

VOORKOMEN IS BETER,
Het ontwerp van waterkerende (grout)lagen
Prof. Ir. A.F. van Tol, GeoDelft, TU-Delft

1. Inleiding

1.1 Algemeen

In dit symposium zult u vernemen hoe lekken in waterkerende lagen en wanden in de grond kunnen worden gemanaged, kunnen worden opgespoord en kunnen worden hersteld. Het bekende motto “voorkomen is beter” geldt echter ook vanmiddag: de beste methode om lekkage in waterkerende lagen en wanden te managen is er voor te zorgen dat lekkage niet optreedt of zo beperkt blijft dat het aanvaardbaar is. Dit lijkt misschien een open deur in de praktijk blijkt dit toch tegen te vallen.

Lekkage is niet meer aanvaardbaar en vormt dus een serieus probleem als de waterstanden of stijghoogten in de omgeving ontoelaatbaar verlagen of in geval de wateraandring zodanig is dat de stabiliteit van de constructie, meestal een bouwput in gevaar komt. De lekkage is in dat geval niet meer beheersbaar. Er voor te zorgen dat lekkage niet optreedt dan wel aanvaardbaar en beheersbaar is wordt in belangrijke mate reeds bepaald in de ontwerpfase van de bouwput of de waterkerende constructie. Daarom wordt in dit symposium eerst aandacht besteed aan ontwerpaspecten voordat de aandacht wordt gevestigd op het eigenlijke fenomeen “lekkage”.

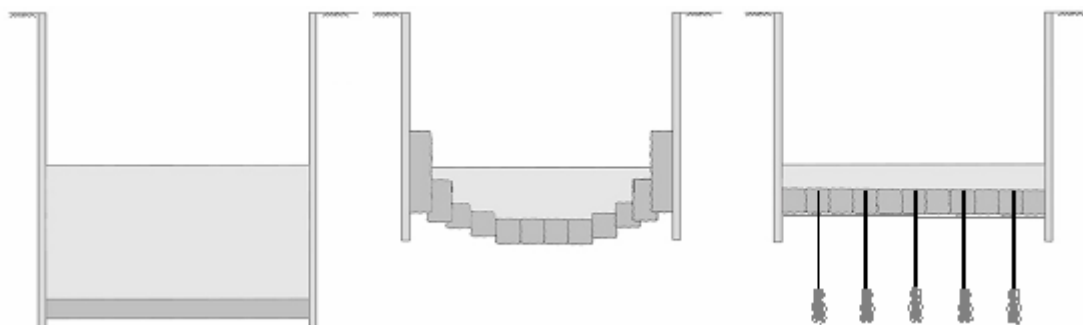
Deze voordracht bestaat uit verschillende onderdelen. In de inleiding wordt ingegaan op de verschillende systemen die worden toegepast om waterkerende (of remmende) injectielagen te vervaardigen en op de hydraulische weerstand van groutlagen. Vervolgens komt “het waterdichte ontwerp” aan de orde. Onder ontwerp wordt hier verstaan het ontwerp van de injectielaag, zowel qua uitvoeringsparameters: raster en kolomdiameter als qua ligging en diepte. Hierna wordt ingegaan op “de aanvaardbare en beheersbare lekkage” dat wil zeggen aan welke eisen moet een ontwerp voldoen opdat in geval van een lekkage de stabiliteit van bouwput niet in gevaar komt en de stijghoogte in de omgeving niet ontoelaatbaar verlaagt. De problematiek van lekkage reikt uiteraard verder dan bouwputten; in mijn voordracht beperk ik mij echter wel tot dit soort lekkage en met name de lekkage van injectie lagen.

1.2 Waterkerende injectie lagen

Sinds een aantal jaren worden jetgroutlagen en of -wanden toegepast als afsluitende of waterremmende laag voor bouwputten. De wanden worden gevormd door een rij aansluitende, gedeeltelijk overlappende kolommen en de lagen worden geformeerd door middel van korte overlappende kolommen. De eerste grootschalige toepassing in Nederland dateert van de bouw van de Willemspoortunnel te Rotterdam, waar met de jetgrouttechniek waterremmende wanden werden gemaakt om de hoeveelheid af te pompen grondwater te minimaliseren dan wel ervoor te zorgen dat de invloed van de bemaling in de omgeving aanvaardbaar was. Voordat de techniek van het jetgrouten zijn intrede deed werden dergelijke lagen en wanden door middel van chemische injectie uitgevoerd. Hierbij wordt het water uit de poriën van het korrelskelet verdrongen door een opstijvende gel. Bij toepassing van deze silica-gels als waterremming in horizontale lagen wordt meestal softgel toegepast. Dit injectiemiddel verhardt niet maar verkrijgt de consistentie van dikke yoghurt en bezit dus geen sterkte. Bij toepassing als bodemafluiting voor een bouwput wordt een dergelijke laag

diep aangelegd en wordt het verticaal evenwicht verzekerd doordat op de laag voldoende gewicht c.q. grond aanwezig is, zie figuur 1a. Eventueel lekwater dat door de injectielaag stroomt wordt in de laag boven de gellaag door middel van een bemalingsstelsel gecontroleerd opgevangen.

Het voordeel van jetgroutlagen, waarbij het korrelskelet met een eroderende vloeistofstraal wordt versneden en deze versneden grond wordt vermengd met grout, is dat deze lagen een aanzienlijke sterkte bezitten. Daardoor bestaat de mogelijkheid om aan deze lagen een constructieve functie toe te kennen, bijvoorbeeld als boog onder een bouwput, die de krachten, voortkomend uit waterdrukken naar de bouwputwanden kan afleiden, zoals toegepast bij de tramtunnel in Den Haag, zie figuur 1b. Een andere toepassing is een jetgroutlaag waarvan de verticale stabiliteit wordt verzekerd door trekelementen, zoals toegepast in Berlijn, zie figuur 1c.



a. diepliggende injectielaag

b. groutboog

c. verankerde groutlaag

Figuur1. Verschillende injectie systemen

Bij meerdere projecten, waar dergelijke lagen werden toegepast, hebben zich grote problemen voorgedaan ten gevolge van grote hoeveelheden grondwater die de bouwput instroomde en zand van onder de jetgroutlaag meevoerde. Dit geschiedde ondanks dat uitgevoerde pompproeven, althans bij het Souterrain in Den Haag aangaven dat de hydraulische weerstand van deze lagen gemiddeld wel (nagenoeg) voldoende was in tegenstelling tot de eerdere toepassingen bij de Willemspoortunnel waar de eisen met betrekking tot weerstand niet werden gehaald (van Tol, 1991). Zie tabel 1.

Tabel 1 geeft een overzicht van de gemiddelde hydraulische weerstand van jetgrout lagen cq wanden van het Souterrain Den Haag en de Willemspoortunnel te Rotterdam, bepaald met behulp van pompproeven.

Werk	Type injectie lichaam	Hydraulische weerstand (dagen)	
		Besteks-eis	Gerealiseerd
Willemspoortunnel - Blaak, kruising metro - Binnenrotte *Proefput *Schermwand	Verticale wand bestaande uit 1 rij kolommen	5	1
	Verticale wand, bestaande uit kolommen afgewisseld door panelen	10 a 20	5
	Verticale wand, bestaande uit kolommen afgewisseld met dubbele panelen.	10 a 20	1
Souterrain Den Haag	Horizontale boog, korte kolommen	300	150 a 300

De gemiddelde doorlatendheid van de lagen in Den Haag was voldoende verlaagd maar desondanks was het niet mogelijk het doorstromend grondwater gecontroleerd op te vangen. Dit was de aanleiding voor verschillende partijen waaronder de Technische Universiteit Delft, en GeoDelft om een onderzoek te starten naar de ontwerpcriteria en de betrouwbaarheid van jetgroutlagen bij toepassing als grondwaterremmend scherm. De aannemerscombinatie Tramkom van de Tramtunnel in Den Haag heeft tevens aan dit meegewerkt. Ook in het buitenland werd onderzoek verricht naar dit fenomeen.

Het onderzoek was gericht op twee items:

1. het ontwikkelen van een model voor de bepaling van de kans op imperfecties c.q. gaten in jetgroutlagen;
2. het vaststellen van de gevolgen van imperfecties in waterremmende lagen door het analyseren van de stroming en de spanningssituatie in een gat, alsmede de invloed van een afdekkende laag daarop.

In aanvulling op dit onderzoek werden door het Waterloopkundig Laboratorium de gevolgen van zandvoerende wellen onderzocht. Uit de modelbenadering blijkt, zoals ook in de praktijk dat dit soort wellen snel tot aanzienlijke ontgrondingen leiden en eigenlijk te allen tijde dienen te worden vermeden. Op dit onderzoek wordt hier niet ingegaan, voor de resultaten wordt verwezen naar (Mastbergen et al, 2003).

2. Een waterdicht ontwerp?

Zoals in de inleiding werd gesteld: “voorkomen is beter”. Is een waterdichte groutlaag echter mogelijk? De waarden in Tabel 1 tonen aan dat volgens de huidige State of the Art groutlagen niet waterdicht zijn. Gelet op de wijze van uitvoering van injectiewerken en op basis van statistische overwegingen is het duidelijk dat een “waterdichte” injectie laag nog niet ontworpen en uitgevoerd kan worden. Wellicht dat in de toekomst met het voortschrijden van de monitoringstechnieken dit wel mogelijk wordt. Men kan hooguit zodanig ontwerpen dat de kans op lekkage voldoende klein is. Daar gaat het om!

Op de TU-Delft is een ontwerpmethode ontwikkeld, die gebaseerd is op een statistische analyse van de kans op onvolkomenheden c.q. gaten in een injectielaag. Met deze methode kan de faalkans, (is kans op openingen) van een bestaand ontwerp (qua laagdiepte, kolomdiameter en grid-afstand) worden vastgesteld. Of kan het ontwerp zodanig worden geoptimaliseerd dat de kans op lekkage voldoende klein is.

De methode analyseert, op basis van gemiddelde en standaardafwijking van de locatie, de helling en de diameter van een jetgroutkolom, de kans dat kolommen elkaar niet overlappen, de kans op schaduwwerking en de kans dat in een verharde kolom wordt geboord. Tevens kan een optimalisatie worden uitgevoerd qua diameter en hart op hart afstand.

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 model berekent met behulp van een Monte Carlo simulatie de kans dat de kolommen elkaar niet overlappen; de kans op schaduwwerking en de kans dat in een eerder gemaakte kolom wordt geboord. De verschillende Z-functies, bijvoorbeeld de kans op niet overlappen van kolommen zijn analytisch opgelost. Tabel 2 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 m²; 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 het totale oppervlakte van gaten 0,045 m² bedraagt.

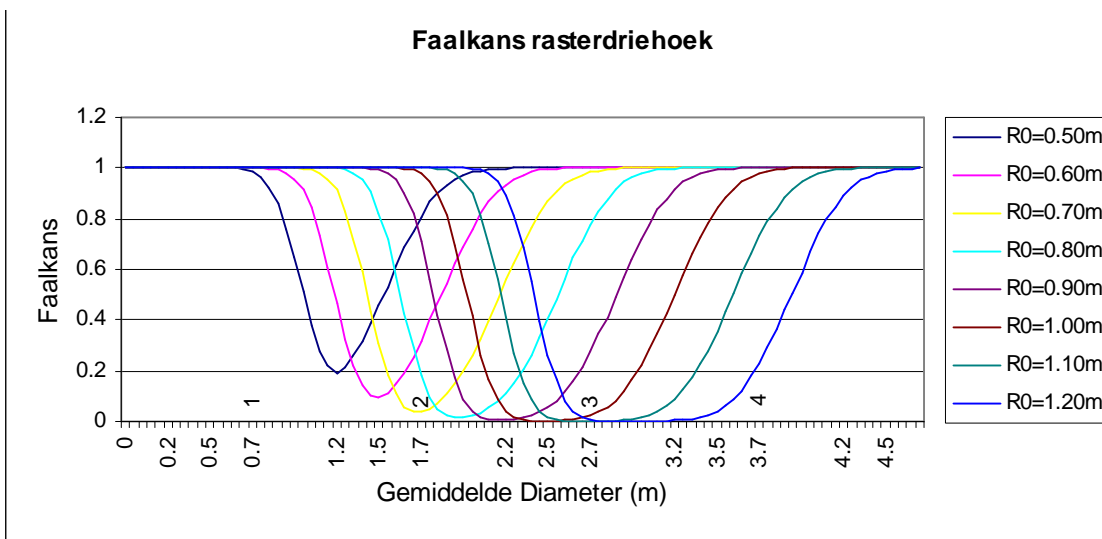
Tabel 2. Berekende kans op gaten in jetgroulaag

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

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. Het model is uitvoeriger beschreven in (Van Riel et al 2000; van Tol et al 2001a).

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. Figuur 2 geeft de faalkans van een jetgroutlaag op een diepte van 25 m onder het injectieniveau, bij een gegeven rasterafstand R₀, een gemiddelde kolomdiameter en een realistische spreiding in de uitvoeringsparameters.

Recent heeft GeoDelft een opdracht gekregen om een vergelijkbaar model te ontwikkelen waarmee voor een willekeurig gegroot lichaam kan worden bepaald hoe groot de kans is op imperfecties, bijvoorbeeld in de vorm van niet gegroute volumina. Het verschil met het hierboven beschreven model ligt vooral in de wijze van het oplossen van de Z-functie. In dit laatste model zal dit discreet worden uitgevoerd. Dat wil zeggen de bodem wordt in kleine vakjes of elementjes ingedeeld en het model berekent met een Monte Carlo simulatie de kans dat bepaalde vakjes of elementjes wel of niet gegroot zijn. Bovendien kunnen aan de elementjes eigenschappen worden meegegeven, waardoor dit model zich uiteindelijk leent voor andersoortige bewerkingen, zoals bijvoorbeeld sterkteberekeningen door middel van een koppeling met een constructief model. Ook kan koppeling met een waterstromingsmodel worden overwogen.



Figuur 2. Faalkans van een jetgroutraster op -25m.

3. De aanvaardbare en beheersbare lekkage

Nu is gebleken dat het niet (absoluut) mogelijk is lekkage door een waterkerende of remmende laag of wand te vermijden wordt de vraag van de aanvaardbaarheid en de beheersbaarheid van lekkage belangrijk. Welke lekkage is aanvaardbaar?

Dit wordt enerzijds bepaald door de onttrekking in de omgeving en anderzijds door eventuele erosie en ontgronding die het gevolg is van de lekkage. De gestelde vraag dient zowel in de ontwerp- als in de uitvoeringsfase beantwoord te worden.

3.1 Waterbezwaar

Lekkage veroorzaakt een grondwaterstand of stijghoogte verlaging in de omgeving. Als deze aanvaardbaar is en het waterbezwaar in de bouwput kan worden afgepompt dan lijkt zo'n lekkage aanvaardbaar. Meerdere malen werd bij de bouw van tunnels in Rotterdam op deze wijze lekkage "opgelost"; men aanvaardde het grotere waterbezwaar (Metro Coolhaven, Station Blaak Willemspoortunnel, HSL-tunnel Rotterdam). Vaak is dit de voordeligste oplossing; zelfs in het geval van de HSL-tunnel waar de stijghoogte verlaging diende te worden gecompenseerd door een aan te leggen retourbemaling.

Het waterbezwaar door een gat in een groutlaag kan eenvoudig worden benaderd door ervan uit te gaan dat het gat is gevuld met het originele bodem materiaal. Uit de pompproeven, die uitgevoerd werden bij de Tramtunnel in Den Haag is dit juist gebleken. Het totale gatoppervlak zoals dat in tabel 2 werd berekend voor een vak van de Tramtunnel in Den Haag levert uitgaande van de doorlatendheid van het oorspronkelijke bodem materiaal een pompdebiet tussen de 0,8 en 1,8 m³ /uur. Dit ligt in dezelfde orde van grootte als het debiet bij de pompproef die werd uitgevoerd ter controle van de waterremmende werking van een vak van de jetgroutboog. De uitdrukkelijke aanname hierbij is dus dat het gat gevuld is met oorspronkelijk bodemmateriaal. Dit is juist zolang geen erosie heeft kunnen optreden. Het blijkt dat zodra zandtransport plaats vindt en het gat leeg spoelt de debieten sterk stijgen. Dit moet dus worden voorkomen.

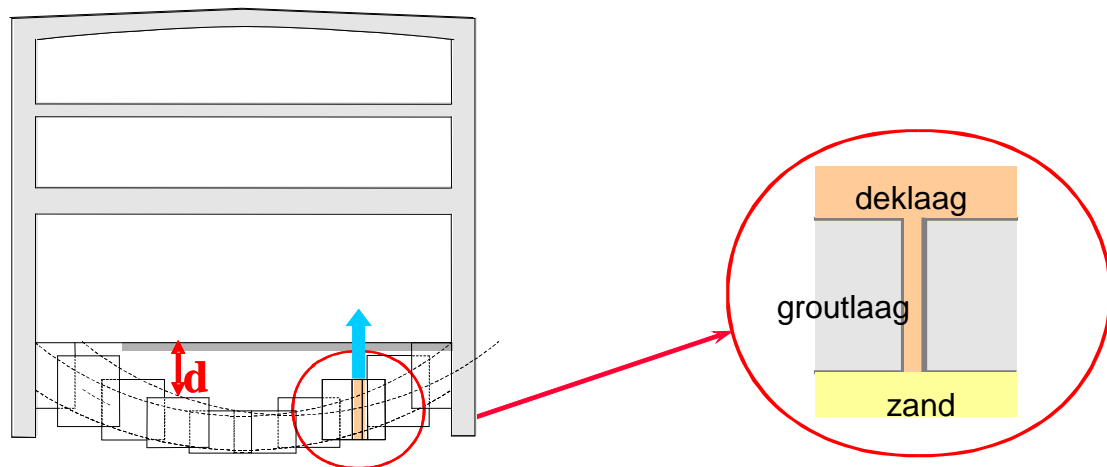
In de ontwerp fase kan men voor de bepaling van het waterbezwaar uitgaan van het totale gat oppervlak zoals dat door het faalkans model bij het gekozen ontwerp is voorspeld. Dit totale gat oppervlak levert bij het benodigde stijghoogteverschil en de ontwerp doorlatendheid van de bodem de verlaging van de stijghoogte in de omgeving. Beoordeeld dient te worden of deze verlaging toelaatbaar is.

Naderhand, nadat de injectielaag is vervaardigd en de gangbare pompproef ter controle van de vereiste gemiddelde hydraulische weerstand heeft plaats gevonden dient deze toets te worden herhaald. Met dien verstande dat nu het werkelijke lekdebiet bekend is.

3.2 Voorkomen zandvoerende wellen

Zandvoerende wellen bij horizontale waterkerende lagen kunnen worden voorkomen door op de groutlagen een laag zand van voldoende dikte te houden. Dat wil zeggen de diepte van de ontgraving ten opzichte van de bovenkant van de groutlaag moet beperkt worden of de grout laag moet dieper worden aangelegd.

Door GeoDelft is een model ontwikkeld dat uitgaat van een gat met een bepaalde diameter in een groutlaag en vervolgens de benodigde dikte d van de deklaag op de groutlaag berekent opdat bij een bepaald verhang over de groutlaag de grond in het gat stabiel is c.q. niet uitspoelt, zie figuur 3.

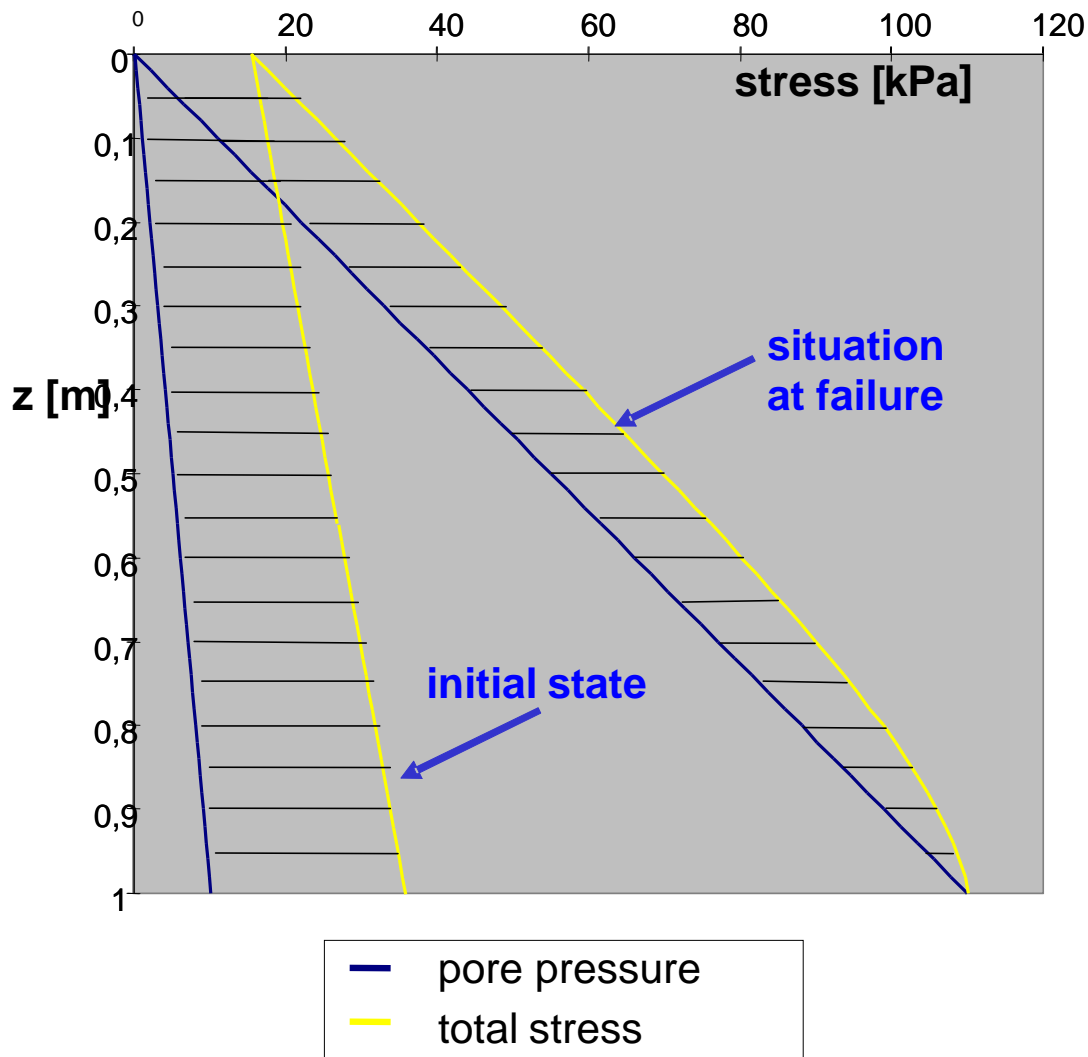


Figuur 3. Dikte d van de deklaag bepalend voor ontstaan van zandvoerende wellen

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 effectieve spanning aan de bovenzijde, de omlaag gerichte wrijving langs de wand van het gat en het eigen gewicht van het mootje (deze drie vormen de sterkte). Op basis van dit evenwicht kan een differentiaal vergelijking worden opgesteld waarvan de grafische oplossing in figuur 4 is weergegeven.

De onbekende parameters werden aan de TU-Delft 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 dan een bepaalde waarde, 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. In deze benadering is ervan uitgegaan dat het volledige verhang over de groutlaag plaats vindt. Bij een homogene deklaag en een gat met een kleine diameter is dit een redelijke veronderstelling. Bij een gelaagde deklaag kan zich in de deklaag echter onder stoorlagen een hoge waterspanning opbouwen. Dit kan leiden tot een aanmerkelijk grotere benodigde dikte van de deklaag. Het blijkt van groot belang dat de lagen

boven een groutlaag of -boog op het diepst mogelijke niveau worden ontwaterd opdat zich geen waterdruk kan opbouwen aan de bovenzijde van deze laag.



Figuur 4. Grafische oplossing spanningsverloop in gat

In de ontwerpfase moet ter beoordeling van de stabiliteit van de bouwput bodem uitgegaan worden van een gat met een fictieve diameter, bijvoorbeeld bepaald met het hierboven beschreven faalkans model. In de fase dat de groutlaag is vervaardigd en gecontroleerd met behulp van een pompproef is het totale debiet door de groutlaag bekend. Een veilige aanname is dan dat dit volledige debiet door één gat stroomt. Met behulp van de doorlatendheid van het oorspronkelijke bodemmateriaal kan de diameter daarvan worden bepaald. Vervolgens kan getoetst worden of door het verhang tijdens de ontgraving van de bouwput de stabiliteit van de grondvulling in het gat in gevaar komt.

4. Het optimale ontwerp

Een betrouwbaar ontwerp van een waterkerende groutlaag is gebaseerd op een analyse van de kans op gaten in de laag en de gevolgen van die gaten. De gepresenteerde faalkans- en stabiliteitsmodellen kunnen hiervoor worden gebruikt. Het optimale ontwerpproces ziet er nu als volgt uit:

1. Ontwerp een injectielaag op een bepaalde diepte met een ontwerpraster en ontwerpdiameter;
2. Bepaal met het faalkansmodel de kans op een gat in de injectielaag;
3. Optimaliseer eventueel het ontwerp met het model: dat wil zeggen verklein faalkans;
4. Genereer een kansverdeling van grootte van gaten;
5. Kies faalkans en het daarbij behorende totale gat oppervlak en de maximale grootte van het gat bij deze faalkans;
6. Bepaal bij dit gat oppervlak het waterbezwaar en de verlaging in de omgeving
7. Indien stap 6 een te grote verlaging in de omgeving geeft herzie dan het ontwerp van de jetgroutlaag: bijvoorbeeld een andere raster of kolomdiameter en herhaal stap 6;
8. Bepaal bij het gat met de grootste diameter en het vereiste verhang de benodigde dekking met het stabiliteitsmodel;
9. Indien stap 8 niet het gewenste resultaat levert herzie dan de dikte van de deklaag c.q. diepte van de groutlaag
10. Ontwerp een bemaling juist boven de groutlaag aan.

Naast deze ontwerpmethodologie is in deze voordracht tevens aangegeven hoe nadat de groutlaag aangebracht en gecontroleerd is, kan worden beoordeeld of de, altijd aanwezige lekkage tot maatregelen noopt of aanvaardbaar is.

5. Literatuur

- Koster, S., (2000), Imperfecties in jetgroutlagen, *Geotechniek*, 4e jaargang, nr. 4, Educom b.v, ISSN: 1386-2758,
- 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.
- Riel, A.J.E. van, A.F. van Tol, J.K. Vrijling, (2000), Naar een betrouwbaar ontwerp van waterkerende jetgroutlagen, *Geotechniek*, 4e jaargang, nr. 4, Educom b.v, ISSN: 1386-2758.
- Tol, A.F. van (1991), Geotechnical aspects of the construction of the Willems-railwaytunnel (5). Jet-grouting. *Civiele Techniek*, 3, blz. 16-21. (in Dutch)
- 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
- Tol, A.F. van, De lessen van de Haagse Tramtunnel, (2004) *Geotechniek*, jaargang 8, nr 1, pg 42-50, Educom bv., ISSN: 1386-2758,