



ing. B.R. de Doelder
Ingenieursbureau
Gemeentewerken
Rotterdam



ir. A.F.M. Slot
Ingenieursbureau
Gemeentewerken
Rotterdam

Samenvatting

Controle waterdichtheid bouwkuip Metrostation CS

Bodemopbouw – geohydrologie

De ondergrond van Rotterdam bestaat uit een 10 tot 20 m dikke Holocene deklaag gelegen op een eerste watervoerend pakket, opgebouwd uit Pleistocene rivierafzettingen. Dit eerste watervoerende pakket heeft een dikte van 15 à 20 m. Hieronder bevinden zich een eerste scheidende laag en een tweede watervoerend pakket, beide bestaande uit afzettingen van de Formatie van Waalre (voorheen Formatie van Kedichem genoemd).

Het bovenste deel van de deklaag bestaat uit opgebrachte grond. Dit antropogene pakket heeft een grotere doorlatendheid dan de Holocene deklaag. Daarnaast komen binnen de Holocene deklaag lokaal zandige insluitingen voor, hoofdzakelijk rivierduinafzettingen, die plaatselijk in contact staan met het onderliggende, watervoerende pakket.

Op het Stationsplein zijn de grondopbouw en de grondwaterstroming nauwkeuriger in kaart gebracht om de volgende redenen:

- De aanwezigheid van een in oost-west richting

lopende zandbaan. Deze zandbaan komt voort uit een kanaal, dat werd gegraven voor de aanleg van de metrotunnel en is na de aanleg opgevuld met zandig materiaal. Hierin bevindt zich de in 1968 in gebruik genomen metrotunnel. De tunnelelementen zijn via het kanaal naar hun plaats getransporteerd en vervolgens afgezonken tot een diepte van NAP - 10 m.

- Een donk (rivierduin) van variërende dikte, ter plaatse van het gebouw Delftse Poort (Nationale Nederlanden), die een tussenzandlaag vormt in het klei- en veenpakket. Plaatselijk is de onderliggende kleilaag (vrijwel) geheel afwezig, waardoor de donk direct contact maakt met het Pleistocene pakket. Ook is contact tussen de donk en het zandkanaal niet uitgesloten (figuur 2).

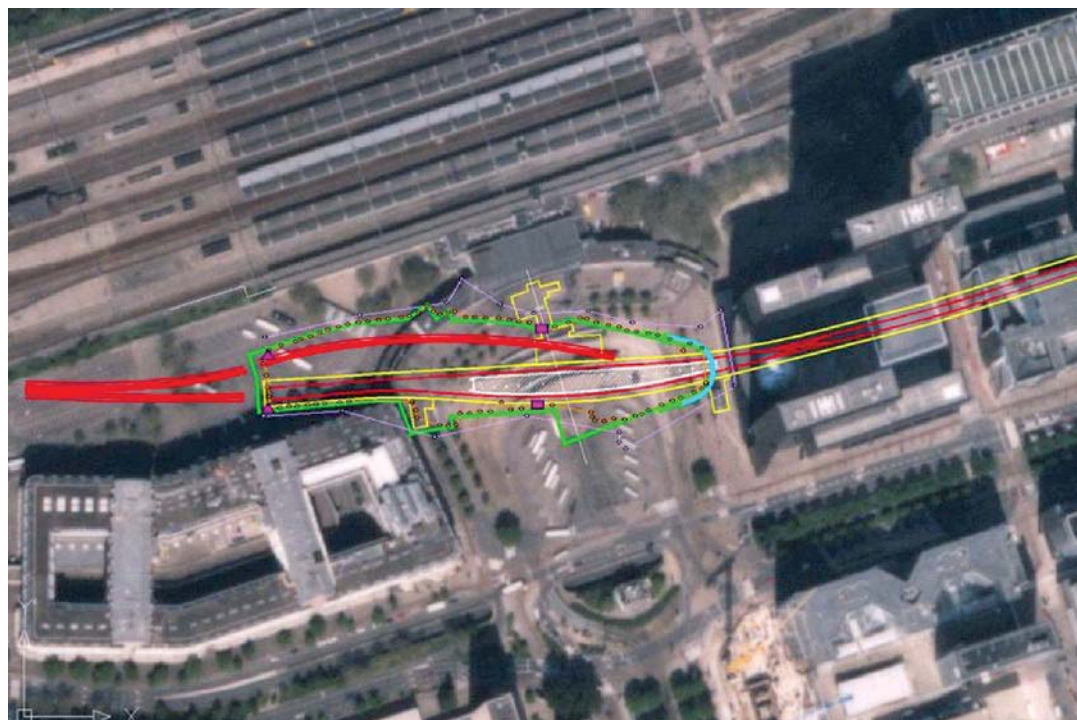
Modellering van het grondwaterregime

Ten behoeve van de bepaling van de effecten van spanningsbemalingen in de omgeving van het Stationsplein is een numeriek geohydrologisch model opgezet, waarvoor het 3D eindige elementen programma MicroFem is ingezet. [4]

Het RandstadRailproject omvat in Rotterdam de aanleg van het Statenwegtracé met o.a. een geboorde tunnel en de verbouwing van het ondergrondse Metrostation CS. Onlangs is het nieuwe Metrostation CS gedeeltelijk in gebruik genomen. De bouw van het ondergrondse deel van het nieuwe metrostation ter plaatse van het Stationsplein is uitgevoerd in een bouwput met diepwanden. Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam heeft het ontwerp van Metrostation CS verzorgd en de directie over de uitvoering van het werk gevoerd. Dit artikel beschrijft de controleproeven die zijn uitgevoerd om de waterdichtheid van de bouwput bij Metrostation CS te verifiëren. Bijzonder aan de uitgevoerde controleproeven waren de omvang en vorm van de bouwput, de grootte van de gerealiseerde verlagingen, het feit dat de eerste controleproef is uitgevoerd terwijl een van de kopse wanden (waar de vrieswand was geprojecteerd) nog niet gesloten was, de omvang van de monitoring en het feit dat het formeren van de gehele bouwput onderdeel was van drie afzonderlijke bestekken. Hierdoor bestond de behoefte de diverse wanden ook afzonderlijk te (kunnen) beoordelen.

In het model zijn het eerste en tweede watervoerende pakket, de Holocene deklaag en de antropogene topklaag in het centrum van Rotterdam (omvang 10 km²) opgenomen. Binnen het Holocene is rekening gehouden met de aanwezigheid van een tussenzandlaag, terwijl het Pleistocene watervoerende pakket is opgedeeld in een drietal modellagen om onvolkomen bronnen goed te kunnen modelleren. In totaal omvat het model zes lagen. De waarden voor de geohydrologische parameters zijn ontleend aan de Grondwaterkaart van Nederland en aan REGIS en zijn vervolgens gekalibreerd op basis van langjarige meetgegevens van het Grondwatermeetnet Rotterdam.

Op basis van boor- en sondeergegevens is voor de omgeving van het Stationsplein een ruimtelijk beeld gemaakt van de ondergrond. Hierbij is aandacht besteed aan de verbreiding van de donk, zowel in horizontale als in verticale richting, en van de restdikten van de holocene deklaag aan de boven- en onderzijde van de donk. De mate van kortsluiting tussen het freatische en Pleistocene watervoerende pakket is met behulp van pompproeven in een eerdere onderzoeksfase nader bepaald en in het model verwerkt [1].



Figuur 1 Overzicht bouwput met peilbuizen en bronnen.

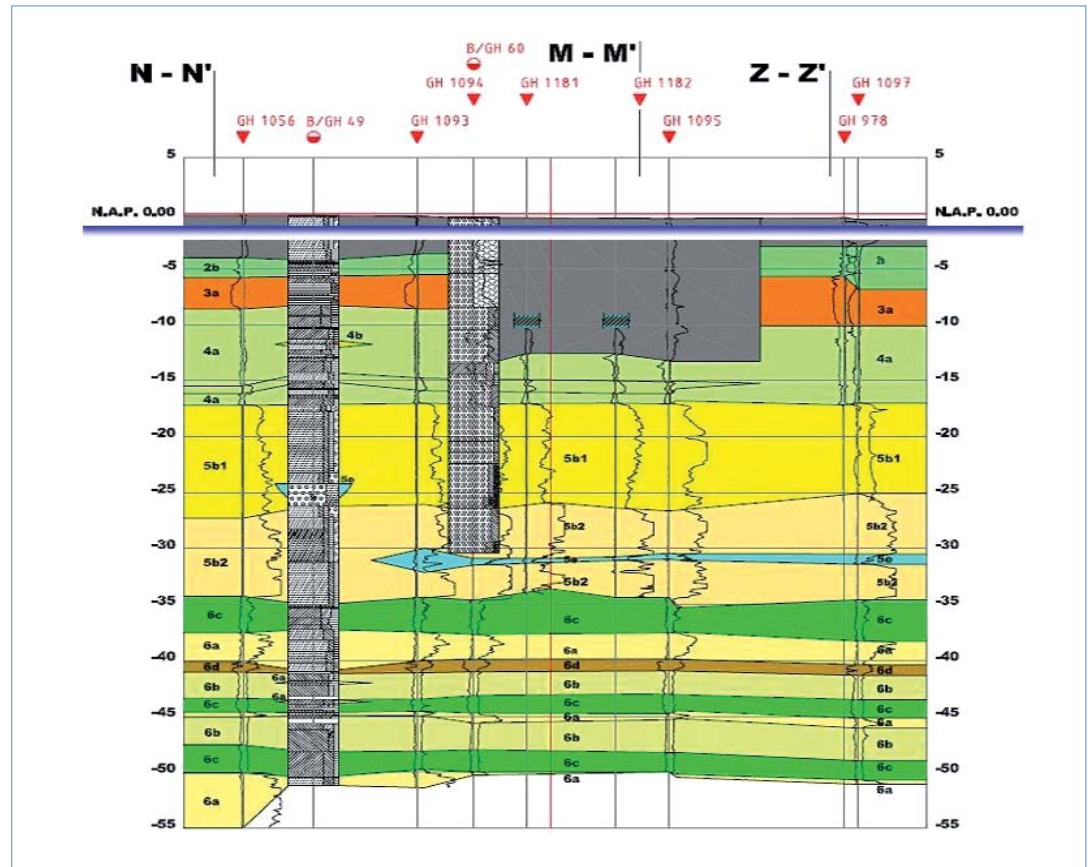
Afweging uitvoeringswijze

Het Metrostation CS wordt verbouwd van een station met één perron en twee sporen naar een station met twee perrons en drie sporen. Hiertoe is het bestaande station gesloopt en is het totale nieuwe station voorzien van een nieuwe fundering. De afmetingen van de bouwput bedragen circa 220 x 45 m². De bouwput omvat het gehele bestaande metrostation. De ontgraving diepte van de bouwput bedroeg 14 m -mv. Zie figuur 1.

De bouwput is uitgevoerd als zogenaamde 'Kedichem' put, met diepwanden tot in de waterafsluitende lagen van de Formatie van Kedichem. Een zwaar wegend argument voor deze keuze is dat het alternatief (een bouwput met conventionele damwanden en een spannings- en retourbemaling) in de benodigde omvang niet gedurende de geschatte bouwtijd (4 jaar of langer) kon worden toegepast; op basis van de historische tijd/stijghoogtereeks geldt een maximale duur van de spanningsbemaling van ca. 20 tot 25 maanden. Tevens bestond in dat geval een reëel risico op een freatische grondwaterstandsverlaging onder het gebouw Delftse Poort (Nationale Nederlanden) als gevolg van kortsluiting met het Pleistocene watervoerend pakket.

Het gebouw Delftse Poort is in de jaren '80 van de vorige eeuw over de bestaande metrotunnel heen gebouwd. Door het gewicht van het gebouw zakt de paalfundering onder de metrotunnel mee. Om de diepteligging van de metrotunnel te waarborgen is, tijdens de bouw van gebouw Delftse Poort, een nieuwe paalfundering aan weerszijden van de tunnel aangebracht, waaraan de metrotunnel is opgehangen. Door middel van vijzels zijn de zettingen in de ondergrond nadien gecompenseerd. Bij de dimensionering van deze constructie is rekening gehouden met een zekere opwaartse grondwaterdruk onder de tunnel. Indien het freatisch vlak om welke reden dan ook te zeer wordt verlaagd, bestaat de kans dat de ophangconstructie wordt overbelast, wat uiteraard onacceptabel is. Om de integriteit van de ophangconstructie te waarborgen, mag de freatische grondwaterstand onder dat gedeelte van de metrotunnel daarom niet dalen tot onder NAP -3,3 m. Naast een kritische belasting op deze ophangconstructie zou de variant 'bouwput met damwand en spanningsbemaling' naar verwachting ook leiden tot additionele zettingen in de omgeving met alle gevolgen voor paalfunderingen en ondergrondse infrastructuur van dien.

Een van de randvoorwaarden bij de verbouwing



Figuur 2 Schematische bodemopbouw.

van Metrostation CS was dat het metroverkeer te allen tijde doorgang moest vinden. Zodoende moest, onafhankelijk van het type bouwput, aan de oostzijde van de bouwput een zgn. kraagconstructie worden gerealiseerd rondom de bestaande metrotunnel. Deze kraagconstructie moest, gedurende de periode dat de bouwput is ontgraven, fungeren als grond- en waterkering. Daarnaast diende de kraagconstructie (freatische) grondwaterstandsverlagingen ter plaatse van de ophangconstructie onder het gebouw Delftse Poort te voorkomen. Dit stelde speciale eisen aan de waterdichtheid van deze kraagconstructie. De kraagconstructie is uiteindelijk gerealiseerd door het bevriezen van de grond (middels vrieslansen en gebruik van pek en stikstof).

Controleproeven

Een belangrijke ontwerp eis bij de 'Kedichem' put is dat de bouwputwanden voldoende waterdicht zijn; zowel de diepwand als de kraagconstructie. Om dit te verifiëren zijn tijdens de uitvoering van het werk controleproeven uitgevoerd. De te toetsen hypothese was een weerstand van de diepwand van ten minste 500 dagen. In de vergunning is veiligheidshalve uitgegaan van een weerstandswaarde van 200 dagen. Deze laatste

waarde geldt als maatgevend criterium. De hypothese van een waterdichte bouwput dient te worden verworpen als dit laatste criterium niet wordt gehaald. Tevens kan uit een controleproef vroegtijdig een signaal volgen of sprake is van gebreken aan diepwandpanelen. Op deze manier bestaat de mogelijkheid dergelijke gebreken te repareren met minimale invloed op de uitvoeringsplanning.

Een belangrijk aandachtspunt voor de opzet van de controleproeven was de wijze waarop de bouwput van Metrostation CS is gerealiseerd. De bouwputwanden zijn namelijk niet door één aannemer gemaakt maar in fasen als onderdeel van drie verschillende bestekken:

- De diepwand aan de westzijde, grenzend aan de bouwput van het Statenwegtracé (bestek Statenwegtracé);
- De diepwanden aan de noord- en zuidzijde van de bouwkuip (bestek 1 Metrostation CS);
- Het vrieslichaam aan de oostzijde (bestek 2 Metrostation CS).

Deze bouwwijze heeft grote invloed gehad op de wijze waarop de controleproeven zijn uitgevoerd: in twee fasen en met een zeer uitgebreide monitoring.

Een controleproef in een bouwput wordt uitgevoerd door uit één of meerdere bronnen te onttrekken en het stijghoogteverloop in een aantal peilbuizen te registreren. Uit het verloop van de stijghoogte in de watervoerende lagen, zowel in als rondom de bouwput, en de grootte van het debiet kan de waterdichtheid van de bouwput c.q. de weerstand van de wanden worden bepaald.

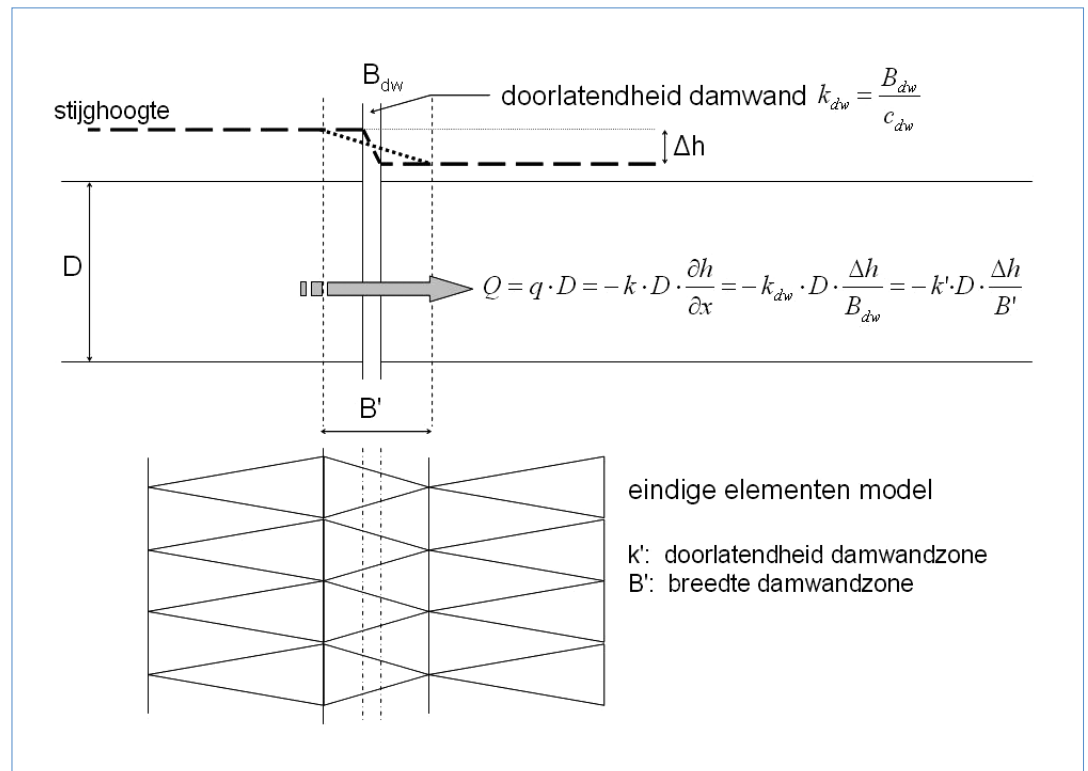
Bij Metrostation CS zijn twee controleproeven uitgevoerd. De eerste proef is uitgevoerd tijdens de fase dat de bouwput nog niet was gesloten door de vrieswand, de tweede proef nadat dit wel het geval was.

Om de invloed van de controleproeven op de stijghoogte te kunnen waarnemen zijn peilbuizen in en rondom de bouwput geplaatst met het peilfilter in het 1e watervoerend pakket. Tevens zijn peilbuizen geplaatst met het peilfilter in de Formatie van Kedichem ter bepaling van de afsluitende werking van deze laag. Ten slotte zijn specifiek voor dit project ook peilbuizen geplaatst met het peilfilter in het freatische pakket en in de tussenzandlaag om de invloed van despanningsbemaling op deze pakketten, als gevolg van een mogelijke kortsluiting, te kunnen bepalen.

Een (gelijkmatig) verdeeld lek is te vertalen naar een wand met een bepaalde (verminderde) weerstand, mits de kleilaag aan de onderzijde als ondoorlatend kan worden beschouwd. Een lage weerstand van de diepwand heeft direct invloed op de verlaging van de grondwaterstand in de omgeving, kan in extreme situaties leiden tot erosie en zanduitspoeling in de bouwput en is daardoor niet toelaatbaar.

Een geconcentreerd lek, bijvoorbeeld ter plaatse van de voegen tussen diepwandpanelen, lijkt meer op een lokale onttrekking – infiltratie. Een dergelijk geconcentreerd lek is alleen goed te lokaliseren met een fijnmazig peilbuizen-net. Bij Metrostation CS is gekozen voor een peilbuizen-netwerk met een hart op hart afstand van 5 m langs de binnenzijde van de diepwand (totaal 80 peilbuizen) teneinde de kans op detectie van lekken van geringe omvang te vergroten. Bij eerder uitgevoerde controleproeven bij het project Statenwegtrace is gewerkt met een hart op hart afstand van de peilbuizen van 50 m waarmee uitsluitend de overall hydraulische diepwandweerstand is bepaald [3].

De eisen voor de controleproef zijn door het Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam beschreven in het Programma van Eisen als



Figuur 3 Modelschematisatie diepwandweerstand.

onderdeel van het bestek. De aannemer heeft aan de hand daarvan een werkplan ter goedkeuring ingediend bij de directie. Ten behoeve van de controleproeven zijn de volgende monitoringsvoorzieningen geplaatst:

In de bouwput

80 Pleistocene buizen nabij de diepwand
 11 Pleistocene buizen midden in bouwkuip
 4 buizen met filter in de donk (alleen van belang bij 1e controleproef)
 12 freatische buizen
 7 waterspanningsmeters in vloer metrotunnel

Rondom de bouwput

18 Pleistocene buizen
 4 Kedichem buizen
 9 freatische buizen
 3 freatische buizen in het zandlichaam van het voormalige kanaal
 2 waterspanningsmeter in vloer metrotunnel onder gebouw Delftse Poort.

Een groot deel van de metingen van grondwaterstand en stijghoogte is automatisch uitgevoerd en was online beschikbaar. Dit heeft gedurende de bouw in het algemeen en in het bijzonder voor de controleproeven geleid tot een zeer nauwkeurige meetreeks die goed kon worden geanalyseerd.

De controleproeven zijn uitgevoerd met telkens een gelijktijdige onttrekking uit een tweetal bronnen één aan de noord- en één aan de zuidzijde van de bouwput. Tijdens de 1e controleproef is de proef eenmaal uitgevoerd met de onttrekingsputten aan de uiterste westzijde van de

bouwput en eenmaal met twee bronnen halverwege de bouwput.. De 2e controleproef is uitgevoerd met de twee bronnen halverwege de bouwput.

Alle bronnen hadden een filterdiameter van 315 mm en een filterlengte van 10 m (NAP -22 tot -32 m). De capaciteit van de bronnen bedroeg 150 m³/uur. In de praktijk varieerde het onttrekkingsdebiet van de verschillende bronnen tussen 27 en 65 m³/uur, afhankelijk van de vereiste verlaging en de fase van de proef (wel of geen stationaire situatie).

Modelberekeningen

Om de hydraulische weerstand van de diepwanden te kunnen bepalen zijn deze als speciale zones in het model ingevoerd. Voor deze zones is een equivalente doorlatendheid bepaald, zodanig dat de lek door de diepwand, gegeven een zeker stijghoogteverschil, in het model en in werkelijkheid met elkaar overeenkomen.

De weerstand van de diepwand kan worden omgerekend naar een equivalente doorlatendheid (k -waarde) volgens de relatie (zie ook figuur 3):

$$k_{dw} = \frac{B_{dw}}{c_{dw}}$$

In het model worden de geohydrologische para-

meters van de diepwand toegekend aan een zone met breedte B' , een waarde die veelal groter is dan de werkelijke dikte van de diepwand. De in het model in te voeren doorlatendheid kan nu uit de diepwandweerstand worden berekend volgens:

$$k' = \frac{B'}{c_{dw}}$$

Met deze vergelijking kan de doorlatendheid, en derhalve ook het doorlaatvermogen, van de verschillende modellen ter plaatse van de diepwand worden aangepast, in overeenstemming met de veronderstelde waarde van de diepwandweerstand.

Om een uitspraak te doen over de te verwachten weerstand van de diepwand zijn met het model tijdsafhankelijke berekeningen uitgevoerd waarvan de resultaten zijn vergeleken met het gemeten stijghoogteverloop. Om een representatieve verdeling van weerstandswaarden te krijgen zijn de berekeningen van de 1e controleproef uitgevoerd met een c-waarde voor de diepwand van 100, 200, 400, 600 en 1000 dagen, omgerekend naar een equivalente doorlatendheid. Uit indicatieve modelberekeningen is gebleken dat een variatie van de c-waarde van de onderliggende scheidende laag, binnen de vermoedelijke spreiding op basis van beschikbare literatuurgegevens, nauwelijks waarneembaar is in het stijghoogteverloop. Voor de analyse van de controleproeven is deze weerstand dan ook als vast gegeven beschouwd.

Op basis van overeenkomst tussen de berekende en waargenomen tijd-stijghoogtelijnen kon een uitspraak gedaan worden over de (vermoedelijke) weerstandswaarde van de diepwand in de directe omgeving van de betreffende peilbuis.

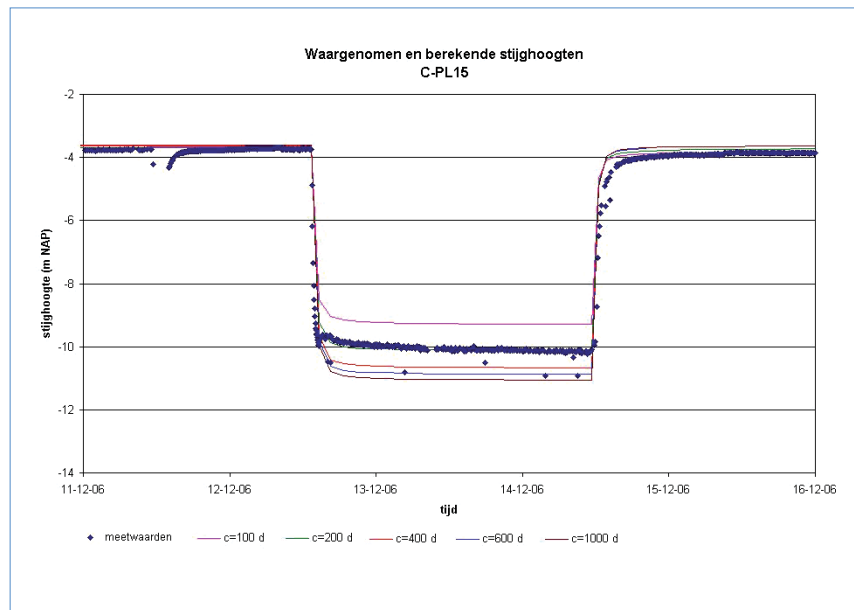
1e controleproef

Bij de eerste fase van de 1e controleproef (met aan één zijde de bouwput open) is de stijghoogte nabij de bronnen aan de uiterste westzijde van de bouwkuip verlaagd tot NAP -14 m. Deze fase duurde van 12 tot 14 december 2006.

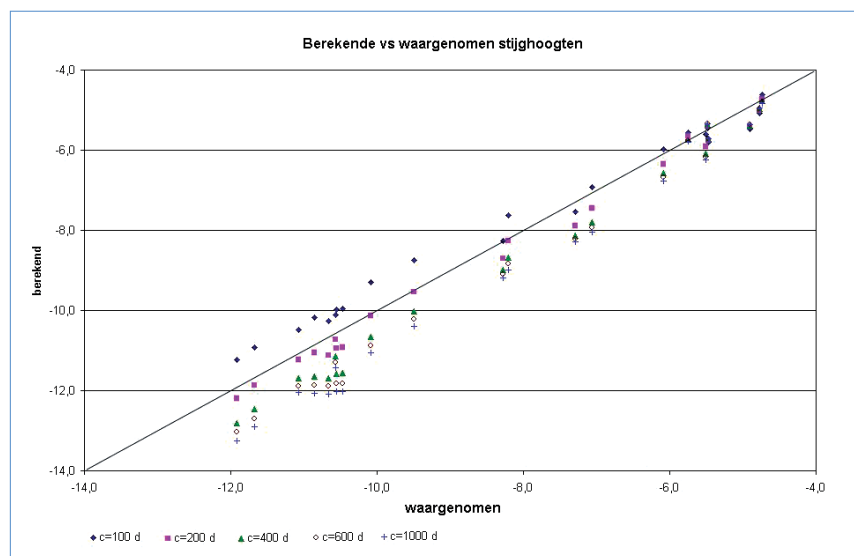
De tijdsafhankelijke berekeningen zijn circa 2,5 dag vóór aanvang van de proef gestart, waarmee de uitgangssituatie goed is gesimuleerd.

Vervolgens is gerekend met een per bron gemiddeld onttrekkingsdebiet en is na beëindiging van de onttrekking nog 48 uur doorgerekend om de terugkeer tot de oorspronkelijke situatie te simuleren.

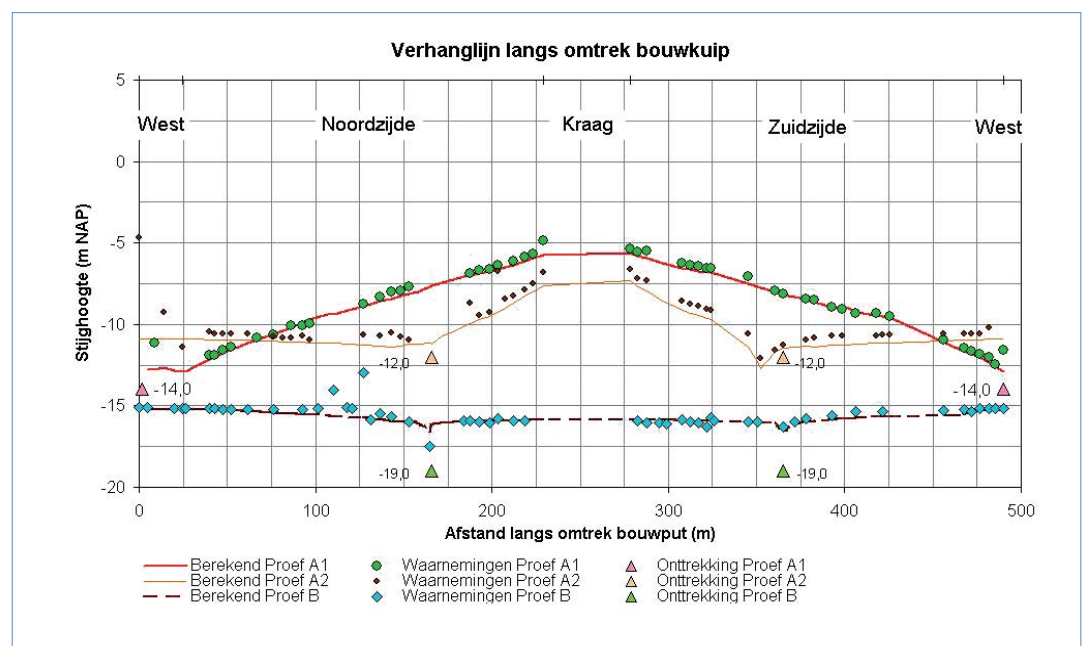
Figuur 4 geeft een typisch tijd-stijghoogteverloop tijdens de 1e controleproef in 1 peilbuis (CPL-15). In *figuur 5* zijn de stijghoogten, geregistreerd aan het eind van de verlagingfase, ver-



Figuur 4
Berekend en gemeten stijghoogteverloop 1e controleproef.



Figuur 5
Berekend en gemeten stijghoogteverloop 1e controleproef.



Figuur 6 Gemeten en berekende verhanglijnen langs binnenomtrek bouwput.

geleken met de met het model berekende stijghoogten behorend bij verschillende waarden voor de diepwandweerstand.

Na de eerste fase is van 18 tot 21 december 2006 het tweede deel van de proef uitgevoerd. Hierbij is de stijghoogte nabij de twee centraal gelegen bronnen verlaagd tot NAP -12 m. Ook tijdens deze proef was de bouwkuip aan de oostzijde niet gesloten. De waarnemingen zijn op dezelfde wijze vergeleken met de berekende stijghoogten als bij het eerste deel van de controleproef.

Op basis van de gemeten en berekende stijghoogten in de verschillende peilbuizen langs de binnenzijde van de diepwand, is een verhanglijn opgesteld lopend van de westzijde via de noordzijde, de kraagconstructie en de zuidzijde weer terug naar het beginpunt aan de westzijde.

In *figuur 6* zijn de verhanglijnen van beide fasen van de 1e controleproef (A1 en A2) en van de 2e controleproef (B) weergegeven. Hierin is duidelijk waar te nemen dat tijdens de 1e controleproef de stijghoogte ter hoogte van de kraagconstructie tot maximaal circa NAP -6 m is verlaagd. Hierdoor vindt toestroming naar de onttrekkingsbronnen plaats. Tijdens de eerste fase van de proef (1A) is deze toestroming (gezien het flauwere verhang) geringer dan tijdens de tweede fase (1B). De mate van toestroming is niet nader geanalyseerd.

Tijdens proef 1B wordt westelijk van de onttrekkingsbronnen een vrijwel horizontale verhanglijn

waargenomen, hetgeen op een relatief homogene situatie wijst.

Op basis van de berekeningen van de 1e controleproef, zowel het verloop van de tijd-stijghoogtelijnen voor de verschillende peilbuizen en het verloop van de verhanglijn langs de binnentrek van de put (*figuur 4 en 5*), kon worden geconcludeerd dat er geen afwijkingen zijn aan de diepwanden in het westelijk deel van de bouwput en dat hiervoor een gemiddelde weerstand van circa 200 dagen kon worden aangehouden. De resultaten voor de peilbuizen buiten de diepwand aan de westzijde van de bouwput wijzen zelfs op hogere waarden; buiten de diepwand zijn nagenoeg geen veranderingen waargenomen in de stijghoogte van het 1e watervoerend pakket. Ook is geen invloed gemeten van de controleproef op de freatische grondwaterstanden.

Over de westelijke diepwand kon na de 1e controleproef geen uitspraak worden gedaan, vooral omdat de onttrekkingsbronnen direct naast deze wand geplaatst waren en de waargenomen verlagingen derhalve niet representatief zijn voor de diepwand. Op basis van het tweede deel van de 1e controleproef wordt hier geen andere weerstandswaarde verwacht dan voor de rest van de westzijde van de bouwkuip.

2e controleproef

Na de 1e controleproef is gestart met het creëren van de vrieswand om zo samen met de diepwand de bouwput waterdicht te maken. Aangezien deze kraagconstructie een essentieel onderdeel is van de bouwput, en omdat relatief

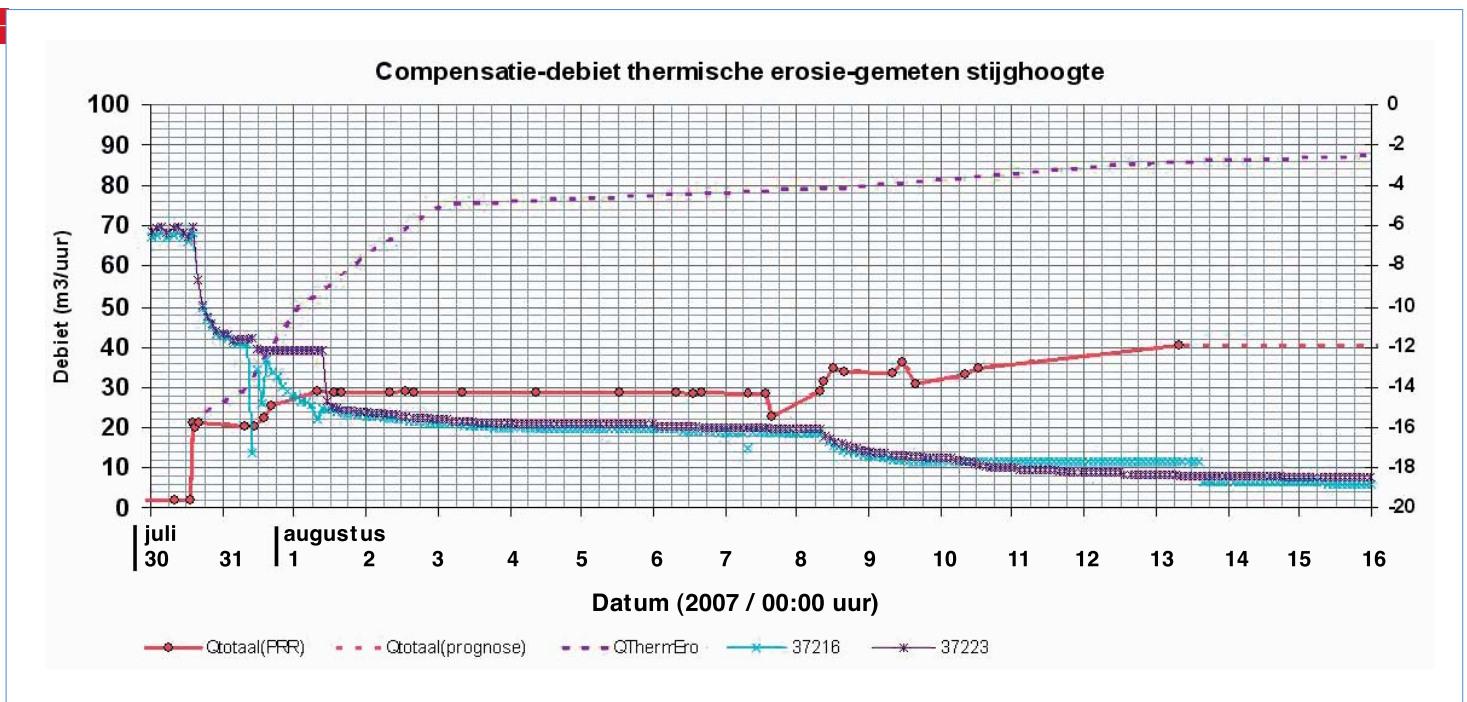
kleine lekkages door thermische erosie zich in de loop van de tijd kunnen ontwikkelen tot moeilijk te beheersen proporties (met een risico voor opbarsten of inundatie van de bouwput), was het noodzakelijk de waterdichtheid van de vrieswand met een hoge mate van zekerheid vast te stellen.

Om deze reden is de 2e controleproef uitgebreid en qua uitvoering en doorlooptijd aangepast. Als extra doelstelling is aan deze controleproef toegevoegd: het aantonen van uitblijvende thermische erosie van de vrieswand. De proef is gehouden tussen 30 juli en 22 augustus 2007, waarbij op 8 augustus het afmalingsniveau is verlaagd tot NAP -19 m.

Voorafgaand aan de proef is met het MicroFem model berekend wat de mogelijke gevolgen zijn van een gat in de vrieswand, in termen van waterbezwaar en stijghoogteverlagingen. [2] Uit deze indicatieve berekeningen volgt dat bij een gat van toenemende grootte rekening gehouden moet worden met een (aanzienlijke) toename van het onttrekkingsdebiet in de put, *zie figuur 7*.

Het feit dat zowel het debiet als de verlagingen gedurende langere tijd vrijwel constant waren, zoals weergegeven in *figuur 7*, waren de 1e indicatie dat de vrieswand waterdicht was. De resultaten van de 1e controleproef zijn geverifieerd tijdens de 2e controleproef, waarbij dezelfde rekenmethode is toegepast. Om een representatieve verdeling van weerstandswaarden te krijgen zijn de berekeningen nu uitgevoerd met een c-waarde voor de diepwand van

Figuur 7
Verloop gemeten debiet en stijghoogte nabij vrieswand.



100, 150, 175, 200 en 250 dagen. Voor de vrieswand is in de berekeningen aangenomen dat deze 100% waterdicht is.

In *figuur 6* is de verhanglijn weergegeven langs de binnenzijde van de bouwput (de onderste stippellijn). Het vlakke verloop is een bevestiging van de aanname dat er geen sprake is van een lekkage ter plaatse van de vrieswand en dat deze inderdaad waterdicht mag worden verondersteld.

Uit de resultaten van de 2e controleproef volgt dat de gemiddelde waarde voor de weerstand van alle diepwanden circa 200 dagen is. Ook bevestigen de resultaten de aanname dat de vrieswand voor 100% waterdicht is en zodoende niet gevoelig voor thermische erosie.

Conclusies

Aan de hand van een vergelijking van de stijghoogtewaarnemingen en de modelberekeningen is geconcludeerd dat de weerstand van de diepwand gemiddeld ongeveer 200 dagen bedraagt, dat er geen lokale afwijkingen zijn en dat de

vrieswand volledig waterdicht is. De berekende waarde voor de weerstand van de diepwanden is lager dan de toetswaarde van 500 dagen, maar voldoet nog wel aan de eis van ten minste 200 dagen, waarop de onttrekkingsvergunning is gebaseerd. Ondanks de tegenvallende weerstandswaarde voor de diepwanden kan de hypothese dat de bouwput voldoende waterdicht is toch bevestigd worden.

Op basis van de resultaten van de controleproeven is aangetoond dat de verschillende besteksonderdelen elk afzonderlijk aan het criterium van waterdichtheid voldeden. Deze uitspraak was alleen mogelijk vanwege de zeer intensieve monitoring, waarbij met een zekere mate van uitval rekening is gehouden. Op basis van de resultaten van de controleproeven bleken geen reparatiewerkzaamheden aan de diepwanden nodig.

Met behulp van het beschikbare geohydrologische model bleken de controleproeven goed te analyseren, mede doordat het model is opgebouwd met gegevens uit een wijdere omgeving en over langere meetperioden. Het model maak-

te het verder mogelijk om, voorafgaand aan of tijdens uitvoering van de proeven, snel verschillende varianten op de gevolgen voor grondwaterstands- en stijghoogteverandering te beoordelen, zoals ook voor de effecten van thermische erosie van de vrieswand is gedaan.

Bronnen en referenties

- [1] Doelder, B.R. de, Slot A.F.M. (2010), *De beheersing van het grondwater bij Metrostation CS, Rotterdam*. Civiele Techniek, jaargang 65, nr. 2010, p. 21-24.
- [2] Thumann, V.M., Hannink, G. and Doelder, B.R. de (2009), *Ground Freezing and Groundwater Control at Underground Station CS in Rotterdam*. Proc. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, 5-9 Oct. 2009, p. 2560-2567.
- [3] Elprama, R., Hannink, G. en Thumann, V.M. (2007), *Waterdichtheid van diepwanden*. Geotechniek nr. 1, januari 2007, p. 56-61.
- [4] K. Hemker, C.J. & De Boer, R.G. 2005. *MicroFem version 3.60.58*, 1997-2005. ■

ADVERTENTIE