

*Foto: Thomas Schlijper*

Geohydrologisch model

Droge zomers in Amsterdam; wat zijn de gevolgen voor grondwaterstanden?

Door verandering in klimaat komen droge zomers steeds vaker voor en worden buien intensiever. Dit heeft een structureel veranderd grondwatersysteem tot gevolg. Het grondwatersysteem in stedelijke gebieden wordt bepaald door een samenspel van natuurlijke factoren zoals bodemopbouw, vegetatie, klimaat, rivieren en kanalen. Echter, antropogene invloeden (de invloed van de mens op het systeem) zijn dikwijls zeer bepalend voor stedelijke grondwatersystemen. Zo vormen damwanden, kelders en funderingen een barrière voor grondwater, terwijl drainagesystemen juist grondwater versneld afvoeren, waardoor natuurlijke effecten kunnen worden versterkt of afgezwakt. Het samenspel van natuurlijke en antropogene factoren bepalen het zeer complexe stedelijk grondwater.

Klimaatverandering beïnvloedt het grondwatersysteem qua neerslag en verdamping. Daarnaast heeft menselijk ingrijpen ook effect. Zo wordt regen actief geïnfiltrerd in de bodem, worden wadi's aangelegd, oppervlaktewater op een kunstmatig hoger peil gehouden en neemt het verhard oppervlak door duurzame inrichting van stedelijk gebied plaatselijk af. Door de klimaatverandering en de bijbehorende adaptieve maatregelen verandert grondwaterhuishouding in stedelijke gebieden. Hiermee veranderen ook de maatgevende grondwaterstanden in civieltechnische projecten. Vaak worden statistische waarden van historische grondwaterstanden gebruikt om een constructief en geotechnisch ontwerp te maken. En juist die ontwerpen zijn van constructies die nog decennia gebruikt gaan worden. Typische waarden zijn de GHG (gemiddeld hoge grondwaterstand) en de GLG (gemiddeld lage grondwaterstand). Er wordt echter onvoldoende rekening gehouden met de gevolgen van klimaatverandering. Daarnaast worden extreme waarden onderschat, omdat in historische reeksen waarden uitmiddelen.

Om het effect van klimaat en extreme periodes op de stedelijk grondwaterstand te illustreren biedt een geohydrologisch model uitkomst. CRUX heeft een geohydrologisch model opgesteld om het grondwatersysteem van Amsterdam te beschrijven. Hiermee is het mogelijk om een verwachting van de grondwaterstand te bepalen waarbij rekening wordt gehouden met toekomstige veranderingen.

Geohydrologisch model

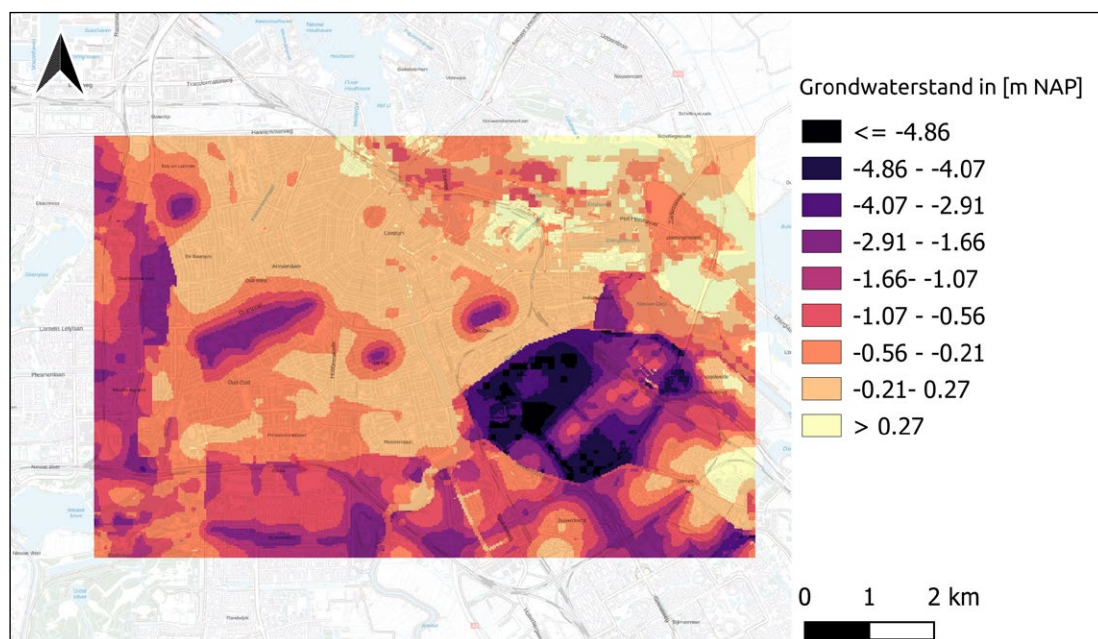
Het geohydrologisch model is opgesteld op basis van zoveel mogelijk open source bronmateriaal zoals het bodemmodel GEOTOP (Dinoloket). Daarnaast worden

randvoorwaarden opgesteld aan de hand van Basis Adressen en Gebouwen (BAG), landgebruik, grondwaterstanden van de grondwatermeetnet van Waternet en de locatie en waterpeil van rivieren, meren en polders. De bovengenoemde informatiebronnen zijn gecombineerd tot een geohydrologisch model door middel van een interactie tussen Qgis (programma voor het weergeven en bewerken van ruimtelijke data), Python en FloPy (Python bibliotheek voor het creëren van inputbestanden voor, en het aansturen van, het model MODFLOW).

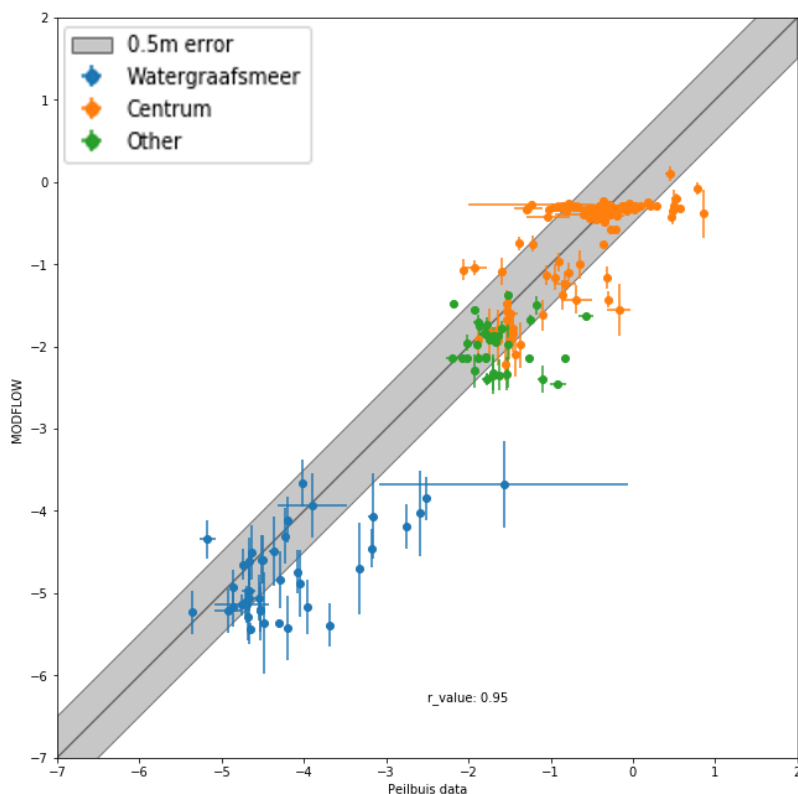
Basismodel van Amsterdam

Van het Amsterdams grondwatersysteem is een basismodel gemaakt. De gemodelleerde gemiddelde grondwaterstanden zijn weergegeven in figuur 1. In het model is duidelijk zichtbaar dat de grondwaterstand in het centrum van Amsterdam rond NAP -0,40m ligt, wat overeenkomt met het streefpeil in de grachten. Tevens zijn het Vondelpark en Watergraafsmeer ook duidelijk aanwezig als polders, waar de grondwaterstand beduidend lager is.

Om het geohydrologisch model te toetsen aan de peilbuismetingen zijn in figuur 2 de gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden tegen elkaar uitgezet. Hierin is duidelijk zichtbaar dat de meeste peilbuislocaties representatief worden gemodelleerd, met uitzondering van een aantal peilbuizen waarvan achteraf gebleken is dat deze naast damwanden, objecten of andere waterscheidingen zijn gelegen; objecten die niet allemaal in het geohydrologisch model aanwezig zijn.



Figuur 1: De gemiddelde grondwaterstanden in [m NAP] zoals gemodelleerd met het geohydrologisch model voor heel Amsterdam



Figuur 2: Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde peilbuizen. De verschillende polders en gebieden zijn duidelijk zichtbaar in de data (r_value = statistische waarde die de mate van correlatie vertegenwoordigt. 1 betekent dat de exact dataset gelijk zijn)

Schaalbaarheid van het model

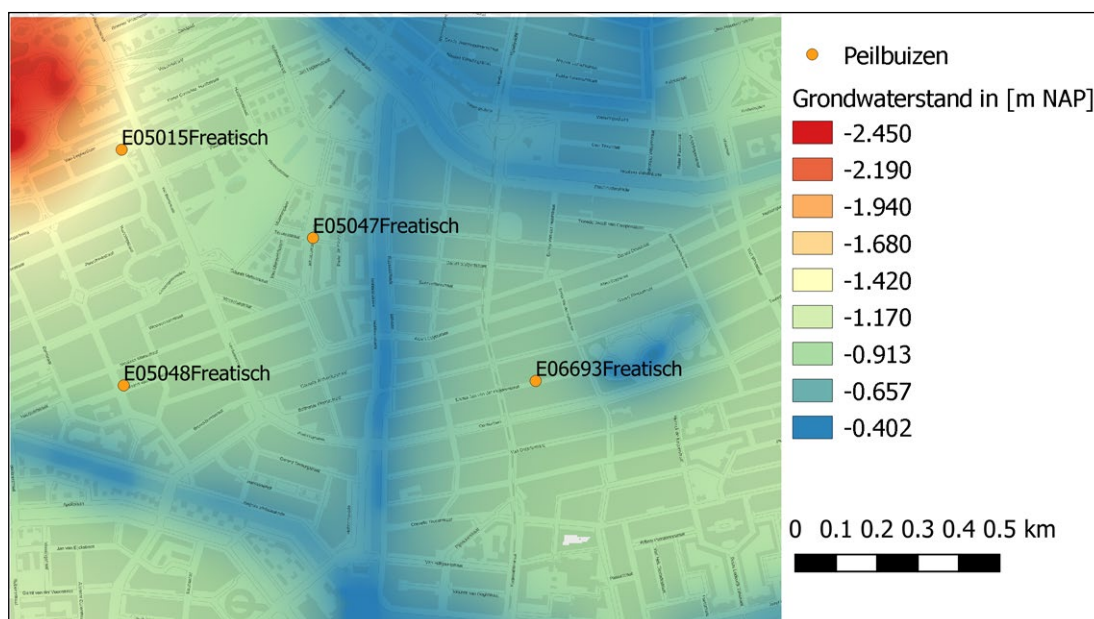
Het stedelijk grondwater wordt bepaald door natuurlijke factoren zoals bodemopbouw, rivieren, neerslag, verdamping en inzijging die allemaal een regionaal karakter hebben. Zo vertonen natuurlijke factoren binnen een afstand van enkele meters weinig abrupte

veranderingen. Echter, antropogene factoren hebben wel zeer plaatselijk invloed. Zo veroorzaken damwanden een sprong in grondwaterstand tot enkele decimeters, kunnen kelders lokaal een geheel freatisch pakket afsnijden en kunnen drainagebuizen de grondwaterstandfluctuatie sterk nivelleren. Het freatisch grondwater wordt idealiter op wijk- of regionaalniveau gemodelleerd, terwijl objecten op centimeterschaal de grondwaterstand kunnen beïnvloeden. Dit betekent dat het goed modelleren van freatisch grondwater een schaalbaarheidsprobleem is; hoeveel detaillering is nodig om een accuraat beeld van het freatisch grondwatersysteem te verkrijgen? Dit geeft ook direct de tekortkomingen van een model weer. Een grondwatersysteem wordt in grote lijnen bepaald door grootschalige processen waarvoor een groter model gewenst is. Echter, juist dan vallen zeer kleine details weg die er op een meterschaal toe doen. Het verkleinen van het raster voor kleinschalige objecten resulteert in een zeer lange modelleertijd. Er kan dus worden verondersteld dat het geohydrologisch model altijd aangepast moet worden op de onderzoeksvraag en dus constant aan verandering onderhevig is.

Concreet betekent de schaalbaarheid* dat het model voor Amsterdam een gemiddeld beeld geeft van de freatische grondwaterstanden. Echter, als op kleinere schaal gekeken wordt, dient het model opnieuw gekalibreerd te worden aan peilbuisdata om lokale effecten in ogenschouw te nemen.

Droge zomer van 2018

De droge zomer van 2018 resulteerde in uitzonderlijk lage grondwaterstanden in Amsterdam. Deze droge zomer is gebruikt om het geohydrologisch model te toetsen en om de achterliggende geohydrologische processen te beschrijven. De zomer wordt als statio-



Figuur 3: Grondwaterstand bij zeer droge zomer zoals in 2018

Peilbuizen	Langlopend gemiddelde			Zomer 2018		
	GHG	GG	GLG	Gemeten	Berekend	Verschil
E05047Freatisch	-0,38	-0,53	-0,66	-0,91	-1,02	0,11
E06693Freatisch	-0,46	-0,64	-0,84	-0,97	-1,01	0,04
E05048Freatisch	-0,67	-0,79	-0,89	-1,15	-1,09	0,06
E05015Freatisch	-1,85	-1,93	-1,99	-2,20	-1,66	0,54

Tabel 1: Peilbuisdata (Waternet). Peilbuis E05015Freatisch wijkt af vanwege de ligging ten opzichte van het Vondelpark

nair beschouwd, waar een netto verdamping optreedt (minder neerslag dan verdamping). Om de droge zomer te beschrijven wordt het Museumkwartier als voorbeeld gebruikt. Het Museumkwartier kent veel diversiteit in de grondwaterstand als gevolg van de randvoorwaarden, namelijk de Boerenwetering evenals het lager gelegen Vondelpark.

In verschillende peilbuizen van Waternet zijn de lage grondwaterstanden tijdens de zomer van 2018 geregistreerd. Een selectie is weergegeven in tabel 1. De gemeten grondwaterstand in 2018 kan tot 35 cm lager zijn dan de gemiddelde lage grondwaterstand. Het geohydrologisch model komt in grote lijnen goed overeen met de gemeten waarden van 2018. Volgens het WH-scenario voor 2085 van het KNMI kan tot tien procent meer verdamping optreden (Klein Tank, 2014). De gevolgen van het WH-scenario is daarom toegepast op een zeer droge zomer. De extra verdamping resulteert nauwelijks in een daling van grondwaterstand (tot maximaal drie cm) voor een vergelijkbare zomer als 2018. Dit betekent dat de grondwaterstanden die in de zomer van 2018 gemeten zijn, behoren tot de laagste grondwaterstanden die kunnen optreden als gevolg van de droogte. In dergelijke zeer droge zomers met een hoge netto verdamping zijn de randvoorwaarden zoals grachten, polders en stijghoogtes in dieper gelegen watervoerende pakketten dominant in het freatisch grondwatersysteem en levert een nog hogere netto verdamping slechts een beperkte reactie op in de freatische grondwaterstand.

Gematigde droge periodes

Met oog op het verleden is de zomer van 2018 extreem droog geweest, immers de grondwaterstanden zijn tot ver onder de GLG gedaald. De GLG kan ook beïnvloed worden door stijging in verdamping en afname in gemiddelde neerslag. Zo wordt voor het Museumkwartier gevonden dat de GLG circa vijf cm daalt als gevolg van het WH-scenario, indien de zomer volgt op een winter met gemiddelde neerslag.

Conclusie

Klimaatveranderingen resulteren in een grotere fluctuatie van de grondwaterstand, gedreven door toename en langere duur van verdamping en neerslag. De droge zomer van 2018 is een goed voorbeeld van een extreem neerslagtype voor een lange duur. De extreme droogte heeft geleid tot zeer lage grondwaterstanden die in een geohydrologisch model goed zijn te modelleren. Uit de modellering is gebleken dat

2018 een minimum is voor het grondwatersysteem van Amsterdam waarbij het grondwatersysteem wordt gedreven door grachten, polders en stijghoogtes in diepere watervoerende pakketten.

Onder normale omstandigheden, waarbij de grondwaterfluctuatie wordt beschreven met de GHG- en GLG-waarden, kan het model inzicht geven in het effect van de klimaatscenario's op de grondwaterstand. Zo is bepaald dat het WH-scenario tot vijf cm verlaging veroorzaakt ten opzichte van de heersende GLG in het Museumkwartier.

De modelstudie laat zien dat klimaatverandering de fluctuatie van de grondwaterstand vergroot en daarmee de gemiddelde grondwaterstanden (GHG, GLG) beïnvloedt. Echter, extremen zijn gebonden aan fysische eigenschappen van het grondwatersysteem. Bij klimaatadaptief bouwen zijn niet alleen historische grondwaterstanden van belang, maar ook de extremen die worden begrensd door de karakteristieken van het grondwatersysteem.

Met behulp van het model is het mogelijk om de maximale klimaateffecten goed in te schatten, waardoor er in het ontwerp en de uitvoering van bouwprojecten duidelijkheid kan worden verkregen in de effecten van bemaling ten opzichte van droogte.

**De schaalgrootte is bepaald middels de correlatie tussen gemodelleerde grondwaterstanden en gemeten grondwaterstanden, waarbij de gemodelleerde grondwaterstanden gewogen zijn aan de hand van een Kerneldistributie (interpolatiemethode waarbij gewicht wordt toegekend aan afstand om tot een betere waarde te komen voor een gegeven locatie) met variërende grootte. De schaalgrootte waarbij de beste correlatie gevonden geeft de toepasbaarheid van het model weer.*

Referenties

- Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Hurk, B. van den & Lenderink, G. (2014). KNMI 14: Klimaatscenario's voor Nederland. KNMI, De Bilt
- Wimmers, R. (2020). Phreatic groundwater modelling of Amsterdam: A case study on the influence of spatial development on the groundwater system Amsterdam. Tech. rep. Utrecht University
- Wimmers, R (2020). Stedelijk grondwater in Amsterdam; hoe gaan we om met infiltratie, barrière werking en klimaatverandering? H2; H₂O-Online d.d. 6 maart 2020

**R. Wimmers (Junior Adviseur Geohydrologie);
R. Brugman (Senior Adviseur Geohydrologie);
T. Sweijen (Adviseur Geohydrologie),
CRUX Engineering B.V.**