Universiteit Twente

Analyse van de verschillen tussen de grondwatermodellen Azure en Hydromedah bij de provincie Utrecht

Bachelor eindopdracht

Auteur:
Anne Siersema

Begeleiders:
Martijn Booij (Universiteit Twente)
Rob Ligtenberg (Tauw)
Hans van Gurp (Tauw)

13 juli 2017

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoek dat ik als afsluiting voor mijn bachelor gedaan heb. Na een uitgebreide zoektocht naar een gebakend onderwerp ben ik terecht gekomen bij dit onderzoek naar verschillende grondwatermodellen. Hierin heb ik sturing gehad van Martijn Booij van de Universiteit Twente.

Toen mijn plan van aanpak goed was gekeurd en ik de eerste beginselen van de werking van grondwater kende, ben ik aan de slag gegaan bij Tauw in Deventer. Bij Tauw heb ik dit onderzoek gedaan onder begeleiding van Rob Ligtenberg en Hans van Gurp. Voornamelijk inhoudelijk, maar ook het proces zelf hebben ze mij goede ondersteuning kunnen geven. Ook andere collega's bij Tauw heb ik altijd vragen kunnen stellen, wat ik als erg prettig ervaren heb.

Tijdens de afsluitende twee weken heb ik het grootste gedeelte van mijn tijd besteed aan het schrijven van dit paper. In deze weken heeft Martijn Booij goede ondersteuning gegeven mede door een goede kritische blik en goede feedback. Waar het begon met een onderwerp waarvan ik niet veel kennis had, durf ik nu te zeggen dat ik goede kennis paraat heb op het gebied van grondwater modellen. Daarnaast heeft deze periose mij goed geleerd hoe een onderzoek uitgevoerd kan worden.

Tijdens het schrijven van het plan van aanpak beschikte ik over weinig kennis over grondwatermodellen. Dit maakt het in het begin lastig om een goed plan van aanpak te schrijven voor mijn onderzoek. Na dit onderzoek ben ik een stuk bekender geworden met de grondwater modellen. In dit onderzoek ik heb twee zogenoemde modellen met 'ik-weet-het-beter-lagen' met elkaar vergeleken (Borren et al., 2016). De modellen zijn opgebouwd met zo goed als dezelfde waarnemingen en dezelfde berekeningsmethode. Het enige wat verschilt, is dat de kalibrator de modellen heeft 'proberen' te verbeteren. Het is ver genoeg gegaan dat enkele eigenschappen van de modellen niet meer op elkaar lijken. De vraag die gesteld kan worden: hoever moet de kalibrator gaan met het kalibreren van modellen?

Graag wil ik iedereen bedanken voor die mij begeleid hebben bij mijn onderzoek met in het bijzonder Martijn Booij, Rob Ligtenberg en Hans van Gurp.

Anne Siersema
Enschede, 13 juli 2017

Samenvatting

Voor het kiezen van locaties voor drinkwaterwinningen in de provincie Utrecht, is het van belang om te voorspellen wat de invloed van onttrekkingen op het specifieke gebied doet. Bij de provincie Utrecht zijn er twee grondwatermodellen die hier geschikt voor zijn: Azure en Hydromedah. Echter geven ze niet dezelfde resultaten voor dezelfde locatie en het is onduidelijk welk model het beste de werkelijkheid representeert.

Daarom zal er in deze studie worden gekeken welk model het best de werkelijkheid representeert en of er nog simpele aanpassingen in het model aan te bevelen zijn. Dit zal worden gedaan voor vier locaties rondom Utrecht: Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist. Om het doel te bereiken zijn de modellen Azure en Hydromedah vergeleken met waarnemingen voor deze vier locaties. De stijghoogtes die uit de modellen volgden, zijn vergeleken met puntmetingen van peilbuizen. Ook zijn de horizontale doorlatendheid en de weerstand van de modellagen vergeleken met REGIS II. Tevens zijn de watergangen van de modellen bekeken. Tot slot zijn de horizontale doorlatendheid, weerstand en watergangen uitgewisseld tussen de modellen om te kijken of kleine aanpassingen in het model kunnen leiden tot een verbeterde stijghoogte.

Hieruit is geconcludeerd dat de modellen Azure en Hydromedah per locatie verschillen in hoe goed ze de werkelijkheid representeren. Dit heeft voornamelijk te maken met de variatie in horizontale doorlatendheid en weerstand. Deze eigenschappen zijn per model ook locatieafhankelijk hoe goed ze overeen komen met het REGIS II model. De watergangen hebben weinig invloed op de stijghoogte. Als er per locatie wordt gekeken, representeert bij Doorn, Groenekan en Leidsche Rijn het model Azure de stijghoogte het het beste. Bij Zeist representeert Hydromedah het het beste. Bij Zeist is het daarbij aan te bevelen om de watergangen van Azure te gebruiken in plaats van die van Hydromedah.

Echter zijn er ook kanttekeningen te plaatsen bij het onderzoek. Er zijn ook aanbevelingen gemaakt voor welk model het best gebruikt kan worden voor andere locaties in de provincie. Deze zijn enkel op weinig data gebaseerd aangezien er maar naar vier locaties is gekeken. Daarom is het aan te bevelen om naar meer locaties te kijken in het onderzoek. Ook is het REGIS II model gebruikt als model dat de werkelijkheid goed representeert voor de horizontale doorlatendheid en weerstand. Een andere aanbeveling die hieruit volgt is dat er ook grondboringen vergeleken moeten worden met de modellen hiervoor.

Inhoudsopgave

Voorwoord **1**

Samenvatting **2**

Verklarende woordenlijst **5**

1 Inleiding **8**
1.1 Aanleiding 8
1.2 Probleemstelling 8
1.3 Onderzoeksdoel en onderzoeksvragen 10
1.4 Leeswijzer 11

2 Methode **13**
2.1 Data 13
2.1.1 Stijghoogte metingen 13
2.1.2 REGIS II 15
2.1.3 ModFlow 15
2.1.4 Azure 16
2.1.5 Hydromedah 17
2.2 Bepalen van de stijghoogte volgens de waarnemingen 17
2.3 Bepalen van de stijghoogte volgens de modellen 19
2.4 Bepalen van de spreidingslengte volgens de modellen Azure en Hydromedah en het REGIS II model 20
2.5 Bepalen van de watergangen volgens de modellen 21
2.6 Uitwisselen van parameterwaarden in de modellen 22
2.7 Vergelijken van modellen en waarnemingen 22
2.7.1 Visueel vergelijken 23
2.7.2 Statistisch vergelijken 24

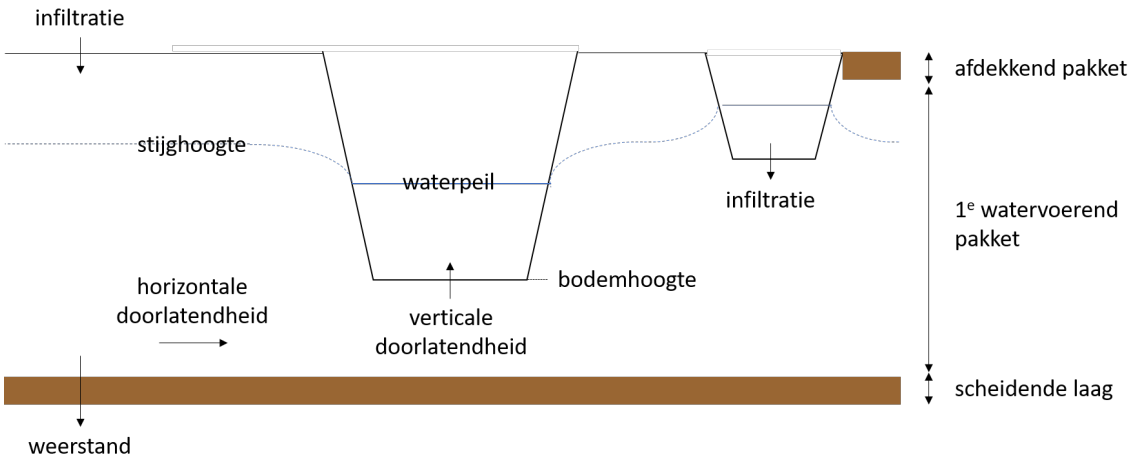
3 Resultaten **27**
3.1 Gemeten stijghoogtes 27
3.2 Verschillen in stijghoogte tussen metingen en modelresultaten 28
3.3 Verschillen tussen de weerstand, de horizontale doorlatendheid en de watergangen van de modellen en de metingen 33
3.4 De invloed van de eigenschappen van het model op de stijghoogte . . 37
3.5 Aanpassingen in het model 39

4 Discussie **42**
4.1 Toevoeging van het onderzoek 42
4.2 Beperkingen 42

5 Conclusie en aanbevelingen **44**
5.1 Conclusie 44
5.2 Aanbevelingen voor het gebruik van de modellen 45
5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek 47

Appendices **53**
A Horizontale doorlatendheid en weerstand per laag 54
B De overeenkomende lagen voor het uitwisselen van eigenschappen tussen de modellen 56
C Gebruikte puntmetingen 58
D Stijghoogtes over de tijd 62
E MAE voor aangewezen locaties 65
F Verband tussen metingen en stijghoogte per punt 66
G De verticale flux van de watergangen 69

Verklarende woordenlijst



Figuur 1: Een schematiserende dwarsdoorsnede met veelvoorkomende begrippen

afdekkend pakket	een geologische formatie waarbinnen de relatief lage doorlatendheid zorgt voor relatief weinig transport van grondwater. Deze laag staat in contact met de open lucht
bodemhoogte	voor een watergang geldt: de hoogte van de bodem onder open wateren ten opzichte van NAP
boormonsterprofiel	op basis van gesteentemonsters opgestelde beschrijving van de lithologische samenstelling en laagopbouw van de op een boorlocatie doorboorde gesteentelagen (DINOloket, 2017)
deklaag	zie afdekkend pakket
drainage	de afvoer van het water over en door de grond en via de watergangen (Moors et al., 2002)
eerste watervoerend pakket	het bovenste watervoerend pakket
flux	de instroom en uitstroom van het grondwater [m^3/dag]. Hier: de uitwisseling van het grondwater met de watergangen.
freatisch pakket	een watervoerend pakket dat in contact staat met de open lucht
gebiedsdossier	een bestand waarin informatie te vinden is over een bepaald gebied

geïnterpoleerde meetwaarden	het uitbreiden van een reeks getallen met punten die binnen die reeks liggen (De Financiële Begrippenlijst, 2017)
grondwater	water beneden het aardoppervlak (Moors et al., 2002)
grondwatermodel	specialistische rekentechniek om de grondwaterstanden of de grondwaterstroming te voorspellen (Wareco, 2017). Elk computermodel en deelgebied is een apart grondwatermodel
horizontale doorlatendheid	het vermogen van de grond om de vloeistof door te laten in horizontale richting [m^2/dag] (Moors et al., 2002)
infiltratie	de neerwaartse stroming van water waarbij het water van het oppervlak de grond instroomt (Moors et al., 2002)
infiltratiefactor	het volume water dat door infiltratie de grond binnentreedt in verticale richting per dag [m^2/dag]
interpolatie	het schatten van een waarde in een punt uitgaande van bekende waarden (Jcwf, 2017)
modelgrens	de grens van een gebied tot waar er voldoende data beschikbaar is
modelresultaten	resultaten die volgen uit een modelberekening
onttrekking	het ontnemen van grondwater uit de bodem
onttrekkingsdebiet	de hoeveelheid grondwater dat ontnomen wordt uit de bodem [m^3/dag]
peilbuis	algemene term voor een buis voorzien van een filter, waarin de stijghoogte kan worden gemeten (Moors et al., 2002)
pompstation	een locatie waar grote hoeveelheden grondwater wordt onttrokken
scheidende laag	een geologische formatie waarbinnen de relatief lage doorlatendheid zorgt voor relatief weinig transport van grondwater
spreidingslengte	lengtemaat voor de afstand waarover de grondwaterverlaging door de onttrekking merkbaar zal zijn [m] (Grondwatergegevens, 2017)
stationair model	een model dat niet afhankelijk is van tijd

stijghoogte	de hoogte van het grondwater voor een bepaald pakket
verticale doorlatendheid	zie weerstand
waterbalans	de vergelijking van de hoeveelheid water betrokken bij toevoer, afvoer, onttrekking en verandering in berging over een bepaalde periode en binnen een gegeven gebied (Moors et al., 2002)
watergang	een langgerekte verlaging in het terrein van natuurlijke of kunstmatige oorsprong die permanent of periodiek stromend water bevat (Moors et al., 2002)
waterhoogte	de hoogteligging van de waterspiegel ten opzichte van een referentievlak, zoals NAP (Moors et al., 2002)
waterpeil	zie waterhoogte
watervoerend pakket	een geologische formatie waarbinnen de relatief hoge doorlatendheid aanzienlijk transport van grondwater mogelijk maakt (Moors et al., 2002)
watervoerende laag	zie watervoerend pakket
weerstand	weerstand die een bepaalde laag biedt tegen verticale grondwaterstroming (Moors et al., 2002)

1 Inleiding

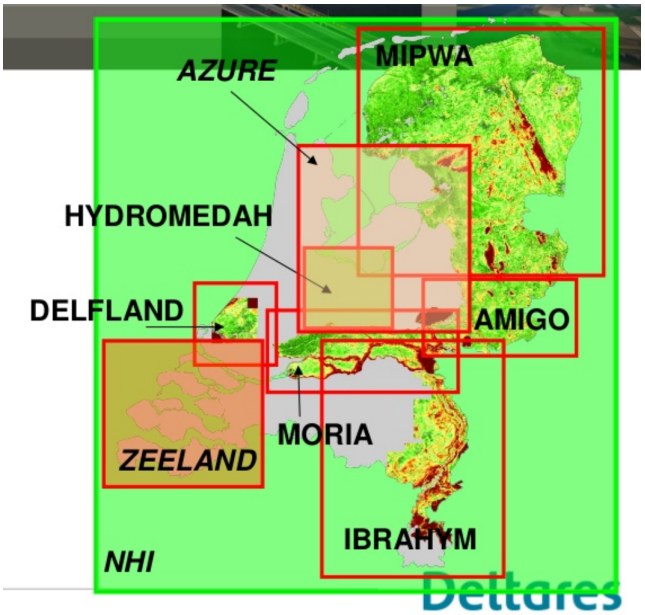
1.1 Aanleiding

In het kader van een samenwerkingsovereenkomst (SOK) tussen Vitens en de Provincie Utrecht zal er kritisch gekeken worden naar de locaties voor drinkwaterwinningen. Vitens heeft namelijk op de Utrechtse Heuvelrug en in het poldergebied bij Utrecht meerdere drinkwaterwinningen. De provincie heeft er belang bij dat de zichtbare invloeden van de drinkwaterwinningen beperkt blijft. Daarom zal er een groot aantal grondwatermodelleringen uitgevoerd gaan worden door de provincie. Echter bestaat er voor de provincie Utrecht geen dekkend grondwatermodel met voldoende detail. Hierdoor is het onzeker wat het effect is van een bepaalde grondwateronttrekking op de stijghoogte.

1.2 Probleemstelling

Voor het modelleren van grondwater, kan gebruik worden gemaakt van verschillende soorten grondwatermodellen. De meeste modellen zijn gebaseerd op wiskundige vergelijkingen (Rushton, 2004). Voorbeelden hiervan zijn ModFlow, ParFlow, HydroGeoSphere and OpenGeoSys (USGS Office of Groundwater, 2016; Maxwell et al., 2009; Therrien et al., 2010; Kolditz et al., 2012). In deze studie wordt het model ModFlow gebruikt. Dit model is een geschematiseerd 3D model dat bestaat uit grondlagen. Elke laag heeft zijn eigen eigenschappen zoals weerstand (c) en horizontale doorlatendheid (kD). Ook bevat het model de verticale doorlatendheid en infiltratie van de aanwezige watergangen. Hieruit kan vervolgens de stijghoogte en de grondwaterstroming van een gebied berekend worden. Het ModFlow model wordt in Nederland gebruikt voor verschillende deelgebieden. Elk deelgebied heeft zijn eigen eigenschappen die als input voor het model gebruikt kunnen worden. Een ModFlow-model van een deelgebied met de bijbehorende eigenschappen, zal in dit rapport een model genoemd worden. In figuur 2 is weergegeven welke modellen (deelgebieden) er beschikbaar zijn voor Nederland.

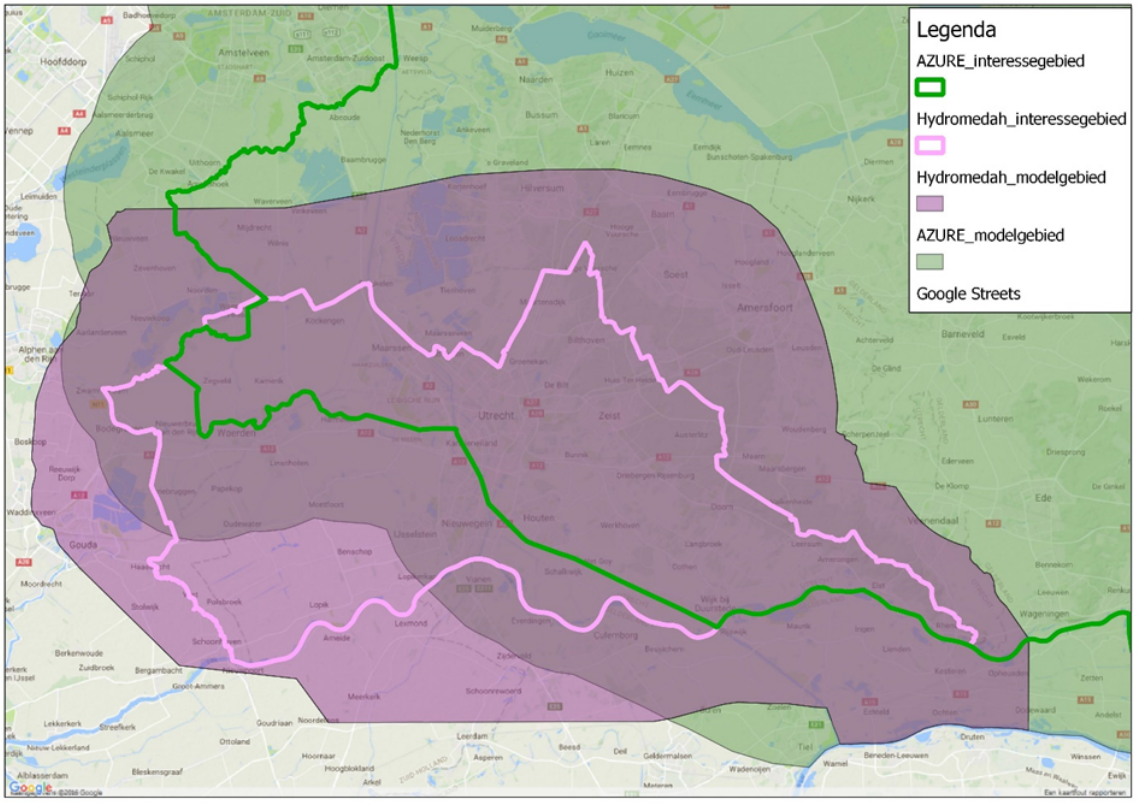
Voor de provincie Utrecht zijn twee modellen beschikbaar die elkaar overlappen: Azure 1.02 en Hydromedah (zie figuur 3) (van Gurp and Blonk, 2017). Hydromedah is tevens uitgebreid met Moria aan de zuidzijde. In deze studie wordt met Azure bedoeld: Azure 1.0.2. Met Hydromedah wordt bedoeld: Hydromedah met een uitbreiding van Moria aan de zuidzijde. Azure en Hydromedah hebben dezelfde basis: beide zijn ModFlow-modellen en ze maken beide gebruik van data uit het REGIS-model (Hekman et al., 2014; Borren et al., 2009). Het belangrijkste verschil



Figuur 2: De beschikbare grondwatermodellen van Nederland die gebruik maken van de model code ModFlow (Minnema, 2016)

tussen de modellen is dat ze anders gekalibreerd zijn.

Er is een voorstudie gedaan om te kijken welk model het best gebruikt kan worden voor de provincie Utrecht (van Gurp and Blonk, 2017). Bij deze voorstudie is gekeken naar de pompstations Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist. Deze locaties zijn gekozen omdat ze een goede afspiegeling zijn van verschillende type winningen in Utrecht. De winningen Doorn en Zeist bevinden zich op de Utrechtse Heuvelrug, terwijl Groenekan en Leidsche Rijn zich in het poldergebied bevinden. De modellen reageren verschillend voor het poldergebied en de Heuvelrug. Bij grondwateronttrekkingen in het poldergebied hebben de beken en rivieren een grote invloed op de stijghoogte. Echter zijn er in de Heuvelrug veel minder watergangen aanwezig. Hierdoor hebben beken en rivieren een kleine invloed op de stijghoogte. Modellen kunnen bovendien verschillend reageren bij variërende onttrekkingsdebieten. Daarom zijn alle modelresultaten per specifieke locatie doorgerekend voor een onttrekking van 2, 4 en 8 miljoen m^3/jaar. De voorstudie heeft voor de verschillende onttrekkingen per locatie gekeken naar de gevoeligheid van diverse eigenschappen van het model. Deze eigenschappen zijn: de horizontale doorlatendheid, de weerstand en de doorlatendheid van de watergangen. Tot slot is er gekeken naar de Bethunepolder. Deze polder wordt gebruikt om de invloed van het onttrekkingsdebiet en de watergangen op de modelresultaten te bekijken.



Figuur 3: De modelgebieden Azure en Hydromedah (de Koning, 2017)

Uit de voorstudie is geconcludeerd dat de modellen zich vergelijkbaar gedragen voor de Utrechtse Heuvelrug (van Gurp and Blonk, 2017). Echter geven de laaggelegen poldergebieden wel een verschillend resultaat in stijghoogte van het eerste watervoerend pakket. Dit verschil ontstaat doordat de modellen verschillende eigenschappen hebben, zoals verschillen in verticale doorlatendheid van de lagen en watergangen. Uit de resultaten van de Bethunepolder kan opgemaakt worden dat Azure 1.02 poldergebieden beter nabootst dan Hydromedah.

Echter is in de voorstudie de stijghoogte, doorlatendheid en weerstand niet specifiek vergeleken met resultaten. Ook is er niet specifiek naar een enkele modellaag gekeken, maar enkel naar alle lagen in totaal. Daarom is deze studie ontstaan.

1.3 Onderzoeksdoel en onderzoeksvragen

Deze studie zal verder bouwen op de resultaten van de voorstudie. Het zal evenals de voorstudie kijken naar de pompstations Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist.

Het onderzoeksdoel is: 'Het vergelijken van gemeten en gemodelleerde stijghoogtes en verbetering van gemodelleerde stijghoogtes voor de pompstations Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist.' In deze studie zullen de volgende onderzoeksvragen worden beantwoord om het onderzoeksdoel te bereiken:

1. Hoe zien de gemeten stijghoogtes eruit voor de locaties Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist voor de stationaire situatie?
2. Wat zijn de verschillen tussen de gemeten stijghoogtes en de berekende stijghoogtes die uit de modellen Hydromedah en Azure volgen voor de locaties Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist voor de stationaire situatie?
3. Wat zijn de verschillen in de weerstand, horizontale doorlatendheid en de verticale doorlatendheid van de watergangen tussen de modellen en tussen de modellen en de metingen/REGIS II?
4. Welke eigenschappen van de modellen zijn de belangrijkste oorzaak voor de verschillen in stijghoogtes tussen de modellen en tussen de modellen en de gemeten stijghoogtes voor de locaties Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist?
5. Wat zijn de verschillen tussen gemeten en gemodelleerde stijghoogtes als de weerstand, horizontale doorlatendheid en de watergangen worden uitgewisseld tussen de modellen Azure en Hydromedah?

Hieruit zal worden geconcludeerd welk model het best presteert bij de locaties in Utrecht. Ook zal er een aanname gedaan worden waarom het model het best presteert. Tot slot zal er worden geconcludeerd of er nog aanpassingen aan het model gewenst zijn voor een voor een nauwkeuriger modelresultaat.

1.4 Leeswijzer

In het verslag zal na deze introductie, de methode aan bod komen. Hierin zal toegelicht worden welke data er is gebruikt en zal beschreven worden wat en waarom er is gedaan om antwoorden te kunnen geven op de onderzoeksvragen.Vervolgens zullen in hoofdstuk 3 de resultaten worden weergegeven. Het hoofdstuk is ingedeeld in meerdere paragrafen waarbij elke paragraaf een onderzoeksvraag beantwoord. In de discussie die volgt wordt kritisch gekeken naar de methode die is gebruikt. Daarna zal in hoofdstuk 5 de conclusie en aanbevelingen behandeld worden. De conclusie geeft antwoord op de hoofdvraag: 'Hoe kunnen kleine aanpassingen in het model ervoor zorgen dat de verschillen tussen de modellen en de metingen kleiner worden voor dezelfde locaties en onttrekkingen?'. De aanbevelingen zijn opgedeeld

in aanbevelingen voor verder onderzoek en aanbevelingen voor het kiezen tussen de twee modellen voor de provincie Utrecht. Tot slot komen de bijlages. Hiernaar zal ter onderbouwing in het verslag worden verwezen.

2 Methode

In paragraaf 2.1 Data worden allereerst beschreven hoe de metingen van de stijghoogtes verkregen worden en zal het REGIS II model aan bod komen. Ook worden de ModFlow-modellen Azure en Hydromedah beschreven. Vervolgens zal in de resterende paragrafen de methode van het onderzoek uitgelegd worden.

Een schematische weergave van de methode staat weergegeven in figuur 4. De kleuren geven aan voor welk onderdeel de stap geldt. De gebiedsdossiers zullen aan bod komen bij de de bepaling van de stijghoogte volgens de waarnemingen en het bepalen van de stijghoogte volgens de modellen. Elk blok in de derde en vierde kolom geeft een apart doel aan die gedaan is om de deelvragen te beantwoorden. Elke paragraaf in dit hoofdstuk behandeld één of meer van deze doelen. De eerste en tweede kolom geven de stappen aan die gezet zijn om tot een bepaald doel te komen. De laatste kolom geeft uiteindelijk de aanbevelingen voor het gebruik van de modellen aan.

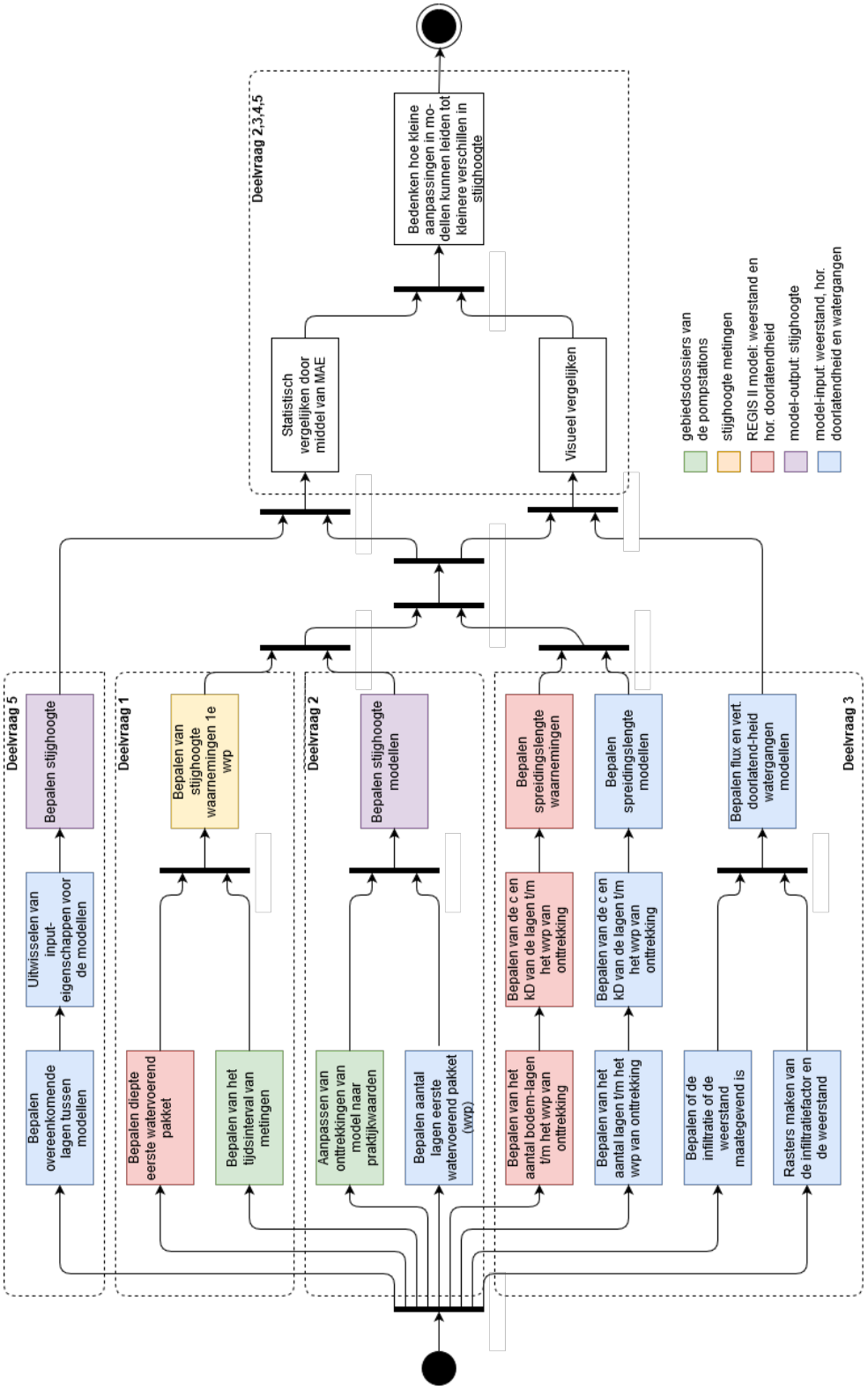
De stijghoogte volgens metingen wordt vergeleken met de stijghoogte die volgt uit de modellen Azure en Hydromedah. Dit wordt allereerst visueel vergelijken en daarna ook met statistische vergelijkingen. De weerstand en horizontale doorlatendheid van de lagen tot en met het watervoerend pakket van onttrekking worden op dezelfde manier vergeleken. Dit wordt gedaan voor zowel de modellen als het REGIS II model. Tevens worden de verschillen tussen de watergangen van de modellen visueel vergeleken. Als laatst wordt er gekeken naar het effect van de parametrisatie van de watergangen, de weerstand en de verticale doorlatendheid van de modellen op de stijghoogte onderzocht. Hiervoor zijn input-eigenschappen van Azure in het model Hydromedah ingevoerd en andersom. Met dit allen is geconcludeerd welk model het best presteert op welke locatie. Ook wordt er gekeken met welke mogelijke aanpassingen in het model zorgen voor een betere representatie.

2.1 Data

De stijghoogte De data die wordt gebruikt, zijn stijghoogtemetingen van peilbuizen en het model REGIS II. In de paragrafen hieronder wordt dit uitgebreid behandeld. Tevens komen de iModFlow-modellen Azure en Hydromedah aan bod.

2.1.1 Stijghoogte metingen

Metingen van stijghoogtes zijn te vinden via DINOloket. (TNO, 2017b). Hierin zijn veel peilbuizen van Nederland te vinden met het bijbehorende coördinaat, diepte van



Figuur 4: Activiteitendiagram van de methodiek

het filter en stijghoogtes over de tijd. De bodemopbouw met daarin onder andere weerstand en horizontale doorlatendheid wordt uit het REGIS II model gehaald. Dit model is tevens beschikbaar via DINOloket (TNO, 2017c; Vernes et al., 2005). Via DINOloket zijn op twee manieren de diepte van de watervoerende pakketten te bepalen: via puntlocaties in ondergrondgegevens en via geïnterpoleerde vlakken op basis van puntlocaties (TNO, 2017a).

2.1.2 REGIS II

Voor het modelleren van grondwaterstroming, zijn de horizontale doorlatendheid (kD) van de watervoerende pakketten en de weerstand (c) van de scheidende lagen van belang. Deze waarden zijn overgenomen uit het REGIS II model. REGIS II is een model dat is gebaseerd op veel meetresultaten, maar lang niet alle beschikbare meetresultaten (Vernes et al., 2005). Voor het bepalen van de horizontale doorlatendheid en weerstand van de lagen, is onder andere gebruik gemaakt van 14.500 boorbeschrijvingen. Deze zijn vervolgens ruimtelijke geïnterpreteerd. Hierbij is er ook rekening gehouden met breuklijnen.

2.1.3 ModFlow

De modellen Hydromedah en Azure zijn iModFlow-modellen. iModFlow is een uitbreiding op het ModFlow-2005 model (Verkaik et al., 2016). ModFlow is een driedimensionaal grondwatermodel (Hoffmann et al., 2003). Het rekent met de eindige-differentie methode. Hierbij bestaat het model uit veel cellen die ieder zijn eigen eigenschappen, invoer en uitvoer heeft. De grondwaterstroming kan elke richting aannemen. Hierbij wordt het cel voor cel uitgerekend. Het model is bedoeld voor stationaire en niet-stationaire berekeningen.

Modflow rekent met verschillende pakketten. Deze pakketten hebben onder andere te maken met eigenschappen van de stijghoogte, flux, grondwaterstroming en observaties. De pakketten die in deze studie van belang zijn, zijn:

1. River package: geeft de eigenschappen van watergangen weer in infiltratiefactor [m^2/dag] en verticale doorlatendheid [m^2/dag].
2. Transmissivity package: geeft de horizontale doorlatendheid [m^2/dag] per modellaag weer.
3. Vertical resistance package: geeft de weerstand [dagen] per modellaag weer.
4. Well package: geeft de onttrekeningen per modellaag weer [m^2/dag].

Een ander pakket dat van belang is, is de iMOD segment package (Vermeulen et al., 2017). Dit pakket is een gedetailleerdere versie van de river package. Het geeft bovenop de eigenschappen van de river package, ook nog eigenschappen zoals de breedte en diepte van een watergang aan. De iMOD segement package is een pakket van Azure en kan uitgelezen, gemaakt en bewerkt worden in het programma iMOD. Echter is het niet volledig beschikbaar voor iModFlow. iModFlow ziet de iMOD segment package als een river package. iMOD is een programma dat de bestanden kan lezen die dienen als invoer en uitvoer voor iModFlow. Het programma kan gebruikt worden om op een gebruiksvriendelijke manier bestanden aan te passen en visueel weer te geven.

De pakketten bestaan uit allemaal eigenschappen die opgeslagen zijn in rasterbestanden. Deze waarden in de rasterbestanden kunnen handmatig per cel aangepast worden. Ook kan er in het model aangegeven worden dat de waardes van het gehele raster vermenigvuldigd of opgeteld kunnen worden met een bepaalde waarde.

Met deze pakketten kan ModFlow verschillende resultaten berekenen. De resultaten waar in deze studie naar gekeken wordt, zijn de stijghoogte [m tov NAP] per laag en de flux [m^3/dag] per laag.

2.1.4 Azure

Het gebied van Azure is geschematiseerd in 9 modellagen. Het basismodel heeft een horizontale resolutie van 100 bij 100 meter (Hekman et al., 2014). Echter zijn er veel onderdelen van het model gebouwd met andere resoluties. Zo hebben enkele watergangen resoluties van 25x25 meter of 250x250 meter.

Het model is, net als bij Hydromedah, bedoeld voor stationaire en niet-stationaire berekeningen.

Voor het verkrijgen van data, maakt Azure gebruik van de Grondwatermodeldatabank (Hekman et al., 2014). In de databank zijn regionale modellen opgenomen en is een koppeling gemaakt met REGIS-lagen. In deze databank staan veel gegevens van de ondergrond die vertaald zijn naar modelparameters (Borren et al., 2016). Er is niet openbaar bekend hoe het Azure aan de grondwateraanvulling voor het stationaire model komt.

De kalibratie is gedaan door de kwalitatieve prestatie van het model te verbeteren. Er is hierbij dus niet gekeken naar de kwantitatieve afwijking van de modelresultaten vergeleken met metingen. Wel zijn er een aantal kwalitatieve criteria opgesteld. Hierbij wordt er gekeken naar de schematisaties van stijghoogtes, stroombanen, watergangen, winningen en waterbalansen.

2.1.5 Hydromedah

Het gebied van Hydromedah is geschematiseerd in 8 modellagen. Het basismodel heeft een horizontale resolutie van 25 bij 25 meter (Borren et al., 2009). Echter rekenen gedeeltes van het model met resoluties van 100x100 meter, zoals de watergangen.

Veel data wordt uit het REGIS II model gehaald. Enkel is de weerstand en horizontale doorlatendheid op veel plekken op de Utrechtse Heuvelrug niet beschikbaar via REGIS II. De weerstand is voor die plekken verkregen uit studies van drinkwaterbedrijven. De grondwateraanvulling voor het stationaire model is berekend via metaSWAP (Schaap and Dik, 2007). Hiervoor is in metaSWAP een niet-stationaire modelberekening gedaan voor de jaren 1989 tot 2000 op dagbasis.

De kalibratie van de horizontale doorlatendheid en weerstand voor de stationaire berekeningen is gedaan via de representermethode (Borren et al., 2009; Valstar, 2001; Valstar et al., 2004). Deze methode is uitermate geschikt om MODFLOW modellen te kalibreren. Het houdt rekening met de meetwaarden, modelvoorspelling, parameterschattingen en prioriteitswaarden. Hierbij beschrijft het de variatie tussen meetwaarden en modelwaarden. De representermethode rekent automatisch uit wat de fout is door te kijken naar de gevoeligheid van de parameters (Boukes and Valstar, 2007). Hierdoor kan de kalibrator parameters gemakkelijk aanpassen. De meetwaarden die zijn gebruikt voor de horizontale doorlatendheid en weerstand, volgen uit het REGIS II model en pompproeven. Echter zijn verlagingskegels moeilijk te modelleren. Daarom zijn metingen binnen een straal van 250 meter van een pompstation niet meegenomen bij de kalibratie. Met dit laatste is geen rekening gehouden in deze studie.

Door de kalibratie, is het merendeel van de stijghoogten maximaal 30 cm gestegen of gezakt vergeleken het model voordat het gekalibreerd was (Borren et al., 2009). Informatie over watergangen is verkregen via literatuurbronnen en kennisexperts van opdrachtgevers en opdrachtnemers van Alterra en TNO/Deltares.

2.2 Bepalen van de stijghoogte volgens de waarnemingen

Er zal gekeken worden naar de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Dit is gedaan omdat de stijghoogte in dit pakket invloed heeft op de vegetatie en landbouw. Het is wettelijk bepaald dat er bij een onttrekking rekening gehouden moet worden met vegetatie en landbouw (MER, 1994a; MER, 1994b).

Voor het verkrijgen van waarnemingen van stijghoogtes in het eerste watervoerend

pakket, is gekeken naar metingen van peilbuizen. Voor de locatie van een peilbuis, is onder andere gelet op de spreidingslengte. De spreidingslengte is de lengte vanaf het pompstation waarbij er een verlaging van de grondwaterstand zal plaatsvinden door de onttrekking. De spreidingslengte is te berekenen via formule 1.

$$\lambda = \sqrt{kD * c} \tag{1}$$

waarbij:
λ: spreidingslengte $[m]$
kD: horizontale doorlatendheid $[m^2/\text{dag}]$
c: = weerstand $[dagen]$

De peilbuizen die meegenomen worden in deze studie, voldoen aan de volgende voorwaarden:

1. De peilbuis ligt op een maximale afstand van het pompstation van één maal de spreidingslengte. Dit is gekozen omdat deze lengte de maximale afstand is dat de onttrekking bij benadering zichtbaar is in het gebied. De weerstand en horizontale doorlatendheid voor de te bepalen spreidingslengte is te halen uit het REGIS II model (Vernes et al., 2005).
2. Het filter van de peilbuis moet zich in het eerste watervoerend pakket bevinden.
3. Als eis is er gekozen om peilbuizen mee te nemen als ze metingen hebben over een tijdsinterval van meer dan tien jaar. Voor andere peilbuizen wordt specifiek beoordeeld of ze meegenomen kunnen worden. Hiervoor moeten de peilbuizen minstens over een dataset beschikken waarbij 36 metingen over een tijdsinterval van 3 jaar zijn gedaan.

De hoogte van de watervoerende laag is te bepalen via boormonsterprofielen uit Dinoloket en het REGIS II model (TNO, 2017a; Vernes et al., 2005). Het watervoerend pakket voor het REGIS II model is bepaald door te kijken naar de scheidende lagen in het totale pakket. Een veen- of kleilaag die grotendeels volledig het gebied bedekt ligt en die op de meeste punten een weerstand heeft van minimaal 100 dagen, wordt in deze studie gezien als scheidende laag. Hierbij wordt onder gebied bedoeld: een cirkelvormig oppervlakte met een radius van één maal de spreidingslengte om het pompstation heen. Hierbij is gekozen dat peilbuizen enkel meegenomen worden als er zich geen enkele kleilaag of veenlaag bevindt tot aan het filter van de peilbuis.

Om te bepalen uit welke jaren metingen worden meegenomen, wordt gekeken naar de onttrekking. De onttrekking per jaar is vastgelegd in de gebiedsdossiers. Indien een onttrekkingsdebiet verandert, zal de stijghoogte hierdoor ook veranderen. De stijghoogte heeft echter tijd nodig om te stabiliseren naar een nieuwe stijghoogte.

Er is aangenomen dat bij een variatie in onttrekking van minder dan 1 miljoen m^3 per jaar de stijghoogte binnen een jaar genoeg stabiliseert. Data kan daarom één jaar na een verandering in onttrekking weer meegenomen worden.

Ook wordt er gekeken naar de stijghoogte over de tijd op een locatie waarbij het pompstation geen invloed uitoefent. Dit zal gaan om een locatie op een afstand van één tot anderhalf maal de spreidingslengte tot het pompstation. Hierdoor kunnen enkele peilbuizen eruit gehaald worden die in de jaren hebben gemeten waarvan de stijghoogte over het algemeen afwijkt van het gemiddelde.

Een peilbuis die heeft gemeten over een tijdsinterval van minder dan drie jaar wordt niet meegenomen. Ook wordt een peilbuis niet meegenomen als het aan beide onderstaande voorwaarden voldoet:

- Als de peilbuis over een tijdsinterval meet waarvan de stijghoogtes van het tijdsinterval erg afwijken van de gemiddelde stijghoogte. Dit is niet te wijten aan een verandering in onttrekkingsdebiet van het pompstation.
- Als de peilbuis een meetreeks heeft met een tijdsinterval tussen de drie en tien jaar

2.3 Bepalen van de stijghoogte volgens de modellen

Voor het verkrijgen van de stijghoogtes vanuit de modellen, zal het model uitgevoerd worden. Hiervoor zal allereerst een gebied gekozen moeten worden waarvoor het model uitgevoerd wordt. Om een gebied te vergelijken van één maal de spreidingslengte rondom een locatie, wordt een gebied gemodelleerd van drie maal de spreidingslengte (Rijkswaterstaat, 2017). Op deze afstand is de invloed van de modelgrens op de ingreep verwaarloosbaar. De spreidingslengte die hiervoor gebruikt is, is de spreidingslengte die volgt uit de modellen. Dit is beschreven in paragraaf 2.4.

Deze onttrekkingsdebieten van de modellen zijn aangepast, omdat de meegeleverde (veelal vergunde) onttrekkingsdebieten soms niet overeenkomen met de debieten in de praktijk. Door dezelfde onttrekkingsdebieten overal te gebruiken, is het makkelijker om de gemeten stijghoogtes te koppelen aan de stijghoogtes die volgen uit de modellen. De in deze studie gebruikte debiet is bepaald door het gemiddeld debiet uit de praktijk te nemen voor een bepaald tijdsinterval. Dit tijdsinterval is hetzelfde als het tijdsinterval dat meegenomen is voor de keuze van de metingen van de peilbuizen. De onttrekkingsdebieten zijn te vinden in de gebiedsdossiers van de pompstations.

Bij de modelresultaten is gekeken naar de stationaire stijghoogtes voor het eerste watervoerend pakket. Voor het bepalen hiervan zijn de stijghoogtes meegenomen van de modellagen die in het eerste watervoerend pakket liggen (Ackerman et al., 2010). Dit wordt gedaan aan de hand van formule 2.

$$h_{wvp} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i * kD_i)}{\sum_{i=1}^{n} kD_i} \tag{2}$$

waarbij:
h_{wvp}: stijghoogte van het eerste watervoerend pakket $[m]$
n: de hoeveelheid modellagen dat in het watervoerend pakket liggen
h_i: stijghoogte van modellaag i $[m]$
kD_i : horizontale doorlatendheid van modellaag i $[m^2/dag]$

Om de modellagen te bepalen die in het eerste watervoerend pakket zitten, zijn er twee stellingen gemaakt

- Een modellaag waarbij de weerstand honderd dagen of meer is, heeft een scheidende laag aan de onderkant van de modellaag
- Als de stijghoogte tussen twee lagen meer dan vijf centimeter verschilt, zitten de modellagen in twee verschillende watervoerende pakket of scheidende lagen

Indien een modellaag aan geen van beide stellingen voldoet, kan er gesteld worden dat ze in hetzelfde pakket liggen. Wanneer de lagen aan één van de twee stellingen voldoen, zal visueel worden gekeken in welk pakket de modellagen liggen. Dit is een eigen keuze geweest. De toekenning van een modellaag aan een watervoerend pakket of scheidende laag hangt binnen Tauw af van de specialist.

2.4 Bepalen van de spreidingslengte volgens de modellen Azure en Hydromedah en het REGIS II model

De spreidingslengte is bepaald voor dezelfde locaties als de meegenomen peilbuizen. Tevens is er gekozen om de lagen mee te nemen tot en met het watervoerend pakket van onttrekking. Dit is gekozen omdat het eerste watervoerend pakket van belang is bij de bepaling van de stijghoogte. Maar daarboven op heeft, volgens medewerkers van Tauw, het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt de grootste invloed op de stijghoogte in het model.

De spreidingslengte volgt uit de weerstand en horizontale doorlatendheid door middel van formule 1. De weerstand en horizontale doorlatendheid waarmee de modellen worden vergeleken, komen uit het REGIS II model. Het REGIS II model is gebaseerd

op metingen. Het nadeel is dat REGIS II geïnterpoleerde waarden bevat. Hierdoor kan het waarden bevatten die niet overeenkomen met praktijkwaarden. Meer uitleg over REGIS-II is te vinden in paragraaf 2.1.2. Er is gekozen om het REGIS II model te gebruiken in plaats van de boorgaten zelf om twee redenen:

1. het is veel tijdsefficiënter om met REGIS II te werken dan boorputten
2. REGIS II bevat geïnterpoleerde waarden voor de weerstand en horizontale doorlatendheid. Terwijl boorgegevens van boorputten enkel geen waardes toegekend hebben. Boorgegevens worden enkel beschreven.

Ook zijn de weerstand en horizontale doorlatendheid uit het model Azure en Hydromedah gehaald. Dit wordt gedaan door middel van de bijgeleverde databestanden van het model (zie paragraaf 2.1 Data). Net als bij het REGIS II model, zijn hier ook de lagen meegenomen tot en met het watervoerend pakket van onttrekking.

Welke modellagen er in het tweede watervoerend pakket liggen, is op dezelfde manier bepaald als het eerste watervoerend pakket. Zie hiervoor paragraaf 2.3. Ook de bepaling van de lagen uit REGIS II die in het tweede watervoerend pakket liggen, zijn op dezelfde manier bepaald als het eerste watervoerend pakket, Zie hiervoor paragraaf 2.2.

2.5 Bepalen van de watergangen volgens de modellen

Onder watergangen wordt oppervlaktewater verstaan. Dit oppervlaktewater wordt in verticale richting uitgewisseld met het grondwater. De modellen werken met een een infiltratiefactor en een verticale weerstand van de watergang (beiden in m^2/dag). Voor het gemak is de verticale weerstand in deze studie verticale doorlatendheid genoemd zodat het meer overeenkomt met de eenheid. Als de oppervlaktewaterpeil hoger ligt dan de berekende stijghoogte, zal er infiltratie plaatsvinden. In het andere geval vindt stroomt het water vanuit de grond, het oppervlaktewater in. Hierbij wordt de verticale doorlatendheid van het model gebruikt (Harbaugh, 2005).

De watergangen van het model Azure en het model Hydromedah worden visueel vergeleken. Hiervoor zijn er kaarten gemaakt in het programma ArcGIS. door enkele stappen uit te voeren:

- Bepalen welke peil het hoogst ligt: de oppervlaktewaterpeil of de stijghoogte
- De totale infiltratiefactor bepalen
- De totale verticale doorlatendheid bepalen

Vervolgens wordt ook de flux visueel vergeleken. De infiltratiefactor en verticale doorlatendheid zijn de eigenschappen waarmee het model rekent (Vermeulen et al., 2016). De flux zijn de uitkomsten van het model in m^3/dag. De flux is tevens in kaart gebracht door middel van ArcGIS.

2.6 Uitwisselen van parameterwaarden in de modellen

Er wordt gekeken of of bepaalde eigenschappen van een model zorgen voor een stijghoogte die meer op de waarnemingen of het andere model lijkt. Hiervoor worden de weerstand en doorlatendheid van Hydromedah vervangen door de weerstand en doorlatendheid van Azure en omgekeerd. Dit wordt gedaan voor de lagen tot en met het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt. Tevens worden de watergangen van Azure vervangen door de watergangen van Hydromedah en andersom.

Eigenschappen van een model kunnen in een paar stappen veranderd worden. Zie paragraaf 2.1.3 voor een uitgebreide beschrijving hiervan. Waar rekening mee moet worden gehouden, is dat modellaag 1 van Hydromedah niet hoeft overeen te komen met modellaag 1 van Azure. Dit heeft te maken met het feit dat de modellen niet evenveel lagen hebben en de dikte per laag verschilt. Om toch de modellagen van het ene model in het andere model te krijgen, is bepaald wat de grootte van het gedeelte van de ene laag is ten opzichte van de andere laag. Hierbij is gekeken naar de hoogte van de lagen. In bijlage B staat exact per laag van Hydromedah welke laag van Azure en welk deel ervan overeenkomt en andersom.

2.7 Vergelijken van modellen en waarnemingen

Er zijn veel studies gedaan naar het vergelijken van grondwatermodellen met waarnemingen (Ackerman et al., 2010; Barnett et al., 2012; Wondzell et al., 2009; Hassan, 2004). Voornamelijk tijdens het kalibreren van de modellen wordt dit gedaan. Kalibratie van stationaire modellen bevat meerdere stappen (Ackerman et al., 2010). Eén stap daarvan is het kijken naar welk model het best de waarnemingen simuleert. Een manier is om dit te doen aan de hand van statistische technieken. Om vervolgens het model te verbeteren, zal gekeken worden naar:

- een kwalitatieve vergelijking van de verticale grondwaterstroming aan de hand van gesimuleerde en gemeten stijghoogtes
- een kwantitatieve vergelijking door middel van statische verdelingen van de gewogen verschillen van de stijghoogtes

De kwalitatieve vergelijking is in deze studie 'visuele vergelijking' genoemd. De kwantitatieve vergelijking is 'statistische vergelijking' genoemd. Volgens Ackerman is het van belang om een gevoeligheidsanalyse van de input parameters mee te nemen. Deze gevoeligheidsanalyse is al in de voorstudie gedaan (van Gurp and Blonk, 2017). Daarom zal dit niet weer meegenomen worden.

2.7.1 Visueel vergelijken

Om de stijghoogte visueel te vergeleken, worden allereerst de puntmetingen omgezet naar ruimtelijke gegevens. Vervolgens zijn de stijghoogtes visueel vergeleken om een ruimtelijk beeld te krijgen van de stijghoogte. Hierdoor kan er gekeken worden of er vreemde waarden zich voordoen alvorens er statistisch vergeleken gaat worden. Ook de watergangen zijn visueel vergeleken. Hierbij is gekeken naar als er verschillen in stijghoogte zich voordoen, deze verschillen ook te zien zijn in de visuele kaarten van de infiltratie, verticale doorlatendheid en flux.

Puntmetingen kunnen omgezet worden naar ruimtelijke gegevens met behulp van interpolatie. Er zijn veel verschillende soorten interpolatie. Het programma dat gebruikt is voor de interpolatie, is ArcGIS. Geographic information system (GIS) modellen zijn namelijk een krachtige manier om interpolatie mee toe te passen (Gong et al., 2014). Vooral het bepalen van stijghoogte kan goed hiermee vanwege de ruimtelijke verdeling van data (Arslan, 2012; Nas and Berktay, 2010). Dit is voornamelijk het geval als het grondwater zich in het tweede watervoerend pakket of dieper bevindt. De mogelijke soorten interpolatie via de tool Spatial Analyst in ArcGIS zijn (Esri, 2017b):

- Inverse Distance Weighting (IDW): des te dichter de punten bij de cel liggen, des te meer de invloed van de punt is op de cel.
- kriging: deze vorm lijkt erg op IDW. Echter houdt kriging ook rekening met de totale ruimtelijke verdeling van de punten (Esri, 2016).
- natural neighbour: tussen de punten zijn Thiessen polygonen gemaakt. De punten hebben een grotere invloed naarmate ze een groter gedeelte van het Thiessen polygon (Sibson, 1981). Deze techniek lijkt erg op kriging. Echter zal het punten die in het verlengde van een ander punt liggen niet meepakken.
- spline: maakt een mathematische functie van de nabijgelegen punten om de waarde van een cel te bepalen (Esri, 2017c). De functie minimaliseert de totale krommingen van het oppervlakte. Hierdoor wordt een effen oppervlakte verkregen dat door de punten loopt.

- trend: maakt een mathematische functie (polynoom) van de nabijgelegen punten om de waarde van een cel te bepalen.

Elk van deze interpolatietechnieken zijn goed op een andere manier. Voor elke soort punten die geïnterpoleerd wordt, kan het zijn dat er een andere interpolatietechniek het beste is (Burrough, 1986). Over het algemeen wordt aangenomen dat het beste IDW gebruikt kan worden. In veel studies is geconcludeerd dat IDW beter is dan technieken die gebaseerd zijn op kriging (Weber and Englund, 1992; Weber and Englund, 1994; Gallichand and Marcotte, 1993; Dingman, 1994; Boman et al., 1995; Brus et al., 1996; Declercq, 1996; Dirks et al., 1998; Moyeed and Papritz, 2002).

IDW en kriging zijn de meest gebruikte methodes om eigenschappen van grondwater te interpoleren (Arslan, 2012; Gong et al., 2014). Deze twee methodes verschillen qua uitkomsten weinig van elkaar (Mirzaei and Sakizadeh, 2016). Voor kleine datasets, waarbij de punten ver van elkaar liggen, verschillen de uitkomsten van interpolatie meer. Gebaseerd op een studie met 65 onttrekkingen in het gebied bij Andimeshk en Shush bij Iran, wordt kriging meer aanbevolen voor het interpoleren van grondwater (Mirzaei and Sakizadeh, 2016). Er bestaan verschillende vormen van kriging: Ordinary Kriging (OK) en Empirical Bayesian Kriging (EBK). Hierbij kost EBK meer tijd, maar lijkt beter dan OK.

Van elke peilbuis is de gemiddelde stijghoogte bepaald. Vervolgens zijn deze stijghoogtes geïnterpoleerd en in kaart gebracht met behulp van Inverse Distance Weighting (IDW) interpolatie (Childs, 2004). Dit is gemaakt met het programma ArcGIS (Esri, 2017a). Er is voor IDW gekozen aangezien de meeste studies hier meer voorkeur aan geven dan de methode kriging. De techniek spline en trend zijn niet gekozen, aangezien deze de waarde bepalen met een functie. Doordat de bodemopbouw sterk verschilt in de ruimte, kan er niet van uitgegaan worden dat de waarden volgens een perfecte functie verlopen.

2.7.2 Statistisch vergelijken

Veel studies over grondwater maken gebruik van de gemiddeld absolute fout (MAE) en de wortel van de gemiddelde kwadratische fout vergelijking (RMSE) of vergelijkbare varianten van deze twee (Hassan, 2004; Barnett et al., 2012; Wondzell et al., 2009). Hierbij worden vooral de stijghoogte en de horizontale doorlatendheid (k) van de grondlagen vergeleken met statistische technieken.

De gemiddelde absolute fout geeft het gemiddelde absolute verschil aan. Hoe meer het getal nul nadert, hoe meer het model op de puntmetingen lijkt. Echter is deze statistische formule een zwakke indicator om de kwaliteit van het model te waarbor-

gen (Anderson et al., 2015). Het wordt uitgerekend met formule 3.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |(O-E)|_i \tag{3}$$

waarbij:
MAE: gemiddelde absolute fout
n: hoeveelheid metingen
O: geobserveerde waarde
E: verwachte waarde

Tevens kan er gebruik gemaakt worden van de wortel van de gemiddelde kwadratische fout vergelijking (RMSE). Zie hiervoor formule 4. Deze formule geeft hogere scores aan grote verschillen doordat het kwadratisch is. Daarom heeft het meer last van de effecten van uitschieters (Anderson et al., 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O-E)_i^2} \tag{4}$$

waarbij:
$RMSE$: wortel van de gemiddelde kwadratische fout
n: hoeveelheid metingen
O: geobserveerde waarde
E: verwachte waarde

De MAE en RMSE is uitgerekend voor de verschillen in stijghoogte voor de modellen en de meetwaarden. Hierbij is voor de MAE de gemiddelde afwijking berekend van alle locaties van peilbuizen die meegenomen zijn. Dit is ook gedaan voor de RMSE. Ook na uitwisselingen van eigenschappen van het model, is de MAE berekend. Echter is niet de RMSE hiervoor berekend, omdat uit de resultaten bleek dat er nauwelijks verschil zat tussen MAE en RMSE.

De MAE is tevens bepaald voor de verschillen in spreidingslengte tussen de modellen Azure en Hydromedah en het REGIS II model voor de vier locaties. Hierbij zijn alle locaties van de peilbuizen die gebruikt zijn voor de stijghoogte meegenomen om de MAE te bepalen.

Om te voorkomen, dat de MAE scheef trekt doordat de meetpunten niet ruimtelijk verspreid liggen in het gebied van onttrekking, zullen de locaties van de meegenomen punten visueel worden vergeleken. Ook worden de gemiddelde stijghoogtes van een peilbuis gemiddeld met een andere peilbuis, als locaties van beide peilbuizen identiek zijn.

Als laatste zal er ter controle voor de ruimtelijke spreiding ook de MAE bepaald worden voor locaties die vooraf bepaald zijn. Het zal gaan om het punt exact op de pomplocatie, vier punten op een afstand vanaf het pompstation van een half maal de spreidingslengte en vier punten op een afstand vanaf het pompstation van één maal de spreidingslengte. Bij deze vier punten ligt er één punt exact ten noorden, één ten oosten, één ten zuiden en één ten westen van het pompstation. Dit is niet mogelijk voor puntmetingen. Daarom zullen hier geïnterpoleerde meetwaarden vergeleken worden met modelresultaten.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk wordt gekeken in hoeverre de gemeten stijghoogte overeenkomt met de stijghoogte die volgt uit de modellen. Tevens zullen de weerstand en doorlatendheid die uit de modellen volgen, vergeleken worden met metingen. Ook zullen de watergangen van de modellen met elkaar vergeleken worden. Dit alles wordt gedaan om te kijken of deze eigenschappen mogelijke verschillen in stijghoogte veroorzaken.

3.1 Gemeten stijghoogtes

In tabel 2 zijn de jaartallen weergegeven die gebruikt zijn voor het benaderen van stationaire grondwaterstanden voor een bepaald onttrekkingsdebiet. Bij Groenekan zijn de jaren van 1987 t/m 1990 niet meegenomen. Het onttrekkingsdebiet wijkt volgens het gebiedsdossier in deze jaren veel af van de onttrekkingsdebieten van de jaren ervoor en erna.

Tabel 2: De meegenomen jaartallen voor een bepaald onttrekkingsdebiet

	onttrekkingsdebiet [$miljoen\ m^3/jaar$]	tijdsinterval [$jaartal$]
Doorn	0,9 ± 0,2	1974-2003
Groenekan	7,5 ± 1,0	1976-1986 1991-2000
	6,0 ± 1,0	2000-2010
Leidsche Rijn	0	1970-1996
	4,5 ± 0,5	2004-2016
Zeist	4,2 ± 0,7	1971-2010

Op alle locaties wordt de stijghoogte voornamelijk beïnvloed door de onttrekking. Er zijn verder weinig invloeden van buitenaf.

Er is gekeken naar grafieken waarbij stijghoogte uitgezet is over tijd voor een bepaalde peilbuis. In bijlage D zijn deze grafieken weergegeven. In de grafieken is te zien dat de stijghoogte op de locatie van het pompstation veranderd op het moment dat er een verandering is in het onttrekkingsdebiet. Echter is deze verandering niet te zien in een peilbuis die op een afstand van één tot anderhalf maal de spreidingslengte van het pompstation ligt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de verandering in stijghoogte bij het pompstation voornamelijk ontstaat door de verandering in onttrekking.

De meegenomen puntmetingen hangt onder andere af van de ruimtelijke locatie. Hiervoor is de spreidingslengte bepaald. De gebruikte verticale doorlatendheid en weerstand van de lagen is te vinden in bijlage A. De puntmetingen die uiteindelijk meegenomen zijn voor het bepalen van de stijghoogte, zijn weergegeven in bijlage C. Deze punten zijn uiteindelijk geïnterpoleerd zodat ze makkelijk vergeleken kunnen worden met de modelresultaten. De kaarten met de geïnterpoleerde stijghoogten, zijn te vinden in paragraaf 3.2.

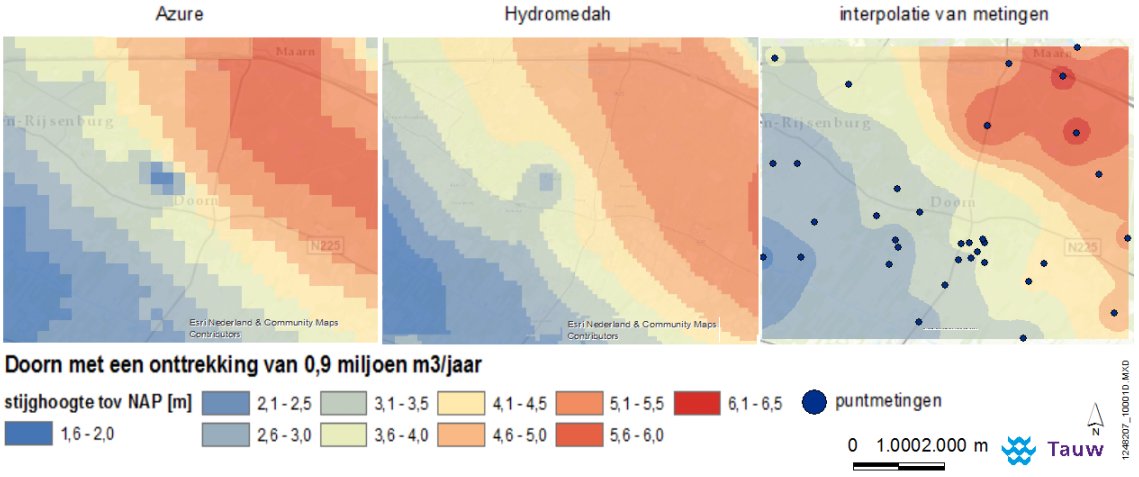
3.2 Verschillen in stijghoogte tussen metingen en modelresultaten

De lagen die meegenomen zijn voor het bepalen van de stijghoogte van de modellen, zijn te vinden in tabel 3. De horizontale doorlatendheid die gebruikt is om de gemiddelde stijghoogte te bepalen voor het eerste watervoerend pakket is te vinden in bijlage A. De modellen hebben gerekend met aangepaste onttrekkingsdebieten voor de vier gebruikte pompstations. De onttrekkingsdebieten zijn te vinden in tabel tabel 2).

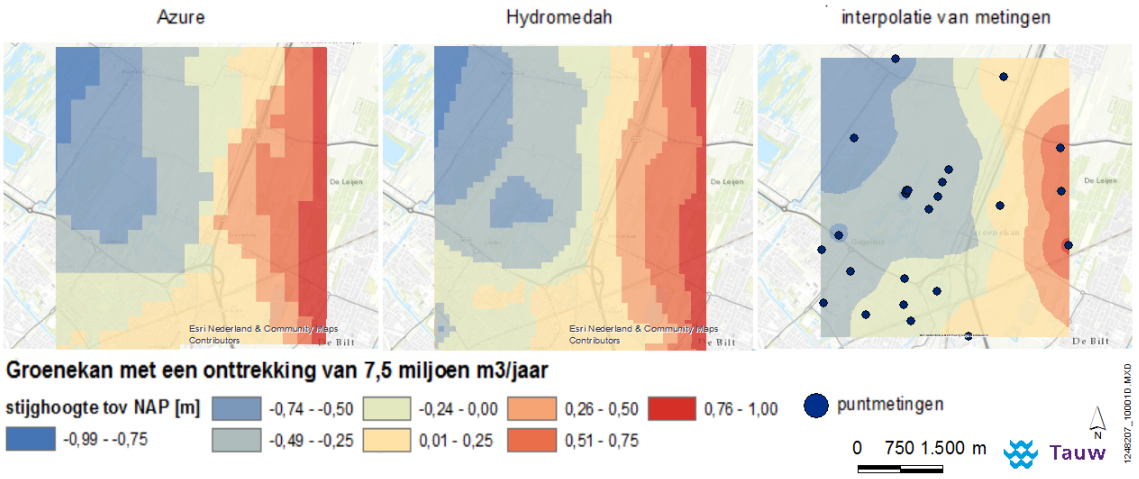
Tabel 3: De lagen uit het model die meegenomen zijn voor de bepaling van de stijghoogte

	Azure	Hydromedah
Doorn	1 t/m 6	1 t/m 2
Groenekan	1 t/m 6	1 t/m 3
Leidsche Rijn	1 t/m 6	1 t/m 4
Zeist	1 t/m 7	1 t/m 4

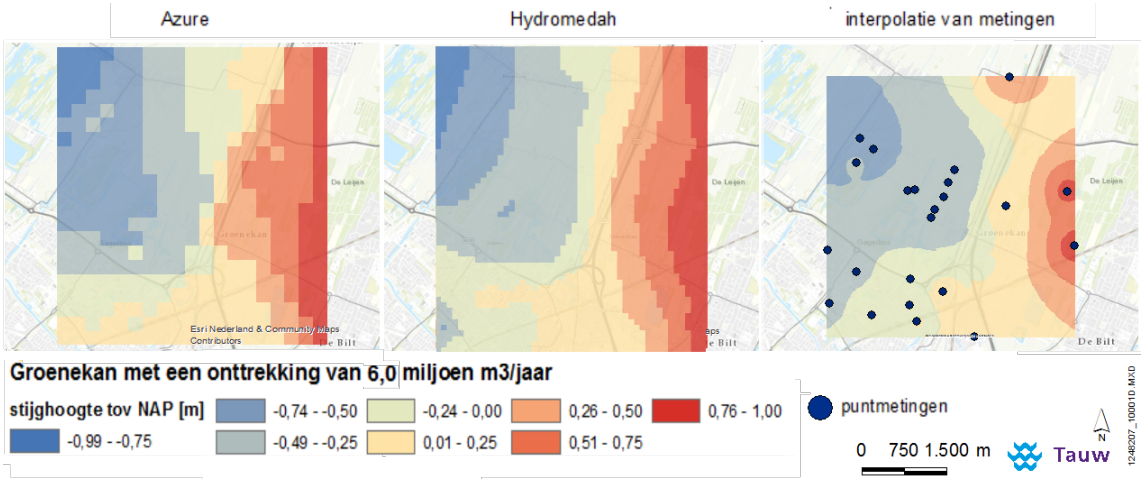
De visuele verschillen in stijghoogte tussen de geïnterpoleerde meetwaarden en de resultaten van de modellen zijn weergegeven in figuur 5, 6, 7, 8, 9 en 10. Hierbij zijn de locaties Groenekan en Leidsche Rijn opgesplitst in twee verschillende onttrekkingsdebieten.



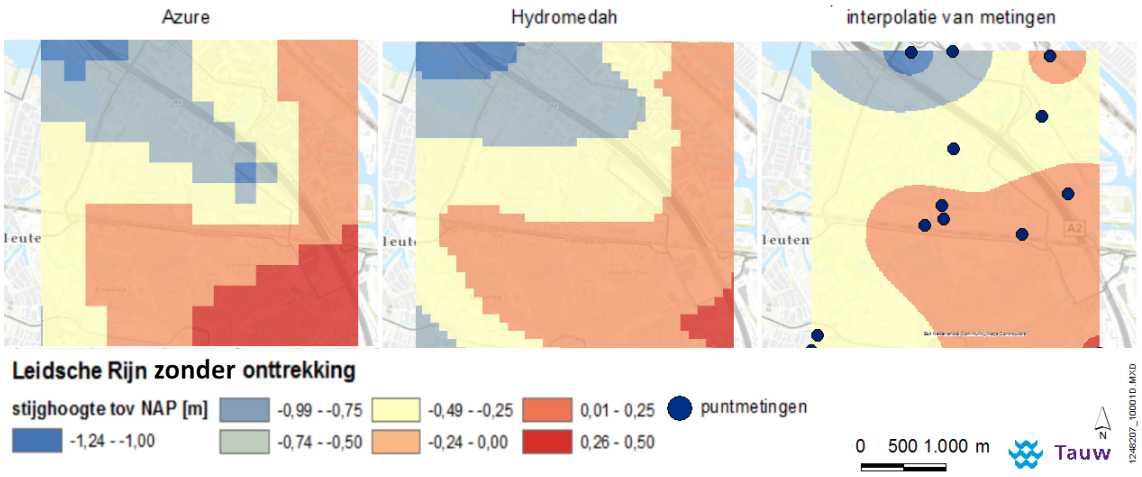
Figuur 5: De stijghoogte van Azure en Hydromedah en de geïnterpoleerde stijghoogten van puntmetingen voor Doorn met een onttrekking van 0,9 miljoen m^3/jaar



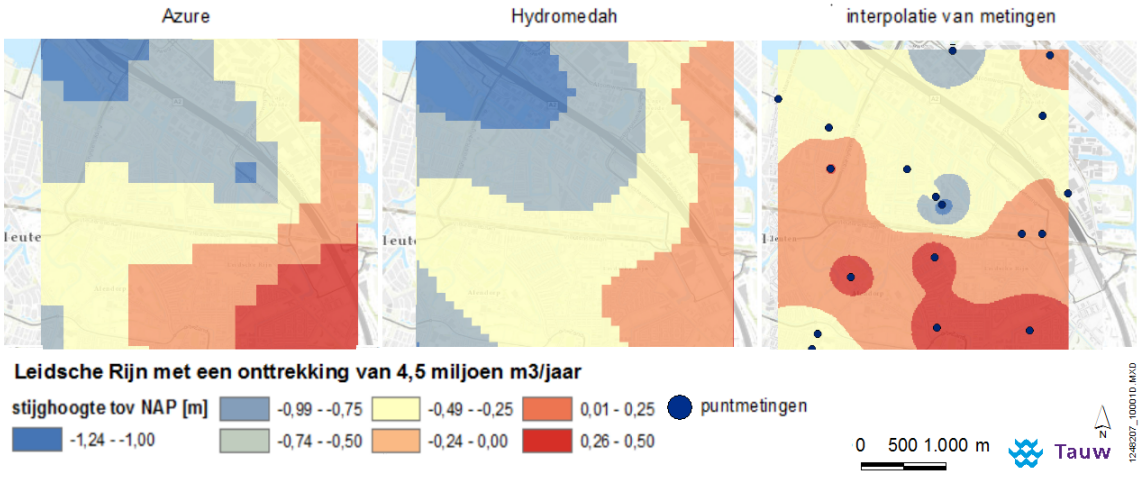
Figuur 6: De stijghoogte van Azure en Hydromedah en de geïnterpoleerde stijghoogten van puntmetingen voor Groenekan met een onttrekking van 7,5 miljoen m^3/jaar



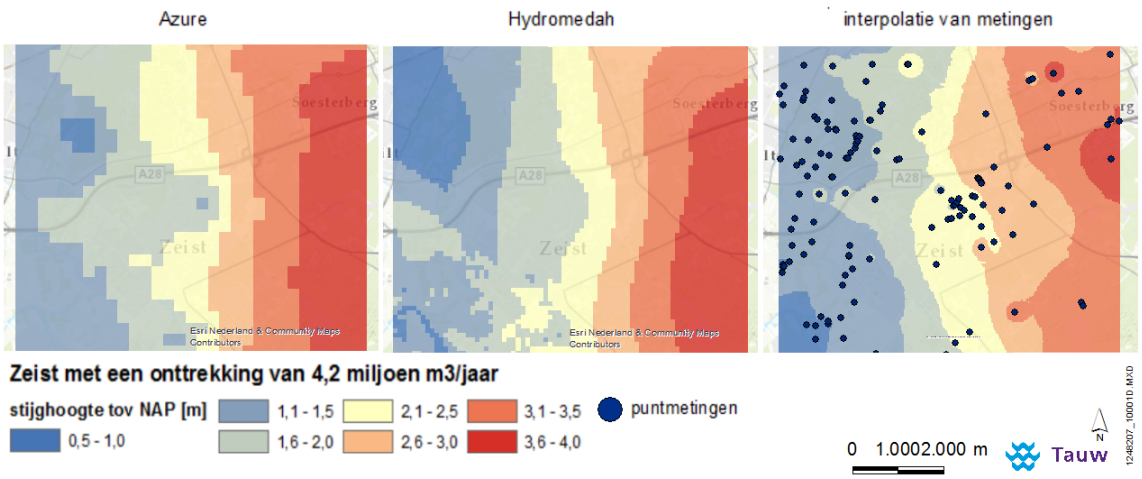
Figuur 7: De stijghoogte van Azure en Hydromedah en de geïnterpoleerde stijghoogten van puntmetingen voor Groenekan met een onttrekking van 6,0 miljoen m^3/jaar



Figuur 8: De stijghoogte van Azure en Hydromedah en de geïnterpoleerde stijghoogten van puntmetingen voor Leidsche Rijn zonder onttrekking



Figuur 9: De stijghoogte van Azure en Hydromedah en de geïnterpoleerde stijghoogten van puntmetingen voor Leidsche Rijn met een onttrekking van 4,5 miljoen m^3/jaar



Figuur 10: De stijghoogte van Azure en Hydromedah en de geïnterpoleerde stijghoogten van puntmetingen voor Zeist met een onttrekking van 4,2 miljoen m^3/jaar

Visueel gezien, lijken de stijghoogtes van de modellen erg op elkaar. Bij Doorn ligt de stijghoogte bij Azure iets hoger dan bij Hydromedah. Azure lijkt hierbij meer op de metingen dan Hydromedah. Bij Groenekan zijn er nauwelijks verschillen te zien tussen de stijghoogtes van de modellen en de geïnterpoleerde metingen. Azure lijkt iets meer op de metingen, maar reageert nauwelijks op variatie in onttrekking. Hydromedah heeft wel wat zichtbare verschillen in stijghoogte bij een variatie in onttrekking. Ook is de locatie van onttrekking goed te zien bij Hydromedah. Bij Leidsche Rijn lijkt de stijghoogte iets meer te variëren bij Azure vergeleken Hydromedah. Hydromedah lijkt beter te reageren bij een onttrekking dan Azure. Bij Azure is nauwelijks verschil te zien bij een variatie in onttrekking. De stijghoogte van Hydromedah lijkt het meest op de waarnemingen indien er geen onttrekking plaatsvindt. De stijghoogte van Azure lijkt het meest op de waarnemingen indien er wel een onttrekking plaatsvindt. Bij Zeist is het moeilijk te zeggen bij welk model de stijghoogte meer op de metingen lijkt. De stijghoogte van de modellen lijkt hier erg op elkaar.

In tabel 4 zijn de gemiddelde absolute fout (MAE) en de wortel van de gemiddelde gekwadrateerde fout (RMSE) weergegeven voor de modellen en de metingen per locatie. Voor de locaties Doorn komt er hetzelfde resultaat naar voren dan bij de visuele vergelijking. Bij Doorn lijkt de stijghoogte van Azure meer op de geïnterpoleerde metingen. Bij Leidsche Rijn zijn de stijghoogtes vrijwel identiek voor de modellen Azure en Hydromedah voor zowel wel als geen onttrekking. De stijghoogte van beide modellen komt echter wel minder overeen met onttrekking dan zonder onttrekking.

Voor enkele locaties zijn de uitkomsten bij de visuele vergelijking wel verschillend ten

opzichte van de statistische vergelijking. Bij Groenekan zijn de verschillen minimaal. De stijghoogte van Hydromedah komt iets beter overeen met de geïnterpoleerde metingen. Beide modellen reageren even goed op de variatie in onttrekking. Bij Zeist komt de stijghoogte van Hydromedah beter overeen dan de metingen.

Tabel 4: MAE en RMSE van de stijghoogten tussen het model en de metingen voor verschillende locaties

		MAE [m]		RMSE [m]	
	onttrekking [$miljoen\ m^3/jaar$]	Azure	Hydromedah	Azure	Hydromedah
Doorn	0,9	0,09	0,39	0,12	0,41
Groenekan	7,5	0,12	0,10	0,15	0,13
	6	0,12	0,11	0,15	0,14
Leidsche Rijn	0	0,13	0,11	0,16	0,14
	4,5	0,22	0,23	0,28	0,28
Zeist	4,2	0,38	0,23	0,58	0,24

3.3 Verschillen tussen de weerstand, de horizontale doorlatendheid en de watergangen van de modellen en de metingen

De weerstand en horizontale doorlatendheid per locatie is weergegeven in tabel 5. Hierbij is gekeken naar de weerstand en doorlatendheid tot en met het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt. De weerstand en de doorlatendheid verschillen per locatie sterk tussen de modellen en de metingen. Voor alle locaties geldt dat de weerstand van Azure veel beter overeenkomt met REGIS II dan Hydromedah. Bij de doorlatendheid is dit juist andersom. Hier lijkt Hydromedah meer op REGIS II dan Azure. Gekeken naar de spreidingslengte, lijkt over het algemeen Azure beter op REGIS II dan Hydromedah. Echter geldt dit niet voor alle locaties.

In tabel 15 is de MAE van de horizontale doorlatendheid, de weerstand en de spreidingslengte weergegeven. Dit geeft de vergelijking aan van hoe goed deze eigenschappen van Azure en Hydromedah overeenkomen met het REGIS II model. De MAE is ter controle ook bepaald voor aangewezen locaties die goed ruimtelijk verspreid liggen. Dit is te vinden in bijlage E.

Hieronder worden de resultaten per locatie omschreven.

Tabel 5: De horizontale doorlatendheid, weerstand en spreidingslengte voor de modellen Azure, Hydromedah en REGIS II

	doorlatendheid [m^2/dag]			weerstand [dagen]			spreidingslengte [m]		
	REGIS II	Azure	Hydromedah	REGIS II	Azure	Hydromedah	REGIS II	Azure	Hydromedah
Doorn	2469	2442	1980	64	304	766	293	665	1093
Groenekan	4383	7364	2321	849	342	1770	1856	1543	1941
Leidsche Rijn	4198	6781	2488	808	2481	11568	1789	3920	5309
Zeist	2452	2314	3081	194	98	2296	346	100	2443

Tabel 6: De MAE van de horizontale doorlatendheid, weerstand en spreidingslengte voor de modellen Azure, Hydromedah en REGIS II

	MAE van doorlatendheid [m^2/dag]		MAE van weerstand [dagen]		MAE van spreidingslengte [m]	
	Azure	Hydromedah	Azure	Hydromedah	Azure	Hydromedah
Doorn	611	526	275	701	85	622
Groenekan	2938	2009	461	1128	490	640
Leidsche Rijn	2538	1727	1798	10602	2191	3516
Zeist	1895	721	219	2046	262	2143

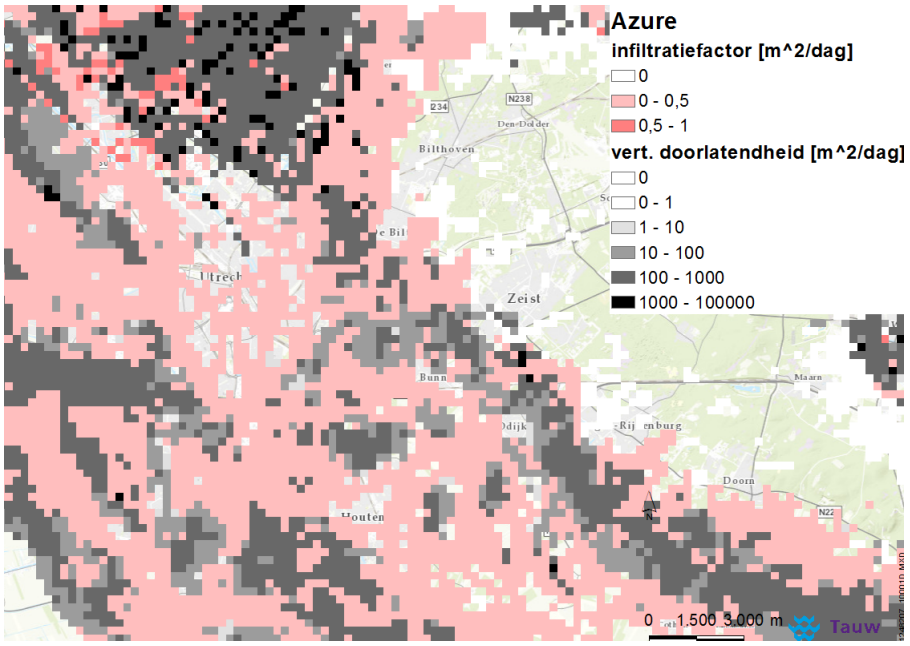
Doorn Bij Doorn lijkt de spreidingslengte van Azure veel op REGIS II. Hydromedah laat een veel grotere spreidingslengte zien dan Azure. Dit komt doordat de weerstand van Hydromedah veel hoger ligt dan bij Azure. De weerstand van Azure komt komt beter overeen met het REGIS II model dan Hydromedah. De doorlatendheid is voor beide modellen ongeveer gelijk.

Groenekan De spreidingslengte van Azure en Hydromedah wijkt vrijwel evenveel af van het REGIS II model. Azure heeft een kleinere spreidingslengte dan REGIS II en Hydromedah juist een grotere. De weerstand van Azure komt beter overeen dan Hydromedah, terwijl de doorlatendheid van Hydromedah beter overeenkomt.

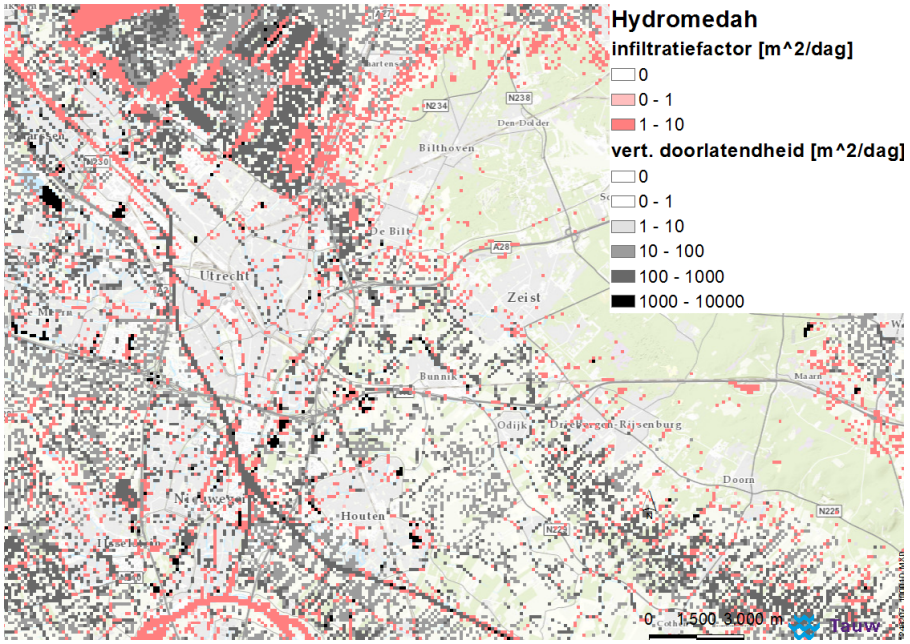
Leidsche Rijn De spreidingslengte van beide modellen is veel hoger dan de spreidingslengte van REGIS II. De weerstand van Hydromedah is heel erg hoog en heeft minder gelijkenis met REGIS II dan Azure. De doorlatendheid van Azure en Hydromedah ten opzichte van REGIS II vertoont minder afwijking dan de weerstand. Hierbij vertoont Hydromedah meer gelijkenis dan Azure.

Zeist Azure heeft een spreidingslengte die meer overeenkomt met REGIS II dan Hydromedah. Bij Zeist komt de weerstand van Azure veel beter overeen met REGIS II dan bij Hydromedah. Bij de doorlatendheid is dit andersom. Hier lijkt Hydromedah meer op REGIS II dan Azure.

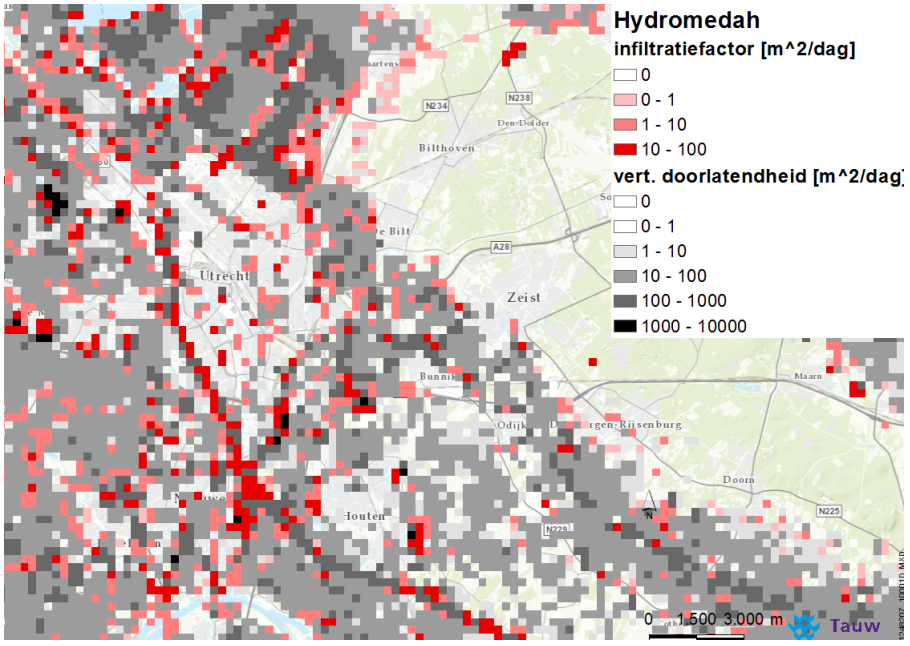
In figuur 11 en figuur 12 zijn de infiltratiefactor en de verticale doorlatendheid te zien vanuit de watergangen volgens Azure en Hydromedah. De infiltratiefactor en verticale doorlatendheid is weergegeven in m^2/dag van een cel. De grootte van een cel waarmee de modellen hebben gerekend bij de watergangen is bij Azure is 250 x 250 meter. Bij Hydromedah is dit 100 x 100 meter. Om de waarden visueel goed te kunnen vergelijken, is in figuur 13 Hydromedah weergegeven met een celgrootte van 250 x 250 meter.



Figuur 11: De infiltratiefactor in $[m^2/dag]$ en de verticale doorlatendheid (in Engels: vertical conductivity) $[m^2/dag]$ van het model Azure met een celgrootte van 250 x 250 meter

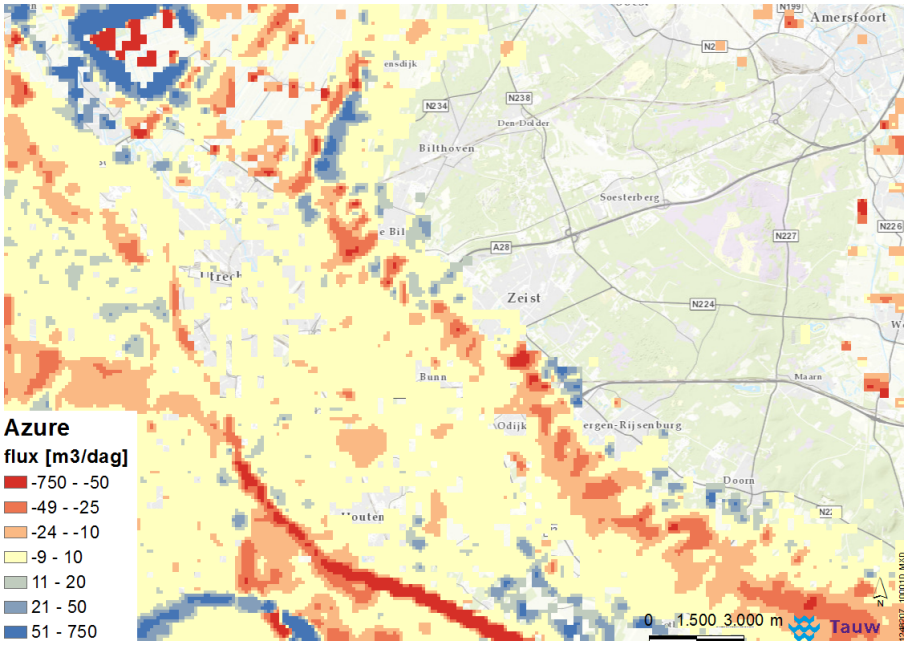


Figuur 12: De infiltratiefactor in $[m^2/dag]$ en de verticale doorlatendheid $[m^2/dag]$ van het model Hydromedah met een celgrootte van 100 x 100 meter



Figuur 13: De infiltratiefactor in $[m^2/dag]$ en de verticale doorlatendheid $[m^2/dag]$ van het model Hydromedah met een celgrootte van 250 x 250 meter

De infiltratie en verticale doorlatendheid zorgt voor een flux in de grondwaterstroming. De flux die door de modellen wordt berekend is weergegeven in figuur 14 en 15. De infiltratie en verticale doorlatendheid verschillen iets tussen de modellen. Echter zijn er weinig harde resultaten aan verbonden.



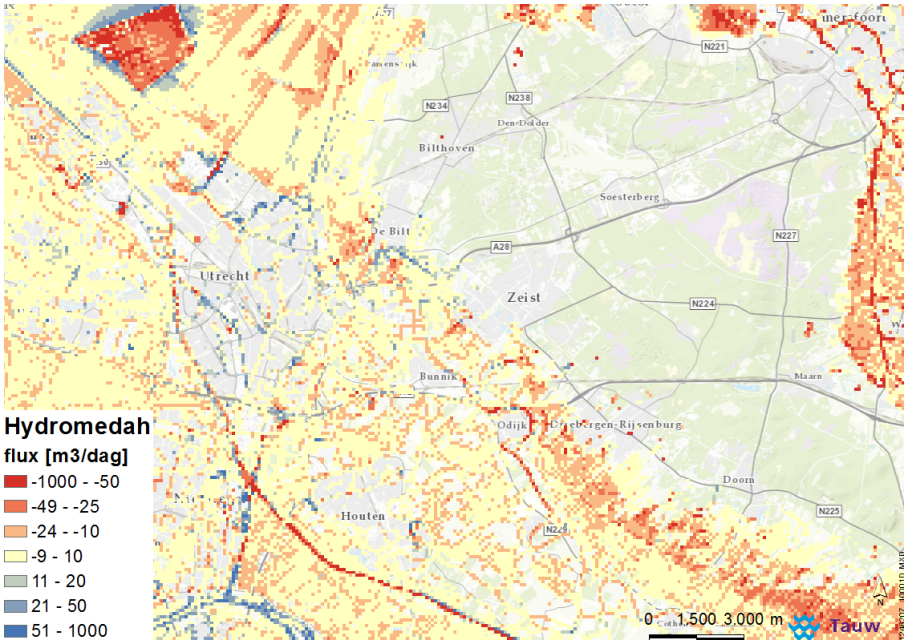
Figuur 14: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Azure

3.4 De invloed van de eigenschappen van het model op de stijghoogte

Bij Doorn lijkt de stijghoogte van Azure het meest op de puntmetingen. Dit heeft te maken met de weerstand en spreidingslengte. Deze eigenschappen lijken bij Azure meer op het REGIS II model dan bij Hydromedah. De afwijking van de horizontale doorlatendheid vergeleken het REGIS II model is wel vrijwel identiek voor Azure als Hydromedah.

Voor Groenekan wijkt de stijghoogte van Azure ongeveer evenveel af als bij Hydromedah vergeleken de puntmetingen. Ook de spreidingslengte hebben ongeveer dezelfde afwijking ten opzichte van het REGIS II model. De weerstand lijkt bij Azure meer op REGIS II terwijl de doorlatendheid bij Hydromedah meer op REGIS II lijkt.

Bij Leidsche Rijn komen de stijghoogtes van Azure en Hydromedah erg overeen.



Figuur 15: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Hydromedah

Ook lijken ze veel op de puntmetingen. Hydromedah heeft een hele grote weerstand vergeleken Azure en REGIS II. Alhoewel de doorlatendheid bij Hydromedah lager ligt dan bij Azure en REGIS II, blijft de spreidingslengte van Hydromedah veel hoger ten opzichte van de andere modellen. De modellen reageren gelijk op de variatie in onttrekking. Beide modellen resulteren in een te hoge stijghoogte vergeleken de metingen. Echter wijken de stijghoogtes van de modellen meer af van de metingen als er een onttrekking plaatsvindt. Zonder onttrekking voorspellen de modellen de stijghoogtes beter.

De gemeten stijghoogte van Zeist komt veel beter overeen met Hydromedah dan met Azure. Er is een grote kans dat dit veroorzaakt wordt doordat de doorlatendheid van Hydromedah beter overeenkomt met het REGIS II model dan Azure. Echter komt de weerstand en spreidingslengte van Azure wel beter overeen met REGIS II dan Hydromedah.

Er is tevens gekeken of er per peilbuis ook visueel een verband is te zien tussen de stijghoogte en de spreidingslengte, weerstand of doorlatendheid. Hierbij zijn de gemeten stijghoogtes uitgezet tegen de stijghoogten die volgen uit de modellen Azure en Hydromedah. Per peilbuis is ook gekeken hoeveel de weerstand, doorlatendheid en spreidingslengte van Azure en Hydromedah overeenkomt met het REGIS II model. Dit is in het diagram aangegeven met de grootte van een bolletje. Hoe groter het bolletje, hoe groter de afwijking tussen REGIS II en Azure/Hydromedah is. Echter

zijn hier geen verbanden gevonden. De uitkomsten zijn te vinden in bijlage F.

Er weinig verband te vinden tussen de verticale flux en de stijghoogte. In bijlage G is de vergelijking te vinden tussen de flux en de stijghoogte. De gebruikte kaarten voor de vergelijking zijn tevens in bijlage G te vinden. Op deze kaarten is voor iedere locatie de flux en de stijghoogte weergegeven.

3.5 Aanpassingen in het model

In tabel 7 zijn de resultaten te vinden van de verandering in stijghoogte door de modelaanpassingen voor Azure. Tabel 8 geeft de resultaten weer voor Hydromedah. Er is hierbij gekeken naar de MAE van de stijghoogte die volgt uit de modellen vergeleken de stijghoogte die volgt uit de puntmetingen. Hierbij zijn bij Leidsche Rijn vijf punten weggelaten aangezien hier te weinig informatie over was om het model aan te passen. Bij Doorn en Zeist is tevens gekeken naar puntmetingen die op een afstand van meer dan een spreidingslengte vanaf het pompstation liggen. Op deze plekken heeft het pompstation geen invloed meer. Daarom vallen in tabel 7 en 8 deze punten onder een onttrekkingsdebiet van 0 miljoen m^3 per jaar.

Tabel 7: De MAE ten opzichte van de puntmetingen voor verschillende aanpassingen en verschillende locaties voor het model Azure

	onttrekkingsdebiet [$miljoen\ m^3/jaar$]	Azure origineel	Azure met kD van Hydromedah	Azure met c van Hydromedah	Azure met watergangen van Hydromedah
Doorn	0,9	0,09	0,14	0,48	0,13
	0[1]	0,31	0,25	0,29	0,32
Groenekan	7,5	0,13	0,73	0,12	0,17
	6,0	0,12	0,74	0,09	0,14
Leidsche Rijn	0	0,10	0,68	0,05	0,22
	4,5	0,23	0,49	0,21	0,25
Zeist	4,2	0,41	0,80	0,18	0,52
	0[1]	0,19	0,27	0,35	0,22

[1]Deze puntmetingen liggen op een afstand vanaf het pompstation dat groter is dan de spreidingslengte

Tabel 8: De MAE ten opzichte van de puntmetingen voor verschillende aanpassingen en verschillende locaties voor het model Hydromedah

	onttrekkings-debiet [$miljoen\ m^3/jaar$]	Hydromedah origineel	Hydromedah met kD van Azure	Hydromedah met c van Azure	Hydromedah met wa-tergangen van Azure
Doorn	0,9	0,39	0,09	0,29	0,33
	0[2]	0,36	0,40	0,30	0,29
Groenekan	7,5	0,12	0,16	0,45	0,15
	6,0	0,11	0,15	0,45	0,16
Leidsche Rijn	0	0,07	0,10	0,27	0,20
	4,5	0,23	0,24	0,28	0,40
Zeist	4,2	0,21	0,31	0,50	0,17
	0[2]	0,24	0,15	0,19	0,20

Het algehele resultaat dat hieruit genomen kan worden, is dat de weerstand en doorlatendheid veel invloed hebben op de stijghoogte. Echter is de invloed van de watergangen zeer gering op de stijghoogte.

Bij Doorn benadert het model Azure de stijghoogte het best voor een afstand tot de spreidingslengte vanaf het pompstation. Het lijkt erop dat de invloed van de weerstand en doorlatendheid van Azure hiervoor zorgt. Het model Hydromedah laat namelijk ook een goede stijghoogte zien als het de weerstand of doorlatendheid van het model Azure gebruikt. Als er wordt gekeken naar punten voor een afstand groter dan de spreidingslengte, lijken de stijghoogtes van de modellen vrij identiek. De stijghoogte wordt het best benaderd bij Azure met de weerstand van Hydromedah. Echter maakt het voor deze locatie weinig uit welk model je gebruikt. De stijghoogtes verschillen nauwelijks van elkaar.

De stijghoogte bij Groenekan lijkt zowel voor Azure als voor Hydromedah evenveel op de puntmetingen. Dit geldt voor beide onttrekkingen. Tevens lijkt het erop de weerstand van Hydromedah het het beste doet. In het algeheel kunnen voor deze locatie de weerstand, doorlatendheid en de watergangen niet verbeterd worden door deze eigenschappen van het andere model te gebruiken.

Leidsche Rijn gedraagt zich hetzelfde als Groenekan. De stijghoogte van Azure en Hydromedah lijken veel op elkaar voor zowel met als zonder onttrekking. Echter

[2]Deze puntmetingen liggen op een afstand vanaf het pompstation dat groter is dan de spreidingslengte

simuleren de modellen de stijghoogte veel beter zonder onttrekking dan met een onttrekking van 4,5 miljoen m^3 per jaar. De weerstand van Hydromedah lijkt een betere invloed te hebben op de stijghoogte. Echter is dit een klein verschil. Daarom kunnen voor deze locatie beter de weerstand, doorlatendheid en de watergangen niet aangepast worden door deze te vervangen door eigenschappen van het andere model.

Bij Zeist lijkt de stijghoogte van Hydromedah het meest op de puntmetingen voor een afstand tot de spreidingslengte vanaf het pompstation. De weerstand van Hydromedah heeft een positief effect te hebben op de stijghoogte. Wel lijkt het erop dat de watergangen van Azure beter presteren dan de watergangen van Hydromedah. Als er wordt gekeken naar de punten voor een afstand groter dan de spreidingslengte, lijkt daarbovenop ook dat de doorlatendheid van Azure zorgt voor een betere stijghoogte.

4 Discussie

4.1 Toevoeging van het onderzoek

Het onderzoek kan gebruikt worden voor als er grondwatermodelleringen gedaan worden in de provincie Utrecht. Ook kan de methode gebruikt worden voor als er andere onderzoeken gedaan worden voor het vergelijken van twee deelgebieden die met hetzelfde grondwatermodel werken (zoals ModFlow).

4.2 Beperkingen

Er waren enkele aspecten in het onderzoek die tot beperkingen hebben geleid.

De documentatie van Azure was niet publiekelijk beschikbaar. Hierdoor kon de manier van kalibratie niet goed vergeleken worden. Onder andere de meegenomen peilbuizen voor de kalibratie en de manier van kalibratie zijn zinvol om naar te kijken. Dit is niet gedaan in het onderzoek.

In deze studie is enkel gekeken naar vier locaties rondom Utrecht. Er is weinig twijfel in de conclusies die voor deze vier locaties zijn gemaakt. Er zijn ook aanbevelingen gemaakt voor andere locaties in de provincie Utrecht. Echter kan het zijn dat er onjuistheden in deze aanbevelingen zitten. Dit komt doordat er maar naar vier locaties is gekeken. Er zal naar meer locaties gekeken moeten worden om er beter vanuit te kunnen gaan dat deze aanbevelingen daadwerkelijk juist zijn.

Er is aangenomen dat er na een verandering in onttrekkingsdebiet van maximaal 1 miljoen m^3/jaar, na één jaar het grondwater genoeg gestabiliseerd is. De stijghoogtemetingen van peilbuizen zullen één jaar na de verandering weer meegenomen kunnen worden in deze studie. Deze aanname kan fout zijn. Er is een kans dat het kleine verschil in stijghoogte bij Groenekan na een verandering in onttrekkingsdebiet hier de oorzaak van is. Echter is bij Leidsche Rijn te zien dat een verandering van onttrekkingsdebiet bijna vrijwel gelijk plaatsvindt aan een verandering in stijghoogte. Zie hiervoor het gebiedsdossier van pompstation Leidsche Rijn en bijlage D (Vergouwen et al., 2013)

Bij het interpoleren van de gemeten stijghoogtes, is gebruik gemaakt van Inverse Distance Weighting (IDW). Deze methode is gekozen aan de hand van literatuur. Echter had er achteraf toch beter de kriging methode toegepast kunnen worden. Deze keuze is niet veranderd door literatuur, maar door uitgebreid de methodes te bekijken. Hierbij lijkt het erop houdt IDW geen rekening met de ruimtelijke locatie van de punten. Kriging houdt meer rekening met de ruimtelijke locatie. De

resultaten van deze studie zullen door deze keuze weinig veranderen. De punten die meegenomen zijn, liggen dichtbij elkaar. Hoe dichter de punten bij elkaar liggen, hoe minder de interpolatiemethode invloed heeft op de resultaten (Mirzaei and Sakizadeh, 2016).

Ook is er in verband met tijd niet specifiek gekeken naar boormonsterprofielen. In plaats hiervan is er voor de horizontale doorlatendheid en weerstand van de grondlagen gekeken naar het REGIS II model. Echter is het REGIS II model een model dat gebaseerd is op waarnemingen, maar niet volledig gelijk is met waarnemingen. Daarom is er een kans dat Azure of Hydromedah betere eigenschappen heeft dan REGIS II, terwijl in deze studie REGIS II als waarheid is aangenomen.

De scheidende lagen die aangenomen zijn bij de modellen Azure en Hydromedah, komen niet helemaal overeen met de scheidende lagen die gebruikt zijn bij het REGIS II model. Bij REGIS II is de keuze van de scheidende lagen gebaseerd op visuele dwarsdoorsnedes en de absolute weerstand van de lagen. Voor Azure en Hydromedah zijn daarbovenop ook de stijghoogte per laag meegenomen bij de keuze voor de scheidende lagen. Dit is voor REGIS II niet gedaan in verband met tijd.

Er is deze studie alleen gekeken hoe de modellen reageren in stationaire situatie. De resultaten als stijghoogtes van de modellen in niet-stationaire staat kunnen daardoor afwijken. Ook is enkel gekeken naar de stijghoogte als resultaat. Indien er andere resultaten van het model gebruikt gaan worden, kan het zijn dat de juistheid van de uitkomsten van de modellen verschilt ten opzichte van de stijghoogte.

Een ander punt is dat er bij Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist alleen naar het eerste en tweede watervoerend pakket met de scheidende laag ertussen is gekeken. Bij Doorn is enkel naar het eerste watervoerend pakket gekeken. Voor de stijghoogte is enkel de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket vergeleken met de werkelijkheid. Het kan daardoor zijn dat de stijghoogte voor de andere lagen in het model minder of juist beter de werkelijkheid representeert.

5 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal allereerst de conclusie aan bod komen. Daarna zullen er aanbevelingen volgen voor het gebruik van modellen bij Utrecht. Deze aanbevelingen volgen uit de resultaten en conclusie. Echter zijn het aanbevelingen die aannames bevatten. Om tot aanbevelingen te komen waarbij er een grotere kans is dat ze overeenkomen met de praktijk, is verder onderzoek nodig. Dit zal in de laatste paragraaf aan bod komen.

5.1 Conclusie

Visueel gezien lijken de stijghoogtes van de modellen veel op elkaar voor de locaties Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist. De stijghoogte volgens geïnterpoleerde puntmetingen verschillen meer met de modellen voor deze locaties. De verschillen tussen de modellen worden wel duidelijker zichtbaar als er statistisch via de gemiddelde absolute fout (MAE) wordt vergeleken.

Er is gekeken naar de horizontale doorlatendheid en weerstand van de lagen tot en met het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt. Deze twee eigenschappen verschillen veel tussen de modellen Azure en Hydromedah voor de vier locaties. Ook verschillen deze eigenschappen veel met het REGIS II model. Hierbij moet echter een kanttekening gemaakt worden dat de diepteligging van de watervoerend pakketten voor het model REGIS II niet helemaal overeenkomt met de modellen Azure en Hydromedah. De horizontale doorlatendheid en weerstand hangt onder andere af van de dikte van het pakket. Hierdoor kan dit tevens een afwijking veroorzaken in de doorlatendheid en weerstand.

Bij Doorn lijkt de stijghoogte van Azure het meest op de puntmetingen. Dit heeft te maken met de weerstand en spreidingslengte. Deze eigenschappen lijken bij Azure meer op het REGIS II model dan bij Hydromedah. De afwijking van de horizontale doorlatendheid vergeleken het REGIS II model is wel vrijwel identiek voor Azure als Hydromedah.

Voor Groenekan wijkt de stijghoogte van Azure ongeveer evenveel af als bij Hydromedah vergeleken de puntmetingen. Ook de spreidingslengte hebben ongeveer dezelfde afwijking ten opzichte van het REGIS II model. De weerstand lijkt bij Azure meer op REGIS II terwijl de doorlatendheid bij Hydromedah meer op REGIS II lijkt.

Bij Leidsche Rijn komen de stijghoogtes van Azure en Hydromedah erg overeen. Ook lijken ze veel op de puntmetingen. Hydromedah heeft een hele grote weerstand

vergeleken Azure en REGIS II. Alhoewel de doorlatendheid bij Hydromedah lager ligt dan bij Azure en REGIS II, blijft de spreidingslengte van Hydromedah veel hoger ten opzichte van de andere modellen. De modellen reageren gelijk op de variatie in onttrekking. Beide modellen resulteren in een te hoge stijghoogte vergeleken de metingen. Echter wijken de stijghoogtes van de modellen meer af van de metingen als er een onttrekking plaatsvindt. Zonder onttrekking voorspellen de modellen de stijghoogtes beter.

De gemeten stijghoogte van Zeist komt veel beter overeen met Hydromedah dan met Azure. Er is een grote kans dat dit veroorzaakt wordt doordat de doorlatendheid van Hydromedah beter overeenkomt met het REGIS II model dan Azure. Echter komt de weerstand en spreidingslengte van Azure wel beter overeen met REGIS II dan Hydromedah.

Bij de watergangen zijn geen verschillen te ontdekken die leiden tot verschillen in stijghoogte. Ook maakt het weinig uit uit welk model de watergangen komen voor het berekenen van de stijghoogte.

De stijghoogte kan nauwelijks beter gesimuleerd worden voor gebieden rondom een onttrekking door eigenschappen uit te wisselen tussen de modellen. Enkel Zeist kan het best Hydromedah gebruiken met de watergangen van Azure. De locaties Doorn, Groenekan en Leidsche Rijn simuleren goed met het volledige model van Azure.

5.2 Aanbevelingen voor het gebruik van de modellen

In deze paragraaf zullen aanbevelingen volgen voor de provincie Utrecht. De aanbevelingen zijn voornamelijk gebaseerd op de stijghoogte. Maar er is ook gekeken naar de weerstand en horizontale doorlatendheid van de lagen tot en met het watervoerend pakket van onttrekking. De watergangen zorgen nauwelijks voor een verschil in stijghoogte. Deze zullen daarom enkel meegenomen worden in de aanbevelingen voor de onderzochte vier locaties.

Er is onderscheid gemaakt in gebieden die vlakbij een pompstation liggen en gebieden die verder van een pompstation vandaan liggen. Ook zullen er aanbevelingen komen specifiek voor de locaties Doorn, Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist. Voor deze locaties is er ook onderscheid gemaakt in het gebied vlakbij het pompstation en het gebied dat verder weg ligt. Voor de locaties zullen eerst de aanbevelingen met onttrekking komen. Er zal afgesloten worden met de aanbevelingen voor de locaties Doorn, Leidsche Rijn en Zeist zonder onttrekking. De locatie Groenekan is niet bekeken zonder onttrekking. Hier zal dan ook geen aanbeveling voor zijn.

Er is gekeken naar de locatie Doorn waarbij de onttrekking in het eerste watervoerend

pakket ligt en de locaties Groenekan, Leidsche Rijn en Zeist waarbij de onttrekking in het tweede watervoerend pakket ligt. Hieruit volgen aanbevelingen voor als er een gebied gesimuleerd moet worden dat op een maximale afstand tot het pompstation ligt van één maal de spreidingslengte. Het model dat gebruikt moet worden bij een onttrekking uit het:

- eerste watervoerend pakket: het model waarvan de spreidingslengte of de weerstand van het eerste watervoerend pakket het meest overeenkomt met het REGIS II model. Dit is in de provincie Utrecht hoogstwaarschijnlijk Azure.
- tweede watervoerend pakket (of dieper): het model waarvan de horizontale doorlatendheid het best overeenkomt met het REGIS II model. Hierbij wordt de horizontale doorlatendheid bedoeld van het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt en alle watervoerende pakketten erboven op. Dit is in de provincie Utrecht hoogstwaarschijnlijk Hydromedah.

Er is een ook een aanbeveling voor locaties waarop pompstations nauwelijks invloed uitoefenen. Hierbij gaat het om locaties die verder dan één maal de spreidingslengte van een pompstation vandaan liggen. Hiervoor is er gekeken naar de locaties bij Doorn en Zeist die op een afstand liggen vanaf het pompstation dat verder is dan één maal de spreidingslengte. Ook is er gekeken naar Leidsche Rijn voordat er een onttrekking plaatsvond. Hieruit wordt aanbevolen dat het model waarvan de weerstand van de eerste scheidende laag het meest overeenkomt met REGIS II, gebruikt kan worden. Bij de provincie Utrecht, heeft Azure hoogstwaarschijnlijk de beste weerstand.

Het model dat het best gebruikt kan worden als er wordt gekeken naar een gebied op een maximale afstand van het pompstation van één maal de spreidingslengte, is voor locatie:

- Doorn: Azure. Dit model heeft een betere weerstand en vergelijkbare horizontale doorlatendheid dan Hydromedah. Tevens lijken de watergangen van Azure tot betere stijghoogtes te leiden dan die van Hydromedah.
- Groenekan: Azure. Het heeft een betere weerstand, maar slechtere doorlatendheid dan Hydromedah. Ondanks dat de stijghoogte iets beter gesimuleerd wordt door Azure met de weerstand van Hydromedah, is dit niet gekozen. De weerstand van Hydromedah lijkt veel minder op REGIS II dan Azure. Bovendien zal de spreidingslengte ook erg afwijken van REGIS II als de doorlatendheid van Azure en de weerstand van Hydromedah wordt gebruikt. Hierdoor is er een grote kans dat op andere vlakken dan de stijghoogte het model slechter zou presteren.
- Leidsche Rijn: Azure. Beide modellen hebben een weerstand en horizontale

doorlatendheid die ver van het REGIS II model ligt. Hoewel Azure de stijghoogte iets slechter simuleert dan Hydromedah, lijkt de weerstand van Azure veel meer op REGIS II dan Hydromedah.

- Zeist: Hydromedah met de watergangen van Azure. Hoewel de weerstand van Azure veel meer op REGIS II lijkt, lijkt de stijghoogte van Hydromedah aanzienlijk meer op de gemeten waarden.

Het model dat het beste gebruikt kan worden als er wordt gekeken naar het gebied waarop het pompstation nauwelijks invloed heeft, is voor locatie:

- Doorn: Azure met de horizontale doorlatendheid van Hydromedah. Hier komt de stijghoogte het meest overeen met de metingen. De weerstand van Azure en de doorlatendheid van Hydromedah lijken het meest op REGIS II.
- Leidsche Rijn: Hydromedah met de weerstand van Azure. De stijghoogte komt iets minder overeen met de puntmetingen. Echter komt de weerstand van Azure en de horizontale doorlatendheid van Hydromedah beter overeen met REGIS II.
- Zeist: Hydromedah met de weerstand en watergangen van Azure. De doorlatendheid van Hydromedah en de weerstand van Azure lijken het meest op REGIS II. Tevens ziet het ernaar uit dat de watergangen van Azure tot betere stijghoogtes leiden dan die van Hydromedah. De stijghoogte wordt echter iets beter nagebootst als Hydromedah met de doorlatendheid van Azure wordt gebruikt. Echter weegt dit niet op tegen dat de horizontale doorlatendheid van Hydromedah en de weerstand van Azure meer overeenkomt met REGIS II.

5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De aanbeveling over welk model het beste gebruikt kan worden per locatie zal met vervolgonderzoek waarschijnlijk niet drastisch veranderen. Wel kan er nog naar andere eigenschappen of andere lagen worden gekeken. Zoals de weerstand in de eerste scheidende laag bij Doorn of eigenschappen van het tweede watervoerend pakket zonder hierbij het eerste watervoerend pakket mee te nemen. Hieruit zouden kleine aanpassingen in het model kunnen volgen die de stijghoogte nog beter simuleren.

Echter kan de aanbeveling die over het algemeen geld voor de provincie Utrecht sterk in twijfel gebracht worden. Daarom is hiervoor een vervolgstudie aan te raden. In deze vervolgstudie wordt aanbevolen om meer locaties te bekijken. De aanbeveling voor een heel gebied is namelijk gebaseerd op vier locaties. Waarbij Doorn enige locatie is waar het water uit het eerste watervoerend pakket wordt onttrokken. Bo-

vendien is er enkel bij Doorn en Zeist gekeken naar een gebied dat op een locatie ligt waar de invloed van de onttrekking nauwelijks zichtbaar is. Hierdoor is de aanbeveling over hoe de stijghoogte van de modellen presteren vergeleken waarnemingen zonder onttrekking ook in twijfel te trekken.

Er zijn enkele locaties aan te bevelen om naar te kijken in vervolgonderzoek. Dit hangt af van wat het doel is van het gebruik van het model. Als het doel van het model voornamelijk is om te kijken naar de invloed van onttrekkingen is het aan te raden om de volgende locaties mee te nemen in vervolgonderzoek:

- Bij een pompstation in de heuvelrug waarbij de onttrekking plaatsvindt in het eerste watervoerend pakket
- Bij een pompstation in de heuvelrug waarbij de onttrekking plaatsvindt in het tweede watervoerend pakket
- Bij een pompstation in het poldergebied waarbij de onttrekking plaatsvindt in het eerste watervoerend pakket
- Bij een pompstation in het poldergebied waarbij de onttrekking plaatsvindt in het tweede watervoerend pakket

Als het doel van het model voornamelijk is om te kijken naar gebieden die op een grotere afstand dan de spreidingslengte van een pompstation liggen:

- Op een locatie in de Heuvelrug op een grotere afstand dan de spreidingslengte van een pompstation.
- Op een locatie in het poldergebied op een grotere afstand dan de spreidingslengte van een pompstation.

Referenties

Ackerman, D. J., Rousseau, J. P., Rattray, G. W., and Fisher, J. C. (2010). Steady-state and transient models of groundwater flow and advective transport, eastern snake river plain aquifer, idaho national laboratory and vicinity, idaho. Technical report, U. S. Geological Survey.

Anderson, M. P., Woessner, W. W., and Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.

Arslan, H. (2012). Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: the case of bafra plain, turkey. *Agricultural Water Management*, 113:57–63.

Barnett, B., Townley, L. R., Post, V., Evans, R. E., Hunt, R. J., Peeters, L., Richardson, S., Werner, A. D., Knapton, A., and Boronkay, A. (2012). Australian groundwater modelling guidelines. *National Water Commission, Canberra*.

Boman, G. K., Molz, F. J., and Güven, O. (1995). An evaluation of interpolation methodologies for generating three-dimensional hydraulic property distributions from measured data. *Ground Water*, 33(2):247–258.

Borren, W., Berendrecht, W., Heijkers, J., Snepvangers, J., and VeldHuizen, A. (2009). Ontwikkeling HDSR hydrologisch modelinstrumentarium – HYDROMEDAH; Deelrapport 1: Beschrijving MODFLOW-model 20080924 .

Borren, W., Bootsma, H., Hunink, J., Hendriksen, G., and Kroon, T. (2016). Kpp retourstroom regis: rapportage 2016. Technical report, Deltares.

Boukes, H. and Valstar, J. (2007). Brieven. *Stromingen*, 13(3):60–63.

Brus, D. J., De Gruijter, J. J., Marsman, B. A., Visschers, R., Bregt, A. K., Breeuwsma, A., and Bouma, J. (1996). The performance of spatial interpolation methods and choropleth maps to estimate properties at points: a soil survey case study. *Environmetrics*, 7(1):1–16.

Burrough, P. A. (1986). Principles of geographical information systems for land resources assessment.

Childs, C. (2004). Interpolating surfaces in arcgis spatial analyst. *ESRI Education Services*.

De Financiële Begrippenlijst (2017). interpoleren. Geraadpleegd op http://www.dfbonline.nl/begrip/13715/interpoleren.

de Koning, M. (2017). Voorstudie consistentie grondwatermodellen utrecht. Dit is een privé-document van Tauw.

Declercq, F. A. N. (1996). Interpolation methods for scattered sample data: accuracy, spatial patterns, processing time. *Cartography and Geographic Information Systems*, 23(3):128–144.

Dingman, S. L. (1994). Physical hydrology, 575 pp. *McMillan, New York*.

DINOloket (2017). Begrippen. Geraadpleegd op https://www.dinoloket.nl/begrippenlijstaz/.

Dirks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D., and Harris, D. (1998). High-resolution studies of rainfall on norfolk island: Part ii: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, 208(3):187–193.

Esri (2016). How kriging works. Geraadpleegd op http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm.

Esri (2017a). Arcgis. Geraadpleegd op: https://www.arcgis.com/features/index.html.

Esri (2017b). Comparing interpolation methods. Geraadpleegd op http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/comparing-interpolation-methods.htm.

Esri (2017c). How spline works. Geraadpleegd op http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm.

Gallichand, J. and Marcotte, D. (1993). Mapping clay content for subsurface drainage in the nile delta. *Geoderma*, 58(3):165–179.

Gong, G., Mattevada, S., and O'Bryant, S. E. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and idw interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in texas. *Environmental research*, 130:59–69.

Grondwatergegevens (2017). Onttrekking onder een deklaag met sloten (formule van de glee/hantush). Geraadpleegd op: http://www.grondwaterformules.nl/index.php/formules/onttrekking/deklaag-zonder-rand-de-glee.

Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston.

Hassan, A. E. (2004). A methodology for validating numerical ground water models. *Ground Water*, 42(3):347–362.

Hekman, A., van Manen, H., and de Lange, W. (2014). Azure: innoveren van de 'gouden driehoek'.

Hoffmann, J., Leake, S. A., Galloway, D. L., and Wilson, A. M. (2003). Modflow-2000 ground-water model–user guide to the subsidence and aquifer-system compaction (sub) package. Technical report, GEOLOGICAL SURVEY WASHINGTON DC.

Jcwf (2017). interpolatie. Geraadpleegd op https://nl.wiktionary.org/wiki/interpolatie.

Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J.-O., Fischer, T., Görke, U. J., Kalbacher, T., Kosakowski, G., McDermott, C., et al. (2012). Opengeosys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (thm/c) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, 67(2):589–599.

Maxwell, R. M., Kollet, S. J., Smith, S. G., Woodward, C. S., Falgout, R. D., Ferguson, I. M., Baldwin, C., Bosl, W. J., Hornung, R., and Ashby, S. (2009). Parflow user's manual. *International Ground Water Modeling Center Report GWMI*, 1(2009):129.

MER (1994a). Besluit milieueffectrapportage, bijlage c, sectie 15.1.

MER (1994b). Besluit milieueffectrapportage, bijlage d, sectie 15.2.

Minnema, B. (2016). What triggered the development of imod [powerpoint]. Geraadpleegd op www.slideshare.net.

Mirzaei, R. and Sakizadeh, M. (2016). Comparison of interpolation methods for the estimation of groundwater contamination in andimeshk-shush plain, southwest of iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3):2758–2769.

Moors, E., Van Ellen, W., Mol, J., and Swart, B. (2002). *Hydrologische woordenlijst*. Nederlandse Hydrologische Vereniging, Utrecht.

Moyeed, R. A. and Papritz, A. (2002). An empirical comparison of kriging methods for nonlinear spatial point prediction. *Mathematical Geology*, 34(4):365–386.

Nas, B. and Berktay, A. (2010). Groundwater quality mapping in urban groundwater using gis. *Environmental monitoring and assessment*, 160(1):215–227.

Rijkswaterstaat (2017). Onttrekken grondwater, schematisatie van de voeding voor grondwatermodellering. Geraadpleegd op: https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemsaneringstechnieken/b-in-situ-reiniging/b4-fysische-technieken/b4-1-spoelen-met-

grondwater/onttrekken-grondwater-schematisatie-van-de-voeding-voor-grondwate8589.

Rushton, K. R. (2004). *Groundwater hydrology: conceptual and computational models*. John Wiley & Sons.

Schaap, J. and Dik, P. (2007). Metaswap meet zich met swap: Simulatie van de onverzadigde zone voor regionale en nationale modellen. *Stromingen*, 13(3):15–25.

Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation. *Interpreting multivariate data*, pages 21–36.

Therrien, R., McLaren, R. G., Sudicky, E. A., and Panday, S. M. (2010). Hydrogeosphere: a three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. *Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo, ON*.

TNO (2017a). Boormonsterprofiel geologische booronderzoek en interpretatie. Geraadpleegd op: https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens.

TNO (2017b). Ondergrondgegevens bekijken en aanvragen. Geraadpleegd op https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens.

TNO (2017c). Ondergrondmodellen bekijken en aanvragen. Geraadpleegd op https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen.

USGS Office of Groundwater (2016). Modflow and related programs. Geraadpleegd op water.usgs.gov.

Valstar, J. (2001). *Inverse problem theory of coupled groundwater flow and mass transport*. PhD thesis, PhD thesis, Technical University of Delft, Delft, The Netherlands.

Valstar, J. R., McLaughlin, D. B., Te Stroet, C., and van Geer, F. C. (2004). A representer-based inverse method for groundwater flow and transport applications. *Water Resources Research*, 40(5).

van Gurp, H. and Blonk, A. (2017). Notitie n001-1248207hvg-v01. Dit is een privé-document van Tauw.

Vergouwen, A. A., Vissers, M. J. M., Rosenthal, I., and Mensing, S. (2013). Gebiedsdossier waterwinning leidsche rijn. Geraadpleegd op: https://www.provincie-utrecht.nl/onderwerpen/alle-onderwerpen/beschermingszones/gebiedsdossiers/.

Verkaik, J., Hughes, J., Sutanudjaja, E., and van Walsum, P. (2016). First applications of the new parallel krylov solver for modflow on a national and global scale. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.

Vermeulen, P. T. M., Burgering, L. M. T., Roelofsen, F. J., and Minnema (2016). imod user manual, version 3.4. Technical report, Deltares.

Vermeulen, P. T. M., Burgering, L. M. T., Roelofsen, F. J., Minnema, B., and Verkaik, J. (2017). imod user manual, online version 3.6: Isg imod segment package.

Vernes, R. W., van Doorn, T. H. M., Bierkens, M. F. P., Gessel, S. F. V., and Heer, E. D. (2005). Van gidslaag naar hydrogeologische eenheid: Toelichting op de totstandkoming van de dataset regis ii.

Wareco (2017). Grondwatermodellen en tijdreeksanalyse. Geraadpleegd op https://www.wareco.nl/water/grondwatermodellen-en-tijdreeksanalyse.

Weber, D. D. and Englund, E. J. (1992). Evaluation and comparison of spatial interpolators. *Mathematical Geology*, 24(4):381–391.

Weber, D. D. and Englund, E. J. (1994). Evaluation and comparison of spatial interpolators ii. *Mathematical Geology*, 26(5):589–603.

Wondzell, S. M., LaNier, J., and Haggerty, R. (2009). Evaluation of alternative groundwater flow models for simulating hyporheic exchange in a small mountain stream. *Journal of Hydrology*, 364(1):142–151.

A Horizontale doorlatendheid en weerstand per laag

De horizontale doorlatendheid per laag is gebruikt om de stijghoogte te bepalen. De horizontale doorlatendheid en weerstand is gebruikt om de spreidingslengte te bepalen. Tabel 10 geeft de gebruikte weerstand en horizontale doorlatendheid van Azure weer voor de exacte locatie van het pompstation. Tabel 11 geeft de weerstand en horizontale doorlatendheid weer voor Hydromedah.

Tabel 9 geeft de weerstand en horizontale doorlatendheid aan die volgt uit het REGIS II model. Ook is in de tabel de laag en diepte van onttrekking te vinden. Hiermee kan de spreidingslengte uitgerekend worden.

Tabel 9: Gegevens voor het berekenen van spreidingslengte van REGIS II

	water-voerend pakket van ont-trekking	hoogte ont-trekking tov NAP $[m]$	horizontale doorla-tendheid $[m^2/dag]$	weerstand $[dagen]$	berekende spreidings-lengte $[km]$	gebruikte spreidings-lengte $[km]$
Doorn	1e	-5 tot -22	2040	32	0,3	3
Groenekan	2e	-59 tot -114	4443	1450	2,5	2,5
Leidsche Rijn	2e	-87 tot -118	4454	680	1,7	1,7
Zeist	2e	-55 tot -70	3350	49	0,4	3

Tabel 10: De gebruikte weerstand en doorlatendheid van Azure per locatie

laag	weerstand [dagen]				doorlaatvermogen [m^2/dag]			
	Doorn	Groenekan	Leidsche Rijn	Zeist	Doorn	Groenekan	Leidsche Rijn	Zeist
1	25	0	118	0	3	5	11	67
2	26	1	1	1	74	652	595	318
3	37	46	1	1	101	681	937	692
4	16	1	1	1	24	267	219	215
5	18	1	1	1	19	61	38	41
6	455	391	1622	56	34	80	126	0
7	1	1	1	209	1194	2246	1994	914
8	1097	7038	26337	3068	688	3494	3403	1360

Tabel 11: De gebruikte weerstand en doorlatendheid van Hydromedah per locatie

laag	weerstand [dagen]				doorlaatvermogen [m^2/dag]			
	Doorn	Groenekan	Leidsche Rijn	Zeist	Doorn	Groenekan	Leidsche Rijn	Zeist
1	1	7	1720	1	15	15	15	15
2	156	0	0	0	421	169	236	428
3	306	168	0	0	479	417	464	716
4	305	1492	6174	521	15	115	110	207
5	1279	0	0	0	1039	67	272	1341
6		664	929	0		1445	1318	237
7		2250	1474	2458		320	225	483

B De overeenkomende lagen voor het uitwisselen van eigenschappen tussen de modellen

Tabel 12: De lagen van Hydromedah met het deel van de laag dat in een bepaalde laag van Azure geplaatst moet worden

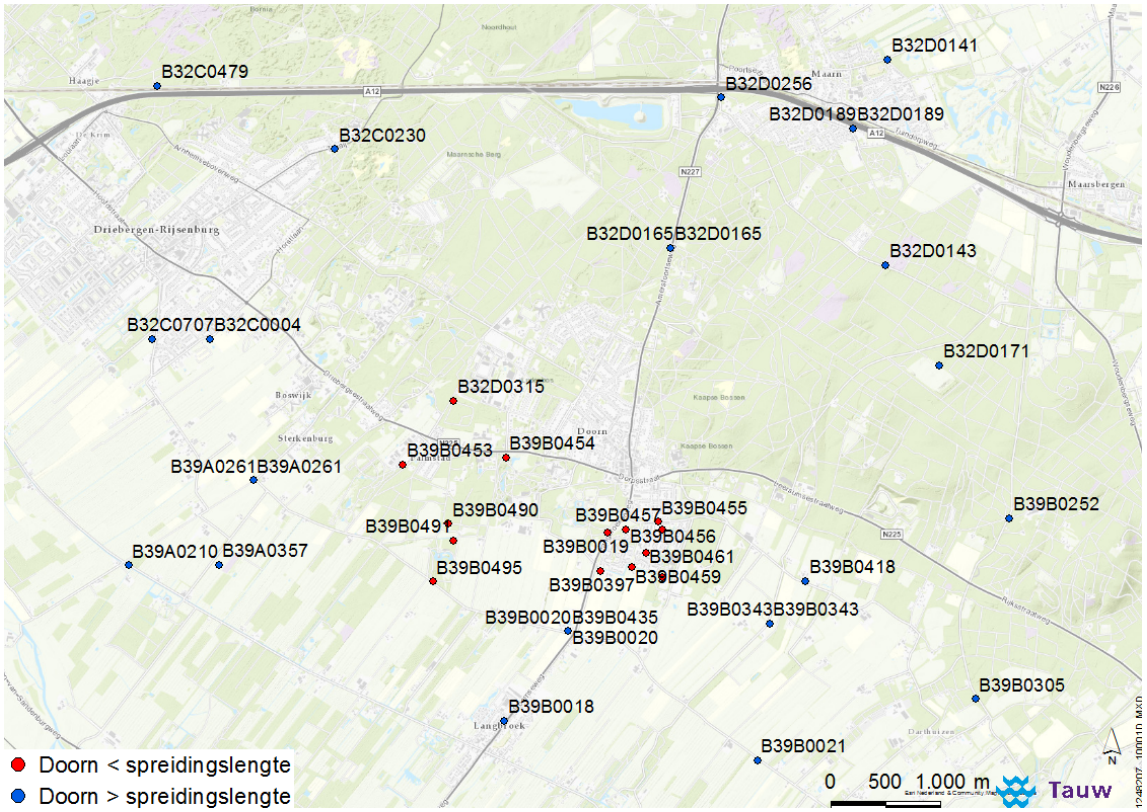
laag Hydromedah	laag Azure	deel van de laag [%]	laag Azure	deel van de laag [%]	laag Azure	deel van de laag [%]	laag Azure	deel van de laag [%]
	Doorn		Groenekan		Leidsche Rijn		Zeist	
1					1 2	100 7		
2	1 2 3	100 100 59	1 2	100 52	2	52	1 2	100 92
3	3 4 5 6 7	41 100 100 100 11	2 3	48 97	2 3 4	41 100 32 68	2 3 4	8 100 63
4	7	7	3 4 5 6 7	3 100 100 100 2	4 5 6	100 100	4 5 6 7	37 100 100 15
5	7 8 9	82 100 5	7	29	7	53	7 8	85 72
6	9	53	7 8	69 100	7 8	47 99	8	23
7			9	26			8 9	5 30

Tabel 13: De lagen van Azure met het deel van de laag dat in een bepaalde laag van Hydromedah geplaatst moet worden

laag Azure	laag Hydromedah	deel van de laag [%]	laag Hydromedah	deel van de laag [%]	laag Hydromedah	deel van de laag [%]	laag Hydromedah	deel van de laag [%]
	Doorn		Groenekan		Leidsche Rijn		Zeist	
1	1 2	100 20	1 2	100 6	1	20	1 2	100 36
2	2	50	2 3	94 25	1 2 3	80 100 20	2 3	64 3
3	2 3	30 20	3 4	75 7	3	74	3	87
4	3	11	4	64	3 4	6 51	3 4	10 19
5	3	11	4	10	4	13	4	10
6	3	22	4	12	4	33		
7	3 4 5	56 100 79	4 5 6	7 100 45	4 5 6	3 100 33	4 5	71 66
8	5	13	6 7	55 10	6 7	67 20	5 6 7	34 100 5

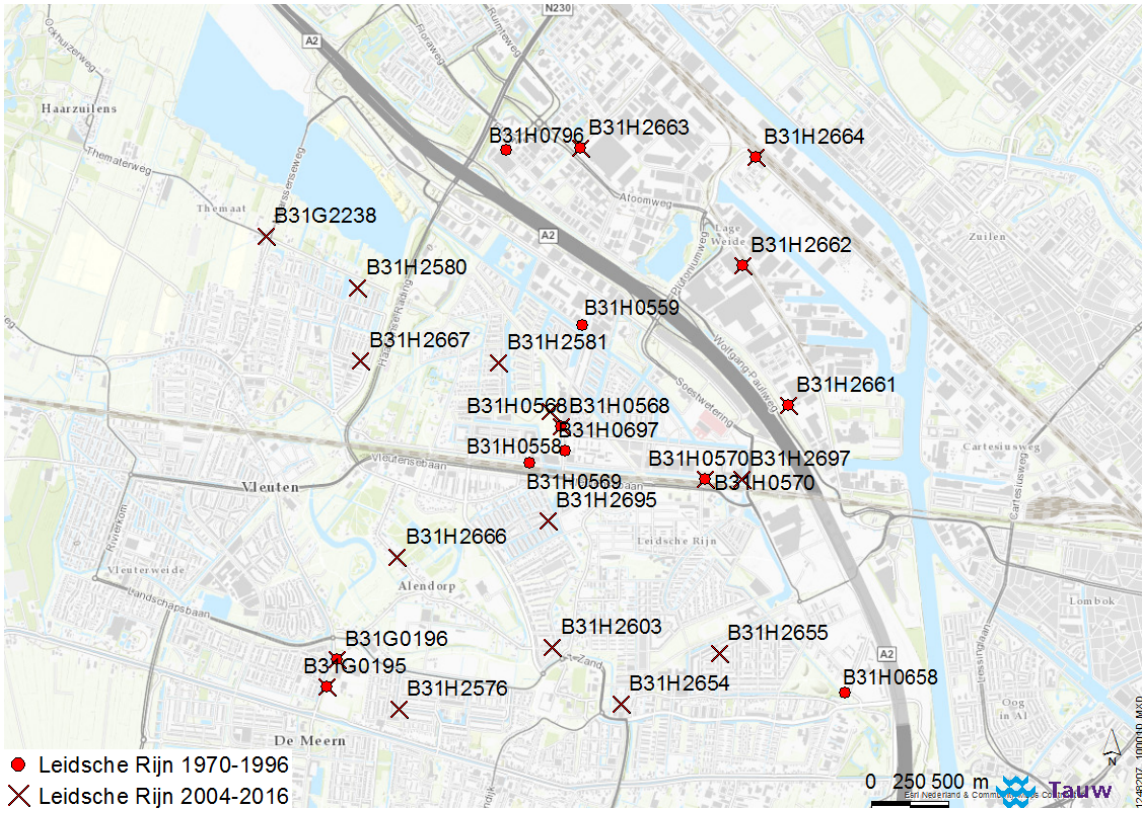
C Gebruikte puntmetingen

Hieronder volgen kaarten waarbij de peilbuizen zijn weergegeven die in deze studie gebruikt zijn voor het bepalen van de stijghoogte. Bij Doorn en Zeist is onderscheid gemaakt voor de peilbuizen die invloed ondervinden van de onttrekking (binnen één maal de spreidingslengte vanaf het pompstation) en peilbuizen die geen invloed ondervinden hiervan. Bij Groenekan en Leidsche Rijn is onderscheid gemaakt in het jaartal van onttrekking.

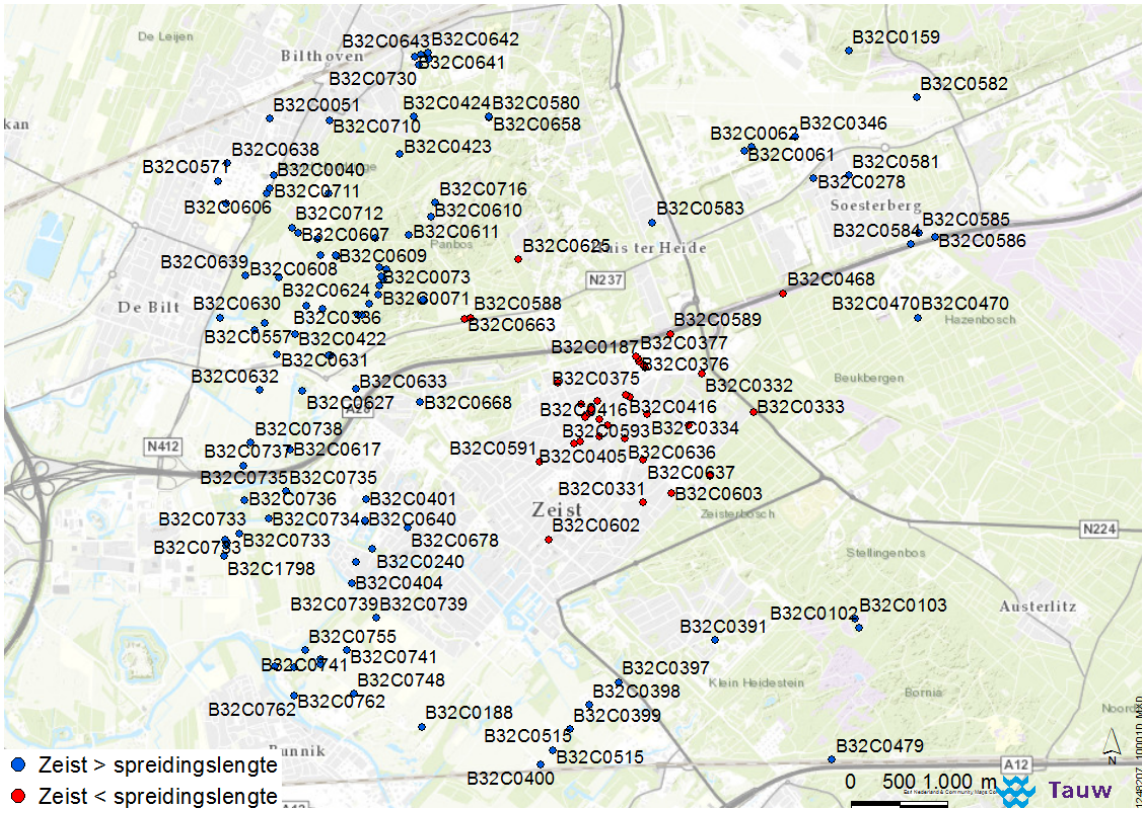


Figuur 16: Peilbuisnummers en ruimtelijke locatie van de gebruikte puntmetingen bij Doorn

Figuur 17: Peilbuisnummers en ruimtelijke locatie van de gebruikte puntmetingen bij Groenekan



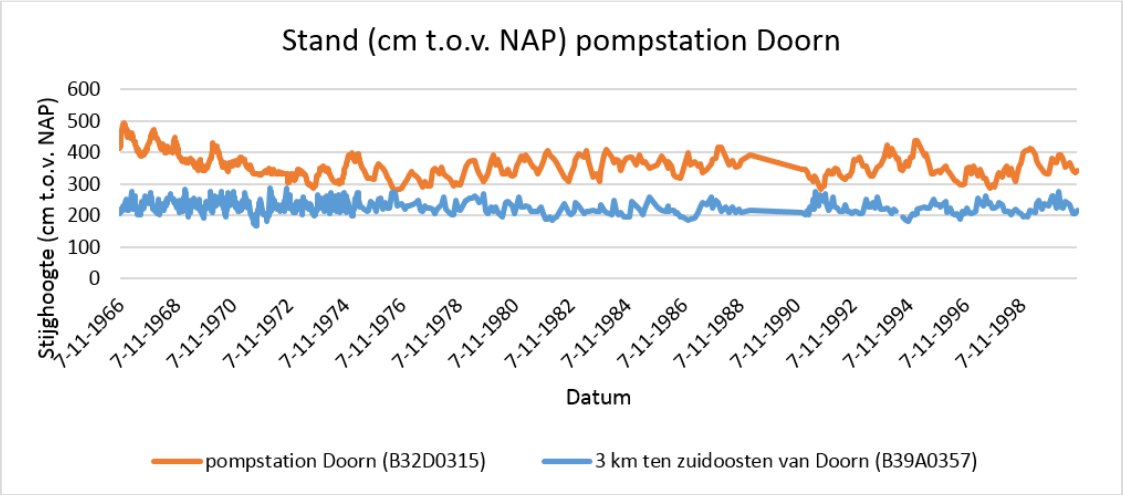
Figuur 18: Peilbuisnummers en ruimtelijke locatie van de gebruikte puntmetingen bij Leidsche Rijn



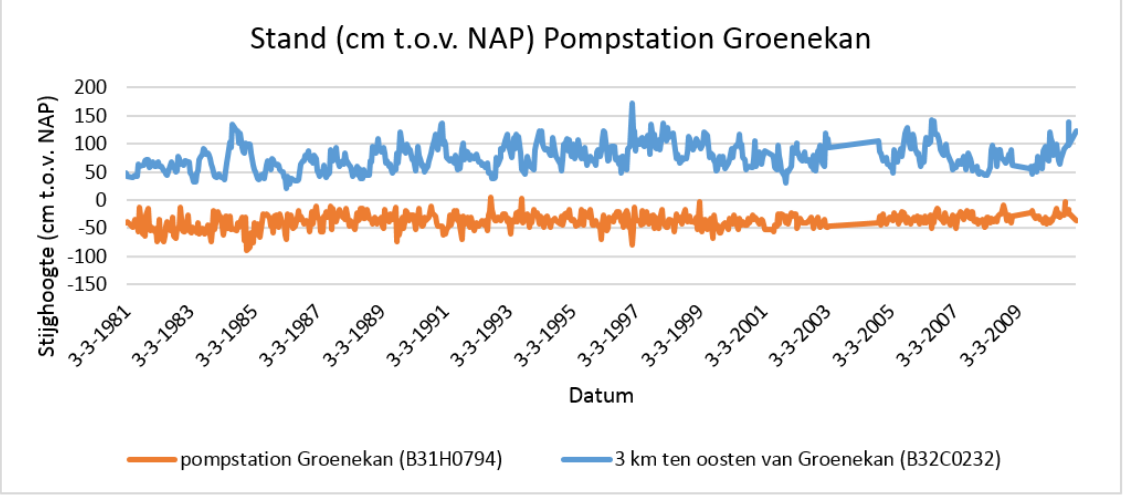
Figuur 19: Peilbuisnummers en ruimtelijke locatie van de gebruikte puntmetingen bij Zeist

D Stijghoogtes over de tijd

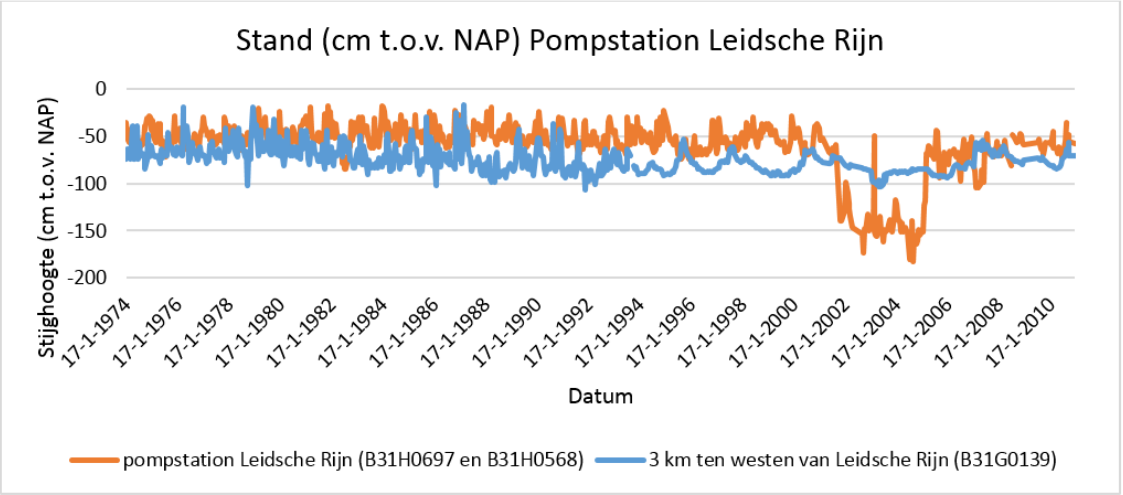
Per locatie is er gekeken naar de stijghoogte over de tijd voor een meetpunt bij het pompstation. Deze stijghoogte is vergeleken voor een meetpunt dat verder dan de spreidingslengte van het pompstation afligt. Door deze stijghoogtes te vergelijken, kan er gekeken worden of er behalve de onttrekking, nog andere invloeden zichtbaar zijn. De stijghoogten van het meetpunt ver van het pompstation, varieert weinig. Hieruit kan geconlcudeerd worden dat er weinig invloeden van buitenaf zijn waarvoor er rekening moet worden gehouden bij het kiezen van het tijdsinterval van de punten.



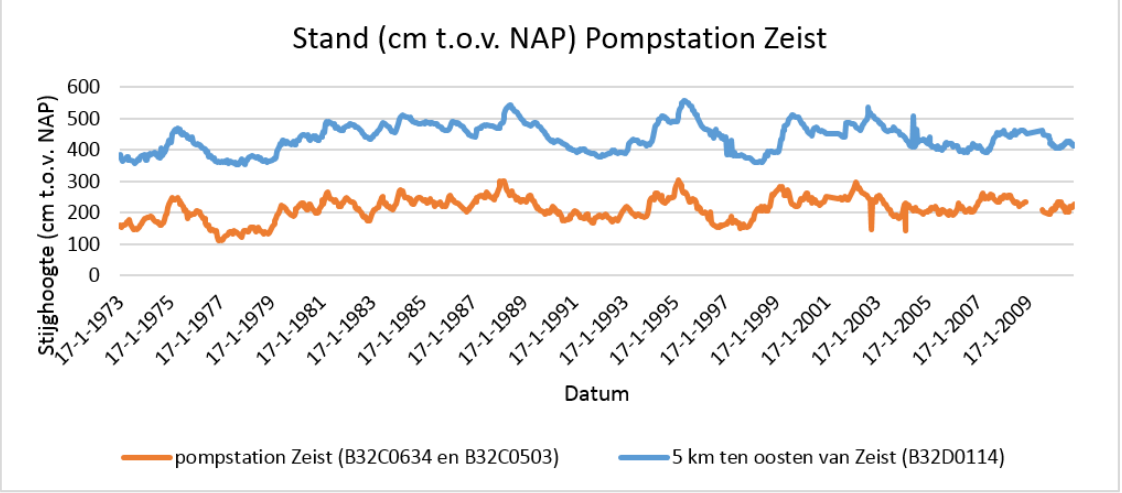
Figuur 20: De stijghoogte over de tijd voor een boorlocatie bij het pompstation Doorn en een boorlocatie op een afstand van minimaal de spreidingslengte tot het pompstation



Figuur 21: De stijghoogte over de tijd voor een boorlocatie bij het pompstation Groenekan en een boorlocatie op een afstand van minimaal de spreidingslengte tot het pompstation



Figuur 22: De stijghoogte over de tijd voor een boorlocatie bij het pompstation Leidsche Rijn en een boorlocatie op een afstand van minimaal de spreidingslengte tot het pompstation



Figuur 23: De stijghoogte over de tijd voor een boorlocatie bij het pompstation Zeist en een boorlocatie op een afstand van minimaal de spreidingslengte tot het pompstation

E MAE voor aangewezen locaties

In tabellen 14 en 15 is de MAE weergegeven voor de stijghoogte, de horizontale doorlatendheid, de weerstand en de spreidingslengte. Hierbij is de MAE uitgerekend voor negen verschillende punten per locatie. Deze punten zijn: het pompstation; 0,5 maal de spreidingslengte ten noorden, ten oosten, ten zuiden en ten westen van het pompstation en 1 maal de spreidingslengte ten noorden, ten oosten, ten zuiden en ten westen van het pompstation.

Tabel 14: De MAE van de stijghoogte voor de modellen Azure en Hydromedah en voor de geïnterpolleerde stijghoogte

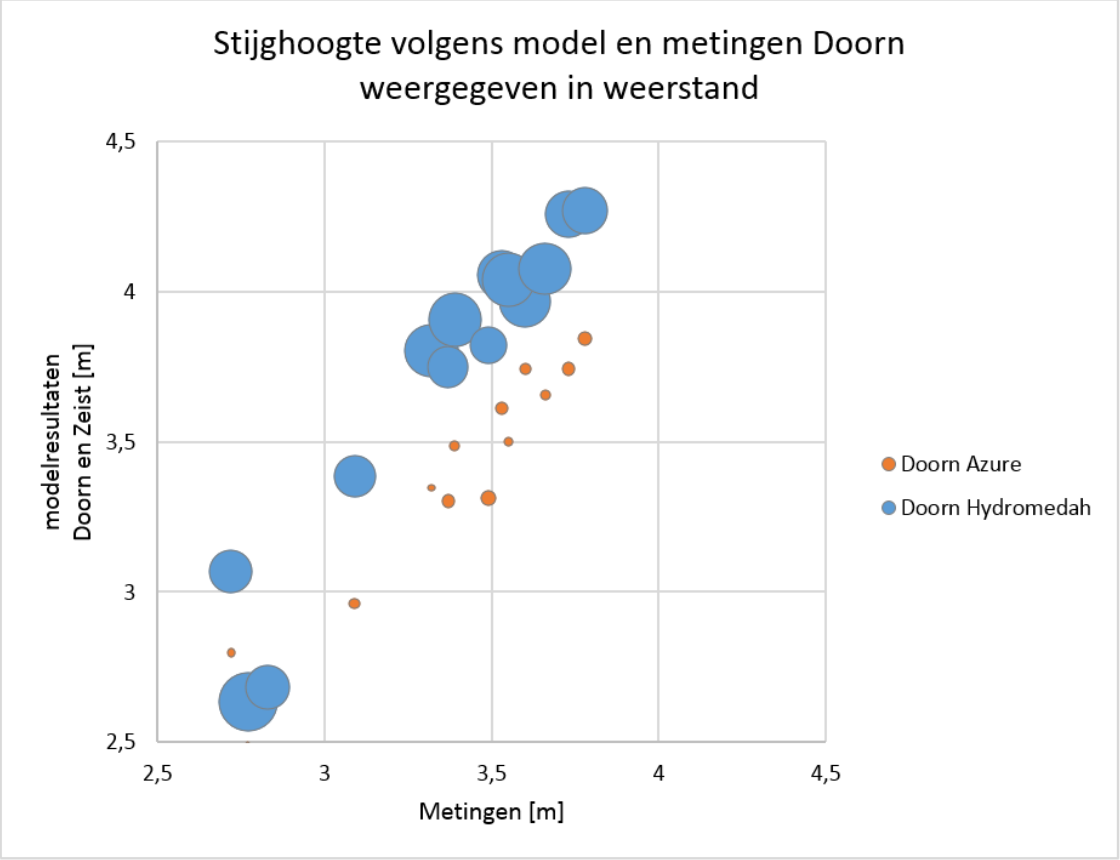
	onttrekking [miljoen m^3/jaar]	stijghoogte [m]	
		Azure	Hydromedah
Doorn	0,9	0,36	0,18
Groenekan	7,5	0,10	0,07
	6	0,13	0,06
Leidsche Rijn	0	0,08	0,06
	4,5	0,16	0,07
Zeist	4,2	0,97	0,35

Tabel 15: De MAE van de horizontale doorlatendheid, weerstand en spreidingslengte voor de modellen Azure, Hydromedah en REGIS II

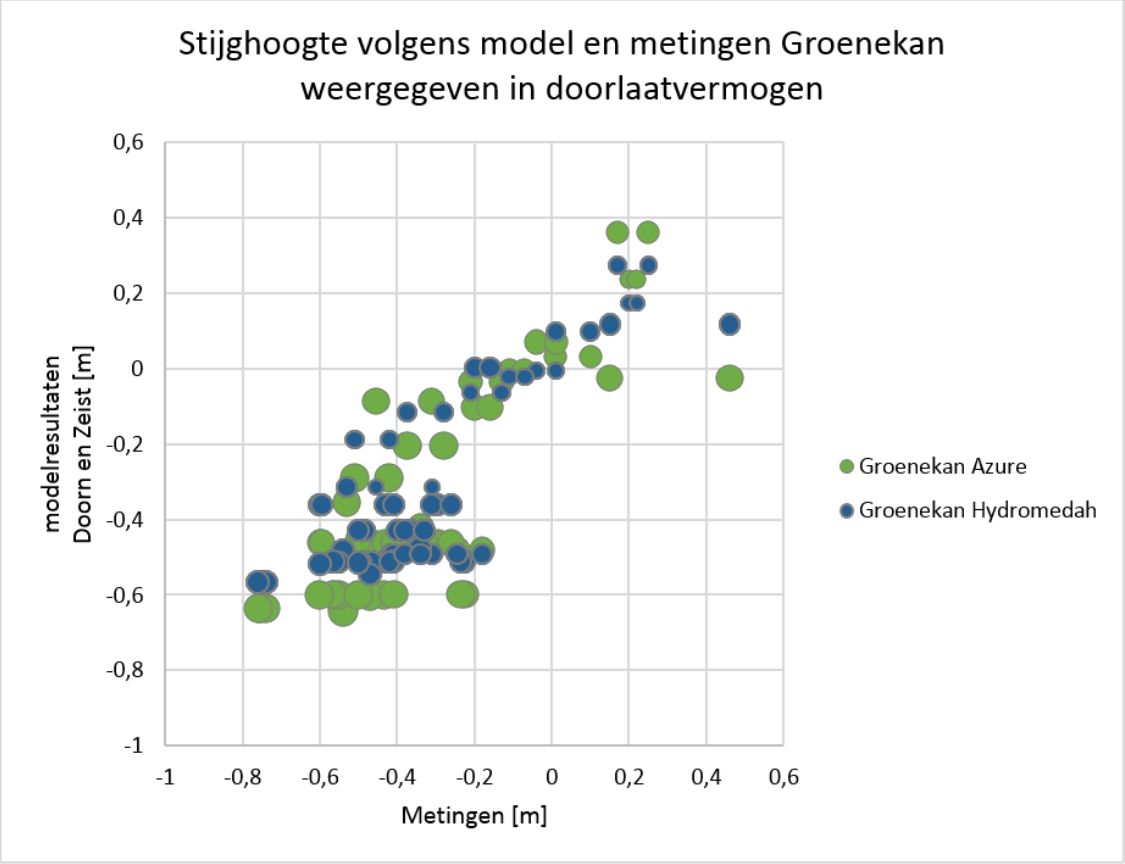
	horizontale doorlatendheid [m^2/dag]		weerstand [dagen]		spreidingslengte [m]	
	Azure	Hydromedah	Azure	Hydromedah	Azure	Hydromedah
Doorn	342	466	494	636	761	955
Groenekan	2525	1992	387	1833	418	915
Leidsche Rijn	2640	2213	1098	8808	1666	2765
Zeist	301	143	208	2452	566	2329

F Verband tussen metingen en stijghoogte per punt

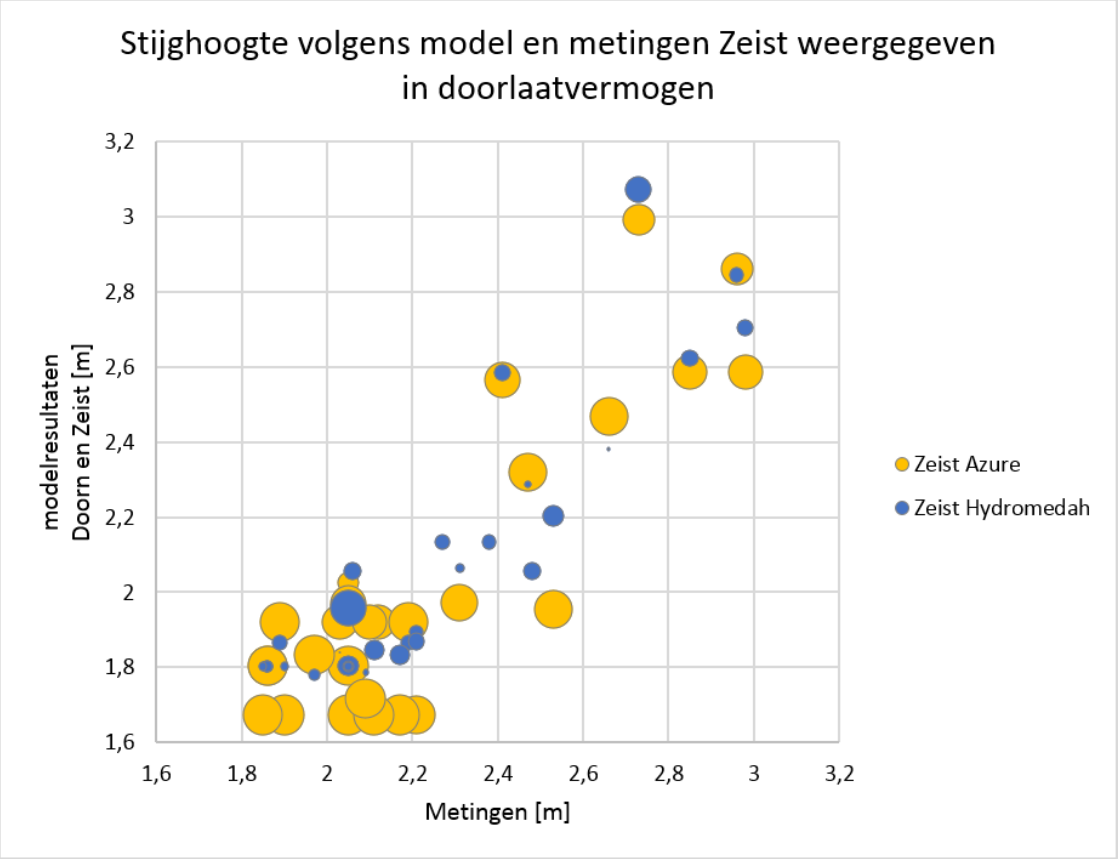
In onderstaande figuren zijn de stijghoogte van de modellen uitgezet tegen de stijghoogte die volgt uit puntmetingen. Elk bolletje is een puntmeting. De grootte van het bolletje stelt de afwijking van de weerstand volgens het model en de weerstand volgens REGIS II voor. Hoe groter het bolletje, hoe meer de weerstand van het model afwijkt van REGIS II. Uit de figuren is duidelijk op te halen dat de weerstanden tussen de modellen verschillen per locatie. Echter is er in een locatie tussen de metingen weinig verband te zien. Er zijn aparte figuren gemaakt met de weerstand, horizontale doorlatendheid en spreidingslengte per locatie. Echter is er in geen van de figuren een verband gezien. Daarom zijn hier enkel drie figuren geplaatst die het idee van alle figuren representeren.



Figuur 24: De stijghoogte volgens het model uitgezet tegen de stijghoogte volgens puntmetingen voor de locatie Doorn. Elk bolletje geeft een puntmeting aan waarbij hoe groter het bolletje, hoe meer de weerstand van het model afwijkt van REGIS II



Figuur 25: De stijghoogte volgens het model uitgezet tegen de stijghoogte volgens puntmetingen voor de locatie Groenekan. Elk bolletje geeft een puntmeting aan waarbij hoe groter het bolletje, hoe meer de horizontale doorlatendheid van het model afwijkt van REGIS II



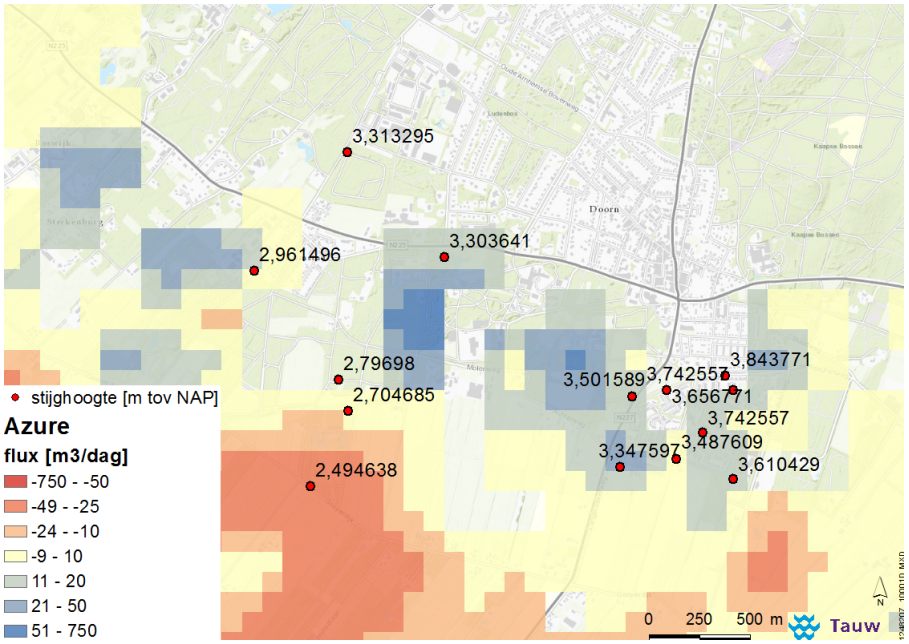
Figuur 26: De stijghoogte volgens het model uitgezet tegen de stijghoogte volgens puntmetingen voor de locatie Zeist. Elk bolletje geeft een puntmeting aan waarbij hoe groter het bolletje, hoe meer de horizontale doorlatendheid van het model afwijkt van REGIS II

G De verticale flux van de watergangen

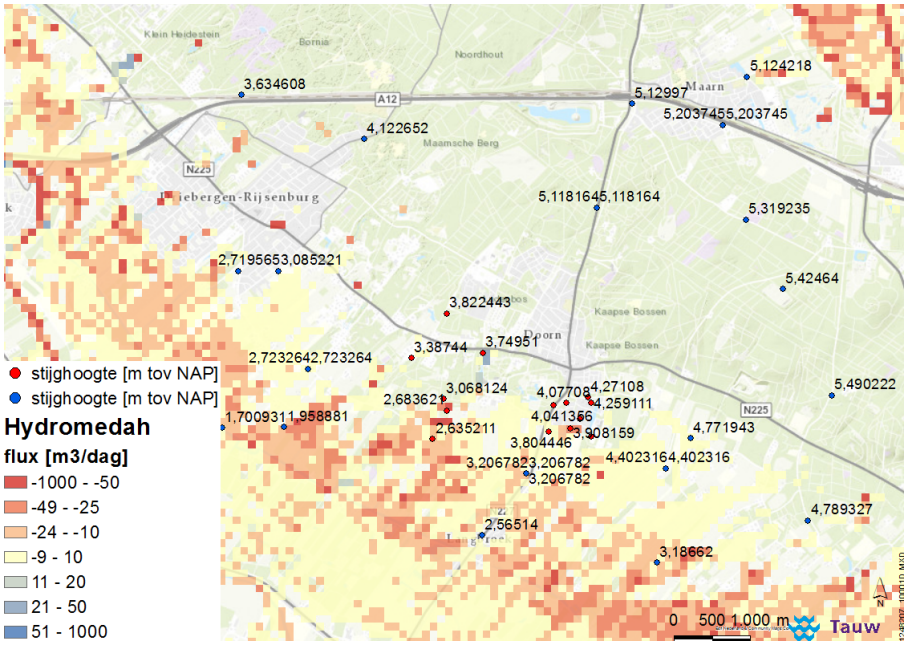
In tabel 16 is de visuele vergelijking te vinden die gemaakt is tussen de stijghoogte en de flux. De figuren met daarin de stijghoogte en de flux zijn onder de tabel te vinden.

Tabel 16: De visuele vergelijking tussen Hydromedah en Azure. Hierbij is er gekeken naar de stijghoogte en de flux

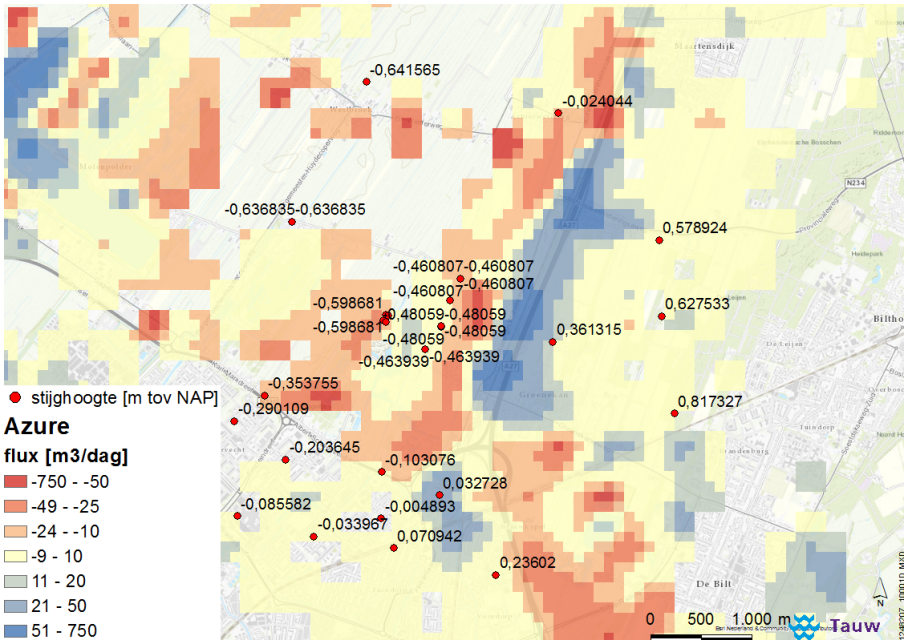
	stijghoogte	flux
Doorn	Hydromedah heeft over het algeheel een hogere stijghoogte dan Azure. De stijghoogte van Azure komt beter overeen met de metingen dan de stijghoogte van Hydromedah.	Op de plek van de metingen, gaat er water de grond in bij Azure. Bij Hydromedah is dit niet het geval. Dit zou betekenen dat Azure een hogere stijghoogte heeft dan Hydromedah.
Groenekan	De stijghoogte van Azure is op de meeste punten vrijwel gelijk aan de stijghoogte van Hydromedah.	De flux varieert tussen Azure en Hydromedah. Op enkele punten stroomt er bij Azure water de grond in vanuit de watergangen. Terwijl bij Hydromedah er dan juist water vanuit de grond de watergangen instroomt. Dit proces gebeurt ook precies andersom.
Leidsche Rijn	De stijghoogtes van Azure en Hydromedah wijken nauwelijks af van de gemeten stijghoogte. De grootte en richting van de afwijking is bij Azure en Hydromedah ook vrijwel gelijk.	Bij Azure varieert de flux meer dan bij Hydromedah. Er stroomt op veel plekken dus meer water de grond in of uit bij Azure. Echter is deze invloed nauwelijks te merken in de stijghoogte.
Zeist	De stijghoogtes van beide modellen verschillen weinig van elkaar. Echter ligt de stijghoogte van Azure gemiddeld iets hoger dan die van Hydromedah. Daarmee lijkt de stijghoogte van Azure meer op de metingen.	Op de plek van metingen bij Zeist zijn nauwelijks watergangen dus ook geen flux.



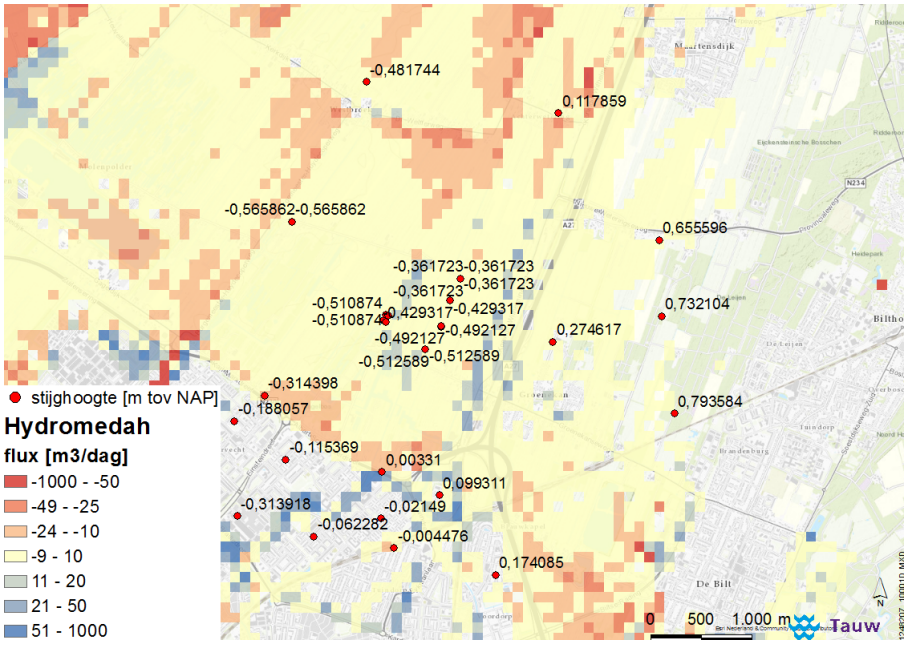
Figuur 27: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Azure voor de locatie Doorn



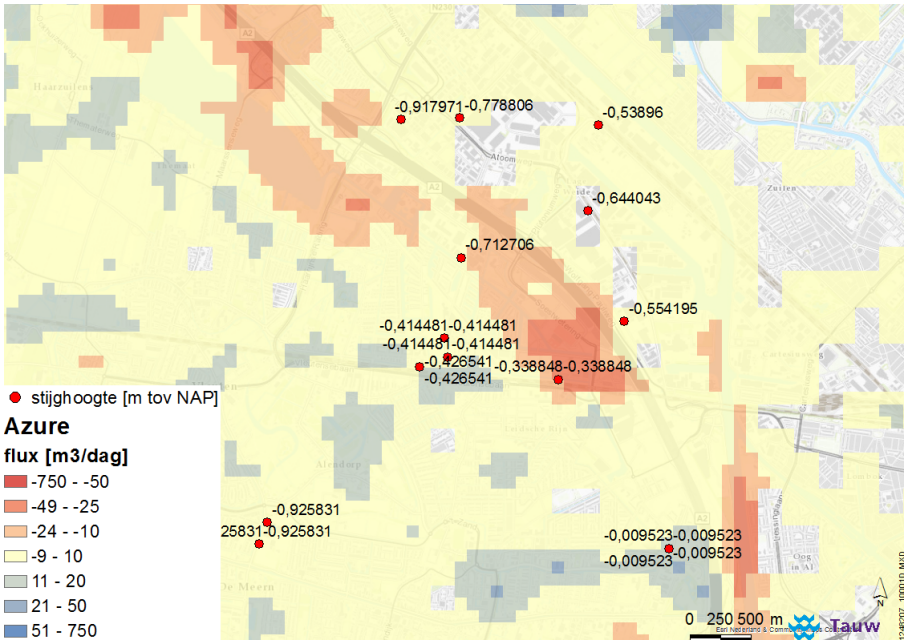
Figuur 28: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Hydromedah voor de locatie Doorn



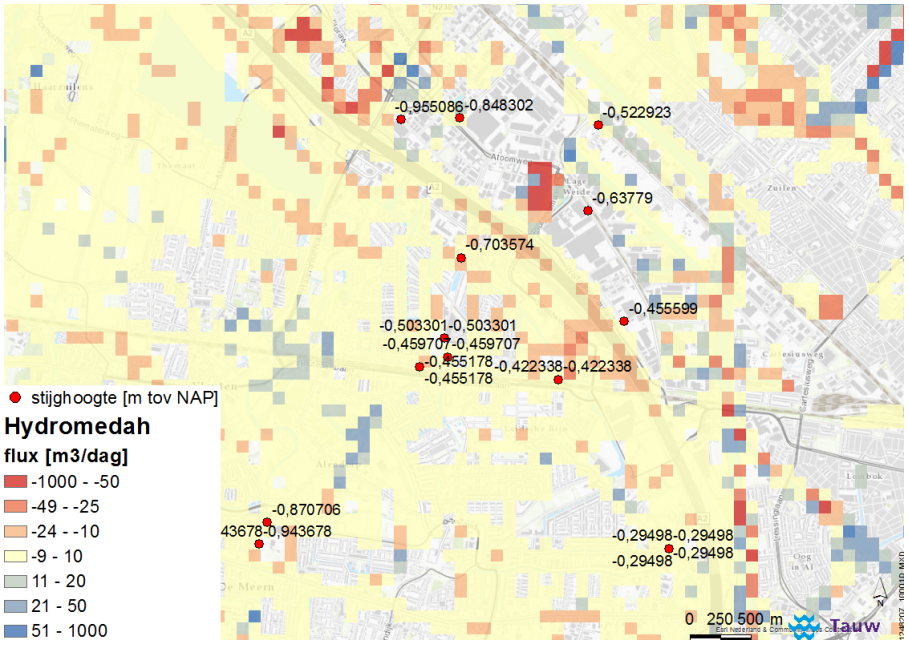
Figuur 29: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Azure voor de locatie Groenekan



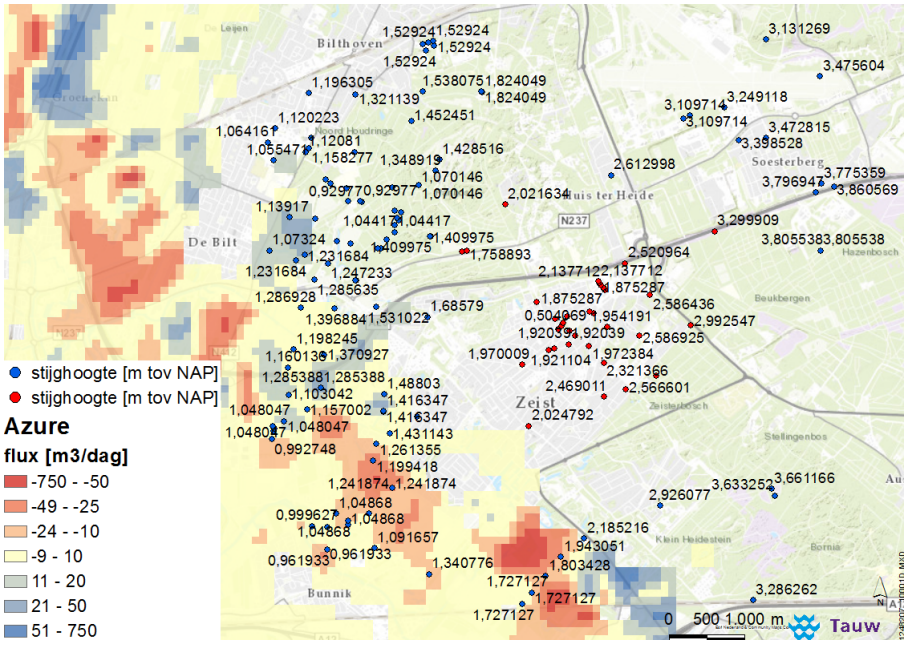
Figuur 30: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Hydromedah voor de locatie Groenekan



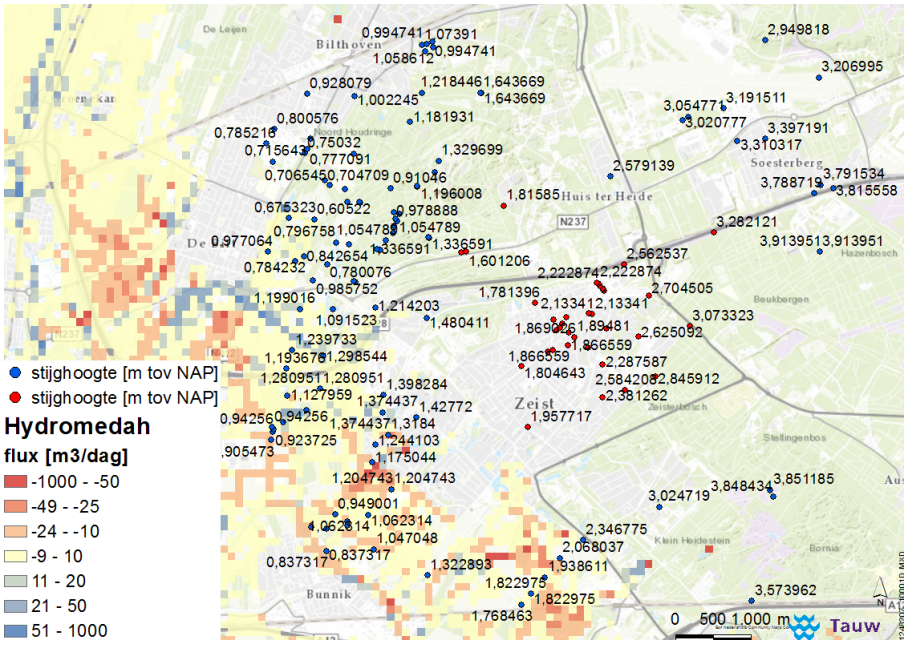
Figuur 31: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Azure voor de locatie Leidsche Rijn



Figuur 32: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Hydromedah voor de locatie Leidsche Rijn



Figuur 33: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Azure voor de locatie Zeist



Figuur 34: De flux in $[m^3/dag]$ van het model Hydromedah voor de locatie Zeist