

Thermisch ontwerp bij grondvriezen in Nederland

ir. Jacco K. Haasnoot
CRUX Engineering



ing. Dirk G. Goeman
CRUX Engineering



Inleiding

In de afgelopen jaren zijn en worden grootschalige grondvrieslichamen toegepast bij binnenstedelijke projecten in Nederland. Daarvoor is grondvriezen slechts incidenteel in Nederland toegepast, waarbij de techniek het imago van een duur 'laatste redmiddel' heeft. Recent is grondvriezen echter toegepast bij een van drukste metrostations in Rotterdam en is daarbij vanaf het ontwerpstadium tot en met uitvoering als een volwaardige techniek ingezet. Bij de bouw van de diepe stations Rokin en Vijzelgracht van de Noord/Zuidlijn in Amsterdam vervult het wel de rol van redmiddel en wordt met succes de waterdichtheid van diepwandvoegen geborgd. Grondvriezen wordt toegepast om de sterkte van de grond te verhogen en de doorlatendheid te

verlagen. De techniek wordt als duur beschouwd maar ook betrouwbaar, voornamelijk als waterdichtheid belangrijk is. De behoefte aan betrouwbare technieken is hoog bij bouwen in drukke en complexe binnenstedelijke projecten waar (locale) bezwijkmechanismen groot effect hebben op de omgeving van het project.

Na een introductie over grondvriezen en de toepassing van deze techniek in Nederland ligt de nadruk van dit artikel op het thermisch ontwerp van grondvriezen. CRUX Engineering heeft in het Rotterdamse en Amsterdamse project het thermisch ontwerp uitgevoerd en de thermische monitoring bewaakt. In beide projecten blijkt het belang van een gevoeligheidsanalyse en voldoende monitoring. Daarmee is het thermisch deel van grondvriezen vergelijkbaar met een 'normaal' geotechnisch project. Met als belangrijke toevoeging dat bij gewone geotechnische projecten de gevoeligheidsanalyse en monitoring meer aandacht verdient dan nu gebruikelijk is.

standhoudfase en de dooifase. In de opvriesfase wordt het vrieslichaam tot de gespecificeerde afmetingen en temperatuur gemaakt. In deze fase wordt de meeste energie verbruikt. In de instandhoudfase vinden de constructiewerkzaamheden plaats. In deze fase dient het vrieslichaam de gespecificeerde afmetingen en temperatuur te behouden, waarvoor minder energie benodigd is. De dooifase start als het vriesproces stopt.

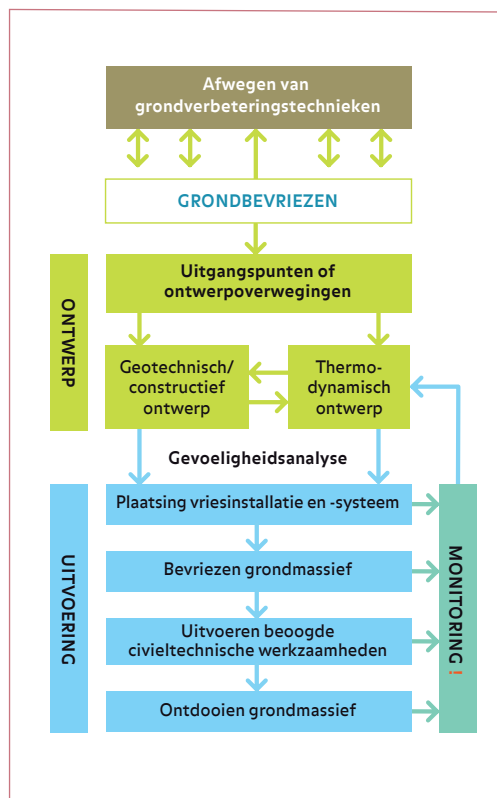
GESLOTEN EN OPEN SYSTEEM

De grond wordt bevroren door warmte uit de ondergrond te onttrekken door middel van een systeem van lanssen in de grond waar een koud medium doorgevoerd wordt. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen twee systemen om de grond te bevriezen, een gesloten en open systeem. In het gesloten systeem wordt een koude vloeistof, in het algemeen pekkel, door de lanssen gecirculeerd waarbij de retourvloeistof door een vriesinstallatie afgekoeld wordt. De werkteemperatuur bij pekkelvriezen ligt rond de -35°C . Het open systeem werkt met een koude vloeistof die verdampt in de lans. De latente warmte benodigd voor de faseovergang wordt hierdoor onttrokken aan de grond. Het vrijkomende gas wordt afgefakkeld. Over het algemeen wordt vloeibare stikstof bij dit systeem gebruikt. Het kookpunt van vloeibare stikstof ligt op -196°C .

Vriezen met het open systeem is, wegens de lage temperatuur en het daaraan gerelateerde grote temperatuursgradiënt, relatief sneller. Het systeem is echter relatief duur, waardoor het vaak wordt toegepast in projecten met een korte instandhoudingsperiode of als het vrieslichaam snel in functie moet zijn. Vriezen met het gesloten systeem neemt, wegens de relatief hoge temperatuur, meer tijd in beslag. De kosten voor dit systeem zijn relatief lager en dit systeem wordt dan ook toegepast als het vrieslichaam relatief lang in stand moet worden gehouden.

THERMISCH EN MECHANISCH ONTWERP

Het ontwerp van een grondvriesproject bestaat uit twee verschillende delen; het thermisch ontwerp en het mechanisch ontwerp. Het ontwerpproces is



Figuur 1 – Ontwerpproces grondvriezen (naar Harris 1995).

Grondvriezen

TECHNIEK

Bij grondvriezen wordt eigenlijk het grondwater bevroren. Het water in de grond wordt bevroren, waardoor de grond sterker en ondoorlatend wordt. De belangrijkste conditie voor toepassing van deze techniek is derhalve dat de grond water bevat. De toepassing van grondvriezen is onafhankelijk van korrelverdeling en grondsoort, waar bij veel grondverbeteringstechnieken deze afhankelijkheid wel aanwezig is. Daarnaast is grondvriezen in het algemeen niet beperkt door obstakels of objecten in de ondergrond (Harris 1995).

Bij grondvriezen bindt het ijs de grondbestanddelen, waardoor de sterkte en stijfheid toenemen. Ijs is waterondoorlatend waardoor een continu ijslichaam volledig waterdicht is, dit in tegenstelling tot veel grondverbeteringstechnieken waar de behandelde grond slechts waterremmend wordt. Tijdens een grondvriesproject kunnen drie fasen onderscheiden worden; de opvriesfase, de in-

Samenvatting

In de afgelopen jaren zijn en worden grootschalige grondvrieslichamen toegepast bij binnenstedelijke projecten in Nederland. Daarvoor is grondvriezen slechts incidenteel in Nederland toegepast, waarbij de techniek het imago van een duur 'laatste redmiddel' heeft. Alleen bij het maken van verbindingen tussen boortunnels is grondvriezen een 'standaard' techniek. Het artikel geeft een beknopt overzicht van de recente toepassingen van grondvriezen in Nederland. Het thermisch ontwerp en uitvoering van twee recente metroprojecten in Rotterdam en Amsterdam wordt nader besproken. Hieruit blijkt dat de combinatie van

gevoeligheidsanalyses met (thermische) modellen en monitoring cruciaal is voor een succesvol project. Tevens wordt een constructieve samenwerking tussen de betrokken partijen van groot belang geacht voor de voortgang van het project. Op basis van de ervaringen in deze projecten wordt geconcludeerd dat de twee besproken projecten goede voorbeelden zijn van de inzet van grondvriezen als betrouwbare grondverbeteringstechniek in binnenstedelijke projecten en dat de toepassing van deze techniek, gezien de steeds complexer wordende toekomstige bouwopgaven, in Nederland navolging zal krijgen.

schematisch weergegeven in *figuur 1*. Het mechanische ontwerp is gebaseerd op de sterkte en stijfheidsparameters uit laboratorium proeven. De sterkte en stijfheid van bevroren grond zijn temperatuur afhankelijk. Dit houdt in dat het mechanische ontwerp de afmetingen van het vrieslichaam in combinatie met een toelaatbare maximumtemperatuur bepaalt. Het doel van het thermisch ontwerp is om een lansconfiguratie te bepalen waarbij de thermische randvoorwaarden over de verschillende constructiefasen tijdens het project kunnen worden gewaarborgd.

Binnen het ontwerpproces moeten twee onderdelen worden benadrukt, te weten de gevoeligheidsanalyse en monitoring. Een gevoeligheidsanalyse is van belang om tot een robuust ontwerp en uitvoering te komen. In een gevoeligheidsanalyse wordt de invloed verschillende thermische invloedsfactoren (grondwaterstroming, luchtstroming) gevarieerd om de noodzaak van aanvullende maatregelen te kunnen beschouwen. Tevens kan hiermee de reactietijd worden bepaald indien de vriesinstallatie tijdelijk uitvalt als gevolg van een storing of externe invloedsbronnen.

Monitoren is een integraal onderdeel van het thermisch ontwerp. Het monitoringsplan moet voldoende temperatuurmetingen bevatten waarmee de staat van het vrieslichaam kan worden geverifieerd. Middels de combinatie van monitoringdata en thermische ontwerpberoeeningen kan gecontroleerd worden of het vrieslichaam aan de temperatuurcriteria volgend uit het mechanische ontwerp voldoet.

Vriesprojecten in Nederland

Een van de eerste grootschalige toepassingen van grondvriezen in de Civiele Techniek in Nederland vond plaats in de jaren '70 toen grondvriezen werd toegepast om verbindingen met caissons te maken voor de Amsterdamse metro (Oostlijn). Een aantal projecten is bekend waarbij deze techniek is toegepast binnen bestaande constructies waar de keldervloer, waar grondwaterdruk op werkte, tijdelijk verwijderd moest worden (Rotterdam en Haren). In Den Haag is grondvriezen toegepast om

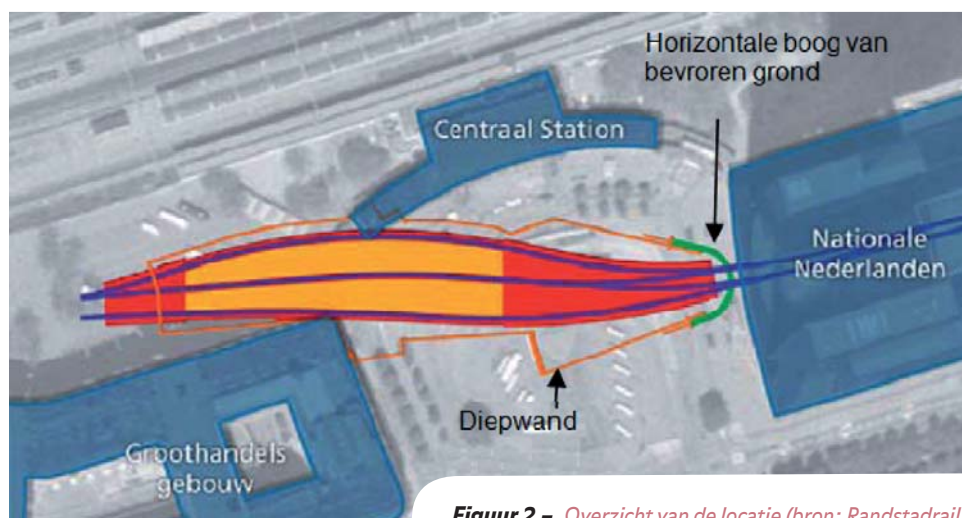
een verbinding te realiseren tussen een ondergrondse parkeergarage en een overheidsgebouw. Verbindingen tussen geboorde tunnels die de afgelopen 15 jaar zijn gebouwd, zijn alle gemaakt met gebruikmaking van grondvriezen. Grondvriezen kan hier als een standaard techniek worden beschouwd, juist vanwege de betrouwbaarheid op het gebied van waterdichtheid. Twee verbindingen in de Westerscheldetunnel zijn uitgebreid gemonitord en geanalyseerd door het Centrum Ondergronds Bouwen (COB F100). Bij een geboorde leidingtunnel onder de Oude Maas in Rotterdam is deze techniek gebruikt als tijdelijke maatregel om constructie problemen bij de start schacht te ondervangen.

Een toepassing van grondvriezen die zeker niet standaard genoemd kan worden is bij de reconstructie van het metro station Rotterdam Centraal uitgevoerd (Thumann et.al. 2007). Ook bij de bouw van de metro in Amsterdam wordt grondvriezen toegepast. Bij de startschacht van de Noord/Zuidlijn bij Amsterdam Centraal kruist de boortunnel mogelijk een houten paalfundering. Het risico bestaat dat paalpunten niet afgeboord worden maar verplaatst worden en mogelijk vast komen te zitten in de tunnel boormachine (TBM). Om de palen te fixeren is een horizontaal vrieslichaam gecreëerd net boven het tracé van de

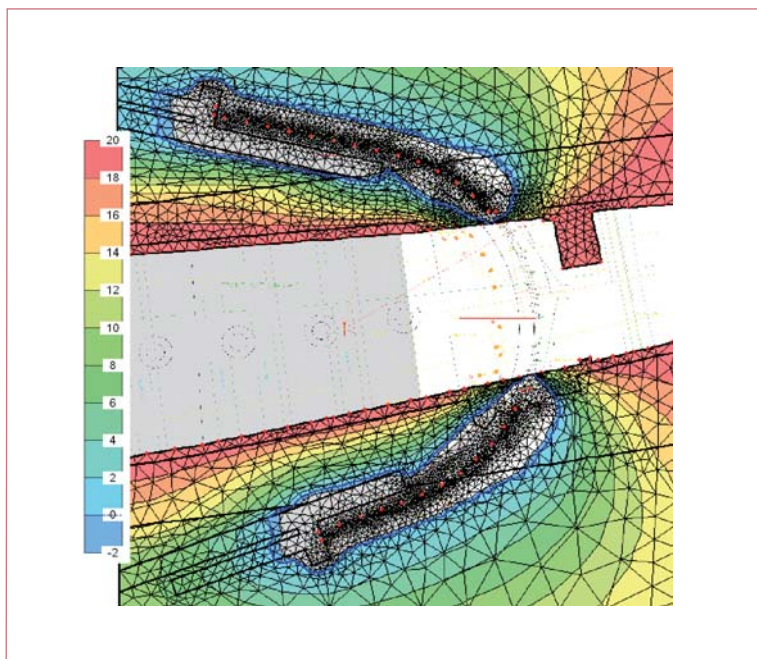
TBM. Bij de stations Vijzelgracht en Rokin wordt grondvriezen ingezet als mitigerende maatregel om de waterdichtheid van de voegen tijdelijk te waarborgen zodat een definitieve waterafdichting van de voeg kan worden gerealiseerd. In twee gevallen in 2008 is zandvoerend water door de diepwandvoegen van station Vijzelgracht gestroomd. Dit heeft geleid tot ernstige schade aan belendingen. Het proces tot herstart van de ontgraving bij beide stations is beschreven in Scheffrahn en Sommeling (2010). In de onderstaande paragrafen worden voor de Rotterdamse en Amsterdamse bouwkuip enkele aspecten nader uitgelicht.

Metrostation Rotterdam CS

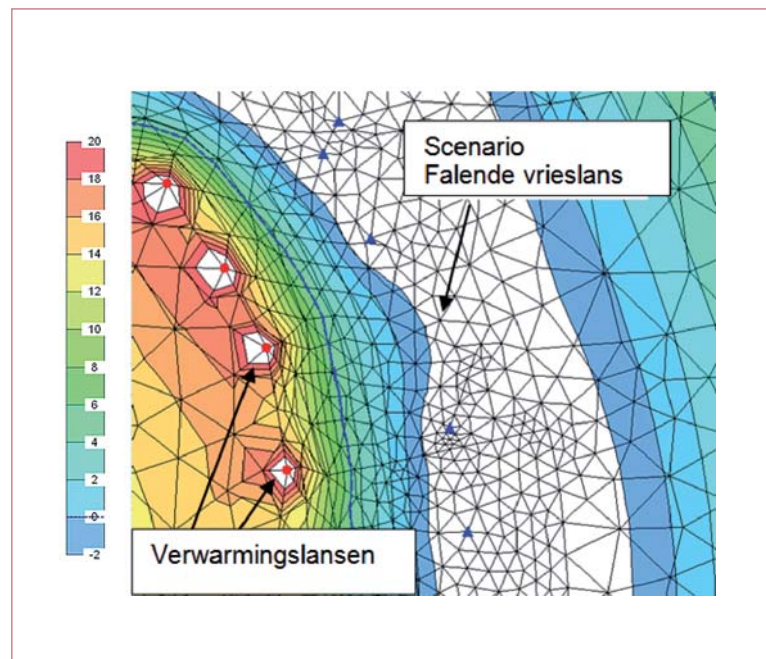
Het bestaande metro station in Rotterdam is uitgebreid van een 2 sporig eindstation tot een 3 sporig doorgaand station, waarbij de metro tijdens de verbouwing moest blijven functioneren. Het station is gebouwd middels diepwanden, behalve waar de wand de bestaande metrotunnel kruist. Hier is een kraagconstructie door middel van grondvriezen toegepast. Deze grote horizontale boog leidt de belastingen naar de diepwand waarbij de horizontale krachten op diepwand baretten worden afgedragen. De dikte van de vrieswand is 2,5m, de teen van de vrieswand bevindt zich op 38m onder maaiveldniveau en de



Figuur 2 - Overzicht van de locatie (bron: RandstadRail).



Figuur 3 – Voorbeeld van het berekende temperatuurveld (diepte ca. NAP -5m).



Figuur 4 – Detail van isothermen gedurende opwarming en falen van een vrieslans.

omtrek van de boog is ongeveer 55m. Het theoretisch volume bevroren grond ligt rond de 5200m³.

In het project is zowel het gesloten als open vriesstelsel gebruikt. Beide systemen waren in gebruik tijdens de opvriesfase. Tijdens de instandhoudingsfase werd alleen met pekkel gevoren. Het stikstofstelsel bleef in geval van nood stand-by. In totaal zijn 86 vrieslansen gebruikt, waarvan 51 pekellansen en 35 vloeibare stikstoflansen.

De ondergrond in Rotterdam bestaat uit slappe Holocene afzettingen op de Pleistocene zandlaag. De top van het holoceen bestaat uit 2 tot 4m veen waaronder circa 7m slappe klei aangetroffen wordt. De Pleistocene zandlaag heeft een dikte van circa 17m en ligt bovenop de ondoorlatende klei van Kedichem. In alle beschreven grondlagen wordt gevoren.

THERMISCH ONTWERP

De hoofddoelen van de thermische ontwerpberekeningen zijn:

- Bepaling van de locatie van de vrieslansen;
- Bepaling van de benodigde energiebehoefte van de vriesinstallatie;
- Bepaling van de benodigde opvriestijd.

De randvoorwaarden voor het thermische ontwerp, om de sterkte en stijfheid uit het mechanische ontwerp te waarborgen zijn:

- Gemiddelde temperatuur van de vrieswand moet lager zijn dan -10°C;
- Dikte van de vrieswand moet minimaal 2,5m bedragen binnen de -2°C isotherm.

Daarnaast dient rekening te worden gehouden met een grondwaterstroming van 4m/d in de Pleistocene zandlaag in verband met de bemaling voor de bouw van een tunnel ten zuiden van de vrieswand.

De ontwerpberekeningen zijn uitgevoerd met het eindige elementen programma Temp/W. Zes horizontale secties op verschillende niveaus zijn doorgerekend. In al deze secties is de volledige constructie fase gemodelleerd. Een voorbeeld van het berekende temperatuurveld is gegeven in *figuur 3*.

De horizontale positie van de vrieslansen over de hoogte is na installatie ingemeten. Als gevolg van obstakels in de ondergrond weken een groot aantal vrieslansen significant af van de ontwerppositie en toleranties. Dit vergroot de noodzaak voor het uitvoeren van thermische berekeningen voor de as-built situatie en heeft tot aanpassingen in de lansconfiguratie geleid.

GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de gevoeligheidsanalyse zijn drie belangrijke aspecten in het ontwerp verder onderzocht:

- Invloed grondwaterstroming;
- Invloed van de stikstoflansen op de pekellansen;
- Invloed van het uitvallen van individuele vrieslansen.

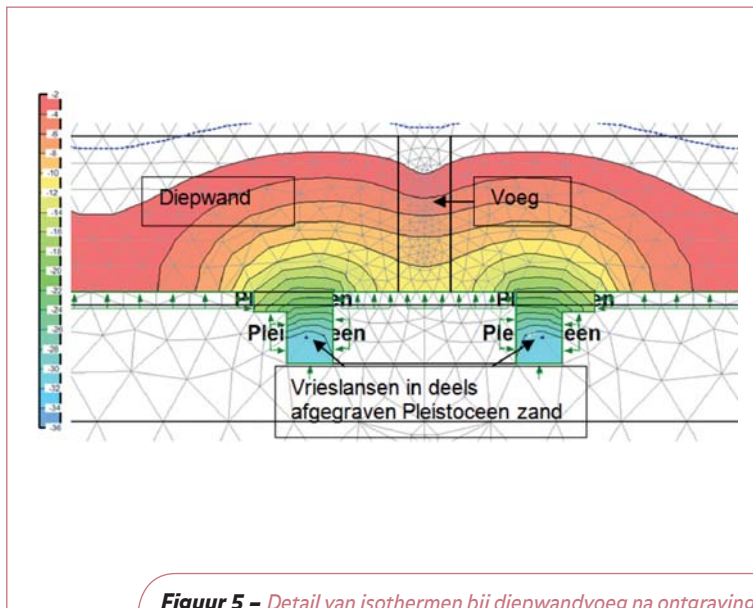
De invloed van grondwaterstroming op het vriesproces kan worden bepaald aan de hand van gecombineerde thermische en grondwaterstromingsberekeningen. Hiervoor worden de EEM

pakketten TEMP/W en SEEP/W gebruikt (beide onderdeel van de Geostudio software van GEOSLOPE). Uit de berekeningen volgt dat de vrieslansconfiguratie in combinatie met een grondwaterstroming van 4m/dag een uitdagend en belangrijk aspect was tijdens de uitvoering van het vriesproces.

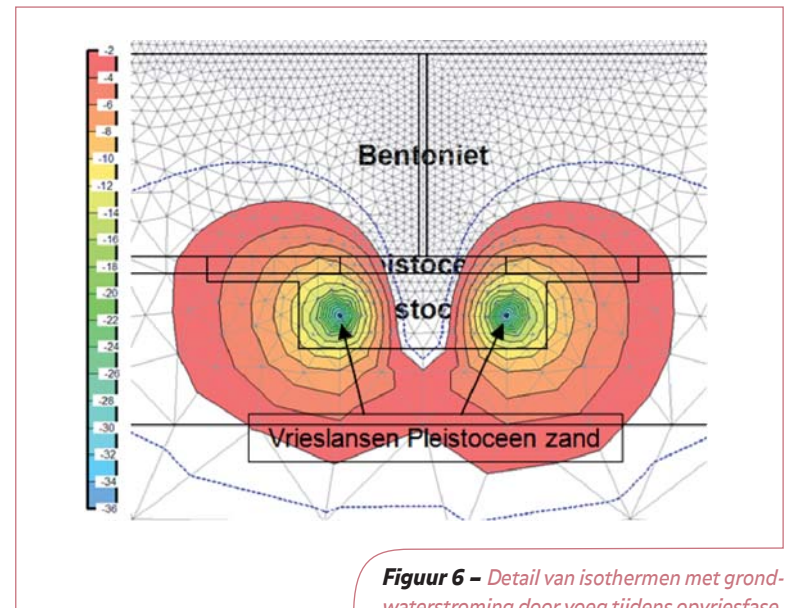
In de as-built situatie lagen op een aantal locaties de stikstof- en pekellansen relatief dicht bij elkaar. Vloeibare stikstof heeft een temperatuur van -196°C. De pekelt temperatuur is -35°C. Pekel wordt minder vloeibaar bij temperaturen van -40°C en bevriest bij lagere temperaturen. Het opvriezen van pekkel werd als significant risico beschouwd. Het risico is gekwantificeerd door een combinatie van analytische en eindige elementen berekeningen. De volgende maatregelen zijn getroffen om dit risico te minimaliseren:

- Aanvullende temperatuur sensoren in de kritieke pekellansen om de invloed van vloeibare stikstof op de pekkel te kunnen meten;
- Vroegtijdige uitschakeling stikstoflansen, waardoor de volle capaciteit van het stikstofvriezen niet volledig benut kon worden;
- Korte en lange stikstof lansen. De vloeibare stikstof wordt op twee niveaus ingebracht waardoor het mogelijk is de diepe lans af te sluiten terwijl de ondiepe lans in gebruik blijft.

Tijdens de uitvoeringsperiode van een jaar kan falen van individuele vrieslansen optreden. In de gevoeligheidsanalyse is de meest kritieke fase en positie beschouwd. De meest kritieke constructie fase was wanneer verwarmingslansen ten behoeve



Figuur 5 – Detail van isothermen bij diepwandvoeg na ontgraving.



Figuur 6 – Detail van isothermen met grondwaterstroming door voeg tijdens opvriesfase.

van het installeren van boorpalen in gebruik genomen waren (zie figuur 4). Uitkomst van de thermische analyse is de beschikbare tijd om maatregelen te nemen om aan de thermische specificaties te blijven voldoen. De op dat moment te nemen maatregelen zijn het repareren van de lans of bij langere uitval het inzetten van de een stikstoflans.

MONITORING

Het EEM model heeft in combinatie met de monitoringsgegevens een belangrijke rol gespeeld bij het controleren van de integriteit van het vrieslichaam. De resultaten uit het EEM model worden vertaald naar data gerelateerd aan de monitoringspunten (grenswaarden). Deze monitoringspunten moeten derhalve in ieder geval op kritieke locaties in de vrieswand gepositioneerd zijn. Als op basis van de meetgegevens geconcludeerd wordt dat aan de grenswaarden wordt voldaan, kan, via het EEM model, worden geconcludeerd dat het gehele vrieslichaam aan de specificaties voldoet.

Het monitoringsschema bestaat uit 10 verticale temperatuurboorgaten met minimaal 3 temperatuur sensoren in elke grondlaag. Ook zijn sensoren geplaatst in de betonconstructies die aansluiten op het vrieslichaam.

Uit de ontwerp- en gevoeligheidsanalyse zijn grenswaarden gedefinieerd voor elk afzonderlijk monitoringspunt. Als de gemeten temperatuur onder de minimum temperatuur ligt voldoet het vrieslichaam aan de benodigde afmetingen. Deze methode heeft een eenvoudig uit te voeren controle tijdens de werkzaamheden tot gevolg.

Tijdens het vriesproces is het temperatuurverloop nauwgezet bijgehouden en het berekeningsmodel is aangepast aan de daadwerkelijke uitvoering zodat snel een gevalideerde koppeling mogelijk was tussen de gemeten temperaturen en de verspreiding van het vrieslichaam in de ondergrond. Op deze wijze kan, per grondlaag, inzichtelijk worden gemaakt of de ontwikkeling van het vrieslichaam aan de verwachting voldoet of dat er locaties zijn waar de temperatuursdaling achter blijft. Met name tijdens de opvriesfase, waarbij sprake was van grondwaterstroming, heeft deze tool een belangrijke bijdrage geleverd in de analyse van de situatie en het definiëren van aanvullende maatregelen.

Diepe stations Noord/Zuidlijn

Bij de stations Vijzelgracht en Rokin van de Noord/Zuidlijn wordt aan de waterdichtheid van de voegen in de diepwand getwijfeld na twee incidenten waarbij ernstige schade aan is ontstaan aan belendende panden. Als maatregel wordt aan grondvriezen gedacht, waarbij na een eerste analyse duidelijk is geworden dat het technisch mogelijk is om dit met pekelvriezen aan de binnenzijde van de kuip uit te voeren.

Ter plaatse van elke diepwandvoeg worden twee vrieslansen binnen de diepwandkuip geplaatst. Nadat het vrieslichaam de vereiste afmetingen heeft verkregen wordt ontgraven en wordt vervolgens de voeg middels een stalen plaat afgedekt. De vrieslansen hebben een lengte van circa 15m. Per station zijn circa 110 voegen aanwezig, wat resulteert in circa 220 vrieslansen per station. De ondergrond in Amsterdam bestaat vanaf het initiële ontgravingsniveau uit een deel van de

kleiïge/zandige Alleröd laag en de 2e zandlaag. Om een waterafsluitende constructie te behouden wordt tot in de Eemklei doorgevroren.

THERMISCH ONTWERP

De hoofddoelen van de thermische ontwerpberekeningen zijn:

- Bepaling van de optimale locatie van de vrieslansen ten opzichte van de voeg (uitvoeringstechnisch en thermisch);
- Bepaling van de benodigde energiebehoefte van de vriesinstallatie;
- Bepaling van de benodigde opvriestijd.

De randvoorwaarden voor het thermische ontwerp, om de sterkte en stijfheid uit het mechanische ontwerp te waarborgen zijn:

- Gemiddelde temperatuur van het vrieslichaam in de voeg lager dan -5°C ;
- Dikte en locatie van het vrieslichaam in de voeg afhankelijk van de diepte en afwijking in diepwand.

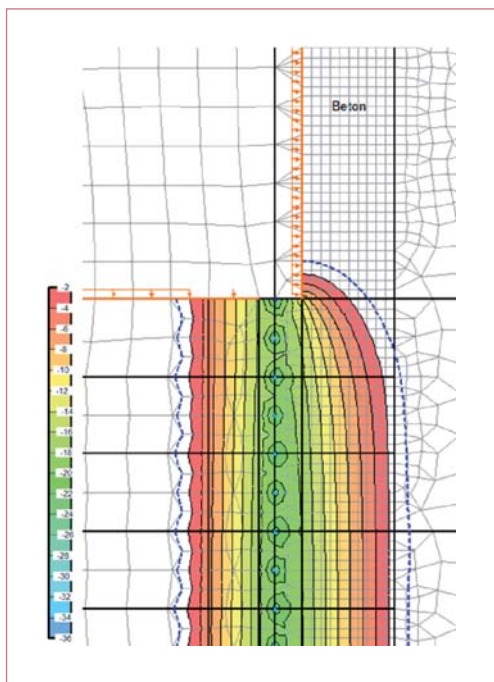
Daarnaast dient rekening te worden gehouden met een grondwaterstroming door de voeg.

De ontwerpberekeningen zijn uitgevoerd met het eindige elementen programma Temp/W. Een horizontale sectie is in verschillende varianten doorgerekend. Daarnaast is tevens een verticale snede berekend. In de horizontale sectie is de volledige constructie fasering tot en met reparatie van de voeg gemodelleerd. Een voorbeeld van het berekende temperatuurveld is gegeven in figuur 5.

GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende belangrijke aspecten verder onderzocht:

- Invloed materiaal in de voeg;



Figuur 7 – Voorbeeld van isothermenverloop in een verticale snede.

- Invloed afstand vrieslansen tot de wand;
- Invloed grondwaterstroming door de voeg;
- Invloed verticale snede.

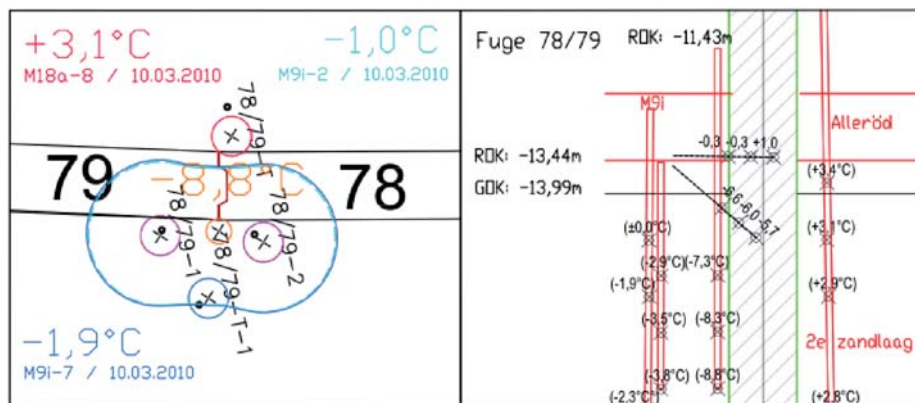
In de voeg tussen de diepwandpanelen kunnen de volgende materialen voorkomen:

- Staal (achtergebleven scheiding tussen diepwandpanelen)
- Zand
- Zand-bentoniet.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat zand-bentoniet de grootste invloed op de benodigde opvriestijd heeft. Naast het type materiaal is ook de spleetgrootte en dus de dikte van het materiaal in de voeg gevarieerd.

Om mogelijke richtingafwijkingen door het boren van de vrieslansen in het ontwerp af te vangen is een analyse uitgevoerd waarbij de lansen zowel evenwijdig aan de wand als haaks op de wand in afstand variëren. De afstand haaks op de wand heeft de grootste invloed op de benodigde opvriestijd. Uit de analyse volgt een opslag op de benodigde opvriestijd uit het ontwerp afhankelijk van de afstand van de lansen tot de diepwand.

De invloed van grondwaterstroming op het vriesproces is bepaald door een gecombineerde berekening met TEMP/W en SEEP/W. Hierbij is als uitgangspunt het debiet van de initiële situatie (stationair debiet van de bemaling van de kuip) gehanteerd. Uit de berekeningen blijkt dat de



Figuur 8 – Voorbeeld van monitoringspunten

eventuele grondwaterstroming invloed heeft op de opvriestijd, maar niet kritiek is.

Aangezien de vrieslansen vanaf ontgravingsniveau in de kuip aangebracht zijn, zal er sprake zijn van een drie dimensionale warmtestroming. Hierdoor buigen in de eerste meter onder ontgravingsniveau de isothermen af richting het ontgravingsniveau (zie figuur 7). Om de opvriestijd te beperken en dus binnen een redelijke tijd aan de specificaties te voldoen zijn maatregelen in de vorm van isolatie genomen. Omdat deze afbuigende isothermen bij iedere ontgravingsstap spelen is als veiligheidsmaatregel bij de diepere tweede en volgende ontgravingsstap de voegreparatie dieper doorgezet om een overlap te creëren tussen ontgravingsniveau en gerepareerde voeg. Door deze overlap is het bovenste deel van de voeg van de volgende ontgravingsstap al gezeurd.

MONITORING

Het monitoren van het vriesproces bij de bouwkuipen van de Noord/Zuidlijn is gedaan om twee criteria te verifiëren:

1. vaststellen of de voeg waterdicht is;
2. vaststellen of de voeg aan de temperatuurcriteria voldoet die uit het mechanische ontwerp volgt.

Met name het eerste criterium is, gezien de grote gevolgen bij falen, zeer belangrijk om door middel van monitoring te controleren. Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat bij grondwaterstroming door de voeg de temperatuursontwikkeling aan de binnenzijde van de bouwkuip, direct voor de voeg, achter blijft (zie figuur 6). Om dit risico te beheersen is het noodzakelijk om bij iedere voeg een temperatuursmeting uit te voeren voordat met ontgraven gestart kan

worden. Voor het controleren van het temperatuurcriterium is het vaststellen van een temperatuurprofiel over de voeg noodzakelijk. Omdat dit een lastig uit te voeren meting is, is deze gedetailleerde meting bij een beperkt aantal voegen uitgevoerd. Bij deze voegen is tevens een meting voor de voeg uitgevoerd, zoals deze standaard bij alle voegen gebeurt. In combinatie met de berekeningen, de metingen voor de voeg (zowel de standaard en de gedetailleerde voegen) kan voor alle voegen een uitspraak worden gedaan of aan beide criteria wordt voldaan.

Tijdens de uitvoering heeft de monitoring zijn waarde bewezen en zijn inderdaad een aantal voegen geconstateerd waar de temperatuursontwikkeling achter bleef. Door additionele maatregelen is de overmatige toevoer van warmte gestopt en is na enige tijd doorvriezen aan beide criteria voldaan. In figuur 8 is als voorbeeld een volledige meetconfiguratie opgenomen.

In figuur 8 zijn in het bovenaanzicht de vrieslansen met een paarse cirkel aangegeven. De overige cirkels zijn monitoringslocaties. Per monitoringslocatie is in het midden van de ontgravingslag door middel van een kleurcodering het punt een temperatuur, nummer meetlocatie en de meetdatum weergegeven. Tevens is een inschatting van het vrieslichaam op de locatie weergegeven. In het dwarsprofiel zijn vervolgens de metingen in de diepte weergegeven, en zijn tevens de meetpunten in de voeg weergegeven.

Conclusies

Grondvriezen wordt nog sporadisch toegepast in Nederland. Het project Rotterdam Centraal laat zien dat grootschalige toepassing van grondvriezen als volwaardig en betrouwbaar onderdeel in het ontwerp en uitvoering succesvol kan zijn.

Het gebruik van EEM berekeningen tijdens het ontwerp en de uitvoering hebben een belangrijke bijdrage geleverd aan dit succes. Toepassing van grondvriezen bij de stations Vijzelgracht en Rokin van de Noord/Zuidlijn laat zien dat deze techniek een robuuste maatregel is waardoor het ontgravingsproces veilig doorgang heeft kunnen vinden.

Concluderend kan worden gesteld dat de twee besproken projecten goede voorbeelden zijn van de inzet van grondvriezen als betrouwbare grondverbeteringstechniek in binnenstedelijke projecten en dat de toepassing van deze techniek, gezien de steeds complexer wordende toekomstige bouwopgaven, in Nederland navolging zal krijgen.

Aanbevelingen

Het op een grote schaal toepassen van grondbevriezen in grote binnenstedelijke projecten leidt tot een aantal aanbevelingen die aandacht behoeven in het ontwerp- en uitvoeringsproces:

- Gevoeligheidsanalyses dragen nadrukkelijk bij in het identificeren en kwantificeren van risico's en het definiëren van adequate maatregelen.
- (Temperatuur) Monitoring in combinatie met de berekeningsmodellen speelt een sleutelrol bij het succesvol uitvoeren van grondvriezen in een project.
- De opvriesfase is doorgaans het meest kritische deel van het vriesproces. Zodra het vrieslichaam aan de criteria voldoet kan pas worden begonnen met ontgraven. De planning voor het moment 'start ontgraving' dient echter voldoende flexibel te zijn en dient rekening te houden met een langere opvriestijd indien de monitoring daar aanleiding toe geeft. Maar ook, zo is de ervaring, met een langere opvriestijd als gevolg van discussies met betrokkenen omdat alle betrokkenen overtuigd moeten zijn dat aan de gestelde temperatuurcriteria wordt voldaan.
- Constructieve samenwerking tussen betrokken partijen, opdrachtgever en opdrachtnemer, is van groot belang voor de voortgang in een vriesproject. De valkuil bij de interpretatie van de monitoringsgegevens is dat men een relatief lange tijd moet wachten op de laatste tienden van graden Celsius voordat aan een temperatuurcriterium wordt voldaan. Indien de betrok-

ken partijen deze gegevens, in een open discussie, verifiëren, bespreken en er conclusies over trekken, kan kostbare bouwtijd worden bespaard.

Dankwoord

De auteurs willen de aannemers TBI Haverkort-Voormolen, nu Mobilis en Max Bögl bedanken voor de samenwerking in deze uitdagende projecten.

Referenties

- Haasnoot J.K., 2010. *Large scale ground freezing in the Netherlands, Proceedings of the 11th International Conference Geotechnical Challenges in Urban Regeneration*, Londen 2010.
- Harris, J.S. *Ground freezing in practice*, 1995.
- Scheffrahn, F.G., Sommeling B., 2010, *Lessen uit de verzakkingen aan de Vijzelgracht*, Geotechniek, december 2010.
- Thuman, V.M., Hass, H. 2007. *Application of ground freezing technology for a retaining wall at a large excavation in the centre of Rotterdam, The Netherlands*, Proceedings of the 14th European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid 2007. ●

**Uw nieuwsbrief
integreren
in vakblad**



Laat de hoge
attentiewaarde
van **Geotechniek**
in uw voordeel
werken!
Informeer naar de
mogelijkheden:
info@uitgeverijeducom.nl

Uitgeverij Educom BV

