

Bijzondere pompproef in gelaagd freatisch pakket

In de zomer van 2009 is in Hilversum een pompproef uitgevoerd in een gelaagd freatisch pakket, waarbij de stijghoogte in meerdere watervoerende pakketten is gemeten tot 100 meter diepte gedurende twintig dagen. Vervolgens is met een grondwatermodel de bemaling van de bouwput berekend.

IR. P.H. SPAANS / IR. J.W.A. LAKEMAN / J. LEBBINK

Aanleiding voor het onderzoek is de aanleg van een tunnelbakconstructie bij de kruising van de Soestdijkerstraatweg met het Oostereind in Hilversum. De gemeente Hilversum werkt in hoog tempo aan de verbetering van de bereikbaarheid en de doorstroming van het verkeer. Hiervoor is onder meer een aanpassing van dit kruispunt noodzakelijk. De aanpassing bestaat uit de aanleg van een tunnelbak met bovenliggende rotonde. De doorrijhoogte in de tunnel wordt 4,50 meter, zodat het vrachtverkeer er ook gebruik van kan maken. De tunnelbakconstructie kan in den droge of in den natte met onderwaterbeton worden aangelegd. De gemeente onderzoekt beide alternatieven. Bij werken in den droge is het zaak de grondwaterstand met een bemaling voldoende te verlagen. Vooraf is het mogelijk het onttrekkingsdebiet en de invloed van de bemaling op de omgeving te berekenen met een grondwatermodel.

Doel

Pompproeven zijn de meest geëigende methode om de hydraulische eigenschappen van watervoe-



Het kruispunt Soestdijkerstraatweg-Oostereind in Hilversum, locatie van de pompproef.

rende lagen en slecht doorlatende lagen binnen een tientallen of honderden meters groot gebied te bepalen. Betrouwbare waarden voor deze eigenschappen zijn nodig om met modelberekeningen het te verwachten onttrekkingsdebiet van de bouwput en de capaciteit van de bemalingsinstallatie te berekenen. De pompproef en de bemaling brengen in feite een vergelijkbare grondwaterstroming op gang. Hierdoor kan men met een pompproef alle relevante hydraulische eigenschappen voor de bemalingberekening bepalen. Pompproeven worden in Nederland regelmatig uitgevoerd, niet alleen voor bemalingen, maar bijvoorbeeld ook voor het dimensioneren van saneringen en van koude-warmteopslagsystemen.

Met een pompproef worden voor watervoerende lagen het doorlaatvermogen (KD) en de bergingscoëfficiënt (S) bepaald. Het doorlaatvermogen is een maat voor het vermogen van de grond om water door te laten. De bergingscoëfficiënt is een maat voor de verandering van de hoeveelheid water die opgeslagen of afgestaan wordt in een watervoerende laag. Voor slecht doorlatende lagen wordt de hydraulische weerstand (c) bepaald.

De pompproef in Hilversum onderscheidt zich van de meeste andere proeven door zijn omvang in ruimte en tijd. Het watervoerende pakket is namelijk meer dan 100 meter dik en de proef heeft een duur van twintig dagen. Opvallend aan de pompproef zijn de duidelijk S-vormige verlaginglijnen, die typerend zijn voor freatische pakketten.

Bodemopbouw

Op de planlocatie zijn zes boringen uitgevoerd met een diepte variërend van NAP -16 meter tot NAP -89 meter. De geohydrologische bodemopbouw is geschematiseerd tot drie watervoerende zandpakketten, gescheiden door weerstandbiedende kleilagen.

De bemaling van de bouwput zal plaatsvinden in het bovenste deel van het freatisch pakket met een onvolkomen bron. Bij een onvolkomen bron

reikt het filter niet over de volledige dikte van het freatisch pakket. Het bronfilter is in de configuratie van de pompproef ook in de bovenste helft van het freatisch pakket geplaatst. Tijdens de pompproef verlaagt de grondwaterspiegel zich, waardoor water aan de bovenzijde van het pakket vrijkomt. Het vrijgekomen water stroomt vervolgens met een zekere neerwaartse component in de richting van de bron. Om met de effecten van verticale stroming rekening te houden, is het freatisch pakket in het model in drie delen gesplitst: een bovenste, zeer dunne zone waarin het freatisch water vrijkomt, een middelste deel waar het bronfilter is geplaatst en de resterende diepere helft.

De geschematiseerde geohydrologische bodemopbouw bestaat daarmee uit de bovenste freatische zone (T1) en vier watervoerende lagen (T2 tot en met T5), gescheiden door weerstandbiedende lagen (c2 tot en met c5). Aan elke met een T gecodeerde laag wordt in de schematisatie een doorlaatvermogen en een bergingscoëfficiënt toegekend. Aan elke met een c gecodeerde laag wordt een verticale weerstand (c) toegekend.

Locatie

De planlocatie bevindt zich aan de zuidoostzijde van Hilversum in een relatief groot infiltratiegebied. Op een afstand van circa 6 kilometer aan de westzijde zijn de Loosdrechtse Plassen. Verder bevindt zich op ruim 1 kilometer aan de noordoostzijde het Laarder Waschmeer en op een kleine 1,5 kilometer aan de zuidzijde het Hilversums Waschmeer. Ook zijn er binnen 500 meter drie kleine vijvers.

Het neerslagstation Laren van het KNMI laat een gemiddelde neerslag van een kleine 900 millimeter per jaar zien. Betrouwbare gegevens van de lokale jaarlijkse verdamping zijn niet aangetroffen. Uit de tijdreeksen van vier peilbuizen van TNO vanaf 1970 tot heden blijkt de freatische grondwaterstand te variëren tussen NAP +0 meter en NAP +2,4 meter. Het maaiveld ligt op NAP +4 meter.

IN 'T KORT - PRAKTIJK

- Aanleg tunnelbak in Hilversum vereist berekening benodigde bemaling voor bouwput
- Bij pompproef wordt grondwater onttrokken om verlagingen stijghoogten te meten
- Uit stijghoogteverlagingen worden hydraulische eigenschappen van grondlagen bepaald
- Met resultaten pompproef is grondwatermodel gemaakt voor onttrekkingsdebieten

Voor de pompproef is een bron geplaatst met een onttrekkingsfilter van NAP -7,5 tot -17,5 meter. Op verschillende afstanden zijn in totaal twaalf peilbuizen geplaatst: acht in het freatische pakket (T2 en T3), twee in het middelste pakket (T4) en twee in het diepste pakket (T5). Alle relevante informatie, zoals de stijghoogten in de peilbuizen, neerslag, luchtdruk en het onttrekkingsdebiet, zijn verzameld met dataloggers. De grondwaterstanden en stijghoogten zijn daarbij automatisch gecorrigeerd voor de luchtdruk.

De pompproef begon op 12 juni 2009 en eindigde 2 juli 2009. Het onttrekkingsdebiet is gedurende de gehele periode tussen 50,2 en 50,7 m³/uur gebleven. Een dergelijk constant onttrekkingsdebiet is opvallend bij de uitvoering van een pompproef. Uit de gemeten freatische grondwaterstanden en de stijghoogten in de watervoerende pakketten zijn de verlagingen tijdens de onttrekking bepaald.

Ongeveer een maand voor aanvang van de pompproef is tweemaal proefgedraaid voor een periode van één dag. Tijdens dit proefdraaien zijn fouten door het installeren en meten met de dataloggers geëvalueerd en gecorrigeerd. Uitermate belangrijk bij de uitvoering van een dergelijke pompproef is synchronisatie van de tijd. De tijd van de dataloggers en van de computers die tijdens de pompproef worden gebruikt, moeten precies gelijk staan.

Uit de gemeten freatische grondwaterstanden en de stijghoogten in de diepere watervoerende pakketten zijn de verlagingen tijdens de onttrekking bepaald.

Tijdens de pompproef is ook de neerslag gemonitord. In totaal is in de twintig dagen 28 millimeter regen geregistreerd. De helft hiervan is aan het einde van de pompproef als een forse bui van 14,6 millimeter gevallen. Deze neerslaggebeurtenis heeft echter slechts een zeer geringe invloed op de metingen. Bij de uitwerking van de pompproef is er daarom van uitgegaan dat het netto effect van de neerslag en verdamping is te verwaarlozen.

Analyse pompproef

Voor de uitwerking van de pompproef is gebruikgemaakt van het programma MLU. Op basis van de gemeten stijghoogteverlagingen is het mogelijk de hydraulische eigenschappen van de lagen te berekenen. In MLU voert men de bodemopbouw, het onttrekkingsdebiet en de verlagingen in de peilbuizen in de tijd in. Het programma zoekt vervolgens iteratief naar die combinatie van parameters die leidt tot de kleinste kwadraten-som van de restfouten. Hierbij zijn de restfouten de verschillen tussen de gemeten en de berekende verlagingen. De verschillende lagen in het MLU-model leiden tot een groot aantal parameters. Als alle parameters worden geoptimaliseerd, is de nauwkeurigheid van de waarden onvoldoende. Daarom moet men een keuze maken in de te optimaliseren parameters. Voor de overige parameters gebruikt men dan een aannemelijke waarde.

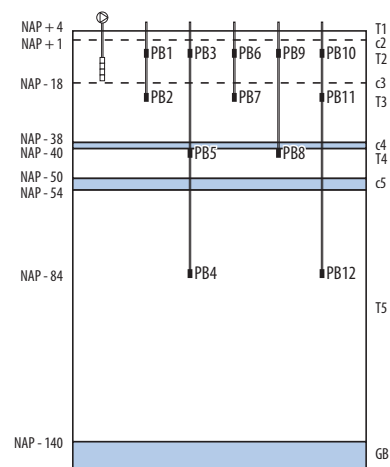
Met de geoptimaliseerde parameters berekent MLU het verloop van de verlagingen in de peilbui-

zen. De berekende verlagingen van MLU en de gemeten verlagingen tijdens de pompproef worden gepresenteerd in een grafiek. Alle berekende verlaginglijnen moeten tussen de metingen door lopen en alleen toevallige fouten laten zien. Bij te weinig of een verkeerde keuze van de berekende parameters wil het model niet goed bij de metingen aansluiten.

Uitwerking

Tijdens de pompproef zijn per peilbuis tienduizenden stijghoogteverlagingen gemeten, maar hiervan is slechts een klein deel in MLU ingevoerd. In het algemeen kan men stellen dat de data-acquisitie van een pompproef gepaard gaat met enige ruis in de vastgestelde verlagingen van de stijghoogten. Bij de analyse van de ruwe gegevens zijn diverse metingen als onbetrouwbaar of onjuist aangemerkt en uit het bestand verwijderd. Zo zijn bij enkele peilbuizen de eerste twee metingen genegeerd. De metingen in peilbuis 11 lieten zelfs zoveel fouten zien dat de hele meetreeks niet is meegenomen in de uitwerking van de pompproef.

Voor alle parameters zijn startwaarden aangenomen. Vervolgens zijn eerst het doorlaatvermo-



BODEMOPBOUW

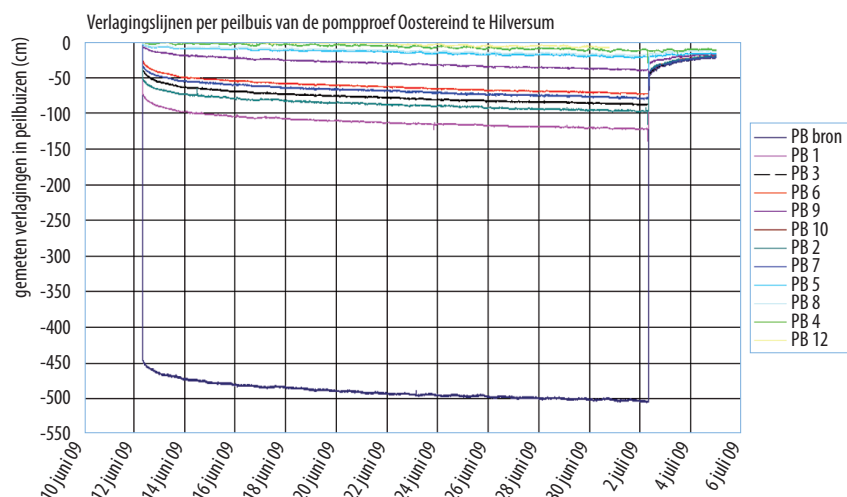
Bovenste freatische zone (T1), watervoerende lagen (T2-T5) en weerstandbiedene lagen (c2-c5).

gen en de bergingscoëfficiënt van het bovenste pakket berekend. Daarna is een steeds grotere groep parameters berekend, met als resultaat een steeds beter passend model. Uiteindelijk bleek

Diepte t.o.v. NAP (m)		Grondsoort	Benaming	Laagaanduiding
+1	+1	-	grondwaterspiegel	T1
+1	+1	-	weerstandslaag	c2
+1	-18	zand, matig tot grof	bovenste deel freatisch pakket	T2
-18	-18	-	weerstandslaag	c3
-18	-38	zand	onderste deel freatisch pakket	T3
-38	-40	klei	scheidende kleilagen	c4
-40	-50	zand, matig tot grof	tweede watervoerend pakket	T4
-50	-54	klei, weinig grind	scheidende kleilaag	c5
-54	-140	zand, fijn tot grof	derde watervoerend pakket	T5
-140		klei	geohydrologische basis	

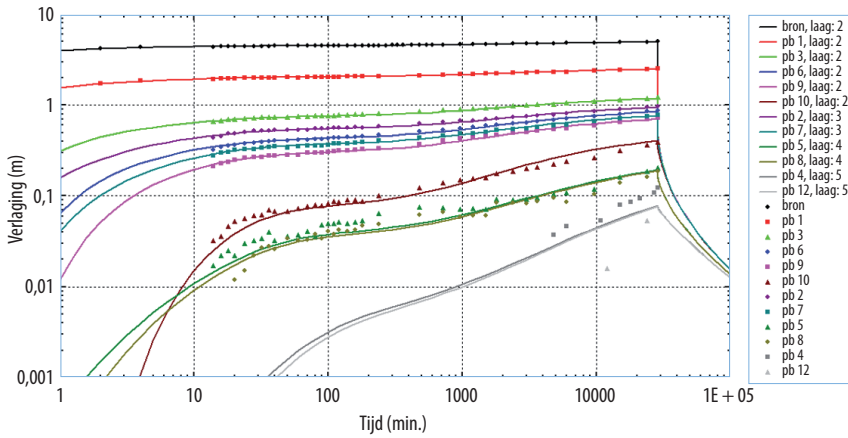
MODELSCHEMATISATIE

Geohydrologische modelschematisatie op basis van de uitgevoerde boringen.



VERLAGINGEN

Verloop van de gemeten verlagingen tijdens de pompproef (PB=peilbuis).



STIJGHOOGTEVERLAGINGEN

Berekende en gemeten stijghoogteverlagings. De gemeten verlagings in de peilbuizen zijn als punten weergegeven. De verlagingscurven zijn berekend met het programma MLU.

Laag	Code	Parameter	Berekende waarde	Standaard afwijking
grondwaterspiegel	S1	freatische bergingscoëfficiënt	0,060 (-)	4 %
weerstandslaag	c2	verticale weerstand	9,0 dag	3 %
bovenste deel freatisch pakket	T2	doorlaatvermogen	206 m ² /dag	0 %
	S2	bergingscoëfficiënt	0,0014 (-)	4 %
weerstandslaag	c3	verticale weerstand	0,5 dag	1 %
onderste deel freatisch pakket	T3	doorlaatvermogen	565 m ² /dag	1 %
	S3	bergingscoëfficiënt	0,0014 (-)	4 %
scheidende laag	c4	verticale weerstand	102 dag	9 %
tweede watervoerend pakket	T4	doorlaatvermogen	321 m ² /dag	13 %

PARAMETERS

Berekende hydraulische parameters met het analytisch meerlagenprogramma MLU.

het mogelijk om acht verschillende parameters met vrij grote nauwkeurigheid te bepalen.

Het doorlaatvermogen van het derde watervoerend pakket (T5) en de hydraulische weerstand van de daarboven liggende kleilaag (c5) konden niet worden berekend. Hiervoor werd respectievelijk 1720 m²/d en 100 dagen aangehouden. Ook de bergingscoëfficiënten van het tweede en derde watervoerend pakket (S4 en S5) werden als bekend verondersteld. Met de zogenoemde grafiek van Gun zijn deze waarden geschat op 0,0002, respectievelijk 0,001.

De meeste berekende parameters hebben aanmerkelijke waarden gekregen. Opgemerkt dient te worden dat weerstandslaag c3 wel erg klein is. Bij c3 zijn de horizontale en de verticale doorlatendheid van het freatisch pakket ongeveer even groot. Ook opvallend is de kleine waarde voor de freatische bergingscoëfficiënt van 0,06, terwijl voor zand eerder een waarde van ongeveer 0,25 mag worden verwacht. Het is echter bekend dat pompproeven in freatische pakketten vaak veel te kleine freatische bergingscoëfficiënten opleveren.

De metingen blijken opvallend goed bij het model te passen. Het verschil tussen de gemeten en berekende waarde is in de meeste gevallen minder dan 0,01 meter. De metingen in de bron

zijn niet bij de bepaling van de parameters gebruikt, omdat de extra weerstand op de putwand de resultaten zou verstoren. Toch blijken de bere-

kende verlagings ook hier prima met de metingen overeen te stemmen.

Toepassing

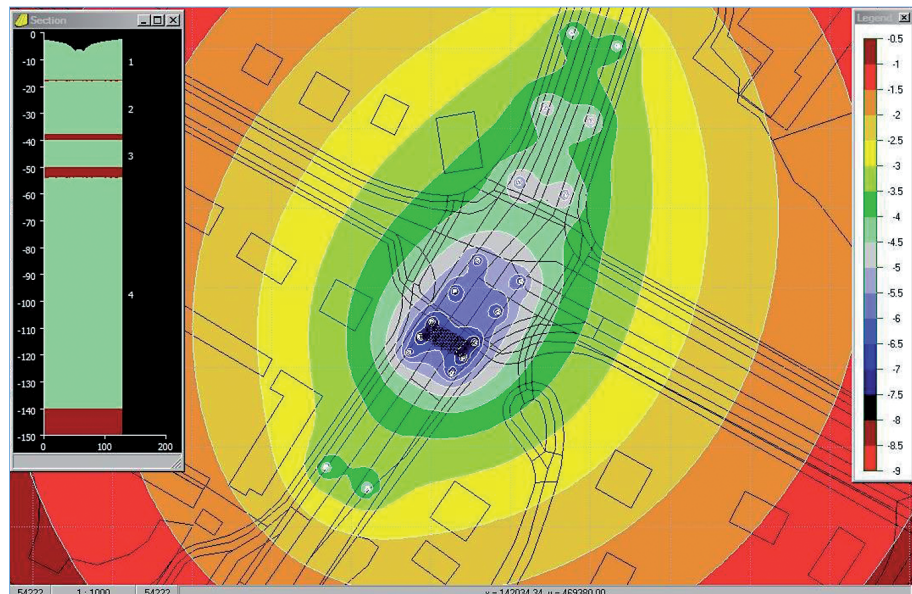
Met de uit de pompproef verkregen parameters is met het eindige-elementenprogramma MicroFEM een grondwatermodel gemaakt. Hierbij is gebruikgemaakt van dezelfde laagindeling als bij de uitwerking van de pompproef.

De grootte van het model bedraagt 15 x 12,5 kilometer. Aangezien de reikwijdte van de bemaling sterk afhankelijk is van de bemalingsduur, zijn de berekeningen niet-stationair uitgevoerd. In niet-stationaire bemalingsberekeningen worden de tijdsafhankelijke aspecten van de grondwaterstroming meegenomen. De berekening is uitgevoerd voor een bemalingsduur van zes maanden met een tijdsinterval van twee dagen.

In het grondwatermodel is in eerste instantie een gefixeerde freatische grondwaterstand bij de bouwput ingevoerd. Door het model is de verticale en laterale toestroming naar de bouwput berekend.

Vervolgens zijn in het grondwatermodel achttien bronnen met onttrekkingsdebiet gemodelleerd. De locaties van de bronnen zijn daarbij zodanig geoptimaliseerd dat de gewenste verlagings van de grondwaterstand overall kan worden bereikt. Met het grondwatermodel is een onttrekkingsdebiet berekend van circa 11.000 m³/dag. Tevens is de invloed van de bemaling op de omgeving bekend, wat van belang is voor op staal gefundeerde belendingen.

Piet-Hein Spaans en Jeroen Lakeman zijn adviseurs in de geotechniek en geohydrologie bij Spaans Watermanagement in Alkmaar. Jet Lebbink is milieuviseur bodem, grond- en oppervlaktewater bij de gemeente Hilversum.



Berekende grondwaterstand (met het programma MicroFEM) t.o.v. NAP in de omgeving van de bouwput aan het eind van de bemaling.