R.D. Essler, J. Maertens, B.K.J. Obladen, C.F. Bosma, J.J. Sleuwaegen, H. Dekker: *Uitvoering van de sandwichwand onder Amsterdam Centraal Station*, Geotechniek juli 2006, nr 3, blz. 28-33.
- [5] J.C.W.M. de Wit, P.J.Bogaards, O.S. Langhorst, B.J. Schat, R.D. Essler, J. Maertens, B.K.J. Obladen, C.F. Bosma, J.J. Sleuwaegen, H. Dekker: *Ontwerp van de sandwichwand onder Amsterdam Centraal Station*, Geotechniek april 2006, nr 2, blz. 26-31.
- [6] J.M. van Esch, A.F. van Tol, H.R. Havinga, A.M.W. Duijvestijn, B.J. Schat, J.C.W.M. de Wit: *Funcional analyses of jetgrout bodies base don Monte Carlo simulations*, 11th Int. Conf. On Computer Methods and Advances in Geomechanics, Torino, Italy, 2005.
- [7] A.M.W. Duijvestijn en B.J. Schat: *Een kanaal onder het Centraal, cement* 2001, nr 3, blz 41-47.
- [8] Grondmechanica Delft, *Wrijving zand-kunststofvliezen*, september 1991.
- [9] CUR174, *Geotextielen in de waterbouw*, januari 1995. ●

Tabel 3 Toegepaste en gemeten parameters

Toegepaste parameters	Eenheid	Primaire en seculaire jetgroutkolommen	Tertiaire (vul) jetgroutkolommen	
Cementgehalte	kg/m ³	≥ 300	≥ 300	
Cementtype	-	Hoogoven CEM III B 42,5		
Wcf	-	0,9	0,9	
Treksnelheid	cm/min	20	20	
Druk	bar	450	480	
Gemeten parameters primaire kolommen		Eenheid	Gemiddeld	Standaard deviatie
Diameter	Landhoofd zuid	m	1,19	0,13
	Landhoofd noord		1,03	0,20
	Pijler		1,55	0,18
Gemiddelde waarden		Druksterkten MPa	Splijtreksterkte kN/m ²	E moduli kN/m ²
Landhoofd zuid		15,73	2,03	5692
Landhoofd noord		21,47	2,46	6966
Pijler		9,46	1,15	3196