

Waterdichtheid van Diepwanden

ir. R. Elprama

ir. G. Hannink

ir. V.M. Thumann

Ingenieursbureau Gemeentewerken

Rotterdam

SAMENVATTING

De drie bouwputten van de RandstadRail-tunnel in Rotterdam, de startschacht, station Blijdorp en de ontvangtschacht zijn uitgevoerd met diepwanden tot NAP $-42,5$ m tot in de Formatie van Kedichem. De waterdichtheid van deze diepwanden is bepaald met behulp van tweetraps controleproeven. De proeven tonen aan dat 500 dagen een veilige waarde is voor de hydraulische weerstand van de betreffende diepwanden. Aanbevolen wordt om bij de controle van de waterdichtheid van diepwanden in vergelijkbare ondergrondconditie de tweetraps procedure te volgen.

INLEIDING

RandstadRail bestaat o.a. uit een light-rail verbinding tussen Rotterdam en Den Haag. Het verbindt de plaatselijke openbaar vervoersystemen zodanig dat het mogelijk is de binnensteden zonder overstappen te bereiken.

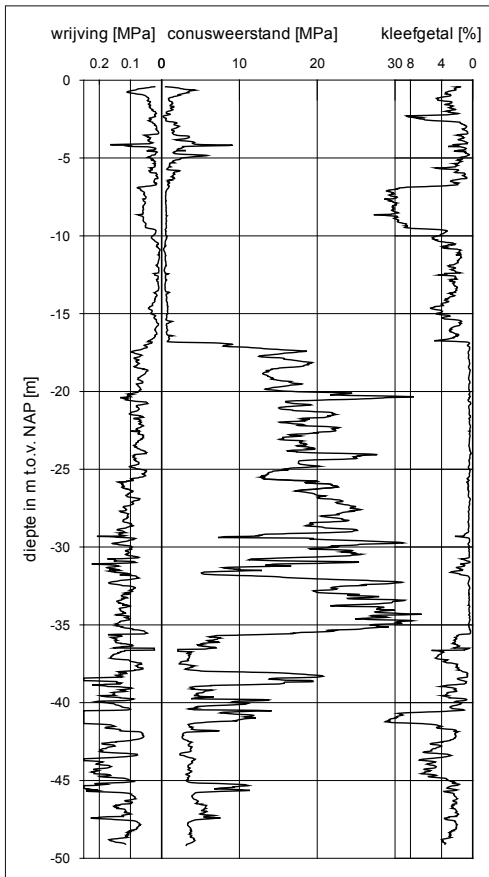
Voor het realiseren van RandstadRail in het stedelijk gebied van Rotterdam worden twee tunnels geboord, elk met een buitendiameter van 6,5 m en een lengte van 2,4 km. Halverwege de tunnels wordt metrostation Blijdorp gebouwd.

De aanleg van RandstadRail in Rotterdam is in 2004 begonnen. Eind 2005 is gestart met het boren van de eerste tunnelbuis. Het boren is aan de noordkant van de tunnel begonnen vanuit de startschacht ter plaatse van de zogenaamde Sint Franciscus Driehoek. Ongeveer halverwege het tracé passeert de tunnelboormachine station Blijdorp. Het boren zal in de ontvangtschacht vlakbij Rotterdam Centraal Station eindigen. Daar zal RandstadRail worden verbonden aan het bestaande ondergrondse metrosysteem van Rotterdam. *Figuur 1* toont de situatie.

In dit artikel worden het ontwerp en de installatie van de diepwanden als onderdeel van de drie diepe bouwputten voor de startschacht, station Blijdorp en de ontvangtschacht beschreven en de methode waarop de waterdichtheid van deze wanden is onderzocht. De randvoorwaarden voor deze proef en enige proefresultaten worden vermeld. De meest waarschijnlijke waarde voor de hydraulische weerstand van de diepwand wordt afgeleid en ook wordt voor de Rotterdamse omstandigheden een ontwerpwaarde voor de hydraulische weerstand van diepwanden aanbevolen.



↑ **Figuur 1** Situatie met het tracé van de geboorde tunnel voor RandstadRail en de locaties van de startschacht, station Blijdorp en de ontvangtschacht (foto: Aeroview)



↑ **Figuur 2** Resultaat van een kenmerkende sondering

GROND EN GRONDWATER

Het maaiveldniveau bevindt zich langs het tracé van de geboorde tunnel rond NAP. Het freatische grondwaterniveau is ongeveer NAP -2 m. In het stedelijk gebied van Rotterdam bestaat de ondergrond vanaf maaiveld tot ca. NAP -5 m uit antropogene lagen. Hieronder bevinden zich tot ca. NAP -17 m slappe Holocene klei- en veenlagen. Vanaf ca. NAP -17 m tot ca. NAP -35 à -40 m komen Pleistocene zandlagen voor. Laatstgenoemde niveau markeert de bovenkant van de Formatie van Kedichem die bestaat uit overgeconsolideerde klei- en zandlagen. *Figuur 2* toont de resultaten van een sondering, uitgevoerd ten behoeve van de bouw van station Blijdorp.

Geohydrologisch gezien kan de ondergrond worden geschematiseerd als een tweelagenstelsel: een relatief ondoorlatende bovenlaag vanaf maaiveld tot ca. NAP -17 m en een watervoerend zandpakket tussen ca. NAP -17 m en ca. NAP -35 m. De vrijwel ondoorlatende Formatie van Kedichem op ca. NAP -35 à -40 m vormt de basis van dit geohydrologische systeem. Gewoonlijk worden voor ontwerpdoeleinden de volgende geohydrologische parameters in het stedelijk gebied van Rotterdam gehanteerd:

- hydraulische weerstand van de bovenlaag: 2.500 dagen;
- doorlaatvermogen van het watervoerend zandpakket: 900 m²/dag;
- hydraulische weerstand van de Formatie van Kedichem: ondoorlatend.

BOUWMETHODE

Het station Blijdorp en de ontvangtschacht bevinden zich in dichtbevolkte gedeelten van de stad en de startschacht nabij een ziekenhuis. Bij het ontwerp van de bouwputten moest daarom rekening worden gehouden met de invloed van de bouwactiviteiten op de omgeving. In de drie bouwputten moest tot ongeveer NAP -20 m, dus tot in het watervoerend zandpakket, droog kunnen worden ontgraven.

Voor diepe ontgravingen is een diepwand de meest voor de hand liggende keuze voor een droge ontgraving. Deze bouwmethode maakt gebruik van de vrijwel ondoorlatende Formatie van Kedichem aan de onderzijde van de bouwput om de grondwaterstroming naar de bouwput tot een minimum te beperken. Dit type bouwput wordt in Rotterdam een Kedichem put genoemd. In feite wordt een tijdelijke polder gecreëerd, zodat de bouwactiviteiten in den droge kunnen plaatshebben.

Voor alle drie bouwputten werden diepwanden als grondkerende constructie gekozen. Om in droge omstandigheden te kunnen bouwen, is het belangrijk dat de diepwanden voldoende waterdicht zijn. Ook is het voor de omgeving belangrijk dat de freatische grondwaterstand buiten de bouwput op peil blijft.

INSTALLATIE DIEPWAND

Een belangrijke randvoorwaarde voor de waterdichtheid van een diepwand is een goede aansluiting tussen de wand en de onderliggende Formatie van Kedichem. Het ontwerp van de diepwand gaat uit van een penetratiediepte van 3 m in de ondoorlatende laag. De dikte van de diepwand varieert tussen 1,2 en 1,5 m. *Figuur 3* toont de dwarsdoorsnede van de bouwput voor station Blijdorp.

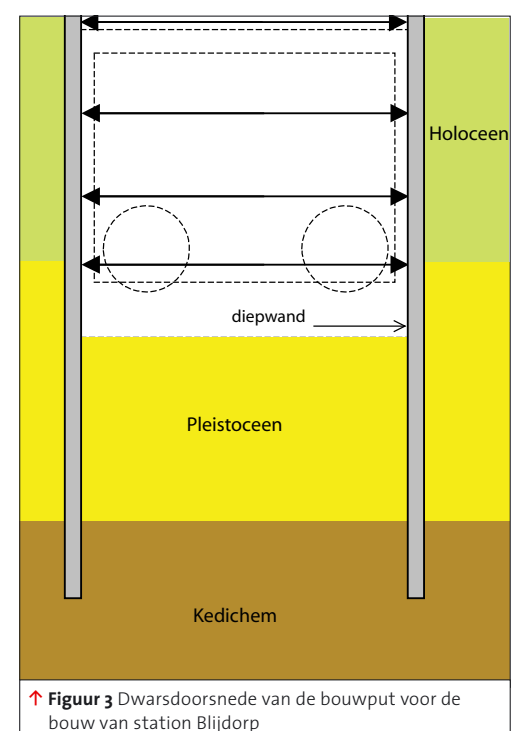
Het bestek schrijft een controle voor van de aard van de uitkomende grond tijdens het ontgraven van elke sleuf voor een diepwandpaneel. Vooral op grote diepte zijn deze controles belangrijk om onderscheid te maken tussen de waterdoorlatende (niet-cohesieve) en water-

ondoorlatende (cohesieve) lagen. In de meeste gevallen bleek de vereiste indringingsdiepte van de sleuf in de waterondoorlatende lagen voldoende. Indien de indringingsdiepte in de waterondoorlatende laag 2 m of minder was, werd de diepte van de sleuf vergroot.

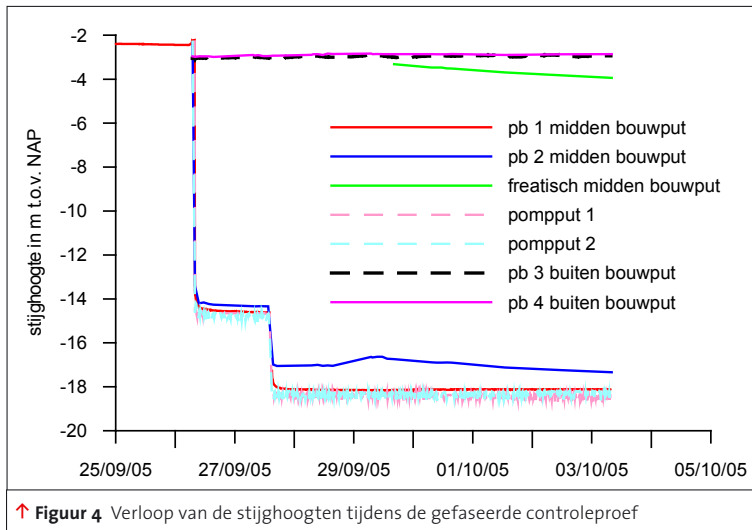
ONTWERPCRITERIA WATERDICHTHEID

Tijdens de bouw van de Willemsspoortunnel, 15 à 20 jaar geleden, werd in Rotterdam voor het eerst een Kedichem put gemaakt. De ontwerpeisen voor deze bouwput waren niet anders dan voor andere typen bouwputten in de stad: verlaging van de stijghoogte van het grondwater in het Pleistocene zand tussen NAP -17 en -35 m was buiten de bouwput toegestaan indien de verlaging niet groter was en niet langer duurde dan in het verleden. Ook toen was verlaging van de freatische grondwaterstand in de omgeving niet toegestaan. Het bestek verlangde een proef om de waterdichtheid van de diepwanden aan te tonen, maar schreef geen aanvullende eisen voor. De vereiste waterdichtheid van de diepwand werd door het bestek dus gerelateerd aan de invloed van eventuele lek op de omgeving.

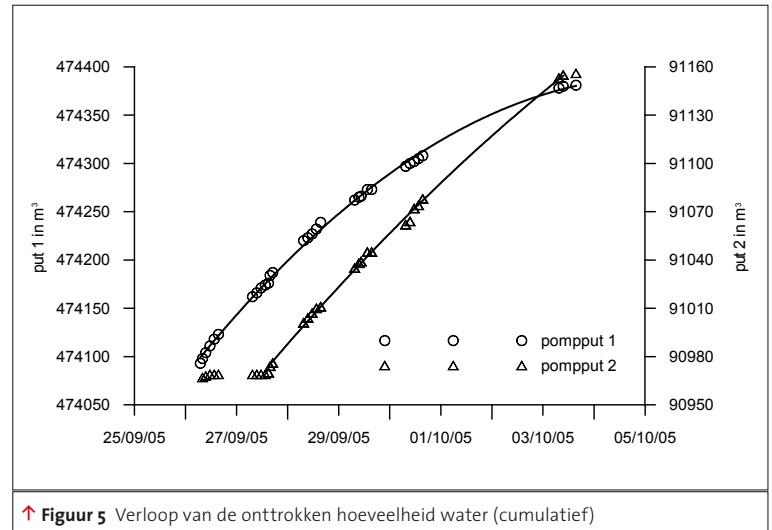
De proef ter bepaling van de waterdichtheid van de Kedichem put voor de bouw van de Willemsspoortunnel in Rotterdam had destijds een lekdebiet van 40 m³/uur als resultaat. De bouwput bestond uit diepwanden en was ongeveer 125 m lang en 40 m breed. Hierbij werd geen tweetrapsfasering inge-



↑ **Figuur 3** Dwarsdoorsnede van de bouwput voor de bouw van station Blijdorp



↑ **Figuur 4** Verloop van de stijghoogten tijdens de gefaseerde controleproef



↑ **Figuur 5** Verloop van de onttrokken hoeveelheid water (cumulatief)

bouwd, zoals in dit artikel gevolgd is. Nadat de stijghoogte in het Pleistoceen sterk was verlaagd, werd de rijzing van de grondwaterstand gemeten. De hieruit afgeleide lekkage was zeer gering en werd niet realistisch c.q. betrouwbaar geacht. Vervolgens werd bij de gewenste drooglegging enkele etmalen het lekdebiet gemeten en dit resulteerde in $40 \text{ m}^3/\text{uur}$. De hydraulische weerstand van de diepwand bleek ongeveer 100 dagen te zijn, indien wordt aangenomen dat de Formatie van Kedichem volledig waterdoorlatend is. Deze diepwand bevond zich nabij de rivier de Nieuwe Maas en mogelijk werd de stabiliteit van de sleuf c.q. de kwaliteit van de diepwand hierdoor beïnvloed. Want in de bouwput zelf was destijds sprake van een zichtbaar wateraanbod in de hoek van de bouwput grenzend aan de rivier.

In de literatuur is over de waterdichtheid van diepwanden weinig te vinden. Van de aannemerszijde schijnt een zogenaamd Berlijns criterium te bestaan, vermoedelijk afgeleid uit de vele in Berlijn gerealiseerde bouwputten in de afgelopen 15 jaar. Dat criterium geeft een maximale lek aan van $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ door een diepwand van 1.000 m^2 die bloot gesteld is aan hydrostatische grondwaterdruk. Gegevens over de beproevingsmethode, de grondgesteldheid en de geometrie van de bouwputten ontbreken echter waardoor een omrekening naar een hydraulische weerstand grote variaties laat zien.

BEPROEVINGSMETHODE

De beproevingsmethode was bij de Willemspoortunnel anders dan de methode die in dit artikel wordt beschreven. De twijfel over de betrouwbaarheid van de destijds gehanteerde beproevingsmethode was een

belangrijke reden om de methode te veranderen en om de voor het project RandstadRail uitgevoerde proeven grondig te analyseren.

In feite hangt de waterdichtheid van een bouwput met diepwanden af van:

- de in de diepwand voorkomende onregelmatigheden;
- de onregelmatigheden ter plaatse van de voegnaden;
- de waterdichtheid van de onderliggende Formatie van Kedichem;
- de inbeddingsdiepte van de diepwand in de onderliggende Formatie van Kedichem.

De verschillende bijdragen kunnen alleen door in situ proefnemingen worden gekwantificeerd. Het is echter bijna onmogelijk om afzonderlijke waarden voor deze bijdragen vast te stellen. Dit betekent dat tijdens een proef de waterdichtheid van de bouwput als geheel wordt beproefd en dat de resultaten van de proef moeten worden vertaald naar de waterdichtheid van de diepwand.

Het doel van de proef is om de stationaire lek van de bouwput op ware grootte vast te stellen. Dit betekent dat de proef zo moet worden uitgevoerd dat de maatgevende bouwphase – verlaging van de stijghoogte in de Pleistocene zandlaag met ettelijke meters – correct wordt nagebootst. Dit wordt gedaan door een directe meting van het debiet tijdens het bemalen onder stationaire omstandigheden.

Een alternatief is een indirecte meting. Hierbij wordt het omhoog komen van de stijghoogte in de Pleistocene zandlaag als gevolg van het stopzetten van de bemaling gemeten. En aan de hand hiervan wordt het lekdebiet berekend. De nadelen van de indirecte

methode zijn o.a. de onzekerheid over het vaststellen van de stationaire toestand van de stijghoogte en de noodzakelijke aanname van de effectieve porositeit van de zandlaag om het lekdebiet te kunnen berekenen.

De proef moet zijn afgerond voordat de ontgraving start. Dit maakt het mogelijk om reparaties uit te voeren voor het geval dit nodig zou zijn. Een belangrijke consequentie van de beproevingsmethode is dat alleen die diepwandgedeelten op waterdichtheid worden beproefd, die zich in de Pleistocene zandlaag bevinden. Lekken in de Holocene veen- en kleilagen bevinden, zullen niet worden opgemerkt, omdat deze lagen relatief waterdoorlatend zijn.

Voor de installatie van de peilbuizen en de pompputten voor de onttrekking van grondwater wordt water gebruikt. Dit zal de stijghoogte binnen de bouwput beïnvloeden. Deze invloed zou na enige tijd verwaarloosbaar moeten zijn, afhankelijk van de grootte van het lekdebiet uit de bouwput. De peilbuizen en pompputten voor de onttrekking van grondwater moeten daarom worden geïnstalleerd, voordat de bouwput met de diepwanden rondom volledig afgesloten is.

PROEFOPSTELLING

In de bouwput worden twee pompputten voor de onttrekking van grondwater geplaatst. Elk onttrekkingsput wordt voorzien van een onderwaterpomp, een debietmeter, een peilbuis en een niveausensor. Binnen de bouwput worden twee tot drie peilbuizen geïnstalleerd. Buiten de bouwput worden peilbuizen met het filter in de Pleistocene zandlaag op een onderlinge afstand van 50 m geplaatst en een aantal

peilbuizen voor het bepalen van de freatische grondwaterstand. De peilbuizen worden zo dicht mogelijk bij de diepwand geplaatst.

Voorafgaande aan de proef worden nulmetingen verricht van de peilbuizen en debietmeters. Deze metingen worden tijdens de proef regelmatig uitgevoerd en geregistreerd. Meetdata van de peilbuis in de onttrekingsput, van een peilbuis binnen en een peilbuis buiten de bouwput worden, met een interval van 10 minuten, nagenoeg continu geregistreerd. Gebruik is gemaakt van elektronische meetinstrumenten (type Diver).

PROEFPROCEDURE

De proef wordt in twee achtereenvolgende stappen uitgevoerd vanwege de freatische bergingscapaciteit van de Pleistocene zandlaag. De eerste stap is een verlaging ter plaatse van elke onttrekingsput tot 2 m boven de bovenkant van de waterdoorlatende Pleistocene zandlaag. Deze verlaging moet worden gehandhaafd met behulp van de niveausensor. Hierop wordt een snelle reactie van de stijghoogte verwacht, omdat de watervoerende laag alleen reageert op de verandering van de poriënwaterdruk (elastische berging). Om de stationaire situatie vast te stellen en aan te tonen, moeten de stijghoogten in de bouwput gedurende ten minste 24 uur min of meer constant zijn. Als gevolg van lekkage en grondwateraanvulling zullen de stijghoogten in het midden van de bouwput hoger zijn dan ter plaatse van de onttrekingsputten. In de tweede stap wordt de stijghoogte verder verlaagd tot enkele meters in de Pleistocene

zandlaag (het vereiste bemalingsniveau) en vervolgens met behulp van de sensor op dat niveau gehandhaafd. De bovenkant van de Pleistocene zandlaag wordt daardoor een onverzadigde zone en het spanningswater verandert in freatisch grondwater. Als gevolg van de freatische bergingscapaciteit van de Pleistocene zandlaag zal de reactie van de stijghoogte (veel) langzamer zijn dan in de eerste stap. Om een stationaire situatie in de bouwput vast te stellen en aan te tonen, moet de stijghoogte min of meer constant zijn gedurende 3 x 24 uur. De periode van 3 x 24 uur is nodig om de invloed van de freatische berging in het lekdebiet te minimaliseren. Ter illustratie is in de figuren 4 en 5 het verloop van de stijghoogten in de peilbuizen en in de onttrekingsputten en de debietmeters weergegeven. De gegevens hebben betrekking op de ontvangtschacht waar de deklaag verticale drains bevat. Hieruit kan worden afgeleid dat tijdens de controleproef de stijghoogte in de pompputten constant gehouden wordt en dat de onttrokken debieten een afnemend verloop hebben.

CONTROLEPROEF STARTSCHACHT

De diepwanden reiken tot een diepte van NAP -42,5 m. De oppervlakte van de bouwput bedraagt 20 x 50 m². De stijghoogte in de Pleistocene zandlaag, waarvan de bovenkant hier op NAP -17 m ligt, werd gemeten door zes peilbuizen die net buiten de bouwput waren geplaatst. Binnen de bouwput werd de stijghoogte door drie peilbuizen gemeten. De proefresultaten toonden gedurende beide stappen een lekdebiet van ongeveer

3 m³/uur en een stijghoogteverlaging van 0,06 m buiten de bouwput. De gemeten verlaging is in overeenstemming met de uit het lekdebiet berekende waarde, uitgaande van een afstand tot de bouwput van 5 m.

CONTROLEPROEF STATION BLIJDORP

De diepwanden reiken eveneens tot een diepte van NAP -42,5 m. De oppervlakte van de bouwput is hier 23 x 126 m². De stijghoogte in de Pleistocene zandlaag waarvan de bovenkant op NAP -17 m ligt, werd gemeten door vier peilbuizen net buiten de bouwput. In de bouwput werd de stijghoogte door drie peilbuizen gemeten. Het resultaat van de eerste stap is een lekdebiet van 7 m³/uur, van de tweede stap 60 m³/uur. De stijghoogteverlaging buiten de bouwput was 0,17 m. Hoewel deze verlaging in overeenstemming is met de uit het lekdebiet van 7 m³/uur berekende waarde, vertonen de in beide stappen gemeten lekdebieten grote verschillen. De gemeten 60 m³/uur werd mogelijk veroorzaakt door luchtballen als gevolg van de positie van de afvoerleiding ten opzichte van de debietmeter.

De omstandigheden die het opvallende verschil in gemeten lekdebieten hebben veroorzaakt, zijn in meer detail onderzocht. Het bleek dat de stijghoogte in de bouwput, als gevolg van het slecht functioneren van de niveausensor, was verlaagd tot beneden het niveau van de onderkant van de peilbuis. Als gevolg hiervan moest de stijghoogte zich eerst herstellen, voordat een goede uitvoering van de tweede stap van de proef mogelijk was. Bij deze bouwput zijn de metingen voortgezet gedurende het weer omhoog komen van de



↑ **Figuur 6** Locatie van de ontvangtschacht (op de achtergrond) met de zandophoging (foto: Aeroview)



↑ **Figuur 7** Locatie van de ontvangtschacht met de diepwanden en de verticale drains (foto: Aeroview)

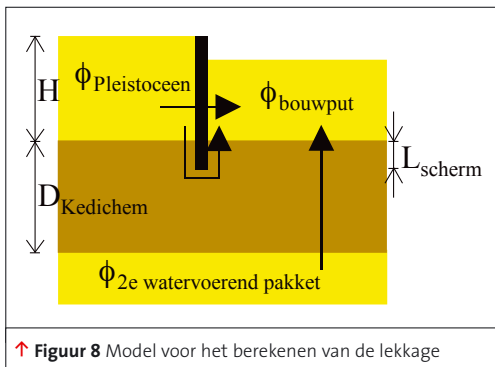
stijghoogte. Ook hieruit en uit een herhaling van de tweede stap van de proef werd het lekdebiet vastgesteld. De proefresultaten toonden lekdebieten tussen 2 en 7 m³/uur.

CONTROLEPROEF ONTVANGSTSCHACHT

De diepwanden reiken ook hier tot NAP -42,5 m. De oppervlakte van de bouwput bedraagt 15 x 33 m². Ter plaatse moest voorafgaande aan de installatie van de diepwanden een zandophoging worden aangebracht om de invloed van het nabijgelegen spoorwegemplacement van Rotterdam CS op de stabiliteit van de te ontgraven sleuf uit te sluiten (zie figuur 6).

De bovenkant van het emplacement ligt ongeveer 3 m boven het maaiveldniveau. De aangebrachte zandophoging veroorzaakt wateroverspanningen in de ondergrond. Om de consolidatie van de Holocene klei- en veenlagen te versnellen, werden verticale drains aangebracht om de wateroverspanningen te verminderen (zie figuur 7). Omdat het freatisch water en het spanningswater verschillende grondwaterregimes betreffen, zijn de verticale drains vanaf maaiveld tot 2 m boven de Pleistocene zandlaag aangebracht.

De stijghoogte in de Pleistocene zandlaag, waarvan de bovenkant op NAP -17 m ligt, werd door twee peilbuizen net buiten de bouwput gemeten. In de bouwput werd de stijghoogte ook door twee peilbuizen gemeten. Ter plaatse van de onttrekkingsputten werd de stijghoogte eveneens gemeten. De proefresultaten toonden voor beide stappen een lekdebiet van ongeveer 3 m³/uur aan. Tijdens de proef werden opvallende verschillen waargenomen tussen de meetresultaten van de twee peilbuizen binnen de bouwput. Visuele waarneming van de grondwaterstand in de bouwput wees er op dat de verschillen hoogstwaarschijnlijk werden veroorzaakt door infiltratie vanuit de antropogene laag. Daarom



↑ Figuur 8 Model voor het berekenen van de lekkage

werd een extra peilbuis in de bouwput geplaatst om de freatische grondwaterstand binnen de bouwput te meten. De verlaging van de freatische grondwaterstand werd door de aanvullende metingen bevestigd. Dit verschijnsel werd in het vervolg nader onderzocht.

Het verloop van het freatische grondwater-niveau in een zandophoging boven een water-voerend pakket gescheiden door een slecht doorlatende Holocene klei/veenlaag kan worden beschreven door:

$$h(t) = (h_o - \phi_o) \exp(-t/nc) + \phi_o \tag{1}$$

waarin:

- h_o = oorspronkelijke freatische grondwaterstand in de zandophoging [m]
- ϕ_o = oorspronkelijke stijghoogte in het watervoerend pakket [m]
- t = tijd [dagen]
- n = effectieve porositeit zandlaag [-]
- c = hydraulische weerstand Holocene klei/veenlaag [dagen]

Uit de meetgegevens kan met behulp van vergelijking (1) een hydraulische weerstand van de Holocene klei/veenlaag van 560 dagen en een effectieve porositeit van de zandophoging van 18,6% worden bepaald. Deze relatief hoge waarde van de hydraulische weerstand van de Holocene klei- en veenlagen toont aan dat er geen kortsluiting is tussen de verticale drains en de Pleistocene zandlaag. De teruggerekende waarde voor de hydraulische weerstand is echter veel kleiner dan de 2.500 dagen waarmee voor ontwerpdoeleinden normaliter wordt gerekend. Dit geeft aan dat er hier sprake is van een verminderde hydraulische weerstand van het Holocene pakket en een vergrote lek als gevolg van de aanwezigheid van de verticale drains.

In plaats van een verwachte verlaging, werd tijdens de proef een verhoging van de stijghoogte rond de bouwput vastgesteld welke het gevolg bleek te zijn van een verminderde grondwateronttrekking bij bouwputten in de omgeving. Vanwege het beperkte lekdebiet is dit in het vervolg niet nader onderzocht.

ANALYSE HYDRAULISCHE WEERSTAND

Uit alle drie proeven werd de hydraulische weerstand van de diepwand en van de Formatie van Kedichem uit de gemeten lekdebieten afgeleid. Door gebruik te maken van de kleinste kwadratenmethode kan

met het volgende model de lekkage van de bouwput worden bepaald. Dit model houdt geen rekening met de lek uit de Holocene klei- en veenlagen en evenmin met consolidatieprocessen [Verruijt, 1982]. Het gemeten debiet is samengesteld uit (zie figuur 8):

$$Q_{\text{totaal}} = Q_{\text{diepwand}} + Q_{\text{onderdoor}} + Q_{\text{Kedichem}} \tag{2}$$

waarin:

$$Q_{\text{diepwand}} = 2 \cdot (B + L) \cdot H \cdot \frac{\phi_{\text{Pleistocene}} - \phi_{\text{bouwput}}}{c_{\text{diepwand}}} \tag{3}$$

$$Q_{\text{onderdoor}} = 2 \cdot (B + L) \cdot \frac{D_{\text{Kedichem}}}{c_{\text{Kedichem}}} \cdot \frac{K_f(1-b)}{K_f(b)} \cdot \frac{\phi_{\text{Pleistocene}} - \phi_{\text{bouwput}}}{2} \tag{4}$$

$$Q_{\text{Kedichem}} = B \cdot L \cdot \frac{\phi_{\text{2e watervoerend pakket}} - \phi_{\text{bouwput}}}{c_{\text{Kedichem}}} \tag{5}$$

en:

$$K_f(m) = \int_0^{0.5 \cdot \pi} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - m \cdot \sin(\theta)^2}} \tag{6}$$

$$b = \sin\left(\frac{\pi \cdot L_{\text{scherm}}}{2 \cdot D_{\text{Kedichem}}}\right)^2 \tag{7}$$

waarin:

- B = breedte van de bouwput [m]
- L = lengte van de bouwput [m]
- H = dikte van de Pleistocene zandlaag [m]
- D_{Kedichem} = dikte van de Formatie van Kedichem [m]
- L_{scherm} = indringingsdiepte van de diepwand in de Formatie van Kedichem [m]
- $\phi_{\text{Pleistocene}}$ = stijghoogte in de Pleistocene zandlaag [m]
- $\phi_{\text{2e watervoerend pakket}}$ = stijghoogte in het tweede watervoerend pakket [m]
- ϕ_{bouwput} = stijghoogte in de bouwput (de vereiste onttrekking) [m]

Als rekenvoorbeeld is het lekdebiet voor de volgende parameters nader uitgewerkt.

- $B = 15 \text{ m}$, $L = 33 \text{ m}$, $H = 20 \text{ m}$
- $D_{\text{Kedichem}} = 16 \text{ m}$, $L_{\text{scherm}} = 3 \text{ m}$
- $c_{\text{Kedichem}} = 1.500 \text{ dagen}$, $c_{\text{diepwand}} = 670 \text{ dagen}$
- $\phi_{\text{Pleistocene}} = \text{NAP} - 2,9 \text{ m}$
- $\phi_{\text{2e watervoerend pakket}} = \text{NAP} - 2 \text{ m}$
- $\phi_{\text{bouwput}} = \text{NAP} - 18,5 \text{ m}$
- $b = 0,084$, $K_f(1-b) = 2,659$, $K_f(b) = 1,606$

Hiermee worden de volgende debieten berekend:

$$Q_{\text{diepwand}} = 44,7 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$Q_{\text{onderdoor}} = 13,2 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$Q_{\text{Kedichem}} = 5,5 \text{ m}^3/\text{dag}$$

$$Q_{\text{totaal}} = 63,4 \text{ m}^3/\text{dag}$$

Voor de analyse van de controleproef Station Blijdorp zijn drie gevallen beschouwd:

- de gemeten 60 m³/uur wordt als incorrect gezien en verder buiten beschouwing gelaten;
- het rekenkundig gemiddelde van de proefresultaten wordt in rekening gebracht;
- het lekdebiet wordt zo goed mogelijk geschat om de gemeten 60 m³/uur te corrigeren.

Voor de controleproef van de ontvangtschacht zijn vanwege de onzekerheid over het aandeel in het lekdebiet van de Holocene klei- en veenlagen twee gevallen geanalyseerd:

- het gemeten lekdebiet wordt niet gecorrigeerd. Het gemeten debiet wordt aangenomen als zijnde lekdebieten uitsluitend van Kedichem en diepwand. Want in het rekenmodel zitten enkel deze lekken en geen lek van het Holoceen.
- het lekdebiet wordt gecorrigeerd voor het berekende lekdebiet behorende bij de deklaag met verticale drains. Dit berekende lekdebiet wordt vervolgens in vermindering gebracht op het gemeten lekdebiet. Want het rekenmodel bevat uitsluitend lekdebieten van Kedichem en diepwand.

De resultaten van de verschillende beschouwingen zijn verzameld in *tabel 1*. Het modelleeren van de lekken van de bouwputten houdt twee onbekende grootheden in: de hydraulische weerstand van de diepwanden en van de Formatie van Kedichem. Voor elke bouwput werd slechts één proef uitgevoerd. Wiskundig gezien is er dan sprake van één vergelijking met twee onbekenden. De hydraulische weerstanden kunnen daarom alleen worden bepaald door een aanname te doen. In dit geval zijn voor de aanname drie mogelijkheden uitgewerkt:

- een waterondoorlatende Formatie van Kedichem;
- een zo goed mogelijke schatting van de hydraulische weerstand van de diepwand van 1.000 dagen;
- een zo goed mogelijke schatting van de hydraulische weerstand van de Formatie van Kedichem van 1.500 dagen.

De resultaten van de analyses op basis van deze aannamen zijn gepresenteerd in *tabel 1*. Wanneer alle gegevens van de drie proeven worden beschouwd, wordt met behulp van de kleinste kwadratenmethode de volgende optimale combinatie van hydraulische

	Ondoorlatende Formatie van Kedichem (c = ∞)	Beste schatting voor diepwanden (c = 1.000 dagen)	beste schatting Formatie van Kedichem (c = 1.500 dagen)
Locatie	diepwand	Kedichem laag	diepwand
Startschacht	610	1.600	1.050
Station Blijdorp (1)	700	2.680	1.520
Station Blijdorp (2)	350	630	480
Station Blijdorp (3)	610	1.820	1.160
Ontvangtschacht (4)	460	800	650
Ontvangtschacht (5)	630	1.540	1.020
Toelichting			
(1) 60 m ³ /uur buiten beschouwing gelaten			
(2) rekenkundig gemiddelde van alle proefresultaten			
(3) beste schatting van de correctie van 60 m ³ /uur			
(4) lekdebiet zonder correctie voor de uitstroming uit de Holocene klei- en veenlagen			
(5) lekdebiet gecorrigeerd voor de uitstroming uit de Holocene klei- en veenlagen			
↑ Tabel 1 Resultaten van de teruggerekende hydraulische weerstand c in dagen			

weerstanden gevonden:

- diepwand: c = 800 dagen;
- Formatie van Kedichem: c = 2.600 dagen.

Deze combinatie blijkt erg gevoelig te zijn voor kleine veranderingen in het gemeten debiet. De afstanden tussen de proeflocaties zijn – geohydrologisch gezien – te ver van elkaar om betrouwbare resultaten te krijgen. Een praktische aanbeveling voor de grootte van de hydraulische weerstanden kan daarom het beste worden gebaseerd op de in *tabel 1* gepresenteerde waarden.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Alle drie proeven tonen bevredigende resultaten en de metingen van de freatische grondwaterstand buiten de bouwput tonen op de drie locaties geen opvallende daling als gevolg van de stijghoogteverlaging in de bouwput.

Van tevoren werd een hydraulische weerstand van de diepwanden van ongeveer 1.000 dagen verwacht. Deze waarde lijkt tijdens de proeven niet te zijn gehaald. Geconcludeerd wordt dat voor ontwerpdoeleinden en voor de vaststelling van het lekdebiet in vergelijkbare omstandigheden voor de hydraulische weerstand van de diepwand een veilige waarde van 500 dagen kan worden aangehouden. Deze waarde is reëel, zelfs indien de Formatie van Kedichem als volledig waterondoorlatend wordt beschouwd.

Een hydraulische weerstand van 1.000 dagen kan voor een diepwand als bovengrens worden beschouwd. In dat geval kan voor ontwerpdoeleinden een waarde van 1.500 dagen voor de hydraulische weerstand van de Formatie van Kedichem worden aangehouden. *Tabel 1* toont

aan dat deze waarde goed overeenkomt met een hydraulische weerstand van de diepwand van ten minste 1.000 dagen.

In het geval dat er met de installatie van de diepwanden problemen worden verwacht, met de mogelijkheid van een aanzienlijke lekkage, kan de grootte van het lekdebiet worden geschat door te rekenen met een hydraulische weerstand van de diepwand die veel kleiner is dan 500 dagen, bijvoorbeeld 100 dagen. Als de hydraulische weerstand kleiner blijkt te zijn dan 100 dagen, is het waarschijnlijk noodzakelijk maatregelen te treffen of reparaties uit te voeren. Om de waterdichtheid van diepwanden te controleren wordt aanbevolen, voor vergelijkbare ondergrond condities, de procedure van de beproeving in twee stappen te volgen, zoals in dit artikel is beschreven. De proefprocedure is relatief eenvoudig, wel moet voldoende aandacht worden geschonken aan lokaal afwijkende omstandigheden.

REFERENTIES

- [1] Verruijt, A., 1982. Theory of groundwater flow (2nd ed.). Macmillan press, London, pp. 50-52.

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 april 2007 naar de uitgever worden gestuurd