

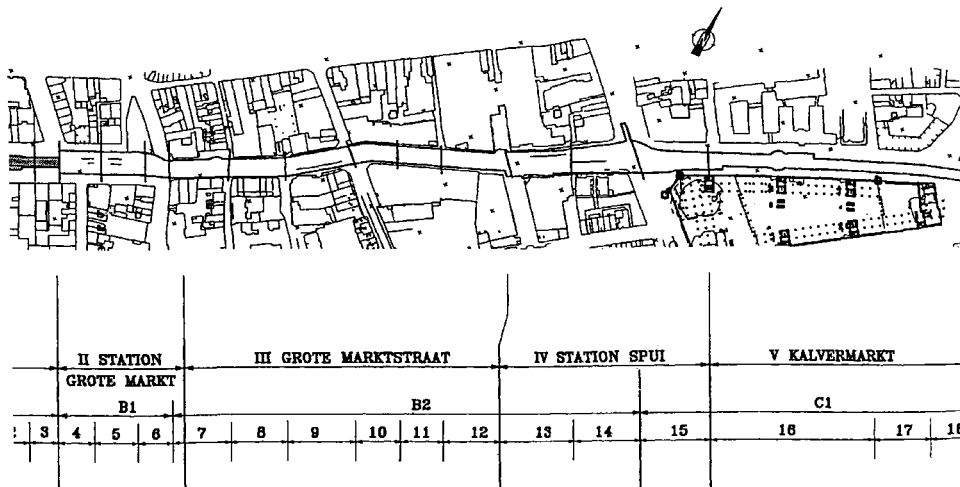
# De lessen van de Haagse Tramtunnel

A.F. van Tol  
GeoDelft, TU-Delft

## Inleiding

In het centrum van Den Haag wordt in opdracht van de Gemeente Den Haag het Souterrain gerealiseerd. Dit project omvat de bouw van een ondergrondse ligh-rail lijn met een lengte van 1250 m, waarin twee stations en parkeer faciliteiten zijn opgenomen. In de tunnel worden twee parkeer dekken onder elkaar gerealiseerd, waaronder de tram op een diepte van 11 à 12 m onder het straatniveau rijdt. De breedte van de tunnel varieert van 15 m tot 25 m ter plaatse van de stations. De wanden van de bouwput zijn op zeer korte afstand, plaatselijk nauwelijks meer dan één meter, van de aangrenzende, voornamelijk op staal gefundeerde bebouwing gesitueerd. Figuur 1 geeft de situering van de tunnel.

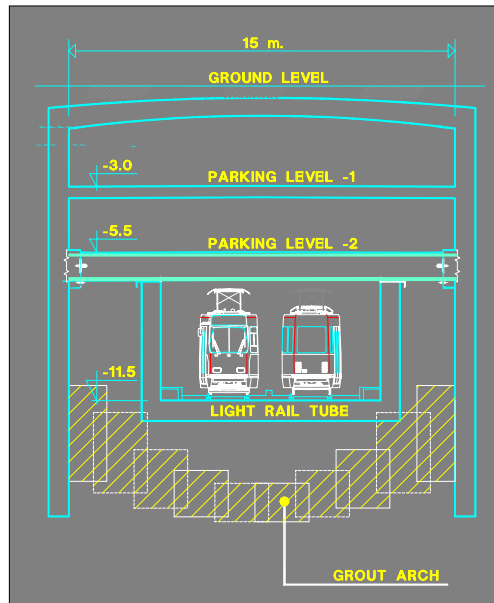
Figuur 1. Situatie van de Tramtunnel



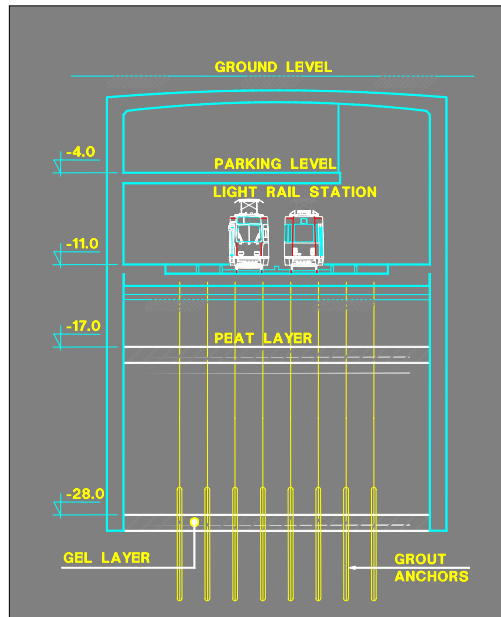
De tunnel wordt gebouwd met de zogenaamde wanden-dak methode. De wanden worden over het grootste gedeelte, ter plaatse van de Grote Marktstraat en het Spui gevormd door diepwanden en voor een kleiner gedeelte, ter plaatse van de Kalvermarkt door stalen damwanden. Na het aanbrengen van de wanden en dakplaat was de hinder voor de omgeving tot een minimum beperkt. Over een aanzienlijke lengte is de bouwput aan de onderzijde voorzien van een groutboog, die bestaat uit korte elkaar overlappende jetgroutkolommen, die de vorm van een boog hebben, zie figuur 2. De jetgroutboog functioneert als waterkering, verzekert het verticale evenwicht van de bouwputbodem door de opwaartse waterdruk naar de wanden te leiden en werkt als stempeling voor de wanden. Vanuit dit laatste oogpunt was het van belang de boog zo hoog mogelijk te positioneren, zodat de stempel functie optimaal was en de vervormingen van de wanden minimaal. Ter plaatse van de stations wordt de verticale stabiliteit

en de waterkering verzekerd door een diepliggende injectielaag, zie figuur 3. Vanwege de veel grotere breedte van de bouwputten ter plaatse van de stations was toepassing van een groutboog hier geen optie. De gellaag dient zodanig diep geïncubateerd te zijn dat het gewicht van de grond op de gellaag evenwicht maakt met de heersende waterdruk. Deze laatste oplossing is in Nederland, over het algemeen met succes, meerdere malen toegepast. Een groutboog met de drie hierboven beschreven functies was nog niet eerder toegepast in Nederland. In het buitenland werden omstreeks dezelfde periode eveneens hooggelegen groutbogen en -lagen toegepast.

Figuur 2 Doorsnede ter plaatse van de Grote Marktstraat



Figuur 3. Doorsnede ter plaatse van station Spui



Zoals inmiddels bekend, zijn er bij de bouw grote technische problemen opgetreden, die de opdrachtgever uiteindelijk noopte het ontwerp aan te passen en op een andere contractvorm over te gaan. Met als gevolg een enorme vertraging van de bouw en verhoging van de bouwkosten. In dit artikel wordt ingegaan op “wat er mis ging”, “hoe het is opgelost” en “wat er van geleerd kan worden” voorzover dit (geo)technische aspecten betreft.

Ondanks dat de Tram tunnel meerdere malen negatief in het nieuws is gekomen is het goed om ook aandacht te besteden aan de vele zaken die bij dit gecompliceerde project in het drukste gedeelte van het centrum van Den Haag wel goed zijn gegaan. Ook daarvan kan geleerd worden. Een van de zaken die in dit kader zeker genoemd dient te worden is de uitvoering van de diepwanden zonder dat hierbij noemenswaardige zakkingen van de belendingen optraden.

## **Wat ging er mis**

De bouw van de tramtunnel startte in maart 1996. In februari 1998 was de ontgraving ter plaatse van de Kalvermarkt bijna op diepte toen welvorming in de bouwputbodem werd geconstateerd. Na enkele pogingen de wellen te dichten door middel van injecteren, hetgeen aanvankelijk succes leken te hebben, nam het debiet toe en werd door het aanbrengen van geotextielen en ballast in de vorm van met zand gevulde “big bags” gepoogd de situatie te beheersen. Nadat enige tijd later naast de damwand een gat in de straat viel werd besloten het drukverschil tussen binnen en buiten op te heffen door de bouwput onder water te zetten.

Deze situatie heeft ruim twee jaar geduurd. In deze periode werden verschillende alternatieven voor het veilig voortzetten van de bouw bezien. Uiteindelijk heeft dit, voor de gedeelten met een groutboog, geleid tot het afbouwen onder luchtoverdruk. In juni 2000 werd een “design and construct” contract ondertekend, waarbij de aannemer Tramkom de verantwoordelijkheid voor het inmiddels gewijzigde ontwerp overnam voor die gedeelten waar een groutboog aanwezig was. De overige bouwgedeelten, waaronder station Spui werden volgens het oude contract afgebouwd.

Gelijktijdig werd de ontgraving van station Spui voortgezet. In juli 2000 ontstond welvorming nabij het compartimenteringsscherm tussen de bouwput Kalvermarkt, die nog onder water stond en de bouwput Spui. Enige uren hierna bezweek dit scherm en liep bouwput Spui onderwater. Nadat dit scherm met een zware betonnen gording was verstevigd en grond was teruggevuld kon het water worden weggepompt. In de daarop volgende maanden werd gepoogd de bemaling van bouwput Spui op orde te brengen. Deze had gedurende de meer dan 2 jaar dat bouwvertraging duurde doorgefunctioneerd omdat Spui al die tijd gedeeltelijk ontgaven was. Het bleek echter dat deze bemaling niet meer functioneerde en bovendien dat elk nieuw filter dat werd geplaatst, na aanvankelijk een goede opbrengst te geven, binnen enkele dagen volledig verstopte. Door het niet kunnen bemalen van de lagen boven de gellaag bleef de waterspanning onder de veenlaag zo hoog dat de diepwand dreigde te worden overbelast en de veenlaag op te barsten.

## **Hoe is het opgelost**

### **Gedeelten met groutboog**

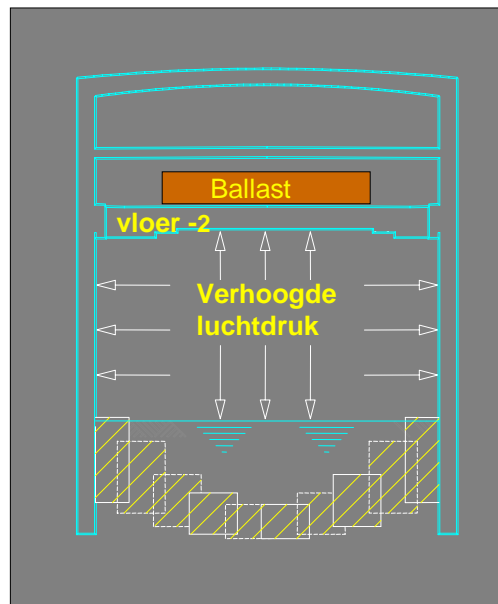
Na de calamiteit ter plaatse van de Kalvermarkt zijn verschillende analyses gemaakt naar de betrouwbaarheid van de besteksoplossing met de groutboog. Het doel van die analyses was voornamelijk om na te gaan of de gebeurtenis aan de Kalvermarkt een incident was met een zeer kleine kans van voorkomen of dat onbeheersbare welvorming inherent was aan de in het bestek voorgeschreven bouwwijze. Uit faalkansanalyses, waarop hieronder nader wordt ingegaan, bleek dat de kans op meer gaten in de groutboog groot was. Verder bleek dat het ontgraven van een injectielaag met gaten alleen veilig mogelijk is indien voldoende gronddekking op de laag aanwezig blijft. Aangezien in het geval van de Tramtunnel plaatselijk tot op de boog moest

worden ontgraven werd het niet verantwoord geacht de bouwwijze volgens het bestek voort te zetten.

#### *Grote Marktstraat*

Nadat een groot aantal alternatieven was gezien en afgewezen werd gekozen voor het afbouwen van de gedeelten met een groutboog onder verhoogde luchtdruk. Figuur 4 geeft een doorsnede van de tunnel ter plaatse van de Grote Marktstraat met daarin aangegeven het compartiment dat onder verhoogde luchtdruk wordt geplaatst. De verhoogde luchtdruk bedraagt 1,14 bar, dat wil zeggen ruim 11 m waterkolom. Bij deze overdruk blijft een gering drukverschil met de waterdruk onder de groutboog, maar de overdruk is voldoende om zandvoerende wellen te voorkomen. Het oorspronkelijke ontwerp diende voor het opnemen van de overdruk ingrijpend te worden aangepast. De vloer -2 werd veel zwaarder uitgevoerd, bovendien werd de verbinding met de diepwanden als een lijnscharnier uitgevoerd om te grote buigende momenten in de diepwand te voorkomen. Tot slot werd op deze vloer 15 kN/m<sup>2</sup> ballast geplaatst. Verder had het werken onder verhoogde luchtdruk grote consequenties, zoals het bouwen van sluisen voor mensen en voor materieel. Ook alle grond moest door de sluis worden afgevoerd. Er werd met electrisch materieel gewerkt en de arbeidsdag was beperkt. Vanwege de hoge kosten van het werken onder verhoogde luchtdruk, werd zolang mogelijk onder atmosferische omstandigheden gewerkt, dat wil zeggen er werd voorzien om onder de vloer -2 eerst 3 m te ontgraven voordat de verhoogde luchtdruk werd aangebracht. In die situatie was de voorziening voor het aanbrengen van de verhoogde luchtdruk wel aanwezig en operationeel om in geval van welvorming het compartiment binnen enkele uren onder druk te brengen.

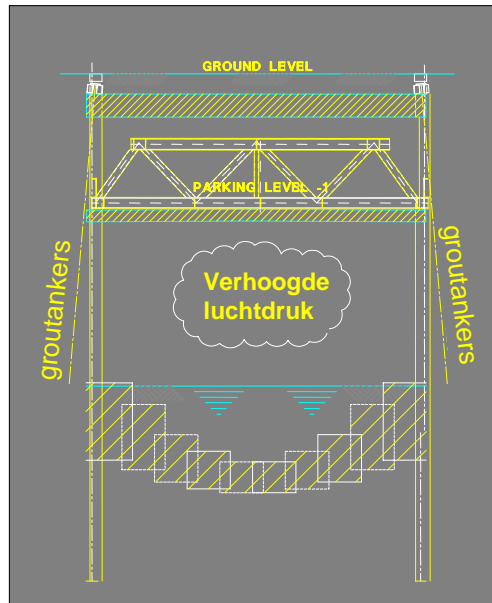
Figuur 4. Grote marktstraat, compartiment waarin de luchtdruk wordt verhoogd



#### *Kalvermarkt*

Het verschil met de doorsnede ter plaatse van de Grote Marktstraat was dat hier de vloer -2 reeds was gestort, de bouwputwanden uit stalendamwanden bestonden en de ontgravingsdiepte enigszins geringer was. De noodzakelijke voorzieningen bestonden hier uit het aanbrengen van groutankers om het verticale evenwicht van de constructie onderverhoogde luchtdruk te borgen en een versteviging van vloer -2 bestaande uit een zware staalconstructie, zie figuur 5.

Figuur 5. Kalvermarkt, doorsnede met luchtdruk



## Station Spui

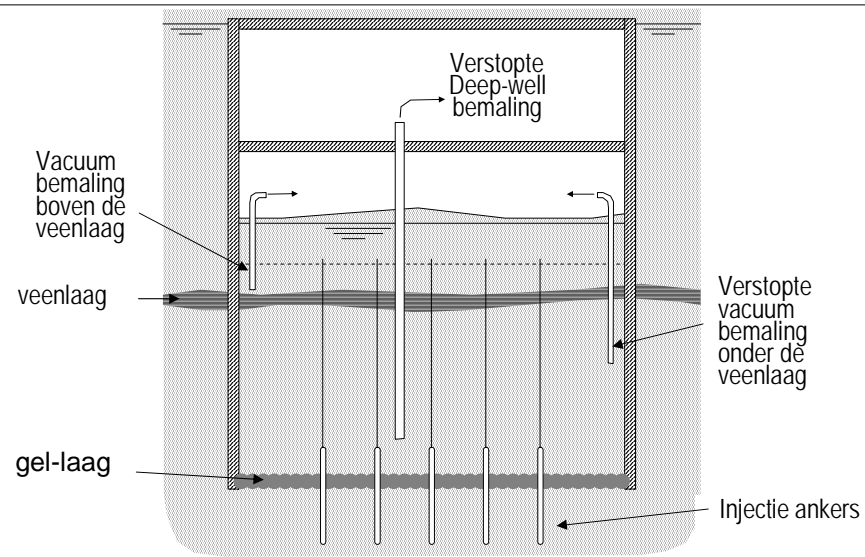
Figuur 6 laat een doorsnede over de bouwput van station Spui zien. Het niet naar behoren functioneren van de bemaling in de laag tussen de gellaag en de veenlaag had tot gevolg dat de veenlaag dreigde op te barsten met risico's voor zandvoerende wellen en dat de diepwand zou worden overbelast en daardoor meer vervormde dan was toegestaan. De oplossing die hier werd gekozen bestond uit een combinatie van:

- een overmaat aan bemalingscapaciteit door het aanbrengen van grindpalen; één per 10 m<sup>2</sup>;
- het ontgraven in sleuven van ca. 6 m over de breedte van de bouwput;
- het storten van een constructieve werkvloer over deze sleufbreedte, die tevens als stempel kon werken;
- het verankeren van deze werkvloer met behulp van de schroefinjectie ankers
- na het storten van 4 stroken werkvloer werd de constructievloer gestort.

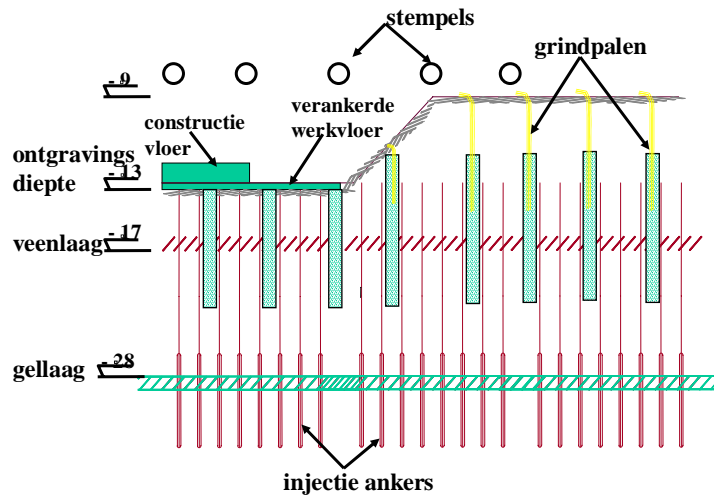
Figuur 7 geeft een langsdoorsnede van deze gefaseerde werkzaamheden. De grindpalen waren ter hoogte van de veenlaag afgestopt en daaronder voorzien van een filter zodat een grindpaal "aan- en uit" kon worden gezet. Op deze wijze kon de bemalingsduur van een grindpalen worden gestuurd.

De tijdsduur dat een bemaling voor een sectie van 6 m, bij deze gefaseerde werkwijze, benodigd was, bedroeg slechts drie weken. Door een uitgebreid systeem van waterspanningsmeters voorzien van elektrische opnemers was men tijdens de uitvoering in staat continue de stijghoogte onder de veenlaag te bewaken en desgewenst door het inschakelen van additonele grindpalen te reguleren.

Figuur 6, doorsnede bouwput station Spui



Figuur 7. Langsdoorsnede van de gefaseerde bouwwijze van station Spui



## Wat hebben we geleerd

De lessen worden onderverdeeld in de problematiek van de jetgroutboog en van de gellaag. Als eerste komt het resultaat van ervaringen en onderzoek naar de betrouwbaarheid van jetgroutlagen aan de orde alsmede het gevolg van gaten en welvorming.

### Jetgroutboog

Na het optreden van de niet beheersbare welvorming in de Kalvermarkt werd onderzoek uitgevoerd, zowel in opdracht van de Gemeente Den Haag als van Tramkom. Dit heeft geleid tot de volgende modellen:

- een faalkansmodel voor een jetgroutlaag, uitgevoerd door de TU-Delft;
- een stabiliteitsmodel voor een gat in een jetgroutlaag, uitgevoerd door TU-Delft en GeoDelft;
- een ontgrondingsmodel voor erosie onder de groutboog, uitgevoerd door WL.

Voor een uitvoeriger beschrijving van het uitgevoerde onderzoek wordt verwezen naar de desbetreffende publicatie, (Van Riel et al 2000; Koster et al 2000; van Tol et al 2001a; van Tol et al 2001b; Mastbergen et al 2003; Luger et al 2003).

Met het faalkansmodel kan de kans worden berekend dat in een jetgroutlaag een gat aanwezig is. Bovendien kan bij een bepaalde kans de grootte van het totale oppervlak van de gaten worden bepaald. Het model werkt als volgt: ingevoerd moeten worden: de vaste gegevens zoals de diepte waarop de laag moet worden aangebracht en het injectiepatroon; vervolgens worden een aantal stochastische parameters ingevoerd. Dit zijn de uitvoeringsparameters zoals bijvoorbeeld de gemiddelde en de standaard afwijking van de kolomdiameter; de gemiddelde hellingshoek (afwijking van de verticaal) en de standaard afwijking etc.

Het programma berekent met behulp van een Monte Carlo simulatie de kans dat de kolommen elkaar niet overlappen; de kans op schaduw werking en de kans dat in een eerder gemaakte kolom wordt geboord. Tabel 1 geeft de berekende kans van gaten in een jetgroutvak, zoals dat bij de Tramtunnel is uitgevoerd. De afmetingen van een vak zijn 15 x 80 m<sup>2</sup>; waarin 300 jetgrout kolommen werden gemaakt. Zoals uit de berekeningsresultaten blijkt is de kans op het ontbreken van overlap en het boren in een bestaande kolom voldoende klein. De kans dat schaduwwerking optreedt is echter gelijk aan 1. Volgens de berekening treedt dit fenomeen zelfs 60 keer op, waarbij de totale oppervlak van gaten 0,045 m<sup>2</sup> bedraagt.

Tabel 1. Berekende kans op gaten in jetgroutlaag

Gebeurtenis	Kans	Opmerking
Geen overlap	10 <sup>-4</sup>	
Boring in bestaande kolom	5. 10 <sup>-5</sup>	
Schaduw effect	1	60 keer, totaalgat oppervlak 0,045 m <sup>2</sup>

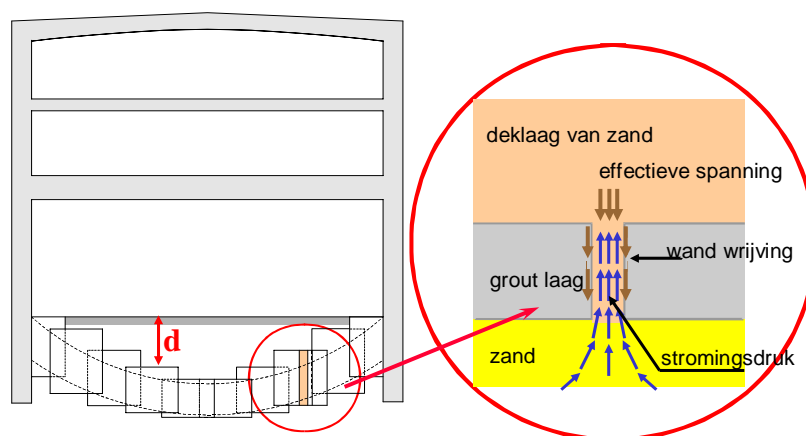
Uit de modelberekeningen blijkt dat de kans op gaten groot is; dit sluit overigens aan bij de praktijkervaringen van het injecteren in het algemeen. Met de huidige stand van de techniek is het niet mogelijk volledig waterdichte injectie lagen te creëren. Met betrekking tot de resultaten moet wel worden opgemerkt dat de in de berekeningen aangehouden spreiding in de uitvoeringsparameters gebaseerd is op een relatief kleine steekproef. Het vergroten daarvan is zeer wenselijk.

Uit berekeningen met het ontwikkelde faalkans model blijkt dat het, bij jetgroutlagen op grotere diepte, bijvoorbeeld 25 m onder het niveau van waaraf gewerkt wordt, nauwelijks meer mogelijk

is een laag te formeren met een voldoende kleine kans op gaten, omdat de onnauwkeurigheid met de diepte toeneemt.

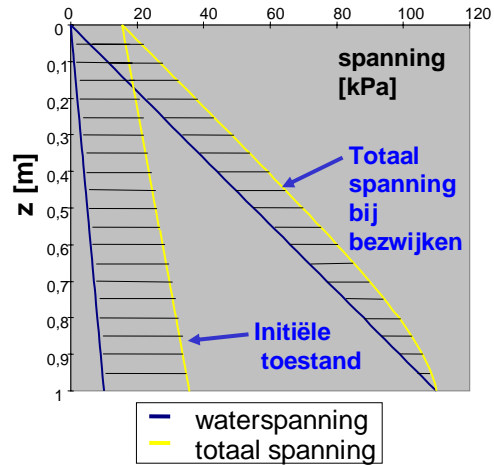
Het stabiliteitsmodel gaat uit van een gat in een jetgroutlaag en berekent de benodigde dikte  $d$  van een deklaag op de groutlaag opdat bij een bepaald verhang over de groutlaag de grond in het gat stabiel is c.q. niet uitspoelt, zie figuur 8. De analyse van de stabiliteit is gebaseerd op het evenwicht van de krachten die op een mootje grond in het gat werken. Dit zijn de omhoog gerichte stromingsdruk (de belasting) en de omlaag gerichte wrijving langs de wand van het gat en het eigen gewicht van het mootje (deze beide vormen de sterkte). Op basis van dit evenwicht kan een differentiaal vergelijking worden opgesteld waarvan de grafische oplossing in figuur 9 is weergegeven. De onbekende parameters werden met behulp van experimenteel onderzoek vastgesteld. Uit de oplossing blijkt dat aan de bovenzijde van het gat altijd een zekere effectieve verticale spanning moet heersen om het evenwicht in het gat te behouden. Zodra de spanning aan de bovenzijde lager wordt, door bijvoorbeeld het voortschrijden van de ontgraving van de laag op de groutboog zal de grond in het gat als een prop omhoog worden gedrukt. In Koster 2000 wordt nader ingegaan op het experimentele onderzoek en de resultaten daarvan. Figuur 10 geeft voor een homogene deklaag de vereiste dikte als functie van de diameter van het gat en het aanwezige verhang. Uit deze figuur blijkt dat zelfs bij zeer grote verhangen orde 10 of hoger een deklaag van enkele meters voldoende is bij een gat diameter tot 0,20 m. In deze benadering is ervan uitgegaan dat het volledige verhang over de groutlaag plaats vindt. Bij een homogene deklaag is dit een redelijke veronderstelling. Bij een gelaagde deklaag kunnen zich in de deklaag echter hogere waterspanningen opbouwen dan de hydrostatische. Dit kan leiden tot een aanmerkelijk grotere benodigde dikte van de deklaag dan volgens figuur 10. Bij de Tramtunnel was een dergelijke gelaagdheid aanwezig en trad bij het atmosferische ontgraven bij een grotere dikte van de deklaag toch reeds welvorming op. Het blijkt van groot belang dat de lagen boven een jetgroutlaag of boog op het diepst mogelijke niveau worden ontwaterd opdat zich geen waterdruk kan opbouwen aan de bovenzijde van deze laag.

Figuur 8. Model bepaalt stabiliteit van grond in gat in de groutlaag

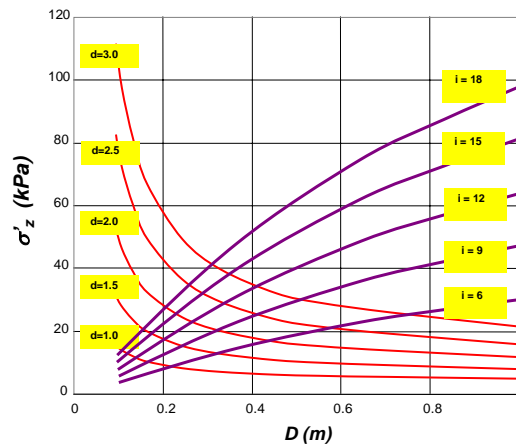




Figuur 9. Grafische oplossing van de DV



Figuur 10. Benodigde dikte van een homogene deklaag volgens stabiliteitsmodel



Het ontgrondingsmodel gaat ervan uit dat de grond uit het gat in de groutlaag of -boog is gespoeld en geeft een benadering voor de snelheid waarmee ontgroning onder de boog plaats vindt. Dit model was gewenst om te kunnen nagaan hoeveel tijd beschikbaar was om nadat een (zandvoerende) wel was geconstateerd (tijdens het atmosferische ontgraven onder vloer -2) de verhoogde luchtdruk effectief te laten zijn. De ontgroning onder de boog mocht in de periode voordat de wel gestopt was niet buiten de bouwputwanden reiken om het risico op verzakkingen naast te bouwput te minimaliseren.

Het waterloopkundig laboratorium heeft in eerste instantie twee uitersten beschouwd:

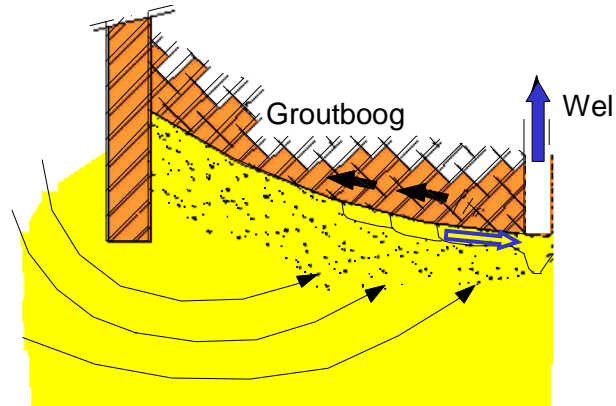
- onder de groutboog bevindt zich een oneindige hoeveelheid water (zwembad)
- onder de groutboog bevindt zich zand met een bepaalde doorlatendheid.

In deze twee uiterste toestanden is het debiet door een gat met een diameter van 0,10 m berekend. Er is gerekend dat het drukverschil gedurende het eerste uur gelijk blijft, in verband met de benodigde reactie tijd na het ontstaan van een wel en dat vervolgens in 3 uur de volledige verhoogde luchtdruk wordt opgebouwd. Het debiet neemt in het eerste geval van 90 m<sup>3</sup>/uur af tot nihil na 4 uur. In het tweede geval wordt het debiet volledig gedomineerd door de doorlatendheid van het zand onder de boog. Door een gat met een diameter van 0,10 m waaronder zich zand met een doorlatendheid van 5 m/dag bevindt stroomt een te verwaarlozen hoeveelheid water. Door het grote verhang start in het zand echter een radiale uitbreidende ontgroning onder de boog. De voortschrijding van deze ontgroning is vergelijkbaar met processen die optreden bij zandwinning en zanddepositie: het zogenaamde bressen. WL heeft een analytische oplossing voor de snelheid waarmee dergelijke bressen zich uitbreiden. Door deze groeiende ontgroning ontstaat onder de boog een veel groter oppervlak dat water levert. Figuur 11 geeft een impressie van de voortschrijdende ontgroning. Het debiet dat in eerste instantie nihil was neemt dan ook door dit proces snel toe. Figuur 12 laat de bovengrens van het debiet zien en de toenemende debieten als gevolg van het bressen bij een gat diameter gelijk aan 0,08 m en 0,10 m. Het blijkt dat in het laatste geval het maximale debiet na 1 uur optreedt en bijna 50 m<sup>3</sup>/uur bedraagt en vervolgens afneemt. De hoeveelheid zand die door een wel kan worden afgevoerd bedraagt ongeveer 30% van de hoeveelheid water. Het blijkt dat uiteindelijk onder de boog afhankelijk van de positie van de wel een bepaald evenwichtsprofiel ontstaat; de berekende evenwichtsprofielen blijken juist binnen de diepwand te blijven.

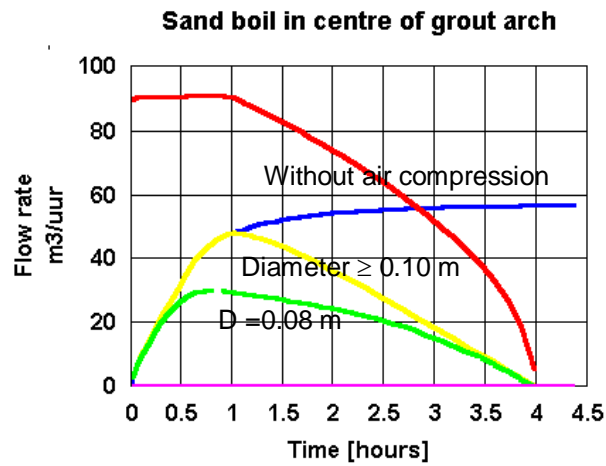
De conclusie van dit onderzoek wijzen uit dat:

- het goed verklaarbaar is dat in geval van welvorming in korte tijd grote hoeveelheden water en zand de bouwput in stromen;
- dit reeds bij kleine diameters van gaten, in de orde van 0,08 m het geval is;
- het proces van bressen de hoeveelheid water en zand bepaalt;
- de doorlatendheid van het zand onder de boog een dominante parameter is; bij doorlatendheden in de orde kleiner dan 1 m/dag nemen de debieten sterk af.

Figuur 11. Voortschrijdende ontgronding



Figuur 12. Bovengrens van het debiet en realistische ontwikkeling van de debieten bij 2 verschillende gat diameters.



### Verstopping bemaling Spui

Een afdoende verklaring voor het verstoppingsfenomeen bij de bemaling boven de gellaag zoals zich dat bij de bouwput voor station Spui voordeed heeft enige tijd op zich laten wachten omdat de verstopping niet bleek te worden veroorzaakt door vaker geconstateerde verschijnselen zoals

het dichtslibben van het filter of het neerslaan van ijzer- of andere oxiden of de groei van biomassa rond de filters van de bemaling. Na het nodige onderzoek werd geconstateerd dat deze fenomenen hier niet waren opgetreden. Uit het onderzoek, dat bestond uit doorlatendheidsproeven, chemische analyses van grond en grondwater volgde uiteindelijk de volgende verklaring. Het grondwater dat door de gellaag omhoog stroomt initieert een proces waarbij het surplus aan natrium hydroxide dat in de gellaag aanwezig is wordt opgelost. Hierdoor neemt niet alleen de doorlatendheid van de gellaag langzaam toe maar neemt de zuurgraad (pH) in de bodem boven de gellaag ook langzaam toe. Door de uitzonderlijke lange periode, ten gevolge van de vertragingen in de bouw, dat de gellaag functioneerde was de pH boven de gellaag zo hoog, in de orde van 12, dat organisch materiaal in het grondwater oploste. Op hogere niveaus, op het niveau van de filters was de pH slechts in geringe mate verhoogd. De hypothese was dat in die zones het opgeloste organisch materiaal weer neersloeg en daarmee het zand rond de filters verstopte. Laboratorium experimenten bevestigden deze hypothese. Een belangrijke vraag, die nog niet afdoende kan worden beantwoord, is wanneer treedt dit effect wel en wanneer niet op. Veel gellagen hebben immers naar behoren gefunctioneerd. Belangrijke factoren zijn de periode waarover een gellaag moet functioneren en de oorspronkelijke doorlatendheid van de te bemalen lagen boven de gellaag. Omdat dit soort softgellagen alleen in de bouwfase worden toegepast is de periode dat de laag in bedrijf moet blijven meestal niet langer dan 2 jaar. Bij meerdere bouwputten in Rotterdam werden gellagen toegepast en werden de bovenliggende zandlagen zonder problemen bemalen. Dit betroffen echter steeds matig tot grove zand formaties met een aanzienlijk grotere doorlatendheid dan bij de Tram tunnel het geval was. Resumerend lijkt het er op dat het toepassen van gellagen voor een periode aanmerkelijk langer dan 2 jaar wordt afgeraden. Zeker in gevallen waarbij de te bemalen lagen boven de gellaag bestaan uit fijne zanden niet is toepassing zonder nader onderzoek naar mogelijk verstopping door het hier beschreven fenomeen niet aan te bevelen.

## Conclusies

1. In injectie lagen bestaande uit overlappende bollen of kolommen zullen met de huidige stand van de techniek altijd gaten aanwezig zijn. Modelberekeningen bevestigen dit en bieden de mogelijkheid het ontwerp zodanig te optimaliseren dat de kans op gaten zo klein mogelijk wordt. Het beter vastleggen van de uitvoeringsparameters en de spreiding daarin kan tot een verbetering van het model leiden.
2. Hooggelegen waterkerende of -remmende injectielagen, dat wil zeggen dicht onder het ontgravingsniveau zijn in niet-cohesieve lagen riskant vanwege het gevaar op zandvoerende wellen. Om dit te voorkomen moet op een injectielaag een grondlaag met voldoende dikte aanwezig blijven. Er is een model ontwikkeld waarmee de vereiste dikte van de deklaag kan worden bepaald, in geval van een homogene deklaag. In geval van stoorlagen in de deklaag moet met een hogere dan hydrostatische waterdruk boven de groutlaag rekening worden gehouden. Bovendien moet de deklaag direct boven de groutlaag worden ontwaterd met behulp van een bemaling.
3. Modelberekeningen bevestigen dat als eenmaal een zandvoerende wel ontstaat ontgroning onder de groutlaag plaatsvindt waardoor het debiet zo sterk toeneemt dat binnen enkele uren tientallen kubieke meters water en zand de bouwput kunnen instromen. Eventuele beheersmaatregelen dienen dus binnen een tijdsduur van enkele uren effectief te zijn.
4. Softgellagen worden als waterremmende laag alleen toegepast voor de, in de tijd beperkte duur van de bouwfase. Het blijkt dat bij toepassingen die aanmerkelijk langer duren dan 2 jaar een proces dat sowieso plaatsvindt, waarbij de gellaag langzaam uitspoelt, verstopping van de bronnen van de bemaling van de lagen boven de gellaag kan optreden. Organisch materiaal juist boven de gellaag blijkt door de verhoogde pH te kunnen oplossen en vervolgens weer neer te slaan in de zone rond de filters van de bemaling. De combinatie van de langdurig doorstromen van de gellaag en fijne zandlagen boven de gellaag lijkt in dit verband risicovol.
5. Meer algemeen bevestigen de ervaringen met de bouw van de Tramtunnel in Den Haag de volgende eisen die aan ondergrondsbouwen moeten worden gesteld:

- ondergronds dient robust te worden gedimensioneerd, dat wil zeggen met in casseringsvermogen;
- bij het ontwerpen dient rekening te worden gehouden met afwijkingen in de bodem en met afwijkingen in de gerealiseerde constructies en funderingswerken;
- dienen te consequenties van het falen van onderdelen van de constructie te worden nagegaan;
- dienen maatregelen te zijn voorbereid die genomen moeten worden in geval van falen van die onderdelen van de constructie waarvan het falen ernstige gevolgen heeft.

## Literatuur

- Koster, S., 2000, Imperfecties in jetgroutlagen, *Geotechniek*, 4e jaargang, nr. 4, Educom b.v, ISSN: 1386-2758,
- Kruijt, J., J. de Jong, M.G.A. van den Elzen and Th.A. Feijen. (2003), Souterrain the Hague: re-design construction method and recent experiences with grout layers. *Proceeding of ITA World Tunneling Congress*, Amsterdam, 12-17 April 2003.
- Mastbergen, D.R., W.G.M. van Kesteren, A.F. van Tol, (2003), Souterrain the Hague: scouring in case of sand boils through a jetgrout layer. *Proceeding of ITA World Tunneling Congress*, Amsterdam, 12-17 April 2003.
- Luger, H.J., E.E. van Hoek, A.F. van Tol, Souterrain the Hague: clogging of groundwater wells above a gellayer during construction of an underground tram station. *Proceeding of ITA World Tunneling Congress*, Amsterdam, 12-17 April 2003.
- Riel, A.J.E. van, A.F. van Tol, J.K. Vrijling, Naar een betrouwbaar ontwerp van waterkerende jetgroutlagen, *Geotechniek*, 4e jaargang, nr. 4, Educom b.v, ISSN: 1386-2758.
- Tol, A.F. van, A.J.E. van Riel, and J.K. Vrijling (2001a). Towards a reliable design for jetgrout layers. *Proc. of the XV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, Balkema, 2000.
- Tol, A.F. van, Koster, S., Ramler, J.P.G., Vrijling, J.K., and Verruijt, A. (2001b): Imperfections in jetgrout layers, *Proc. XV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Togrol et al., ed.). Balkema, Rotterdam, 2001, pp.1883-1886