

Invloed klimaatverandering op grondwaterstand in stedelijk gebied

Definitief

Uitgebracht aan:

Wareco Ingenieurs

Auteur	Maarten Baan	Periode	22-04 t/m 04-07-2014
		Datum	11-07-2014

Wareco is het Nederlandse ingenieursbureau op het gebied van water, bodem en funderingen. Onze kracht is de integratie en combinatie van de specialisaties. We doen onderzoek en geven advies. We maken plannen en begeleiden de uitvoering. Enthousiast, persoonlijk en innovatief. Al 30 jaar leveren we maatwerk, met als resultaat hoge kwaliteit en duurzame, kostenbesparende oplossingen.

Vanuit haar vestigingen in Deventer en Amstelveen bedient Wareco met circa 60 professionals overheden, bedrijfsleven en particulieren.

Wareco beschikt over een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitssysteem en een ISO 14001 gecertificeerd milieumanagementsysteem. Daarin worden de kwaliteit van onze adviseurs, de producten die we leveren en het adviesproces duurzaam geborgd.

Voorwoord

Dit verslag is het eindproduct van de bachelor eindopdracht die uitgevoerd is bij Wareco Ingenieurs in Deventer. De opdracht is uitgevoerd als afronding van de bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. In dit voorwoord wil ik mijn collega's bij Wareco bedanken voor de fijne werksfeer en de ruimte die ik heb gekregen om de opdracht uit te voeren. Daarnaast wil ik Henk Krajenbrink bedanken voor de goede begeleiding. Bij vragen werd er direct tijd vrijgemaakt, ook als die er eigenlijk niet was. Als laatste wil ik mijn begeleider vanuit de universiteit, Kathelijne Wijnberg, bedanken voor haar begeleiding en constructieve feedback.

Deventer, 01-07-2014

Maarten Baan

Samenvatting

Het doel van dit onderzoek is om de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand in stedelijk gebied in beeld te brengen. Dit is belangrijk omdat, wanneer deze invloed bekend is, er dan waar nodig voortijdig maatregelen kunnen worden getroffen om problemen als gevolg van verandering van de grondwaterstand op te vangen.

Om de invloed van klimaatverandering in beeld te brengen is de volgende methode gebruikt. Eerst is er met behulp van tijdreeksanalyses de empirische relatie tussen de grondwaterstand enerzijds en neerslag en verdamping anderzijds vastgesteld. Daarna is het model met deze relaties gesimuleerd op basis van neerslag- en verdampingsreeksen die overeenkomen met de eigenschappen van de KNMI'14-klimaatscenario's. Op basis van deze simulaties zijn betrouwbaarheidsintervallen voor de gemiddelde veranderingen van de grondwaterstand in de gemeentes Almelo, Hogeveen en Delft opgesteld. Ook is onderzocht of er een verband is aan te tonen tussen de mate van verharding en de mate van verandering van de grondwaterstand.

Uit het onderzoek blijkt dat de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand redelijk goed in beeld is te brengen met de gebruikte methode. De methode werkt vooral goed voor steden in het oosten van Nederland, zoals Hogeveen en Almelo. Dit komt omdat de grondwaterstand hier voornamelijk beïnvloed wordt door neerslag en verdamping. Voor het westen van Nederland geldt dat er ook sprake is van andere invloeden op de grondwaterstand die met deze methode niet in beeld worden gebracht. Zo wordt de grondwaterstand vaak gereguleerd door peilbeheer.

Uit het onderzoek blijkt dat de klimaatverandering zorgt voor een toename van de fluctuatie van de grondwaterstand in stedelijk gebied. De hoge grondwaterstand zal door de klimaatverandering stijgen. Dit wordt veroorzaakt door meer neerslag in het winterseizoen. De invloed van de klimaatverandering op de gemiddelde grondwaterstand is minder groot, doordat er in de meeste gevallen sprake is van een stijging van de hoge grondwaterstand en een daling van de lage grondwaterstand. Dit leidt tot grotere fluctuaties, maar het effect op de gemiddelde grondwaterstand zal deels tegen elkaar wegvallen. De lage grondwaterstand zal in de meeste gevallen dalen. Dit wordt veroorzaakt doordat er in alle klimaatscenario's sprake is van een toename van de verdamping. Daarnaast is er in het G_H en W_H scenario sprake van een afname van de hoeveelheid neerslag in de zomer. Door deze factoren zal de lage grondwaterstand dalen.

Ook kan geconcludeerd worden dat de mate van verharding geen significante invloed heeft op de verandering van de grondwaterstand. Wel is er een verband zichtbaar tussen de mate van verandering en de huidige fluctuatie. Doordat de

mate van verharding geen significante invloed heeft op de mate van verandering van de grondwaterstand, kan geconcludeerd worden dat de huidige fluctuatie ook afhangt van andere factoren dan de mate van verharding.

De gebruikte methode brengt alleen de invloed van klimaatverandering op lokale schaal in beeld. De grondwaterstand hangt echter ook af van een aantal andere factoren. Zo kunnen regionale grondwaterstromen veranderen doordat het verschil in hoogte van de grondwaterstand tussen verschillende plekken kan veranderen. Daarnaast zal de klimaatverandering ook zorgen voor het stijgen van de zeespiegel, met als gevolg meer zoute indringing langs de kust en een stijging van de grondwaterstand. Ook de afvoer van de Rijn kan veranderen door de klimaatverandering. Deze afvoer heeft invloed op de grondwaterstand. Een verandering van de afvoer kan dus ook leiden tot een verandering van de grondwaterstand. De invloed van klimaatverandering op deze factoren is niet in beeld gebracht.

Inhoudsopgave

Tekst	pagina
Voorwoord	
Samenvatting	
1. Inleiding.....	1
1.1. Aanleiding	1
1.2. Doelstelling	1
1.3. Onderzoeksvragen	2
1.4. Leeswijzer	2
2. Scope	3
2.1. Geanalyseerde gemeentes.....	3
2.2. Mate van verharding.....	3
2.3. Klimaatverandering	5
2.4. Tijdshorizon	5
3. Onderzoeksmethode.....	6
3.1. Peilbuizen selecteren	6
3.2. Huidige situatie modelleren.....	7
3.3. Toekomstige situatie simuleren	9
3.4. Vergelijking huidige en toekomstige situatie	9
3.5. Invloed mate van verharding	11
3.6. Beantwoording hoofd- en deelvragen.....	12
4. Opstellen modellen.....	13
4.1. Gemeente Almelo.....	13
4.2. Gemeente Hoogeveen.....	14
4.3. Gemeente Delft	16
4.4. Algemeen beeld	18
5. Toekomstige situatie	20
5.1. Verandering grondwaterstand	20
5.2. Invloed mate van verharding	22

5.3.	Interpretatie resultaten	23
6.	Discussie	26
7.	Conclusie en aanbevelingen	28
8.	Bibliografie	30

Bijlagen

Bijlage 1: Klimaatscenario's en transformatieprogramma

Bijlage 2: Tijdreeksanalyse en Menyanthes

Bijlage 3: Bepaling uitschieters en verdeling

Bijlage 4: Verandering grondwaterstand

Bijlage 5: Opstellen betrouwbaarheidsintervallen

Bijlage 6: Invloed mate van verharding

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Door de verandering van het klimaat staat de kwaliteit van de leefomgeving in dorpen en steden onder druk. Dit wordt veroorzaakt door zwaardere regenval, langere droge periodes en meer warme dagen. Dit zorgt nu al voor enige schade aan gebouwen, infrastructuur en openbare ruimte. Daarnaast heeft dit nadelige gevolgen voor het welzijn van de bewoners. Veranderingen in de grondwaterstand kunnen op verschillende plaatsen problemen en schade opleveren. Zo kunnen bijvoorbeeld kruipruimtes onder water komen te staan als de grondwaterstand stijgt, grond kan zich gaan zetten als de grondwaterstand daalt en houten paalfunderingen kunnen gaan rotten bij grotere fluctuaties van de grondwaterstand.

Door middel van dit onderzoek wordt de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand in beeld gebracht. Als duidelijk is in hoeverre de grondwaterstand verandert, kan men controleren of er in de toekomst nog voldaan wordt aan het gestelde beleid. Is dit niet het geval, dan kunnen er voortijdig maatregelen worden genomen om schade te voorkomen. De kosten voor deze maatregelen zullen lager uitvallen als deze nu al gecombineerd kunnen worden met andere noodzakelijke werkzaamheden, in plaats van deze later apart uit te voeren.

1.2. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om met behulp van tijdreeksanalyses een inschatting te maken van de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand in stedelijk gebied. Dit zal gedaan worden voor enkele gemeentes waarvan Wareco de grondwatermeetnetten beheert. Uit het onderzoek zal blijken in hoeverre de grondwaterstand in stedelijk gebied verandert door de klimaatverandering. Hierbij wordt onderzocht of er grotere fluctuaties optreden, of dat de representatief hoogste grondwaterstand (RHG), de representatief laagste grondwaterstand (RLG) of de gemiddelde grondwaterstand (GG) verandert. De RHG is gebaseerd op de 90^e percentielwaarde van de gemeten grondwaterstanden. Dit betekent dat 90 % van de metingen lager zijn dan deze waarde. De RLG is gebaseerd op de 10^e percentielwaarde van de gemeten grondwaterstanden. Dit betekent dat 10 % van de metingen lager is dan deze waarde. De gemiddelde grondwaterstand is het gemiddelde van alle gemeten grondwaterstanden. Ook wordt er onderzocht of de invloed van de klimaatverandering verschillend is in gebieden met een verschillende mate van verharding.

1.3. Onderzoeksvragen

Om aan het gestelde doel van het onderzoek te kunnen beantwoorden, is de volgende hoofdvraag opgesteld: "Wat is de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand in stedelijk gebied?"

Deze hoofdvraag zal beantwoord worden door met behulp van tijdreeksanalyses empirische relaties tussen gemeten grondwaterstanden en gemeten neerslag en verdamping vast te stellen en daarmee de volgende deelvragen te beantwoorden:

- In hoeverre verandert de RHG, GG, of de RLG door de klimaatverandering?
- In hoeverre treden er grotere fluctuaties van de grondwaterstand op door de klimaatverandering?
- In hoeverre verschillen de veranderingen van de grondwaterstand tussen steden in oost en west Nederland?
- In hoeverre verschillen de veranderingen van de grondwaterstand tussen gebieden die in een verschillende mate verhard zijn?

1.4. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de scope van het onderzoek toegelicht. Hier komt aan bod welke gemeentes zijn onderzocht, welk onderscheid er wordt gemaakt in mate van verharding, van welke klimaatverandering uit wordt gegaan en voor welke tijdshorizon het onderzoek gedaan wordt. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens de onderzoeksmethode beschreven. Daarna volgt de beschrijving van het modelleren van de huidige situatie en de selectie van de peilbuizen in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt vervolgens een inschatting gemaakt van de toekomstige grondwaterstanden in de geselecteerde peilbuizen. In hoofdstuk 6 volgen enkele discussiepunten. In hoofdstuk 7 worden de conclusies van het onderzoek gepresenteerd en worden enkele aanbevelingen gedaan.

2. Scope

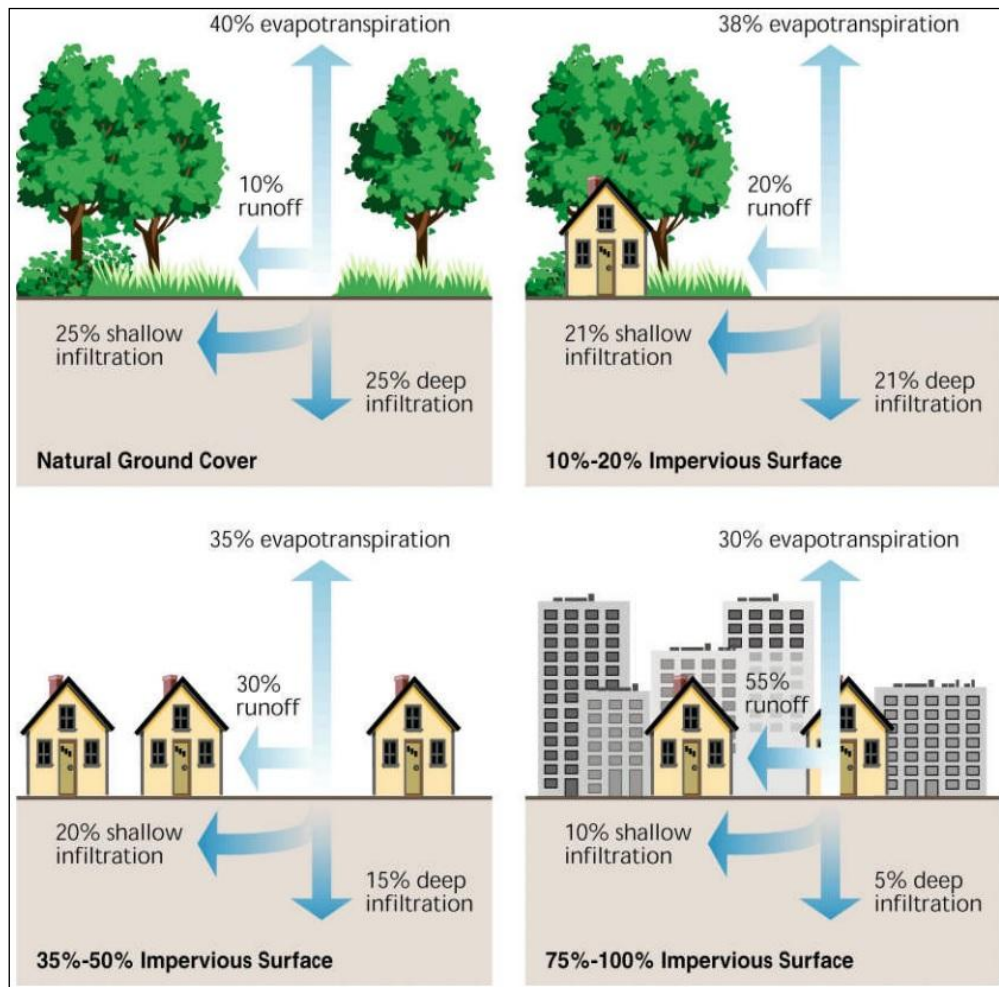
In dit hoofdstuk wordt beschreven welke gemeentes zijn gebruikt voor het onderzoek en waarom voor deze gemeentes is gekozen. Daarnaast wordt beschreven waarom er onderscheid is gemaakt in de mate van verharding en welk onderscheid hierin is gemaakt. Ook wordt beschreven welke mate van klimaatverandering gehanteerd is. Als laatste wordt beschreven voor welke tijdshorizon het onderzoek uitgevoerd is.

2.1. Geanalyseerde gemeentes

Wareco beheert grondwatermeetnetten voor verschillende gemeentes in Nederland. Deze meetnetten bestaan uit peilbuizen met dataloggers die de grondwaterstand elk uur meten. Zo ontstaan hoogfrequente tijdreeksen van de grondwaterstand in deze gemeentes. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van het grondwatermeetnet van de gemeentes Almelo, Hoogeveen en Delft. Er is voor deze gemeentes gekozen omdat ze een uitgebreid meetnet hebben dat al een aantal jaren meet. Daarnaast verschillen de gemeentes onderling wat betreft bodemopbouw en geografische ligging. Zo bestaat de bodem in de gemeente Almelo voornamelijk uit zandlagen en zijn er relatief weinig onnatuurlijke elementen die het verloop van de grondwaterstand beïnvloeden, zoals vijvers, vaste peilen, drainage, etc. De ondergrond in de gemeente Hoogeveen bestaat voornamelijk uit zand en leem. Ook komen er enkele veenlagen voor. De ondergrond in de gemeente Delft bestaat voornamelijk uit klei. Daarnaast ligt de gemeente Delft, in tegenstelling tot de gemeente Almelo en Hoogeveen, in de polder. Hier wordt de grondwaterstand door veel onnatuurlijke factoren, zoals vaste peilen in watergangen en drainage, beïnvloed. Door voor deze gemeentes te kiezen is ook in beeld gebracht of de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand verschilt tussen steden in oost en west Nederland.

2.2. Mate van verharding

Zoals aangegeven is er ook onderzocht of er verschil is in de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand tussen gebieden met een verschillende mate van verharding. De mate van verharding heeft namelijk invloed op de grondwaterstand in een gebied. Als er meer verharding aanwezig is in een gebied, zal er meer water oppervlakkig afstromen naar bijvoorbeeld open waterlopen en het rioolstelsel en minder water infiltreren en verdampen. Een indicatie van deze verschillen is weergegeven in Figuur 1 (Schöniger, 2007).



Figuur 1: Afvoerroutes neerslag bij verschillende mate van verharding

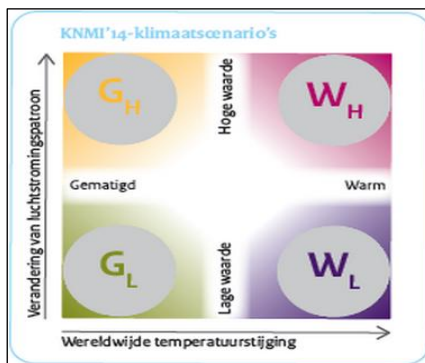
Doordat dit het geval is, heeft de mate van neerslag en verdamping een kleinere invloed op de grondwaterstand in verhard gebied dan in onverhard gebied. De verwachting is dat ook veranderingen in de mate van neerslag en verdamping een kleinere invloed zullen hebben naarmate er meer verhard oppervlak aanwezig is. Door peilbuizen te selecteren in gebieden met een verschillende mate van verharding, is onderzocht of dit daadwerkelijk het geval is. In Tabel 1 is het onderscheid in mate van verharding weergegeven.

Tabel 1: Onderscheid mate van verharding

	Omschrijving
Klasse 1	(Nagenoeg) geheel onverhard
Klasse 2	Grotendeels onverhard, ook delen verhard
Klasse 3	Grotendeels verhard, ook delen onverhard
Klasse 4	(Nagenoeg) geheel verhard

2.3. Klimaatverandering

Voor de mate van klimaatverandering is gebruik gemaakt van de klimaat-scenario's die zijn opgesteld door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Deze scenario's zijn gepubliceerd op 26 mei 2014. Voor het weer rondom het jaar 2050 en 2085 zijn vier scenario's opgesteld. Deze vier scenario's worden onderscheiden door de mate van temperatuurstijging en luchtstroomverandering. In figuur 2 is de verdeling van de scenario's weergegeven (KNMI, 2014a).



Figuur 2: KNMI'14-klimaatscenario's

De scenario's G_L en G_H gaan uit van een temperatuurstijging van 1 graad in 2050 en 1,5 graden in 2085. De scenario's W_L en W_H gaan uit van een temperatuurstijging van 2 graden in 2050 en 3,5 graden in 2085. In alle scenario's zal de potentiële verdamping toenemen. Doordat de temperatuurstijging in de scenario's W_L en W_H extremer is, zal de potentiële verdamping ook meer toenemen. In alle scenario's zal de totale neerslag en de intensiteit van extreme buien in de winter toenemen. In de zomer neemt de intensiteit van extreme buien ook toe in alle scenario's. De totale hoeveelheid neerslag neemt in de zomer echter alleen toe in het G_L en W_L scenario. In het G_H en W_H scenario neemt de totale hoeveelheid neerslag in de zomer af. Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar bijlage 1.

2.4. Tijdshorizon

Als tijdshorizon voor het onderzoek is gekozen voor de middellange (2050) en lange termijn (2085). Dit is ten eerste gedaan omdat de klimaatscenario's van het KNMI ook gemaakt zijn voor deze tijdshorizon. Daarnaast is het beleid van gemeentes vaak gericht op één van deze periodes.

3. Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk zal de methode van het onderzoek worden toegelicht. Dit wordt gedaan door de gebruikte methode stap voor stap te beschrijven. De eerste stap is het selecteren van geschikte peilbuizen voor het onderzoek.

3.1. Peilbuizen selecteren

In de gemeentes die onderzocht zijn, is per gemeente een selectie gemaakt van de peilbuizen in deze gemeente. Hierbij is ten eerste gekeken welke peilbuizen een meetreeks hebben die volledig is. Het kan namelijk voorkomen dat de logger in de peilbuizen een periode geen data heeft verzameld omdat de logger defect is. Ook kan het voorkomen dat de logger droog komt te staan, waardoor er geen goede meting is verricht. Reeksen die onvolledig zijn, of te maken hebben gehad met droogstand, zijn minder geschikt voor een tijdreeksanalyse. Daarom is gekozen voor peilbuizen met een volledige en consistente reeks.

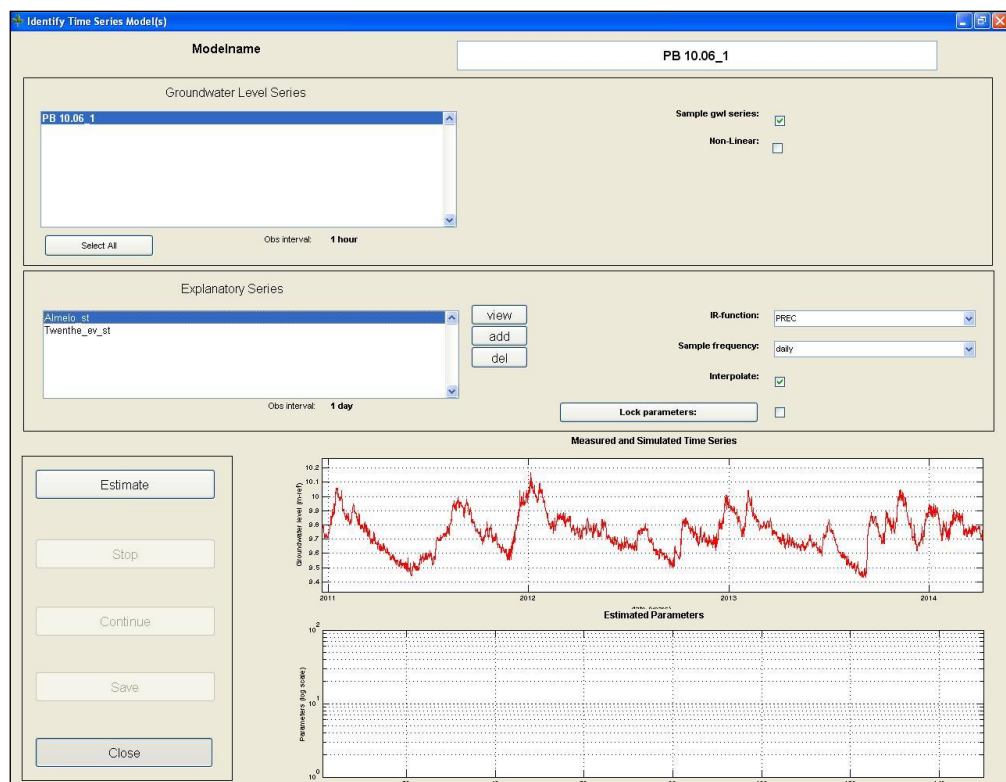
Uit deze peilbuizen is vervolgens een aantal peilbuizen gekozen. Er is voor zover mogelijk een gelijk aantal peilbuizen gekozen voor de verschillende klassen van verharding zoals weergegeven in Tabel 1. Dit is gedaan op basis van luchtfoto's van BING uit 2012. Met behulp van het GIS programma Qgis is op basis van deze luchtfoto's ingeschat wat de mate van verharding binnen een straal van 50 meter rondom de peilbuis is. Daarnaast is gecontroleerd of er binnen een straal van 100 meter geen grote verstorende elementen aanwezig zijn, zoals bijvoorbeeld een vijver. Doordat het peil in vijvers vaak op hetzelfde niveau wordt gehouden, heeft dit een drainerende werking op de grondwaterstand in de omgeving. Daardoor heeft de grondwaterstand in de omgeving een minder natuurlijk verloop en is een meetreeks van deze grondwaterstand minder geschikt voor tijdreeksanalyse.

Bij de geselecteerde peilbuizen is als laatste gecontroleerd of er in de nabije omgeving van de peilbuis geen verandering heeft plaatsgevonden in de bebouwing. Dit kan namelijk gevolgen hebben voor het verloop van de grondwaterstand in het gebied. Tijdens het bouwproces kan er bijvoorbeeld bemaling zijn toegepast, waardoor de grondwaterstand kunstmatig laag is gehouden. Daarnaast kan door de verandering in bebouwing het verhard oppervlak zijn toegenomen, wat ook gevolgen heeft voor het verloop van de grondwaterstand. Door deze onnatuurlijke invloeden op de grondwaterstand, kan er een minder goed model worden gemaakt van het verloop van de grondwaterstand op basis van de neerslag en verdamping. Om te controleren of er geen verandering in de bebouwing is geweest tijdens de meetperiode, is gebruik gemaakt van gegevens van de Basis Administratie Gebouwen (BAG). Met behulp van deze gegevens kan worden nagegaan wat het bouwjaar is van de panden rondom de peilbuis. Als er ook geen verandering in de bebouwing heeft plaatsgevonden, is de peilbuis geschikt om mee verder te werken.

3.2. Huidige situatie modelleren

Met behulp van het programma Menyanthes is een model gemaakt van de meetreeksen van de peilbuizen die geselecteerd zijn. Menyanthes maakt een model van de meetreeksen op basis van verklarende reeksen. Door middel van een iteratieproces, wordt het model zo goed mogelijk gefit aan de meetreeks van de grondwaterstand. De verklarende reeksen die in dit onderzoek gebruikt zijn, zijn de neerslag- en verdampingsgegevens van het dichtstbijzijnde station van het KNMI. Met behulp van Menyanthes kunnen deze stations eenvoudig gevonden worden en kan de data in Menyanthes worden geïmporteerd. Voor de neerslag- en verdampingsreeksen is gekozen voor een dagelijkse frequentie. Dit omdat de maximale frequentie van verdamping veelal dagelijks is. Daarnaast is de maximale frequentie voor de getransformeerde neerslag- en verdampingsreeksen voor de toekomst ook dagelijks. Wat deze getransformeerde reeksen zijn, zal worden toegelicht in paragraaf 3.3.

In Figuur 3 is het modelscherm binnen Menyanthes weergegeven.



Figuur 3: Modelscherm Menyanthes

In het bovenste kader wordt de meetreeks van de grondwaterstand weergegeven waarvoor het model gemaakt wordt. Hier is de optie 'Sample gwl series' aangevinkt. Dit houdt in dat de meetreeks van de grondwaterstand, die nu een uurlijkse frequentie heeft, wordt teruggebracht naar een dagelijkse frequentie. Dit

wordt gedaan omdat de data van de KNMI-stations ook een dagelijkse frequentie hebben. Het heeft dan geen nut om een model te maken op basis van uurlijkse metingen van de grondwaterstand. In het kader daaronder zijn de verklarende reeksen weergegeven. Door op de knop 'Estimate' te klikken, worden de parameters van het model geschat. In bijlage 2 wordt het modelleringsproces binnen Menyanthes in meer detail beschreven.

Als Menyanthes een model heeft gemaakt, kan het model beoordeeld worden aan de hand van enkele criteria. Ten eerste is het model gecontroleerd aan de hand van het percentage verklaarde variantie van het model (EVP). Dit percentage wordt beschreven door de volgende formule:

$$EVP = \frac{\sigma_h^2 - \sigma_n^2}{\sigma_h^2} * 100 \%,$$

waarin σ_h^2 is de variantie van de gemeten grondwaterstanden en σ_n^2 is de variantie van de residuen, dus de verschillen tussen de gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden (Von Asmuth J. R. et al., 2012). Hoe groter het percentage verklarende variantie, hoe beter het model de werkelijkheid simuleert. In dit onderzoek wordt het model geaccepteerd als het EVP groter is dan 75 %. Naast het EVP is het model beoordeeld aan de hand van de Root Mean Square Error (RMSE). Dit is de wortel uit de gemiddelde kwadratische afwijking tussen het model en de werkelijke waarden (McClave, Benson, Sincich, & Knypstra, 2011). Hoe lager de RMSE, hoe beter het model de werkelijkheid simuleert. Een RMSE lager dan 15 cm wordt in dit onderzoek geaccepteerd. Er is gekozen voor deze grenswaarden van het EVP en de RMSE, omdat veranderingen in de toekomstige situatie anders voor een groot deel veroorzaakt kunnen worden door een fout in het model.

Als er aan deze statistische criteria wordt voldaan, is er ook gecontroleerd of de parameters van het model plausibel zijn. Het model kan namelijk de huidige situatie wel goed modelleren, maar als dit gebeurt met niet plausibele parameters, zal de simulatie voor de toekomst niet betrouwbaar zijn. Van de volgende parameters kan de plausibiliteit gecheckt worden: local drainage base, M_0 en de verdampingsreductiefactor (Von Asmuth J. R., Maas, Bakker, & Petersen, 2008). Ten eerste is gecontroleerd wat de waarde is van de local drainage base. Deze waarde geeft aan wat de grondwaterstand zou zijn als er lange tijd geen neerslag en verdamping zou zijn. Als de waarde hiervan boven maaiveld ligt, of juist heel ver onder maaiveld, is deze waarde niet realistisch. Ook is de waarde M_0 gecontroleerd. Deze waarde geeft aan hoelang het duurt voordat de laagste grondwaterstand wordt bereikt, als er lange tijd geen neerslag en verdamping zou zijn (Bakker, Maas, & Von Asmuth, 2008). In een snel reagerend systeem ligt deze waarde in de buurt van 100 dagen, in een traag reagerend systeem kan dit oplopen tot meer dan 3000 dagen (Leunk, Houten, & Maas, 2012). Als laatste is de waarde van de verdampingsreductiefactor (evap. factor) gecontroleerd. Deze moet ongeveer tussen 0,5 en 2 liggen. Deze factor kan groter zijn dan 1, omdat deze ook rekening houdt met onttrekkingen van bijvoorbeeld landbouw en drinkwaterbedrijven (Von Asmuth J. R et al., 2008).

Als aan de statistische criteria wordt voldaan en de parameters van het model plausibele waarden hebben, is het model gebruikt om de grondwaterstanden in de toekomst te simuleren. Als dit niet het geval is, is er een vervangende peilbuis geselecteerd, met, voor zover mogelijk, dezelfde mate van verharding. Hoe de toekomstige situatie gesimuleerd is, wordt beschreven in de volgende paragraaf.

3.3. Toekomstige situatie simuleren

Om de toekomstige grondwaterstand te simuleren voor een bepaald klimaatscenario, zijn er fictieve neerslag- en verdampingsreeksen nodig voor de toekomst die voldoen aan de eigenschappen van de verschillende klimaatscenario's. Het KNMI heeft een programma ontwikkeld dat neerslag- en verdampingsreeksen uit het verleden kan transformeren naar neerslag- en verdampingsreeksen die voldoen aan de eigenschappen van de verschillende klimaatscenario's. Met dit programma zijn voor dit onderzoek de benodigde neerslag- en verdampingsreeksen voor de toekomst gegenereerd. Hoe de neerslag- en verdampingsreeksen worden getransformeerd is beschreven in bijlage 1.

Als de neerslag- en verdampingsreeksen voor de toekomst zijn opgesteld, is het opgestelde model in Menyanthes gesimuleerd op basis van deze neerslag- en verdampingsreeksen. Dit is gedaan op basis van zowel het deterministische als het stochastische deel van het model. Dit omdat het deterministische deel van het model de variatie van de fluctuaties onderschat. Met behulp van het stochastische deel van het model, wordt het verloop van de grondwaterstand, inclusief de pieken, beter in beeld gebracht (Von Asmuth J. R. et al., 2012). De uitkomst van deze simulatie levert een reeks grondwaterstanden op voor de toekomst rond 2050 of 2085, die vervolgens vergeleken is met de historische reeks grondwaterstanden. Hoe deze reeksen vergeleken zijn, wordt beschreven in de volgende paragraaf.

3.4. Vergelijking huidige en toekomstige situatie

De reeksen voor de toekomst zijn per scenario vergeleken met de huidige situatie. Er is een vergelijking gemaakt tussen de huidige en toekomstige fluctuatie, RHG, GG en RLG.

De fluctuatie van de grondwaterstand wordt beschreven door het verschil tussen de RHG en de RLG. De verandering van de fluctuatie is zowel absoluut als relatief berekend. De veranderingen van de RHG, GG en RLG zijn eveneens zowel absoluut als relatief berekend. Deze zijn relatief berekend door de absolute verandering te delen door de fluctuatie in de huidige situatie.

Vervolgens is per klimaatscenario en per gemeente getoetst in hoeverre de fluctuatie, RHG, GG en RLG van de grondwaterstand gemiddeld genomen veranderen. Dit is gedaan door het construeren van betrouwbaarheidsintervallen voor het gemiddelde van de relatieve veranderingen van de fluctuatie, RHG, RLG en GG. Hiervoor is per gemeente eerst gecontroleerd of er sprake is van uitschieters. Hoe dit is gedaan, wordt beschreven in bijlage 3. Mocht er sprake zijn van een uitschieter, dan is deze verandering niet meegenomen in het opstellen van het betrouwbaarheidsinterval.

Om het betrouwbaarheidsinterval vervolgens op te stellen, is eerst getoetst of de relatieve veranderingen per gemeente normaal verdeeld zijn. Dit is gedaan met behulp van de Shapiro-Wilk test (Shapiro & Wilk, 1965). Een beschrijving van deze test is te vinden in bijlage 3. Uit de Shapiro-Wilk test volgt of de relatieve veranderingen van de fluctuatie, RHG, GG of RLG per gemeente normaal verdeeld zijn. Voor het toetsen van normaliteit en daarna voor het opstellen van de betrouwbaarheidsintervallen is een significantieniveau, α , van 0,05 aangehouden. Als vuistregel wordt over het algemeen aangehouden dat dit niveau statistisch significant is (McClave et al., 2011).

Als de veranderingen normaal verdeeld zijn, is het betrouwbaarheidsinterval opgesteld op basis van de t-verdeling. Bij het gebruik van deze verdeling wordt aangenomen dat de steekproef genomen is uit een populatie die normaal verdeeld is. Daarom is hiervoor de Shapiro-Wilk test uitgevoerd. Er is geen gebruik gemaakt van de normale verdeling omdat de steekproef per gemeente niet groot genoeg is om deze verdeling te gebruiken. Om van de normale verdeling gebruik te maken, moet de steekproef namelijk groter zijn dan 30 (McClave et al., 2011). Het maximum aantal peilbuizen dat in één gemeente is geanalyseerd is echter 25. De t-verdeling lijkt erg veel op de normale verdeling, maar heeft een minder hoge piek in het midden en is wat breder. Hierdoor zal het betrouwbaarheidsinterval voor de t-verdeling ook wat breder zijn dan voor de normale verdeling. Het betrouwbaarheidsinterval voor de t-verdeling wordt geconstrueerd door middel van de volgende formule:

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}},$$

waarin $\bar{x}$ is het gemiddelde van de veranderingen, n is de grootte van de steekproef, $t_{\alpha/2}$ is een waarde die afhangt van het gekozen significantieniveau, α , in dit geval 0,05 en het aantal vrijheidsgraden, $n - 1$ (McClave et al., 2011).

Als uit de Shapiro-Wilk test volgt dat de relatieve verschillen niet normaal verdeeld zijn, kan de t-verdeling niet gebruikt worden. In dat geval is er een betrouwbaarheidsinterval opgesteld op basis van een verdelingsvrije techniek. Verdelingsvrije technieken zijn niet afhankelijk van de verdeling van de populatie waaruit de steekproef genomen is (McClave et al., 2011). Campbell en Gardner hebben een verdelingsvrije techniek opgesteld om een betrouwbaarheidsinterval te construeren (1988). Voor deze methode moeten de relatieve veranderingen eerst gesorteerd worden van klein naar groot. Vervolgens kan de onder- en

bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval berekend worden. Voor de ondergrens gebeurt dit door de volgende formule in te vullen:

$$r = \frac{n}{2} - \left(N_{1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sqrt{n}}{2} \right),$$

waarin $N_{1-\alpha/2}$ is de waarde voor de standaardnormale verdeling met significantieniveau α . In dit geval is α 0,05 en dus is $N_{1-\alpha/2}$ gelijk aan 1,96 (Campbell & Gardner, 1988). De uitkomst van deze formule, de waarde r , wordt afgerond naar het dichtstbijzijnde gehele getal, bijvoorbeeld 3. De ondergrens van het betrouwbaarheidsinterval is dan de 3^e waarde in de gesorteerde reeks relatieve veranderingen. Voor de bovengrens wordt hetzelfde principe gehanteerd. Het rangnummer van de bovengrens wordt berekend door middel van de volgende formule:

$$s = 1 + \frac{n}{2} + \left(N_{1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sqrt{n}}{2} \right),$$

hier wordt s afgerond naar het dichtstbijzijnde gehele getal.

Op basis van de opgestelde betrouwbaarheidsintervallen kan met een betrouwbaarheid van 95 % worden geconcludeerd hoeveel de fluctuatie, RHG, GG of RLG in een bepaalde gemeente in een bepaald klimaatscenario gemiddeld verandert. Bijvoorbeeld: 'Met een betrouwbaarheid van 95 % stijgt de RHG in de gemeente Almelo in het W_H-scenario tot 2085 gemiddeld met 4 tot 6 % van de huidige fluctuatie.'

3.5. Invloed mate van verharding

Ook is per gemeente onderzocht of er een verband is aan te tonen tussen de mate van verandering in fluctuatie, RHG, GG en RLG en de verschillende klassen wat betreft mate van verharding. Hierbij is onderzocht of de absolute veranderingen van de fluctuatie, RHG, GG of RLG van de peilbuizen van één klasse in een bepaalde gemeente significant verschillen van die van een andere klasse. Hiervoor is gebruik gemaakt van de Mann-Whitney U-test (Mann & Whitney, 1947). Met behulp van deze test kan bepaald worden of een bepaalde verdeling significant hoger ligt dan een andere verdeling. Voor de Mann-Whitney U-test is het niet nodig dat de populaties normaal verdeeld zijn. Daarom is deze test ook geschikt voor kleine steekproeven. Ook is de test geschikt voor 2 steekproeven met een verschillend aantal waarnemingen. Omdat er per klasse in een gemeente maar een klein en verschillend aantal peilbuizen geselecteerd is, is er gekozen voor de Mann-Whitney U-test. De toetsingsgrootte van deze toets is U. Omdat de verwachting is dat de invloed van klimaatverandering in een gebied met minder verharding groter is, dan in een gebied met meer verharding, is de waarde van U berekend voor de steekproef van klasse met de minste verharding, klasse m . Om deze te berekenen moeten eerst de waarnemingen van de twee steekproeven gerangschikt worden van klein naar groot. Vervolgens wordt voor steekproef m de rangsom (T) berekend door de rang van alle waarnemingen in die steekproef bij elkaar op te tellen. Vervolgens kan voor steekproef m de

waarde van U bepaald worden. Deze wordt bepaald door de volgende formule in te vullen:

$$U = mn + \frac{m(m+1)}{2} - T,$$

waarin m is het aantal waarnemingen van de steekproef met de minste verharding en n is het aantal waarnemingen van de steekproef met de meeste verharding. Vervolgens kan aan de hand van tabellen die zijn opgesteld door Mann en Whitney bepaald worden of de waarde van U aangeeft dat met een significantieniveau, α , van 0,05, steekproef m systematisch hoger ligt dan steekproef n . Als dit het geval is, kan met een betrouwbaarheid van 95 % worden geconcludeerd dat de klimaatverandering significant meer invloed heeft in klasse m dan in klasse n .

3.6. Beantwoording hoofd- en deelvragen

Op basis van de hiervoor beschreven methode zijn de verschillende deelvragen van het onderzoek en daarmee de hoofdvraag beantwoord. De eerste 2 deelvragen zijn beantwoord door op basis van de opgestelde betrouwbaarheidsintervallen conclusies te trekken over de verandering van de RHG, GG, RLG en de fluctuatie. De derde deelvraag is beantwoord door te kijken of er een verschil is waar te nemen tussen de verschillende steden die onderzocht zijn. De laatste deelvraag is beantwoord op basis van de uitkomsten van de Mann-Whitney U-test. Uiteindelijk is de hoofdvraag beantwoord op basis van de antwoorden op de deelvragen.

4. Opstellen modellen

In dit hoofdstuk wordt per gemeente beschreven welke peilbuizen zijn geselecteerd voor het onderzoek. Deze selectie is verlopen volgens de methode zoals beschreven in paragraaf 3.1. Voor deze peilbuizen is vervolgens een model gemaakt in Menyanthes. Wanneer het model niet voldoet aan de eisen zoals gesteld in paragraaf 3.2, is er een vervangende peilbuis geselecteerd. De vervangende peilbuis heeft dezelfde mate van verharding.

4.1. Gemeente Almelo

In Tabel 2 zijn de geselecteerde peilbuizen voor de gemeente Almelo weergegeven. Voor de neerslaggegevens is gebruik gemaakt van het KNMI-neerslagstation Almelo. Voor de verdampingsgegevens is gebruik gemaakt van het KNMI-weerstation Twente. Peilbuizen waarvan het model niet voldeed aan de gestelde eisen, zijn rood gemarkeerd. Ook is het criterium dat niet voldoet, rood gemarkeerd. Daaronder is de vervangende peilbuis weergegeven.

Tabel 2: Geselecteerde peilbuizen gemeente Almelo

Peilbuis	Mate van verharding	EVP (%)	RMSE (cm)	M0 (dag)	Evap. factor	Loc. drain. base (m + nap)
13.03	Klasse 1	88,2	10,4	228	1,12	9,9
19.23.2	Klasse 1	88,6	11,3	477	1,18	9,9
13.04	Klasse 1	71,7	12,7	144	0,9	9,5
20.05	Klasse 1	85,4	6	91	1,04	8,5
19.12	Klasse 2	86,9	8,1	224	0,87	9,1
19.14	Klasse 2	81,4	7,6	185	0,79	9,2
12.09	Klasse 2	90,9	8,8	378	1,18	9,4
14.05	Klasse 2	87,5	9,2	227	1,3	9,2
16.04	Klasse 2	89,9	7,2	257	0,72	9,3
17.08	Klasse 2	88,7	10,7	411	0,9	10,1
18.09	Klasse 2	93,5	8,9	393	1,38	9,7
19.10	Klasse 2	88,2	6,5	259	0,79	9
19.01	Klasse 3	86,7	6,6	161	0,85	9
11.05	Klasse 3	85,2	6,2	167	0,78	9,6
13.12	Klasse 3	69,5	6,1	67	0,91	10,1
13.13	Klasse 3	81,2	8,6	232	0,97	9,8
15.04	Klasse 3	88,7	6,3	172	0,77	9,2
18.02	Klasse 3	78	9	210	0,78	9,1
18.10	Klasse 3	92	7,3	300	1,12	9,7
19.06	Klasse 3	88,3	5,9	193	0,87	9,1
10.05	Klasse 4	66,4	7,9	182	0,82	9,7
16.03	Klasse 4	69,9	14,9	239	0,68	9,3
19.22	Klasse 4	82	4,7	197	0,89	9,5
10.06	Klasse 4	76,2	6,4	225	0,56	9,4
16.01	Klasse 4	84,5	6,6	126	0,92	9,1
19.13	Klasse 4	87,6	6,3	200	0,85	9,2
11.01	Klasse 4	88,5	7,7	292	0,7	9,6
17.01	Klasse 4	88,6	7,1	252	1,03	10,1
18.06	Klasse 4	85,9	8,6	310	0,76	9,1

EVP = Percentage verklaarde variantie, RMSE = Root Mean Square Error, M0 = aantal dagen voordat laagste grondwaterstand is bereikt bij geen neerslag en verdamping, Evap. Factor = Verdampingsfactor, Loc. drain. base = Grondwaterstand bij geen neerslag en verdamping

Het grondwatermeetnet in Almelo bestaat in totaal uit 138 peilbuizen. Hiervan zijn uiteindelijk 25 peilbuizen geselecteerd, waarvan een model gemaakt is in Menyanthes dat voldoet aan de gestelde eisen. In Figuur 4 is de locatie van de peilbuizen weergegeven.



Figuur 4: Locatie geselecteerde peilbuizen Almelo

4.2. Gemeente Hoogeveen

Ook voor de gemeente Hoogeveen is een selectie van de peilbuizen gemaakt. Deze selectieprocedure is op dezelfde manier verlopen als voor de gemeente Almelo. Voor de neerslag- en verdampingsgegevens is gebruik gemaakt van het KNMI-weerstation Hoogeveen. In Tabel 3 zijn de geselecteerde peilbuizen weergegeven.

Tabel 3: Geselecteerde peilbuizen gemeente Hoogeveen

Peilbuis	Mate van verharding	EVP (%)	RMSE (cm)	M0 (dag)	EVAP fac.	Loc. drain. base (m +nap)
B17C1708	Klasse 2	82,23	8,2	383	0,87	9,8
B17C1715	Klasse 2	88,71	9,3	601	0,9	9,1
B17C1739	Klasse 2	87,86	14,3	986	0,96	9,1
B17C1740	Klasse 2	88,9	15	4754	0,58	4,3
B17C1709	Klasse 2	87,91	10,3	723	0,92	9,4
B17C1741	Klasse 2	92,7	9,5	1473	0,77	8,5
B17D1441	Klasse 2	81,68	13,2	268	0,94	11,2
B17D1451	Klasse 2	86,91	12,7	686	0,98	13
B17C1697	Klasse 3	84,53	15,9	540	1,22	8,4
B17C1705	Klasse 3	86,55	13,6	1177	0,84	8,6
B17C1698	Klasse 3	88,84	8,3	513	0,89	8,5
B17C1710	Klasse 3	80,98	16,4	1098	0,77	8,3
B17C1718	Klasse 3	88,47	11,8	663	0,98	9,9
B17C1714	Klasse 3	83,82	7,5	409	0,7	10,5
B17C1720	Klasse 3	86,76	9,2	574	0,75	9,2
B17C1735	Klasse 3	90,98	7,1	611	0,76	8,8
B17C1736	Klasse 3	90,37	5	545	0,82	8,8
B17D1443	Klasse 3	91,73	7,6	624	0,88	9,8
B17D1449	Klasse 3	91,5	9,6	501	1,08	11,2
B17D1450	Klasse 3	68,87	8,2	1370	0,8	10,1
B17C1699	Klasse 3	87,98	7,8	498	0,84	8,1
B17C1692	Klasse 4	87,07	6	342	0,8	7,4
B17C1695	Klasse 4	84,76	8,6	378	0,91	7,8
B17C1712	Klasse 4	82,89	13	1149	0,76	8,6
B17C1716	Klasse 4	81,25	7,8	468	0,73	10
B17C1717	Klasse 4	87,05	9,6	568	0,83	9,1
B17C1724	Klasse 4	66,78	6,6	158	0,44	10,8
B17C1737	Klasse 4	93,15	8,1	577	1	9,1
B17C1728	Klasse 4	86,42	12,2	648	1,03	9,3
B17D1440	Klasse 4	89,83	7,4	577	0,86	9,5

EVP = Percentage verklaarde variantie, RMSE = Root Mean Square Error, M0 = aantal dagen voordat laagste grondwaterstand is bereikt bij geen neerslag en verdamping, Evap. Factor = Verdampingsfactor, Loc. drain. base = Grondwaterstand bij geen neerslag en verdamping

Het meetnet in de gemeente Hoogeveen bestaat in totaal uit 73 peilbuizen. Hiervan zijn uiteindelijk 25 peilbuizen geselecteerd. In Hoogeveen zijn geen peilbuizen met een mate van verharding klasse 1 aanwezig. De locatie van de geselecteerde peilbuizen is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Locatie geselecteerde peilbuizen Hoogeveen

4.3. Gemeente Delft

De laatste gemeente waarvoor peilbuizen zijn geselecteerd, is de gemeente Delft. Deze selectieprocedure is op een iets andere manier verlopen dan voor de gemeentes Almelo en Hoogeveen. Dit omdat er maar enkele peilbuizen zijn waarvoor een geschikt model kan worden gemaakt. Zo zijn er geen vervangende peilbuizen gekozen, omdat deze simpelweg niet beschikbaar zijn. Daarnaast is er niet gekeken naar een verschil in de mate van verharding omdat er maar een klein aantal peilbuizen geschikt is. Voor de neerslaggegevens is gebruikgemaakt van het KNMI-neerslagstation Delft. Voor de verdampingsgegevens is gebruik gemaakt van het KNMI-weerstation Rotterdam. In Tabel 4 zijn de geselecteerde peilbuizen weergegeven.

Tabel 4: Geselecteerde peilbuizen gemeente Delft

Peilbuis	EVP (%)	RMSE (cm)	M0 (dag)	EVAP fac.	Loc. Drain. base (m + nap)
11-1.02	72,67	11,6	250	0,34	-0,8
11-1.07	79,18	6,4	191	0,57	-0,8
11-1.11	54,19	10,7	834	0,22	-2,3
11-1.16	85,07	7,5	238	0,64	-0,7
11-1.19	83,96	6,3	252	0,43	-0,9
11-1.20	44,4	4,3	36	0,2	-0,6
11-1.21	76,15	6,8	7278	0,42	-14,8
11-1.23	71,84	8,5	192	0,41	-1
11-1.24	43,68	5,8	129	0	-1,3
11-2.08	80,6	6,2	361	0,51	-1,2
12-1.04	55,25	8,5	1730	1,07	-3
12-1.07	47,18	12,1	142	0,28	-1,7
12-1.08	68,2	6,4	116	0,47	-1,6
12-1.10	81,18	6	237	0,37	-1,7
12-1.12	77,67	3,5	281	0,14	-2,1
12-2.12	74,74	4,2	143	0,17	-1,8
13-1.01	76,37	5,8	252	0,33	-1,7
13-1.02	23,99	22,6	181	0,41	-1,5
13-1.06	73,96	4,4	89	0,76	-1,3
13-1.09	80,41	4,6	332	0,55	-2
13-1.18	80,4	9,2	520	0,52	-1,8
13-1.19	83,8	7,6	338	0,27	-1,7
13-1.21	61,45	8,8	606	0,46	-2,2
22-1.04	55,5	15,5	821	0,43	-4,3
22-1.08	70,2	4,5	117	0,39	-2,8
22-1.09	70,36	5	1073	0,35	-4,8
22-1.10	60,41	12,2	72442	0,6	-127,7
22-1.11	74,23	5,5	23506	0,63	-41,6
23-1.02	72,38	8,5	340	0,66	-3
23-1.03	75,46	10,9	912	1,03	-3,4
23-1.04	69,02	11,8	24153	0,84	-34,5
23-1.08d	65,39	5,8	154	0,42	-2,4
23-1.09d	68,2	10,6	2781	0,66	-6,7
25-1.03	61,55	7,4	3974	0,45	-8,9
25-1.06	74,06	9,8	11558	1,01	-14,6
25-1.17	61,08	7,7	3435	0,47	-7,9
27-1.01	50,99	14,6	1799150	0	-4850,5
27-1.04	73,43	6,2	683	0,46	-1,7
27-1.05	69,9	10,8	511	0,2	-1,6
27-1.06d	72,44	6	21691	0,44	-43,5
28-1.03	65,21	5,8	4365	0,86	-6,6
28-1.17	78,65	6,5	698	0,57	-2
28-1.22	55,93	10,8	163	0,42	-2,5
28-1.27	81,98	6,8	103	0,39	-1,2
28-1.28	72,35	4,1	264	0,56	-3,3
28-2.02	60,03	4,7	203	0,25	-0,9
29-1.05	82,05	9,8	5433	0,73	-10,5
29-1.06	39,92	6,9	92914	0	-253,3
31-1.02	76,48	16,3	421	1,43	-3,1
31-1.03	74,9	13,4	540	0,77	-2,6

EVP = Percentage verklaarde variantie, RMSE = Root Mean Square Error, M0 = aantal dagen voordat laagste grondwaterstand is bereikt bij geen neerslag en verdamping, Evap. Factor = Verdampingsfactor, Loc. drain. base = Grondwaterstand bij geen neerslag en verdamping

Zoals te zien is in de tabel is er een groot aantal peilbuizen waarvoor geen geschikt model kon worden gemaakt. Er is geprobeerd een model te maken voor 50 peilbuizen, dit zijn alle potentieel geschikte peilbuizen in de gemeente Delft.

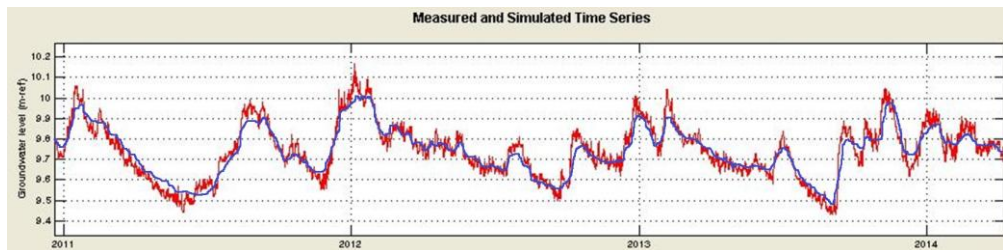
De overige peilbuizen hebben een te korte meetreeks, een meetreeks met een lange periode waarin niet gemeten is, of een meetreeks met onverklaarbare verspringingen in de grondwaterstand. Van deze 50 peilbuizen voldoen er slechts 7 aan de gestelde eisen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de grote invloed van drainage en het kunstmatig op peil houden van de grondwaterstand. In Figuur 6 zijn de locaties van de uiteindelijk geselecteerde peilbuizen weergegeven.



Figuur 6: Locatie geselecteerde peilbuizen Delft

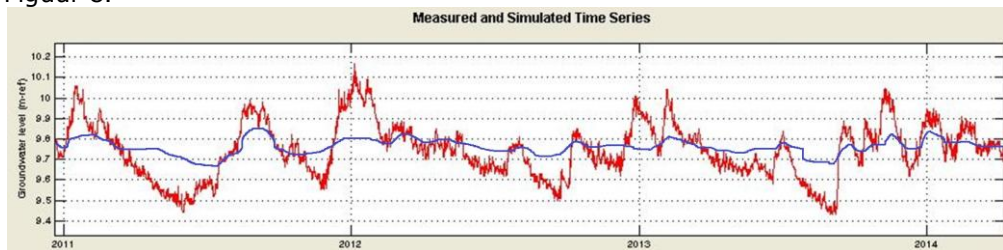
4.4. Algemeen beeld

Bij het maken van de modellen is er over het algemeen sprake van twee soorten modellen. Het eerste model laat een gemodelleerde grondwaterstand zien, die de werkelijke grondwaterstand goed benadert met uitzondering van de pieken in de grondwaterstand. Dit beeld komt voor in nagenoeg alle modellen van de gemeentes Almelo en Hogeveen naar voren. Ook bij de zeven goedgekeurde peilbuizen in de gemeente Delft komt dit beeld naar voren. Een grafische weergave van dit soort modellen is weergegeven in Figuur 7. De rode lijn geeft de werkelijke grondwaterstand weer. De blauwe lijn geeft de gemodelleerde grondwaterstand weer.



Figuur 7: Goede fit model, uitgezonderd voor pieken

Daarnaast is er voornamelijk in de gemeente Delft bij een groot aantal peilbuizen sprake van een model dat de werkelijke grondwaterstand bijna nooit goed benaderd. Een grafische weergave van dit soort modellen is weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8: Over het geheel een slechte fit

De modellen die gebruikt worden voor het in beeld brengen van de toekomstige situatie hebben allemaal een goede simulatie van de grondwaterstand met uitzondering van de pieken. Bij het simuleren van de toekomstige situatie wordt echter, zoals beschreven in paragraaf 3.3, ook een stochastisch model gebruikt. Met behulp van dit model worden de pieken bij het simuleren van de toekomstige situatie beter in beeld gebracht (Von Asmuth J. R. et al., 2012).

5. Toekomstige situatie

In dit hoofdstuk is een inschatting gemaakt van de toekomstige grondwaterstanden van de hiervoor geselecteerde peilbuizen. Dit is gedaan aan de hand van de methode zoals beschreven in paragraaf 3.4 en 3.5.

5.1. Verandering grondwaterstand

Voor de geselecteerde peilbuizen uit hoofdstuk 4 zijn de modellen op basis van de getransformeerde neerslag- en verdampingsreeksen gesimuleerd om de toekomstige situatie in beeld te brengen. Dit is gedaan zoals beschreven in paragraaf 3.3. In bijlage 4 is per peilbuis de verandering van de grondwaterstand grafisch weergegeven. In deze paragraaf zullen de opgestelde betrouwbaarheidsintervallen op basis van de simulaties worden weergegeven. In Tabel 5 tot en met Tabel 10 zijn de ondergrens (OG) en bovengrens (BG) per gemeente weergegeven. Deze grenzen geven met een betrouwbaarheid van 95 % weer hoeveel procent van de huidige fluctuatie, de fluctuatie, RHG, GG en RLG gemiddeld per gemeente zal veranderen. Daarnaast is een indicatie van de grootte van de verandering weergegeven. Deze is gebaseerd op de gemiddelde fluctuatie van de getoetste peilbuizen per gemeente. Een beschrijving van de totstandkoming van deze betrouwbaarheidsintervallen is te vinden in bijlage 5.

Tabel 5: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Almelo 2050

Scen ario	Fluctua tie	RHG	GG	RLG
G _L	OG 3,8 % 2 cm	1,1 % 1 cm	-0,7 % 0 cm	-3,3 % -2 cm
	BG 5,0 % 3 cm	2,2 % 1 cm	0,5 % 0 cm	-2,1 % -1 cm
G _H	OG 11,3 % 7 cm	2,1 % 1 cm	-3,3 % -2 cm	-10,2 % -6 cm
	BG 12,8 % 8 cm	3,5 % 2 cm	-2,2 % -1 cm	-8,3 % -5 cm
W _L	OG 1,5 % 1 cm	1,1 % 1 cm	-0,1 % 0 cm	-0,9 % -1 cm
	BG 2,8 % 2 cm	2,2 % 1 cm	1,0 % 1 cm	0,0 % 0 cm
W _H	OG 16,4 % 10 cm	5,0 % 3 cm	-3,5 % -2 cm	-12,5 % -7 cm
	BG 18,4 % 11 cm	7,2 % 4 cm	-1,8 % -1 cm	-10,2 % -6 cm

Tabel 6: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Almelo 2085

Scen ario	Fluctua tie	RHG	GG	RLG
G _L	OG 3,3 % 2 cm	2,1 % 1 cm	0,6 % 0 cm	-1,3 % -1 cm
	BG 4,2 % 2 cm	3,2 % 2 cm	1,4 % 1 cm	-0,8 % 0 cm
G _H	OG 11,5 % 7 cm	3,2 % 2 cm	-2,3 % -1 cm	-9,3 % -6 cm
	BG 13,1 % 8 cm	4,6 % 3 cm	-0,8 % 0 cm	-7,5 % -4 cm
W _L	OG 6,1 % 4 cm	1,9 % 1 cm	-1,5 % -1 cm	-4,9 % -3 cm
	BG 7,7 % 5 cm	3,4 % 2 cm	0,1 % 0 cm	-3,5 % -2 cm
W _H	OG 26,2 % 15 cm	10,4 % 6 cm	-3,9 % -2 cm	-16,6 % -10 cm
	BG 28,0 % 17 cm	13,1 % 8 cm	-1,6 % -1 cm	-14,2 % -8 cm

Tabel 7: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Hoogeveen 2050

Scen ario	Fluctua tie	RHG	GG	RLG
G _L	OG 4,3 % 3 cm	5,5 % 4 cm	3,1 % 2 cm	0,6 % 0 cm
	BG 4,9 % 4 cm	6,5 % 5 cm	4,0 % 3 cm	1,7 % 1 cm
G _H	OG 12,2 % 9 cm	5,5 % 4 cm	-0,6 % 0 cm	-7,5 % -6 cm
	BG 13,1 % 10 cm	6,0 % 5 cm	-0,3 % 0 cm	-6,4 % -5 cm
W _L	OG 2,3 % 2 cm	5,5 % 4 cm	3,5 % 3 cm	2,4 % 2 cm
	BG 3,5 % 3 cm	6,5 % 5 cm	4,5 % 3 cm	3,8 % 3 cm
W _H	OG 15,2 % 11 cm	7,8 % 6 cm	-1,2 % -1 cm	-8,9 % -7 cm
	BG 17,2 % 13 cm	8,6 % 6 cm	-0,6 % 0 cm	-7,2 % -5 cm

Tabel 8: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Hoogeveen 2085

Scen ario	Fluctua tie	RHG	GG	RLG
G _L	OG 3,4 % 3 cm	7,4 % 6 cm	5,0 % 4 cm	3,5 % 3 cm
	BG 4,1 % 3 cm	8,8 % 7 cm	6,4 % 5 cm	5,2 % 4 cm
G _H	OG 12,1 % 9 cm	7,6 % 6 cm	1,5 % 1 cm	-5,6 % -4 cm
	BG 13,4 % 10 cm	8,2 % 6 cm	2,2 % 2 cm	-4,2 % -3 cm
W _L	OG 6,7 % 5 cm	6,5 % 5 cm	2,2 % 2 cm	-1,6 % -1 cm
	BG 8,4 % 6 cm	7,4 % 6 cm	3,1 % 2 cm	0,4 % 0 cm
W _H	OG 28,0 % 21 cm	12,8 % 10 cm	-0,7 % -1 cm	-16,9 % -13 cm
	BG 30,3 % 23 cm	13,9 % 10 cm	0,0 % 0 cm	-14,7 % -11 cm

Tabel 9: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Delft 2050

Scen ario	Fluctua tie	RHG	GG	RLG
G _L OG	3,8 % 2 cm	7,6 % 3 cm	5,3 % 2 cm	2,0 % 1 cm
BG	6,4 % 3 cm	14,7 % 6 cm	11,6 % 5 cm	10,1 % 4 cm
G _H OG	14,3 % 6 cm	5,6 % 2 cm	2,3 % 1 cm	-2,0 % -1 cm
BG	21,8 % 9 cm	9,0 % 4 cm	5,6 % 2 cm	2,3 % 1 cm
W _L OG	3,8 % 2 cm	8,6 % 4 cm	6,8 % 3 cm	3,9 % 2 cm
BG	6,2 % 3 cm	15,7 % 7 cm	12,1 % 5 cm	10,4 % 4 cm
W _H OG	8,3 % 4 cm	8,3 % 4 cm	3,2 % 1 cm	-3,2 % -1 cm
BG	13,0 % 6 cm	13,4 % 6 cm	7,8 % 3 cm	3,5 % 1 cm

Tabel 10: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Delft 2085

Scen ario	Fluctua tie	RHG	GG	RLG
G _L OG	4,4 % 2 cm	9,0 % 4 cm	6,7 % 3 cm	4,0 % 2 cm
BG	5,4 % 2 cm	17,1 % 7 cm	14,1 % 6 cm	12,4 % 5 cm
G _H OG	6,5 % 3 cm	7,3 % 3 cm	4,1 % 2 cm	-0,4 % 0 cm
BG	9,7 % 4 cm	13,1 % 6 cm	8,3 % 4 cm	5,6 % 2 cm
W _L OG	5,3 % 2 cm	8,1 % 3 cm	5,1 % 2 cm	1,1 % 0 cm
BG	8,5 % 4 cm	14,3 % 6 cm	10,1 % 4 cm	7,5 % 3 cm
W _H OG	15,0 % 6 cm	11,6 % 5 cm	3,5 % 2 cm	-6,3 % -3 cm
BG	20,0 % 9 cm	18,2 % 8 cm	8,3 % 4 cm	1,1 % 0 cm

5.2. Invloed mate van verharding

In deze paragraaf wordt beschreven of de verandering van de grondwaterstand door de klimaatverandering beïnvloed wordt door de mate van verharding. Dit is getoetst op basis van de methode zoals beschreven in paragraaf 3.5. Omdat er in Delft slechts 7 geschikte peilbuizen zijn, is voor deze gemeente de analyse niet uitgevoerd. In Tabel 11 en Tabel 12 is voor de gemeentes Almelo en Hoogeveen weergegeven of er sprake is van een significant verschil in de mate van verandering van de grondwaterstand tussen de verschillende klassen verharding. In bijlage 6 is beschreven hoe deze resultaten tot stand zijn gekomen.

Tabel 11: Invloed mate van verharding gemeente Almelo

Scenario		Klasse 1-2	Klasse 2-3	Klasse 3-4
G _L	Fluctuatie	Nee	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee	Nee
	RLG	Nee	Ja	Nee
G _H	Fluctuatie	Nee	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee	Nee
	RLG	Nee	Ja	Nee
W _L	Fluctuatie	Nee	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee	Nee
	RLG	Nee	Nee	Nee
W _H	Fluctuatie	Nee	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee	Nee
	RLG	Nee	Ja	Nee

Tabel 12: Invloed mate van verharding gemeente Hoogeveen

Scenario		Klasse 2-3	Klasse 3-4
G _L	Fluctuatie	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee
	RLG	Nee	Nee
G _H	Fluctuatie	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee
	RLG	Ja	Nee
W _L	Fluctuatie	Nee	Nee
	RHG	Nee	Nee
	GG	Nee	Nee
	RLG	Nee	Nee
W _H	Fluctuatie	Ja	Nee
	RHG	Ja	Nee
	GG	Nee	Nee
	RLG	Nee	Nee

5.3. Interpretatie resultaten

In deze paragraaf volgt een interpretatie van de resultaten van de uitgevoerde analyses. In deze interpretatie wordt antwoord gegeven op de deelvragen van het onderzoek. Op basis van de opgestelde betrouwbaarheidsintervallen in paragraaf

5.1 kan een antwoord worden gegeven op de eerste drie deelvragen van dit onderzoek.

- In hoeverre verandert de RHG, GG, of de RLG door de klimaatverandering?

De RHG zal in alle gemeentes en in alle klimaatscenario's stijgen. De mate van de stijging verschilt wel per gemeente en per klimaatscenario. Het klimaatscenario W_H zorgt voor de meest extreme stijging van de RHG. Dit wordt veroorzaakt doordat er in alle klimaatscenario's sprake is van een toename van de totale neerslaghoeveelheid in de winter. In het W_H scenario is deze toename het grootst. De verandering van de GG is minder groot dan die van de RHG en de RLG. Dit komt doordat in de meeste gevallen de RHG stijgt en de RLG daalt. Het effect op de GG wordt hierdoor gedeeltelijk opgeheven.

De RLG zal in de meeste gevallen dalen. In de gemeente Almelo daalt de RLG in alle klimaatscenario's. In de gemeente Hoogeveen en Delft zijn er echter ook scenario's waarin de RLG stijgt, namelijk het G_L en het W_L scenario. Voor het G_H en het W_H scenario is de situatie in de gemeente Delft onzeker. Hier is er in sommige gevallen sprake van een stijging en in andere gevallen sprake van een daling van de RLG. Dit wordt veroorzaakt doordat er in alle klimaatscenario's sprake is van een toename van de verdamping. Daardoor zal er minder neerslag naar het grondwater afstromen. Daarnaast valt er in het G_H en het W_H scenario ook minder neerslag in de zomer.

Uit de analyse blijkt verder dat de mate van verandering sterk samenhangt met de huidige mate van fluctuatie. Als er in de huidige situatie sprake is van een grotere fluctuatie, zal de absolute verandering van de grondwaterstand ook groter zijn.

Om een overzicht te geven van de spreiding in de verandering van de grondwaterstand zijn in Tabel 13 de minimale en maximale verandering in 2050 per gemeente weergegeven. In Tabel 14 is hetzelfde gedaan voor 2085. In de tabellen in paragraaf 5.1 zijn de veranderingen per klimaatscenario apart weergegeven.

Tabel 13: Ondergrens en bovengrens veranderingen grondwaterstand 2050

Gemeente		Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
Almelo	OG	1,5 %	1 cm	1,1 %	1 cm	-3,5 %	-2 cm	-12,5 %	-7 cm
	BG	18,4 %	11 cm	7,2 %	4 cm	1,0 %	1 cm	0,0 %	0 cm
Hoogeveen	OG	2,3 %	2 cm	5,5 %	4 cm	-1,2 %	-1 cm	-8,9 %	-7 cm
	BG	17,2 %	13 cm	8,6 %	6 cm	4,5 %	3 cm	3,8 %	3 cm
Delft	OG	3,8 %	2 cm	5,6 %	2 cm	2,3 %	1 cm	-3,2 %	-1 cm
	BG	21,8 %	9 cm	15,7 %	7 cm	12,1 %	5 cm	10,4 %	4 cm

Tabel 14: Ondergrens en bovengrens veranderingen grondwaterstand 2085

Gemeente		Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
Almelo	OG	3,3 %	2 cm	1,9 %	1 cm	-3,9 %	-2 cm	-16,6 %	-10cm
	BG	28,0 %	17 cm	13,1 %	8 cm	1,4 %	1 cm	-0,8 %	0 cm
Hoogeveen	OG	3,4 %	3 cm	6,5 %	5 cm	-0,7 %	-1 cm	-16,9 %	-13cm
	BG	30,3 %	23 cm	13,9 %	10 cm	6,4 %	5 cm	5,2 %	4 cm
Delft	OG	4,4 %	2 cm	7,3 %	3 cm	3,5 %	2 cm	-6,3 %	-3 cm
	BG	20,0 %	9 cm	18,2 %	8 cm	14,1 %	6 cm	12,4 %	5 cm

- In hoeverre treden er grotere fluctuaties van de grondwaterstand op door de klimaatverandering?

De fluctuatie van de grondwaterstand zal in alle gemeentes bij alle klimaatscenario's toenemen. De toename is ten opzichte van de veranderingen in de RHG, RLG en GG relatief groot. Dit komt doordat er in veel gevallen sprake is van een stijging van de RHG, gecombineerd met een daling van de RLG. In Tabel 13 en Tabel 14 zijn de minimale en maximale verandering van de fluctuatie per gemeente weergegeven.

- In hoeverre verschillen de veranderingen van de grondwaterstand tussen steden in oost en west Nederland?

Uit de opgestelde betrouwbaarheidsintervallen blijkt dat de relatieve veranderingen in de gemeente Delft (west Nederland) ongeveer dezelfde grootte hebben als in de gemeentes Almelo en Hoogeveen (oost Nederland). Wel zijn de opgestelde betrouwbaarheidsintervallen in de gemeente Delft in een aantal gevallen wat breder. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de vele onnatuurlijke invloeden in de gemeente Delft. Door deze invloeden zal de mate van verandering per locatie sterker verschillen dan in situaties waar het verloop van de grondwaterstand natuurlijker is. Daarnaast zijn de absolute verschillen in de gemeente Delft wel kleiner dan in Almelo en Hoogeveen. Dit wordt veroorzaakt doordat de huidige fluctuatie in de gemeente Delft ook een stuk kleiner is. Deze is namelijk ongeveer 43 cm, terwijl deze in de gemeente Almelo en Hoogeveen 59 respectievelijk 75 cm is.

Op basis van de analyse uit paragraaf 5.2 kan antwoord gegeven worden op de laatste deelvraag van het onderzoek.

- In hoeverre verschillen de veranderingen van de grondwaterstand tussen gebieden die in een verschillende mate verhard zijn?

Uit de analyse blijkt dat er in het overgrote deel van de gevallen geen sprake is van een significant verschil tussen de verschillende klassen in verharding. Zoals al eerder beschreven, hangt de mate van verandering af van de mate van huidige fluctuatie. Doordat de mate van verharding geen significante invloed heeft op de mate van verandering van de grondwaterstand, kan geconcludeerd worden dat de huidige fluctuatie ook afhangt van andere factoren dan de mate van verharding.

6. Discussie

In dit hoofdstuk wordt ten eerste de gebruikte tijdsperiode voor het onderzoek behandeld. Daarnaast wordt er ingegaan op het feit dat in de gebruikte methode alleen lokale invloeden zijn meegenomen, terwijl er echter ook sprake kan zijn van andere invloeden.

Voor dit onderzoek is er gebruik gemaakt van meetreeksen van de grondwaterstand in stedelijk gebied van enkele jaren lang. Deze meetreeksen bevinden zich in de periode 2007-2014. De precieze periode is per gemeente verschillend. De gebruikte klimaatscenario's zijn echter gebaseerd op het basisjaar 1995 en de periode 1981-2010. Het kan voorkomen dat er een verschil is tussen de neerslag- en verdampingshoeveelheden in de periode 1981-2010 en 2007-2014. Omdat de getransformeerde neerslag- en verdampingsreeksen zijn gebaseerd op de ingevoerde periode, kan het zijn dat de uitkomsten van het onderzoek niet representatief zijn voor de klimaatscenario's (Bakker & Bessembinder, 2012). Om te controleren of dit het geval is, is voor zowel de periode waarop de klimaatscenario's gebaseerd zijn, 1981-2010, als de gebruikte periode per gemeente voor dit onderzoek, het gemiddelde en de standaardafwijking van de neerslag en verdamping per dag bepaald. De uitkomst hiervan is weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15: Gegevens neerslag- en verdampingsreeksen

Plaats	Aspect	Periode	Gemiddelde	Standaardafwijking
Almelo	Neerslag	1981-2010	2,3 mm/dag	4,6 mm/dag
		2010-2014	2,2 mm/dag	4,8 mm/dag
Twente	Verdamping	1981-2010	1,5 mm/dag	1,3 mm/dag
		2010-2014	1,5 mm/dag	1,3 mm/dag
Hoogeveen	Neerslag	1981-2010	2,2 mm/dag	4,7 mm/dag
		2010-2014	2,2 mm/dag	4,6 mm/dag
Eelde (i.p.v. Hoogeveen)	Verdamping	1981-2010	1,5 mm/dag	1,3 mm/dag
		2010-2014	1,5 mm/dag	1,3 mm/dag
Delft	Neerslag	1981-2010	2,5 mm/dag	4,9 mm/dag
		2007-2014	2,7 mm/dag	5,3 mm/dag
Rotterdam	Verdamping	1981-2010	1,6 mm/dag	1,4 mm/dag
		2007-2014	1,6 mm/dag	1,4 mm/dag

Voor het station Hoogeveen waren niet genoeg gegevens over de verdamping beschikbaar voor de periode 1981-2010. Daarom is hier gekeken naar het dichtstbijzijnde station, namelijk Eelde. Uit de tabel volgt dat er wat betreft verdamping geen verschillen zijn waar te nemen tussen de twee verschillende periodes. Qua neerslag zijn er in Almelo en Hoogeveen zeer kleine verschillen waar te nemen. In Delft zijn de verschillen iets groter, maar nog steeds minimaal.

Dit betekent dat de gebruikte periode wat betreft neerslag en verdamping ongeveer hetzelfde beeld geeft als de periode 1981-2010. Daarom zullen de berekende veranderingen van de grondwaterstand ook nagenoeg overeenkomen met de veranderingen als deze zouden zijn berekend over de periode 1981-2010.

Bij de gebruikte onderzoeksmethode is de toekomstige grondwaterstand voorspeld aan de hand van de huidige, empirische relatie tussen neerslag en verdamping enerzijds en de grondwaterstand anderzijds. Hiermee is de invloed van klimaatverandering op lokale schaal in beeld gebracht. Het kan echter zijn, dat de klimaatverandering ook invloed heeft op de grondwaterstand op regionale schaal, bijvoorbeeld door veranderingen in de regionale grondwaterstroming. Grondwater stroomt van hoog naar laag en van hoge druk naar lage druk. De grondwaterstroming is dus afhankelijk van het verschil in hoogte, verschil in druk, maar ook van de bodemopbouw. Als de bodem namelijk beter doorlatend is, zal het grondwater sneller afstromen. (Harter, 2003) Door de klimaatverandering zal de opbouw van de bodem niet veranderen. Wel kan het verschil in de hoogte van de grondwaterstand tussen verschillende plekken veranderen, doordat de veranderingen niet overal even groot zijn. Hierdoor kan de grondwaterstroming veranderen ten opzichte van de huidige situatie. Met de gebruikte onderzoeksmethode is deze verandering, die ook invloed kan hebben op de grondwaterstand, niet meegenomen.

Daarnaast zal de klimaatverandering waarschijnlijk ook zorgen voor een verandering van het afvoerpatroon van de Rijn (Middelkoop, et al., 2001). De verwachting is dat er in de winter sprake zal zijn van een hogere afvoer, terwijl er in de zomer sprake zal zijn van een lagere afvoer. De afvoer van de Rijn draagt, naast neerslag, voor een aanzienlijk deel bij aan de aanvulling van het grondwater (Vries, 2007). Veranderingen in de afvoer van de Rijn zullen dus ook zorgen voor veranderingen in de grondwaterstand. De invloed van deze verandering is met de gebruikte methode niet in beeld gebracht. Echter is het niet te verwachten dat de afvoer van de Rijn grote invloed zal hebben op de gemeentes Almelo en Hoogeveen omdat deze ver van de grote rivieren af liggen. Voor de gemeente Delft kan de afvoer van de Rijn echter wel gevolgen hebben omdat het kan voorkomen dat er door een te lage afvoer niet genoeg water in de polders ingelaten kan worden.

Als laatste aspect zal de klimaatverandering ook zorgen voor het stijgen van de zeespiegel (KNMI, 2014a). Een hogere zeespiegel zal langs de kust zorgen voor een grotere ondergrondse instroom van zout water. Dit leidt tot een grotere opwaartse druk van het grondwater. Hierdoor zal het grondwater langs de kust stijgen. Deze stijging kan zelfs leiden tot het openbreken van de veenlagen, waardoor het brakke grondwater ook aan het oppervlak in de polders kan komen (Knippenberg, Musterd, & Pater, 2003). Ook deze invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand is niet meegenomen in de gebruikte onderzoeksmethode. Voor de gemeente Delft kan de invloed van de zeespiegelstijging echter wel significant zijn.

7. Conclusie en aanbevelingen

Op basis van het uitgevoerde onderzoek kan een antwoord worden geformuleerd op de hoofdvraag van het onderzoek. Deze hoofdvraag luidt als volgt: "Wat is de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand in stedelijk gebied?"

Uit het onderzoek blijkt dat de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand redelijk goed in beeld is te brengen met de gebruikte methode. Deze methode stelt met behulp van tijdreeksanalyses de empirische relatie tussen de grondwaterstand enerzijds en neerslag en verdamping anderzijds vast. Daarna wordt dit model gesimuleerd op basis van getransformeerde neerslag- en verdampingsreeksen die voldoen aan de eigenschappen van de klimaatscenario's om de toekomstige situatie in beeld te brengen. De methode werkt vooral goed voor steden in het oosten van Nederland, in dit geval Hogeveen en Almelo. Dit komt omdat de grondwaterstand hier voornamelijk beïnvloed wordt door neerslag en verdamping. Voor het westen van Nederland geldt dat er ook sprake is van andere invloeden op de grondwaterstand die met deze methode niet in beeld worden gebracht. Zo wordt de grondwaterstand vaak kunstmatig op peil gehouden door beheer.

Uit het onderzoek blijkt dat de klimaatverandering zorgt voor een toename van de fluctuatie van de grondwaterstand in stedelijk gebied. De RHG zal door de klimaatverandering stijgen. De invloed van de klimaatverandering op de GG is minder groot, doordat er in de meeste gevallen sprake is van een stijging van de RHG en een daling van de RLG. Dit leidt tot grotere fluctuaties, maar het effect op de gemiddelde grondwaterstand zal deels tegen elkaar wegvallen. De RLG zal in de meeste gevallen dalen.

Uit het onderzoek blijkt verder dat de relatieve veranderingen in de gemeente Delft (west Nederland) ongeveer dezelfde ordegrootte hebben als in de gemeentes Almelo en Hogeveen (oost Nederland). De absolute veranderingen in de gemeente Delft zijn over het algemeen wel kleiner dan in Almelo en Hogeveen. Dit wordt veroorzaakt doordat de huidige fluctuatie in de gemeente Delft een stuk kleiner is.

Ook kan geconcludeerd worden dat de mate van verharding geen significante invloed heeft op de verandering van de grondwaterstand. Wel is er een verband zichtbaar tussen de mate van verandering en de huidige fluctuatie. Doordat de mate van verharding geen significante invloed heeft op de mate van verandering van de grondwaterstand, kan geconcludeerd worden dat de huidige fluctuatie ook afhangt van andere factoren dan de mate van verharding.

De gebruikte methode brengt alleen de invloed van klimaatverandering op lokale schaal in beeld. De grondwaterstand hangt echter ook af van een aantal andere factoren. Zo kunnen regionale grondwaterstromen veranderen doordat het verschil in hoogte van de grondwaterstand tussen verschillende plekken kan veranderen. Daarnaast zal de klimaatverandering ook zorgen voor het stijgen van de zeespiegel, met als gevolg meer zoute indringing langs de kust en een stijging van de grondwaterstand. Ook de afvoer van de Rijn kan veranderen door de klimaatverandering. Deze afvoer heeft invloed op de grondwaterstand. Een verandering van de afvoer kan dus ook leiden tot een verandering van de grondwaterstand. De invloed van klimaatverandering op deze factoren is niet in beeld gebracht.

Aanbevolen wordt om aanvullend onderzoek te doen naar de invloed van deze regionale factoren op de grondwaterstand. Zo kan de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand beter in beeld worden gebracht.

Daarnaast wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar wat de veranderingen betekenen voor de situatie in het stedelijk gebied. Hierbij kan gekeken worden naar of er sprake is van toename van paalrot, hoeveel de grond zal gaan zetten en in hoeverre gebieden met een structureel te hoge grondwaterstand zich uit zullen breiden.

8. Bibliografie

- Bakker, A., & Bessembinder, J. (2007). Neerslagreeksen voor de KNMI' 06-scenario's. *H2O* , No. 22, p. 45-47.
- Bakker, A., & Bessembinder, J. (2012). *Time series transformation tool: description of the program to generate time series consistent with the KNMI '06 climate scenario's*. De Bilt: KNMI.
- Bakker, M., Maas, K., & Von Asmuth, J. R. (2008). Calibration of transient groundwater models using time series analysis and moment matching. *Water Resources Research* , Vol. 44, W04420.
- Buckett, J., & Oliver, F. (1977). Fitting the Pearson Type 3 Distribution in Practice. *Water Resources Research* , Vol. 13, No. 5, p. 851-852.
- Campbell, M. J., & Gardner, M. J. (1988). Calculating confidence intervals for some non-parametric analysis. *Britisch Medical Journal* , Vol. 296, p. 1454-1456.
- Harter, T. (2003). *Basic Concepts of Groundwater Hydrology*. Davis: University of California.
- Hiemstra, P., & Sluiter, R. (2011). *Interpolation of Makkink evaporation in the Netherlands*. de Bilt: KNMI.
- Kelley, C. (1999). *Iterative Methods for Optimization*. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University.
- Knippenberg, H., Musterd, S., & Pater, B. d. (2003). *Strijd om de ruimte: conflicten over water, grondgebied en de stad*. Amsterdam: Uitgeverij Aksant.
- KNMI. (2014a). *KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie*. De Bilt: KNMI.
- KNMI. (2014b). *KNMI'14 Toelichting transformatie tijdreeksen*. De Bilt: KNMI.
- Leunk, I., Houten, G. v., & Maas, K. (2012). Trendanalyse grondwaterstanden Waterschap Rijn en IJssel toont na vroegere verdroging nu stabilisering. *H2O* , No 18, p. 23-25.
- Mann, H., & Whitney, D. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics* , Vol. 18, No 1, p. 50-60.
- McClave, J. T., Benson, P. G., Sincich, T., & Knypstra, S. (2011). *Statistiek, een inleiding*. Amsterdam: Pearson Education Benelux BV.
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J., Lang, H., ... Wilke, K. (2001). Impact of Climate Change on Hydrologic Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin. *Climatic Change*, Vol. 49, Issue 1-2, p. 105-128.
- Schöniger, H. (2007). *Surface and groundwater hydrology interaction with landscape in urban environments*. Braunschweig: Technische universität Braunschweig.
- Shapiro, S., & Wilk, M. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* , Vol. 52, No. 3/4, p. 591-611.

- Von Asmuth, J. R., Maas, K., Bakker, M., & Petersen, J. (2008). Modeling time series of ground water head fluctuations subjected to multiple stresses. *Ground Water* , Vol. 46 p. 30-40.
- Von Asmuth, J. R., Maas, K., Bakker, M., Bierkens, M. F., Knotters, M., Olsthoorn, T. N., ... Von Asmuth, D.C. (2012). Software for hydrogeologic time series analysis, interfacing with physical data insight. *Elsevier* , No. 38 p. 178-190.
- Vries, J. d. (2007). Groundwater. In T. Wong, D. Batjes, & J. d. Jager, *Geology of the Netherlands* (pp. 295-315). Amsterdam: Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences.

Bijlage 1

Klimaatscenario's en transformatieprogramma

In Figuur 9 en Figuur 10 (KNMI, 2014a) zijn de veranderingen voor de verschillende klimaatscenario's weergegeven.

Seizoen ⁴⁾	Variabele	Indicator	Klimaat ⁵⁾ 1951-1980	Klimaat ⁵⁾ 1981-2010 = referentie- periode	Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2050 ⁶⁾ (2036-2065)				
					G _L	G _H	W _L	W _H	
					+1 °C	+1 °C	+2 °C	+2 °C	
Wereldwijde temperatuurstijging:					Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde	
Verandering van luchtstromingspatroon:									
Jaar	Zeespiegel bij Noordzeekust	absolute niveau ⁴⁾	4 cm beneden NAP	3 cm boven NAP	+15 tot +30 cm	+15 tot +30 cm	+20 tot +40 cm	+20 tot +40 cm	
		tempo van verandering	1,2 mm/jaar	2,0 mm/jaar	+1 tot +5,5 mm/jaar	+1 tot +5,5 mm/jaar	+3,5 tot +7,5 mm/jaar	+3,5 tot +7,5 mm/jaar	
	Temperatuur	gemiddelde	9,2 °C	10,1 °C	+1,0 °C	+1,4 °C	+2,0 °C	+2,3 °C	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	774 mm	851 mm	+4%	+2,5%	+5,5%	+5%	
	Zonnestraling	zonnestraling	346 kJ/cm ²	354 kJ/cm ²	+0,6%	+1,6%	-0,8%	+1,2%	
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	534 mm ⁹⁾	559 mm	+3%	+5%	+4%	+7%	
	Mist	aantal uren met zicht minder dan 1 km	412 uur	300 uur ¹⁰⁾	-110 uur	-110 uur	-110 uur	-110 uur	
Winter	Temperatuur	gemiddelde	2,4 °C	3,4 °C	+1,1 °C	+1,6 °C	+2,1 °C	+2,7 °C	
		jaar-op-jaar variaties ¹¹⁾	-	± 2,6 °C	-8%	-16%	-13%	-20%	
		dagmaximum	5,1 °C	6,1 °C	+1,0 °C	+1,6 °C	+2,0 °C	+2,5 °C	
		dagminimum	-0,3 °C	0,5 °C	+1,1 °C	+1,7 °C	+2,2 °C	+2,8 °C	
		koudste winterdag per jaar	-7,5 °C	-5,9 °C	+2,0 °C	+3,6 °C	+3,9 °C	+5,1 °C	
		zachtste winterdag per jaar	10,3 °C	11,1 °C	+0,6 °C	+0,9 °C	+1,7 °C	+1,7 °C	
		aantal vorstdagen (min temp < 0°C)	42 dagen	38 dagen	-30%	-45%	-50%	-60%	
		aantal ijsdagen (max temp < 0°C)	11 dagen	7,2 dagen	-50%	-70%	-70%	-90%	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	188 mm	211 mm	+3%	+8%	+8%	+17%	
		jaar-op-jaar variaties ¹¹⁾	-	± 96 mm	+4,5%	+9%	+10%	+17%	
		10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden ⁸⁾	80 mm	89 mm	+6%	+10%	+12%	+17%	
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	56 dagen	55 dagen	-0,3%	+1,4%	-0,4%	+2,4%	
		aantal dagen ≥ 10 mm	4,1 dagen	5,3 dagen	+9,5%	+19%	+20%	+35%	
	Wind	gemiddelde windsnelheid	-	6,9 m/s	-1,1%	+0,5%	-2,5%	+0,9%	
		hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-	15 m/s	-3%	-1,4%	-3%	0,0%	
		aantal dagen met windrichting tussen zuid en west	44 dagen	49 dagen	-1,4%	+3%	-1,7%	+4,5%	
	Lente	Temperatuur	gemiddelde	8,3 °C	9,5 °C	+0,9 °C	+1,1 °C	+1,8 °C	+2,1 °C
Zomer	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	148 mm	173 mm	+4,5%	+2,3%	+11%	+9%	
	Temperatuur	gemiddelde	16,1 °C	17,0 °C	+1,0 °C	+1,4 °C	+1,7 °C	+2,3 °C	
		jaar-op-jaar variaties ¹¹⁾	-	± 1,4 °C	+3,5%	+7,5%	+4%	+9,5%	
		dagmaximum	20,7 °C	21,9 °C	+0,9 °C	+1,4 °C	+1,5 °C	+2,3 °C	
		dagminimum	11,2 °C	11,9 °C	+1,1 °C	+1,3 °C	+1,9 °C	+2,2 °C	
		koelste zomerdag per jaar	10,3 °C	11,1 °C	+0,9 °C	+1,1 °C	+1,6 °C	+2,0 °C	
		warmste zomerdag per jaar	23,2 °C	24,7 °C	+1,4 °C	+1,9 °C	+2,3 °C	+3,3 °C	
		aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C)	13 dagen	21 dagen	+22%	+35%	+40%	+70%	
		aantal tropische nachten (min temp ≥ 20°C)	< 0,1 dagen	0,1 dagen	+0,5%	+0,6%	+1,4%	+2,2%	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	224 mm	224 mm	+1,2%	-8%	+1,4%	-13%	
		jaar-op-jaar variaties ¹¹⁾	-	± 113 mm	+2,1 tot +5%	-2,5 tot +1,0%	+1,4 tot +7%	-4 tot +2,2%	
		dagelijkse hoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden ⁸⁾	44 mm	44 mm	+1,7 tot +10%	+2,0 tot +13%	+3 tot +21%	+2,5 tot +22%	
		maximum urneerslag per jaar	14,9 mm/uur	15,1 mm/uur	+5,5 tot +11%	+7 tot +14%	+12 tot +23%	+13 tot +25%	
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	45 dagen	43 dagen	+0,5%	-5,5%	+0,7%	-10%	
		aantal dagen ≥ 20 mm	1,6 dagen	1,7 dagen	+4,5 tot +18%	-4,5 tot +10%	+6 tot +30%	-8,5 tot +14%	
		Zonnestraling	zonnestraling	149 kJ/cm ² ⁸⁾	153 kJ/cm ²	+2,1%	+5%	+1,0%	+6,5%
		Vochtigheid	relatieve vochtigheid	78%	77%	-0,6%	-2,0%	+0,1%	-2,5%
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	253 mm ⁹⁾	266 mm	+4%	+7%	+4%	+11%	
	Droogte	gemiddeld hoogste neerslagtekort gedurende het groeiseizoen ⁸⁾	140 mm	144 mm	+4,5%	+20%	+0,7%	+30%	
		hoogste neerslagtekort dat eens in de 10 jaar wordt overschreden ⁸⁾	-	230 mm	+5%	+17%	+4,5%	+25%	
Herfst	Temperatuur	gemiddelde	10,0 °C	10,6 °C	+1,1 °C	+1,3 °C	+2,2 °C	+2,3 °C	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	214 mm	245 mm	+7%	+8%	+3%	+7,5%	

Figuur 9: Kerncijfers klimaatscenario's 2050

Seizoen ^{a)}	Variabele	Indicator	Klimaat ^{b)} 1951-1980	Klimaat ^{b)} 1981-2010 = referentie- periode	Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2085 ^{c)} (2071-2100)					
					G _L	G _H	W _L	W _H		
					+1,5 °C	+1,5 °C	+3,5 °C	+3,5 °C		
Wereldwijde temperatuurstijging:					Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde		
Verandering van luchtstromingspatroon:					Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde		
Jaar	Zeespiegel bij Noordzeekust	absolute niveau ^{d)}	4 cm beneden NAP	3 cm boven NAP	+25 tot +60 cm	+25 tot +60 cm	+45 tot +80 cm	+45 tot +80 cm		
		tempo van verandering	1,2 mm/jaar	2,0 mm/jaar	+1 tot +7,5 mm/jaar	+1 tot +7,5 mm/jaar	+4 tot +10,5 mm/jaar	+4 tot +10,5 mm/jaar		
	Temperatuur	gemiddelde	9,2 °C	10,1 °C	+1,3 °C	+1,7 °C	+2,8 °C	+3,7 °C		
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	774 mm	851 mm	+5%	+5%	+6%	+7%		
	Zonnestraling	zonnestraling	346 kJ/cm ²	354 kJ/cm ²	-0,5%	+1,1%	-0,8%	+1,4%		
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	534 mm ^{e)}	559 mm	+2,5%	+5,5%	+6%	+10%		
	Mist	aantal uren met zicht minder dan 1 km	412 uur	300 uur ^{g)}	-120 uur	-120 uur	-120 uur	-120 uur		
Winter	Temperatuur	gemiddelde	2,4 °C	3,4 °C	+1,3 °C	+2,0 °C	+2,8 °C	+4,1 °C		
		jaar-op-jaar variaties ^{h)}	-	± 2,6 °C	-10%	-17%	-13%	-24%		
		dagmaximum	5,1 °C	6,1 °C	+1,2 °C	+2,0 °C	+2,7 °C	+3,8 °C		
		dagminimum	-0,3 °C	0,5 °C	+1,4 °C	+2,1 °C	+3,0 °C	+4,4 °C		
		koudste winterdag per jaar	-7,5 °C	-5,9 °C	+2,7 °C	+4,1 °C	+4,8 °C	+7,3 °C		
		zachtste winterdag per jaar	10,3 °C	11,1 °C	+1,0 °C	+1,2 °C	+2,4 °C	+3,1 °C		
		aantal vorstdagen (min temp < 0°C)	42 dagen	38 dagen	-35%	-50%	-60%	-80%		
		aantal ijsdagen (max temp < 0°C)	11 dagen	7,2 dagen	-60%	-80%	-80%	< -90%		
		Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	188 mm	211 mm	+4,5%	+12%	+11%	+30%	
		jaar-op-jaar variaties ^{h)}	-	± 96 mm	+6,5%	+12%	+14%	+30%		
	Wind	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{g)}	80 mm	89 mm	+8%	+12%	+16%	+25%		
		aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	56 dagen	55 dagen	+0,3%	+1,0%	-0,9%	+3%		
		aantal dagen ≥ 10 mm	4,1 dagen	5,3 dagen	+14%	+24%	+30%	+60%		
		gemiddelde windsnelheid	-	6,9 m/s	-2,0%	+0,5%	-2,5%	+2,2%		
		hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-	15 m/s	-2,0%	-0,9%	-1,8%	+2,0%		
		aantal dagen met windrichting tussen zuid en west	44 dagen	49 dagen	+1,6%	+6,5%	-6,5%	+4%		
		Lente	Temperatuur	gemiddelde	8,3 °C	9,5 °C	+1,2 °C	+1,5 °C	+2,4 °C	+3,1 °C
		Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	148 mm	173 mm	+8%	+7,5%	+13%	+12%	
		Zomer	Temperatuur	gemiddelde	16,1 °C	17,0 °C	+1,2 °C	+1,7 °C	+2,7 °C	+3,7 °C
				jaar-op-jaar variaties ^{h)}	-	± 1,4 °C	+5%	+9%	+6,5%	+14%
	dagmaximum			20,7 °C	21,9 °C	+1,0 °C	+1,7 °C	+2,6 °C	+3,8 °C	
	dagminimum			11,2 °C	11,9 °C	+1,4 °C	+1,7 °C	+2,9 °C	+3,7 °C	
	koelste zomerdag per jaar			10,3 °C	11,1 °C	+1,0 °C	+1,4 °C	+2,3 °C	+3,1 °C	
	warmste zomerdag per jaar			23,2 °C	24,7 °C	+2,0 °C	+2,6 °C	+3,6 °C	+4,9 °C	
	aantal zomerse dagen (max temp ≥ 25°C)			13 dagen	21 dagen	+30%	+50%	+90%	+130%	
	aantal tropische nachten (min temp ≥ 20°C)			< 0,1 dagen	0,1 dagen	+0,9%	+1,2%	+4,5%	+7,5%	
	Neerslag			gemiddelde hoeveelheid	224 mm	224 mm	+1,0%	-8%	-4,5%	-23%
	jaar-op-jaar variaties ^{h)}			-	± 113 mm	+1,2 tot +5,5%	-2,5 tot +1,9%	-0,6 tot +9%	-8,5 tot +2,3%	
	dagelijkse hoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{g)}		44 mm	44 mm	+2,5 tot +15%	+2,5 tot +17%	+5 tot +35%	+5 tot +40%		
maximum urneerslag per jaar	14,9 mm/uur		15,1 mm/uur	+8 tot +16%	+9 tot +19%	+19 tot +40%	+22 tot +45%			
aantal natte dagen (≥ 0,1mm)	45 dagen		43 dagen	+2,1%	-5,5%	+4%	-16%			
aantal dagen ≥ 20 mm	1,6 dagen		1,7 dagen	+5 tot +23%	-3,5 tot +14%	+2,5 tot +35%	-15 tot +14%			
Zonnestraling	zonnestraling		149 kJ/cm ² ^{e)}	153 kJ/cm ²	+0,9%	+5,5%	+3%	+9,5%		
Vochtigheid	relatieve vochtigheid		78%	77%	0,0%	-2,0%	-0,6%	-3%		
Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)		253 mm ^{e)}	266 mm	+3,5%	+8,5%	+8%	+15%		
Droogte	gemiddeld hoogste neerslagtekort gedurende het groeiseizoen ^{h)}		140 mm	144 mm	+1,0%	+1,9%	+13%	+50%		
	hoogste neerslagtekort dat eens in de 10 jaar wordt overschreden ^{g)}		-	230 mm	+3,5%	+17%	+14%	+40%		
Herfst	Temperatuur		gemiddelde	10,0 °C	10,6 °C	+1,6 °C	+1,6 °C	+3,3 °C	+3,8 °C	
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	214 mm	245 mm	+7,5%	+9%	+5,5%	+12%		

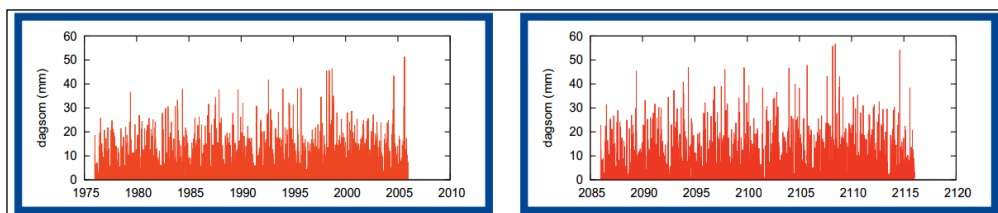
Figuur 10: Kerncijfers klimaatscenario's 2085

Op basis van deze veranderingen transformeert het KNMI transformatieprogramma historische neerslagreeksen naar fictieve neerslagreeksen voor de toekomst, die voldoen aan de eigenschappen van één van de scenario's opgesteld door het KNMI. De scenario's geven relatieve veranderingen van het aantal natte dagen met meer dan 0,1 mm neerslag (NDF), de gemiddelde neerslag op natte dagen (P_{gem}) en de dagsom die op één procent van die dagen wordt overschreden (Q99) voor de winter- en zomermaanden (december t/m februari resp. juni t/m augustus) rond 2030, 2050 en 2085, ten opzichte van het klimaat rond 1990 (KNMI, 2014a). Voor het transformatieprogramma zijn de relatieve veranderingen voor de zomer- en wintermaanden omgezet naar veranderingen voor alle maanden, zodanig dat de veranderingen voor de zomer- en wintermaanden nog wel overeenkomen met de klimaatscenario's (Bakker & Bessembinder, 2007). Om P_{gem} en Q99 te transformeren wordt gebruik gemaakt van de volgende functie:

$$P^* = \alpha(P)^b,$$

waarin P^* is de getransformeerde neerslag, P is de neerslag in de historische neerslagreeksen en α en b zijn coëfficiënten die geschat zijn op basis van de

historische tijdreeksen van 240 KNMI-neerslagstations. De coëfficiënten α en b zijn door het KNMI middels een iteratieproces geschat, zodanig dat de relatieve veranderingen in P_{gem} en Q99 overeenkomen met de klimaatscenario's. Nu P_{gem} en Q99 overeenkomen met de klimaatscenario's, wordt de natte-dagfrequentie (NDF) per kalendermaand aangepast aan de scenario's. Dit gebeurt door waar nodig natte dagen droog te maken, of droge dagen nat. Als dit op een willekeurige manier gebeurt, kan de kansverdeling van de overgebleven natte dagen erg verschillen. Daarom is gekozen voor een methode waarbij de kansverdeling zo min mogelijk verandert door het aanpassen van de NDF (Bakker & Bessembinder, 2007). Per kalendermaand worden de natte dagen eerst gesorteerd op de hoeveelheid neerslag. Als er natte dagen verwijderd moeten worden, gebeurt dat gelijkmatig over deze sortering. Bij een afname van de NDF van 20 %, wordt bijvoorbeeld elke 5^e dag in de gesorteerde reeks droog gemaakt. Als er natte dagen toegevoegd moeten worden, wordt bepaald welke dag nat wordt gemaakt en hoeveel neerslag er op die dag valt. De nieuwe natte dagen worden zoveel mogelijk over de tijd verdeelt door steeds de eerste droge dag na een vaste hoeveelheid natte dagen, nat te maken. De neerslaghoeveelheden voor nieuwe natte dagen worden gelijkmatig getrokken uit de gesorteerde reeks. In Figuur 11 is een voorbeeld van de historische en getransformeerde tijdreeksen van de Bilt voor het scenario W+ rond 2100 weergegeven (Bakker & Bessembinder, 2007).



Figuur 11: Historische neerslagreeks en getransformeerde neerslagreeks voor W+-scenario rond 2100 voor de Bilt

Hierin is te zien dat er veel dagen droog zijn gemaakt, maar dat het aantal dagen met veel neerslag wel toeneemt. Dit is overeenkomstig de eigenschappen van het W+-scenario uit 2006.

De huidige potentiële verdamping wordt door het KNMI berekend met behulp van de methode van Makkink. Hiervoor is een meting van de gemiddelde temperatuur en de inkomende straling nodig. Hieronder volgt de wijze waarop de verdamping berekend wordt (Hiemstra & Sluiter, 2011). De methode is gebaseerd op de volgende formule:

$$ET_{ref} = 1000 * C * \frac{s}{s + \gamma} * \frac{S_{day}^{\downarrow}}{\lambda * \rho'}$$

waarin ET_{ref} is de Makkink referentie verdamping in mm per dag, C is een constante gelijk aan 0,65, $S_{day}^{\downarrow}$ is de totale inkomende straling per dag en ρ is de dichtheid van water, 1000 kg/m³. s is de helling van de lijn van de verzadigde waterdampspanning en wordt bepaald door de volgende formule:

$$s = \frac{7,5 * 237,3}{(237,3 + T_{day})^2} * \ln(10) * e_s,$$

waarin T_{day} is de gemiddelde temperatuur en e_s wordt bepaald door de volgende formule:

$$e_s = 0,6107 * 10^{\frac{7,5 * T_{day}}{237,3 + T_{day}}}.$$

γ is de psychometrische constante en wordt bepaald door:

$$\gamma = 0,0646 + 0,00006 * T_{day}.$$

λ is de verdampingswarmte en wordt bepaald door de volgende formule:

$$\lambda = (2501 - 2,375 * T_{day}) * 1000.$$

Om tot een getransformeerde verdampingsreeks te komen, wordt bovenstaande methode doorlopen op basis van getransformeerde temperatuur- en stralingsreeksen. De gemiddelde temperatuur wordt op de volgende manier getransformeerd (KNMI, 2014b). Eerst wordt van de historische tijdreeks het 1^e, 5^e, 50^e, 95^e en 99^e percentiel berekend. Vervolgens wordt berekend wat de waarde voor deze percentielen moet zijn aan de hand van de relatieve veranderingen die hiervoor zijn opgesteld in de klimaatscenario's. Daarna wordt elke afzonderlijke waarde uit de historische tijdreeks getransformeerd op basis van de volgende formule:

$$T^f = T_{50}^f * a(T^c - T_{50}^c),$$

waarin T^f is de getransformeerde temperatuur, T_{50}^f is het 50^e percentiel van de getransformeerde reeks, a is een vermenigvuldigingsfactor, die afhangt van de afstand tot het 1^e, 5^e, 50^e, 95^e en 99^e percentiel, T^c is de temperatuur in de historische reeks en T_{50}^c is het 50^e percentiel van de historische reeks (Bakker & Bessembinder, 2012).

De straling per dag wordt getransformeerd door deze te vermenigvuldigen met een factor die afhankelijk is van het klimaatscenario, de tijdshorizon en de kalendermaand waarin de waarde voor de straling valt (KNMI, 2014b).

BIJLAGE 2
Tijdreeksanalyse en Menyanthes

In een tijdreeks analyse wordt een output reeks gemodelleerd aan de hand van een aantal input reeksen (Bakker et al., 2008). In het geval van dit onderzoek is de output reeks een reeks gemeten grondwaterstanden en de inputreeksen zijn invloeden op de grondwaterstand, namelijk neerslag en verdamping. De reeks gemeten grondwaterstanden, beïnvloed door N factoren, wordt gemodelleerd op de volgende manier:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N h_i(t) + d + n(t)$$

(Von Asmuth J. R. et al., 2008). Waarin h is de gemeten grondwaterstand op tijdstip t , h_i is de invloed van factor i op de grondwaterstand op tijdstip t , d is een parameter die de grondwaterstand weergeeft als er geen invloed is van neerslag en verdamping en $n(t)$ is het residu op tijdstip t , dus het verschil tussen de gemeten en de gemodelleerde grondwaterstand op tijdstip t .

In dit geval is er sprake van 2 beïnvloedende factoren, namelijk neerslag en verdamping. De invloed van de neerslag wordt gemodelleerd op de volgende manier:

$$h_p(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) \theta_p(t - \tau) d\tau$$

(Von Asmuth J. R. et al., 2008). Hierin is $p(\tau)$ de neerslag op tijdstip τ en θ_p de impulsresponsie functie van de neerslag. In de volgende alinea zal worden ingegaan op wat deze impulsresponsie functie inhoudt. Er wordt een integraal genomen vanaf tijdstip $\tau = -\infty$ omdat alle neerslaggebeurtenissen uit het verleden invloed hebben op de grondwaterstand op het huidige tijdstip. Dit kan echter niet gedaan worden in Menyanthes, omdat het programma dan een oneindige berekening uit moet voeren. Om een goede inschatting te kunnen maken, maar ook de rekentijd te beperken, gebruikt Menyanthes maximaal 8 jaar aan data voor de eerst gemeten grondwaterstand. De invloed van de verdamping wordt op nagenoeg dezelfde manier gemodelleerd als die van de neerslag:

$$h_e(t) = \int_{-\infty}^t -e(\tau) f \theta_p(t - \tau) d\tau$$

(Von Asmuth J. R. et al., 2008). Zoals te zien is, is de invloed van de verdamping negatief, en wordt de impulsresponsie functie van de neerslag vermenigvuldigd met een factor f . Deze factor is een verdampingsreductiefactor, die niet verward moet worden met de verdampingsfactor van bijvoorbeeld Makkink. De factor f houdt namelijk, naast de bebouwing en begroeiing in het gebied ook rekening met de gemiddelde reductie van de verdamping als gevolg van grondwatertekorten (Von Asmuth J. R. et al., 2008). Om de rekentijd van het model te beperken, wordt f genomen als een constante.

De impulsresponsie functie van de neerslag, die ook wordt gebruikt voor de verdamping, wordt gemodelleerd door middel van een Pearson type III verdeling,

$$\theta_p(t) = \frac{A(a^n t^{n-1} \exp(-at))}{\Gamma(n)}.$$

Hierin zijn A , a en n parameters die de vorm van θ_p bepalen. Er is gekozen voor

een Pearson type III verdeling omdat deze verdeling de invloed van factoren op de hydrologie goed beschrijft (Buckett & Oliver, 1977).

Menyanthes maakt gebruik van een deterministisch model, de hierboven beschreven invloeden van neerslag en verdamping, en een stochastisch model, namelijk een ruismodel dat de residuen modelleert. De residuen worden niet als afzonderlijke waarden beschouwt, omdat de grondwaterstand gerelateerd is aan grondwaterstanden op vorige tijdstippen (Von Asmuth J. R. et al., 2008). Daarom wordt er in Menyanthes gebruik gemaakt van een stochastisch ruismodel. Aan de hand van deze twee modellen worden vijf parameters geschat. Deze vijf parameters zijn de drie parameters van de Pearson type III verdeling, de verdampingsreductiefactor en één parameter voor het ruismodel. Dit schattingsproces verloopt door middel van een niet-lineaire kleinste kwadraten methode. Met deze methode kan in geval van een niet-lineair verband een model zo goed als mogelijk gefit worden aan de werkelijkheid (Kelley, 1999). Met de niet-lineaire kleinste kwadraten methode wordt een criterium van het ruismodel geminimaliseerd, zodat de waardes van het deterministische model uiteindelijk zo goed mogelijk overeenkomen met de gemeten waardes.

BIJLAGE 3

Bepaling uitschieters en verdeling

Voor het opstellen van de betrouwbaarheidsintervallen zoals beschreven in paragraaf 3.4 is het nodig om te bepalen of er sprake is van uitschieters en of de veranderingen normaal verdeeld zijn. Hoe dit gedaan wordt, wordt beschreven in deze bijlage.

Of er sprake is van uitschieters wordt bepaald aan de hand van de z-score van de verandering per peilbuis. De z-score wordt bepaald met behulp van de volgende formule:

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{s},$$

waarin x_i is de verandering van één peilbuis, $\bar{x}$ is de gemiddelde verandering van alle peilbuizen in een bepaalde gemeente en s is de standaardafwijking van alle peilbuizen in een bepaalde gemeente (McClave et al., 2011). De standaardafwijking wordt bepaald door de volgende formule:

$$s = \sqrt{s^2},$$

waarin

$$s^2 = \left(\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \right) / (n - 1),$$

waarin n is de steekproefgrootte, dus het aantal peilbuizen waarvoor de veranderingen bepaald is (McClave et al., 2011). Er is sprake van een uitschieter als de absolute waarde van de z-score groter is dan 3 (McClave et al., 2011).

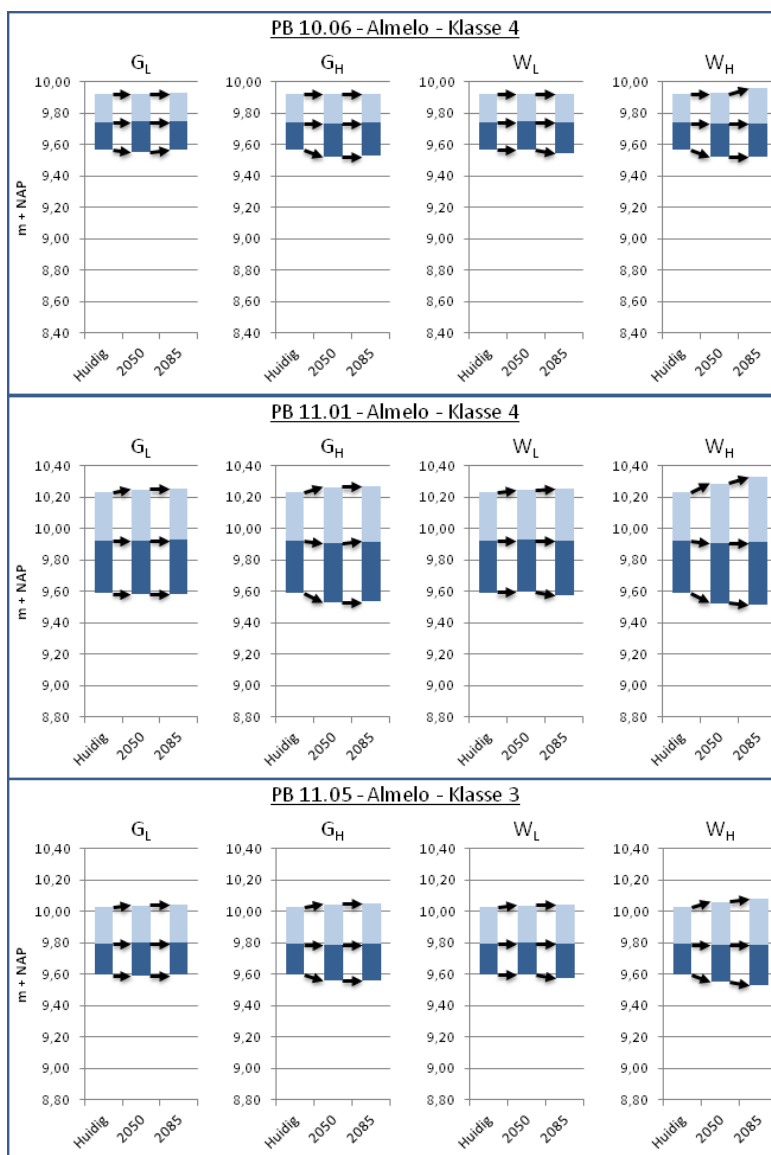
Naast het bepalen van uitschieters, is het nodig om te bepalen of er sprake is van een normale verdeling. Dit wordt gedaan met behulp van de Shapiro-Wilk test (Shapiro & Wilk, 1965). Deze test wordt uitgevoerd op basis van de volgende toetsingsgrootte:

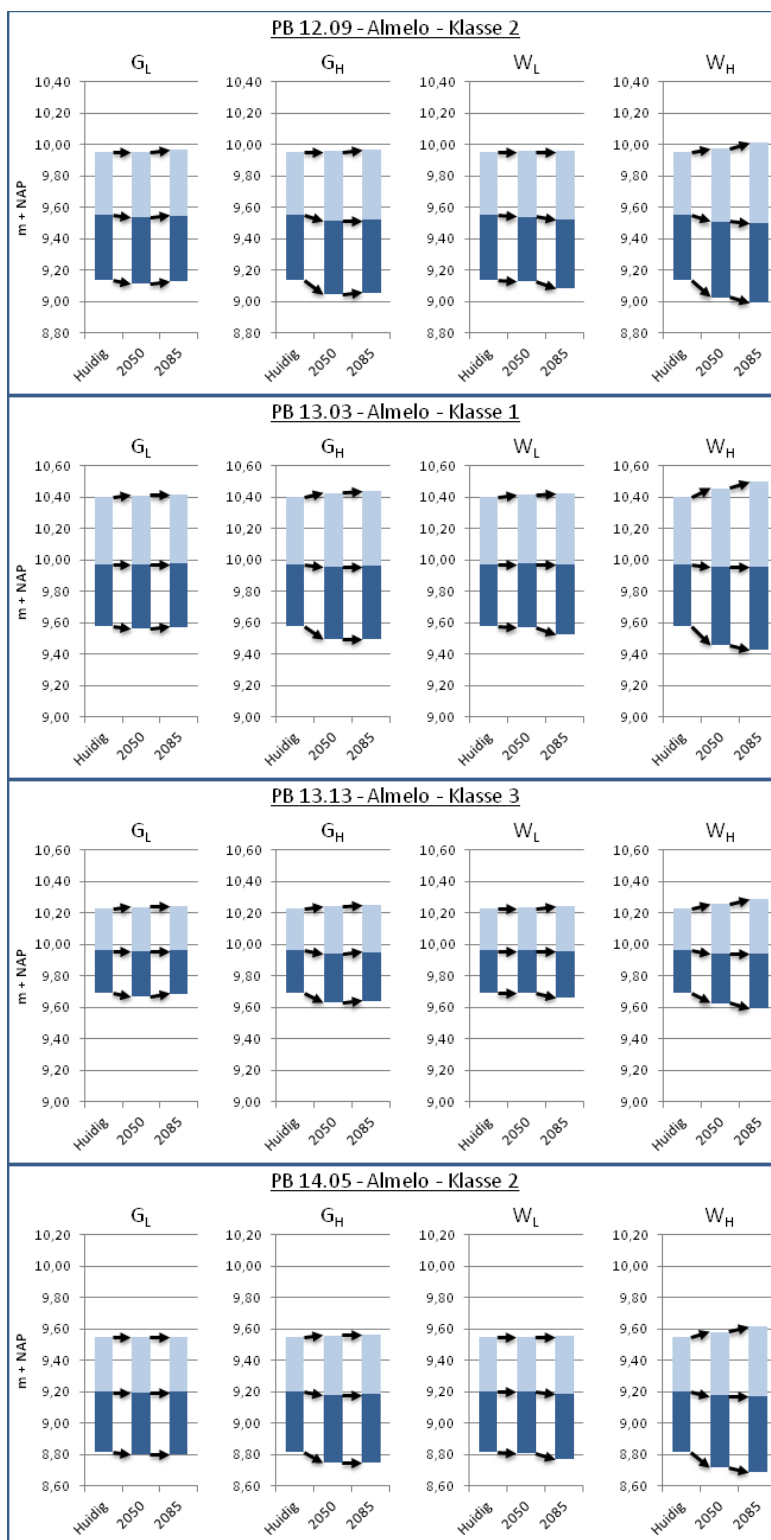
$$W = \left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right),$$

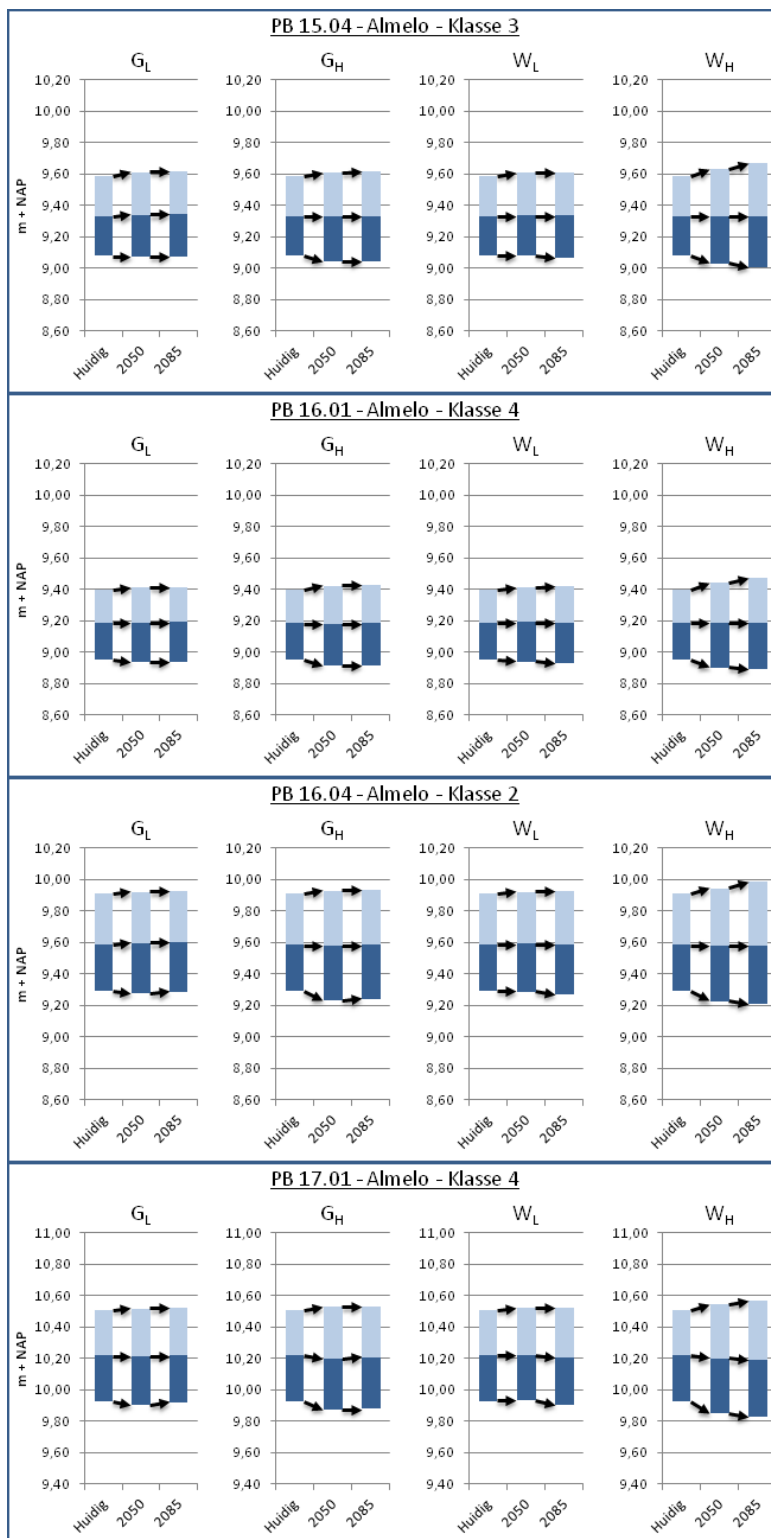
waarin $x_{(i)}$ is het i^{de} kleinste getal van de relatieve veranderingen en a_i is een constante die afhangt van de steekproefgrootte n en $x_{(i)}$. De waardes van a_i zijn bepaald door Shapiro en Wilk (1965). Als de waarde van de toetsingsgrootte W boven een bepaalde waarde komt, die afhangt van de gekozen betrouwbaarheid, kan met die gekozen betrouwbaarheid aangenomen worden dat de steekproef normaal verdeeld is. Deze kritieke waardes zijn ook bepaald door Shapiro en Wilk (1965).

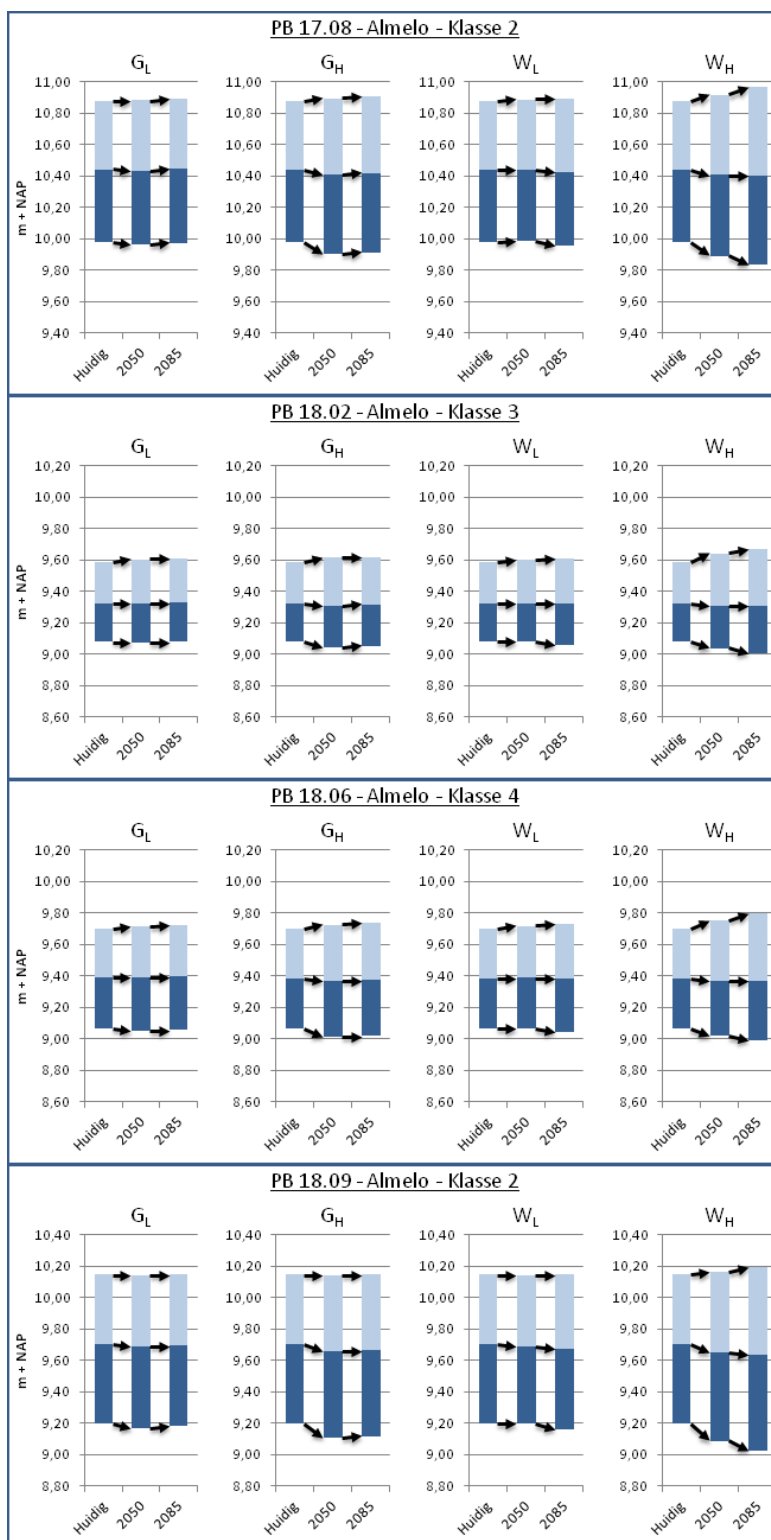
BIJLAGE 4
Verandering grondwaterstand

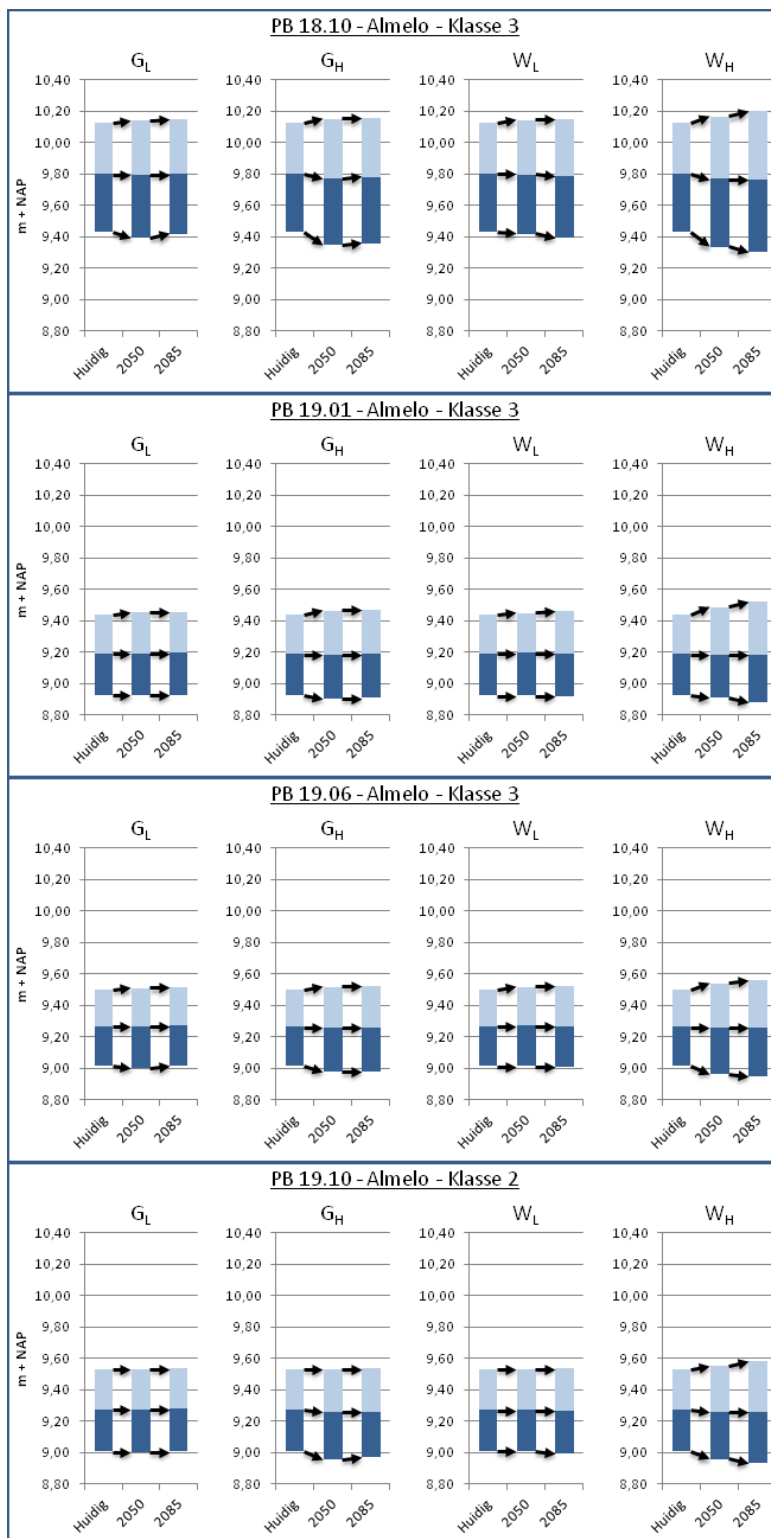
In de onderstaande serie afbeeldingen is de verandering van de grondwaterstand per peilbuis grafisch weergegeven voor 2050 en 2085. De bovenste serie pijlen geeft de verandering van de RHG aan, de middelste serie de verandering van de GG en de onderste serie de verandering van de RLG. De verandering van de mate van fluctuatie wordt weergegeven door de verandering van de lengte van de balkjes.

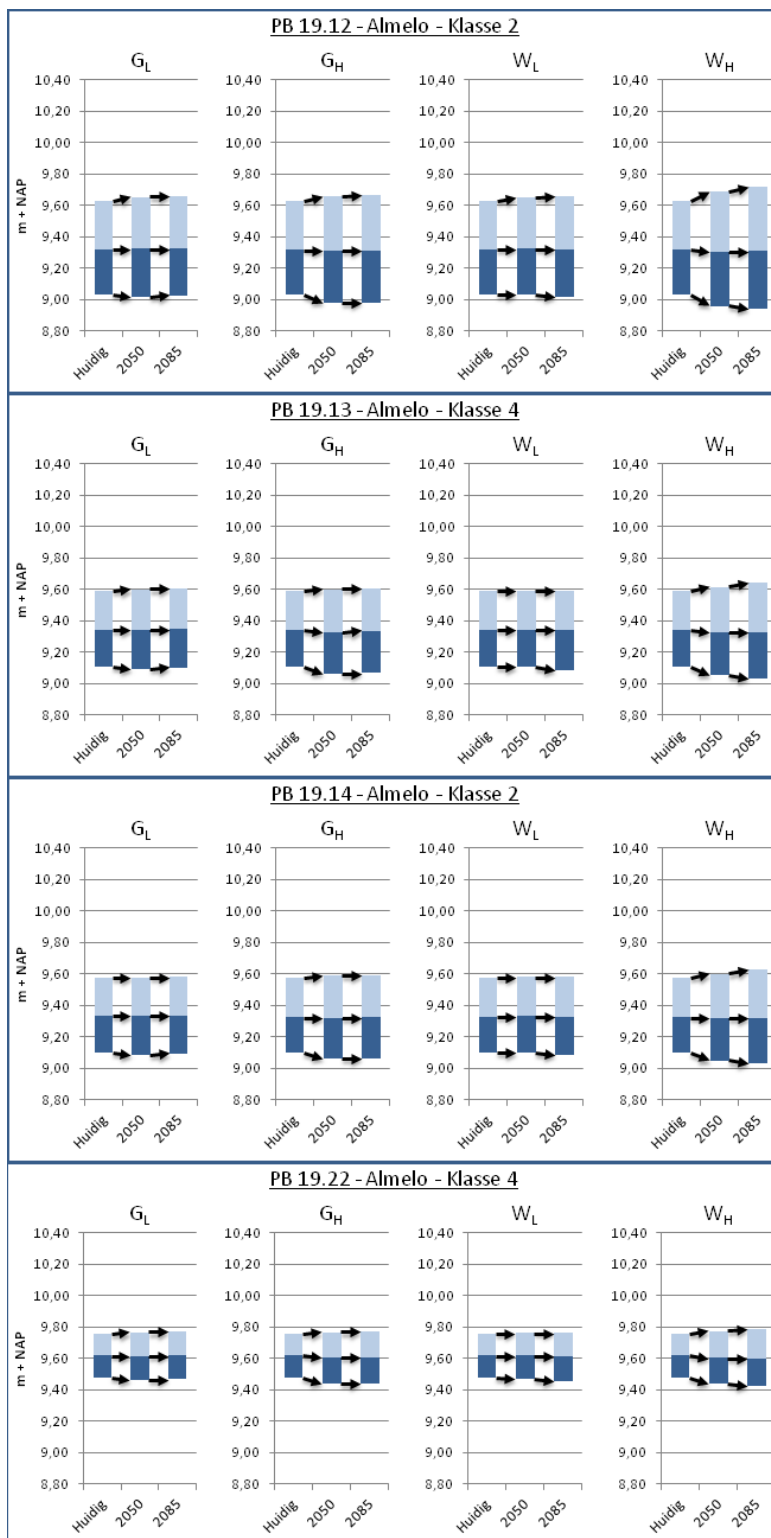


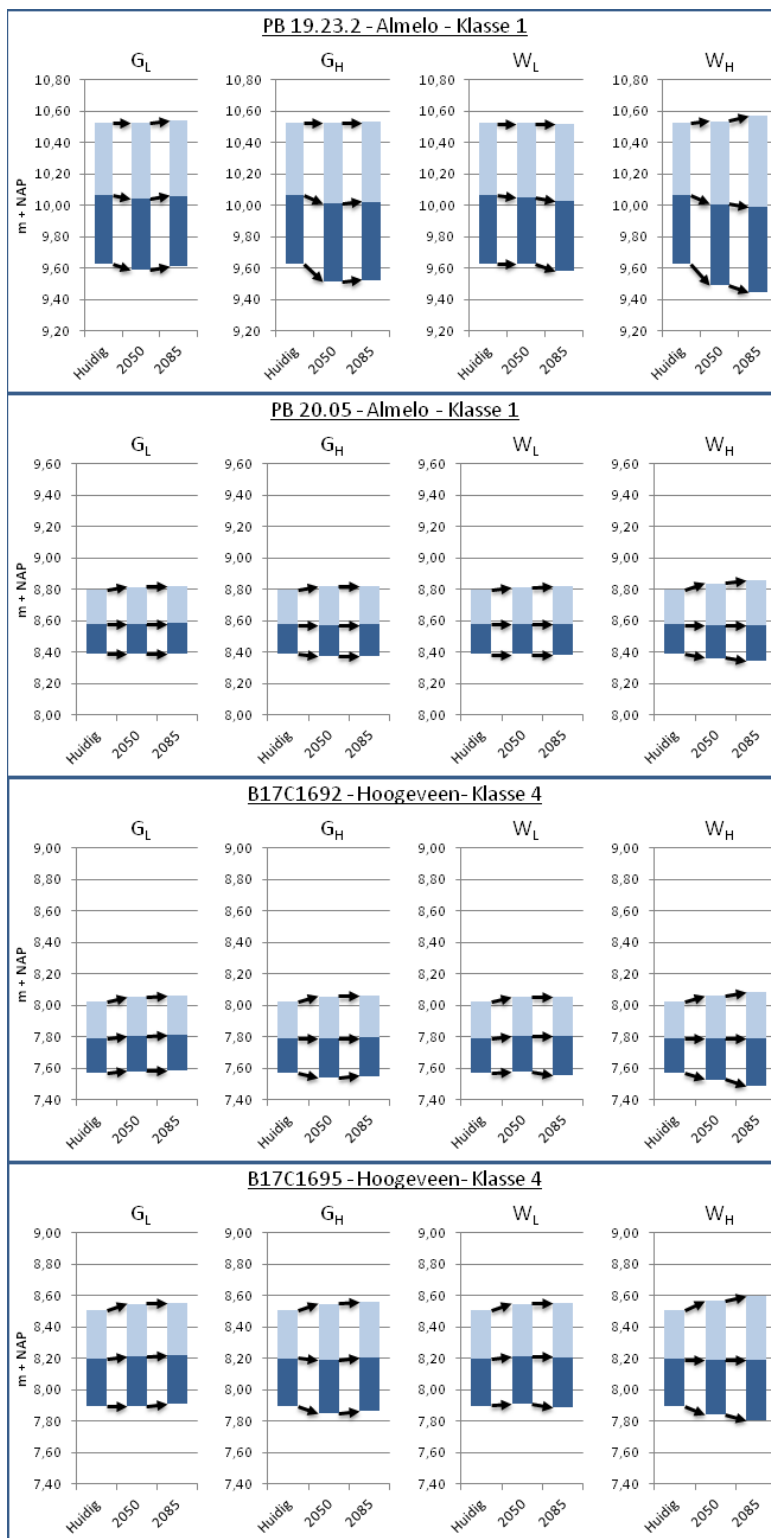


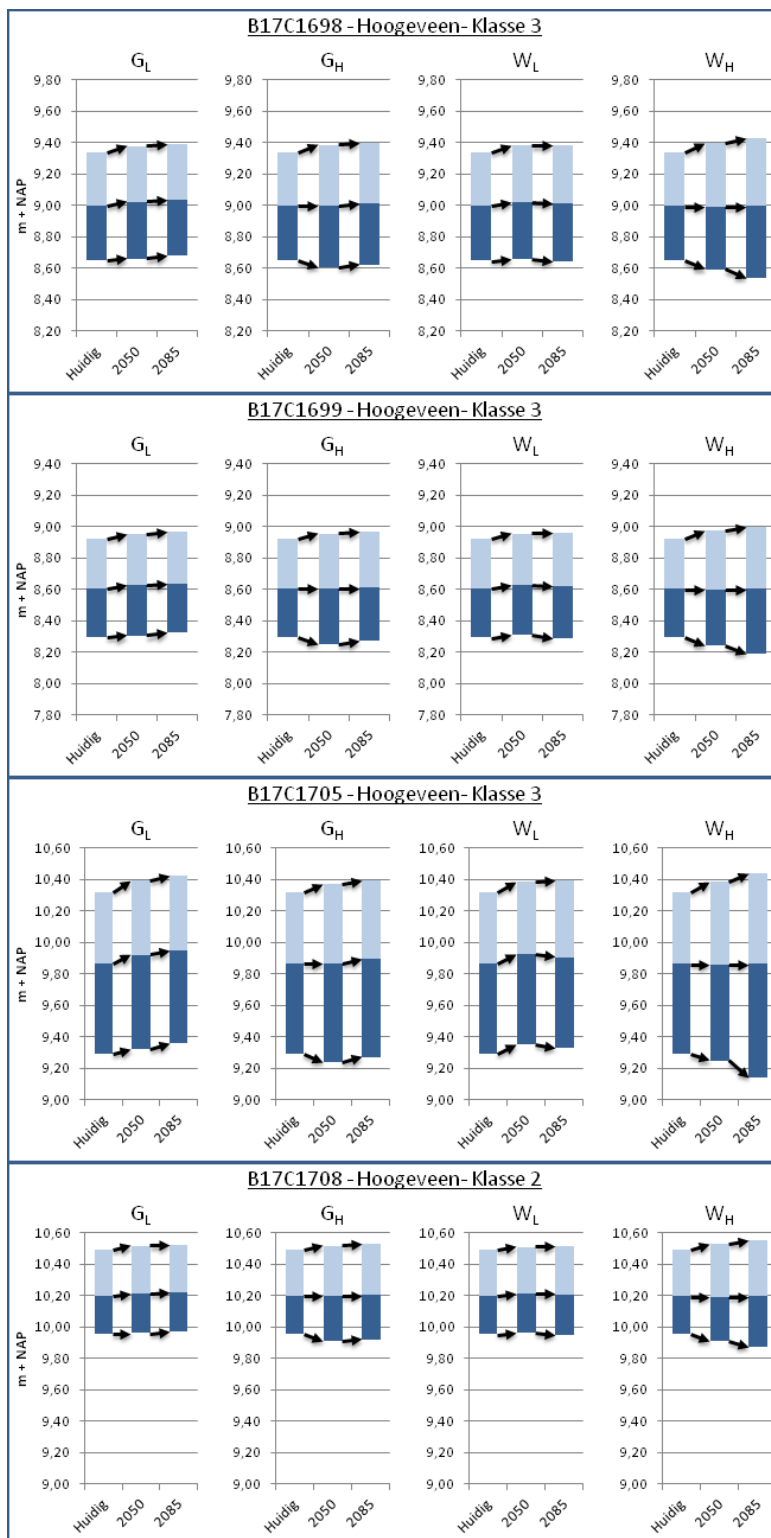


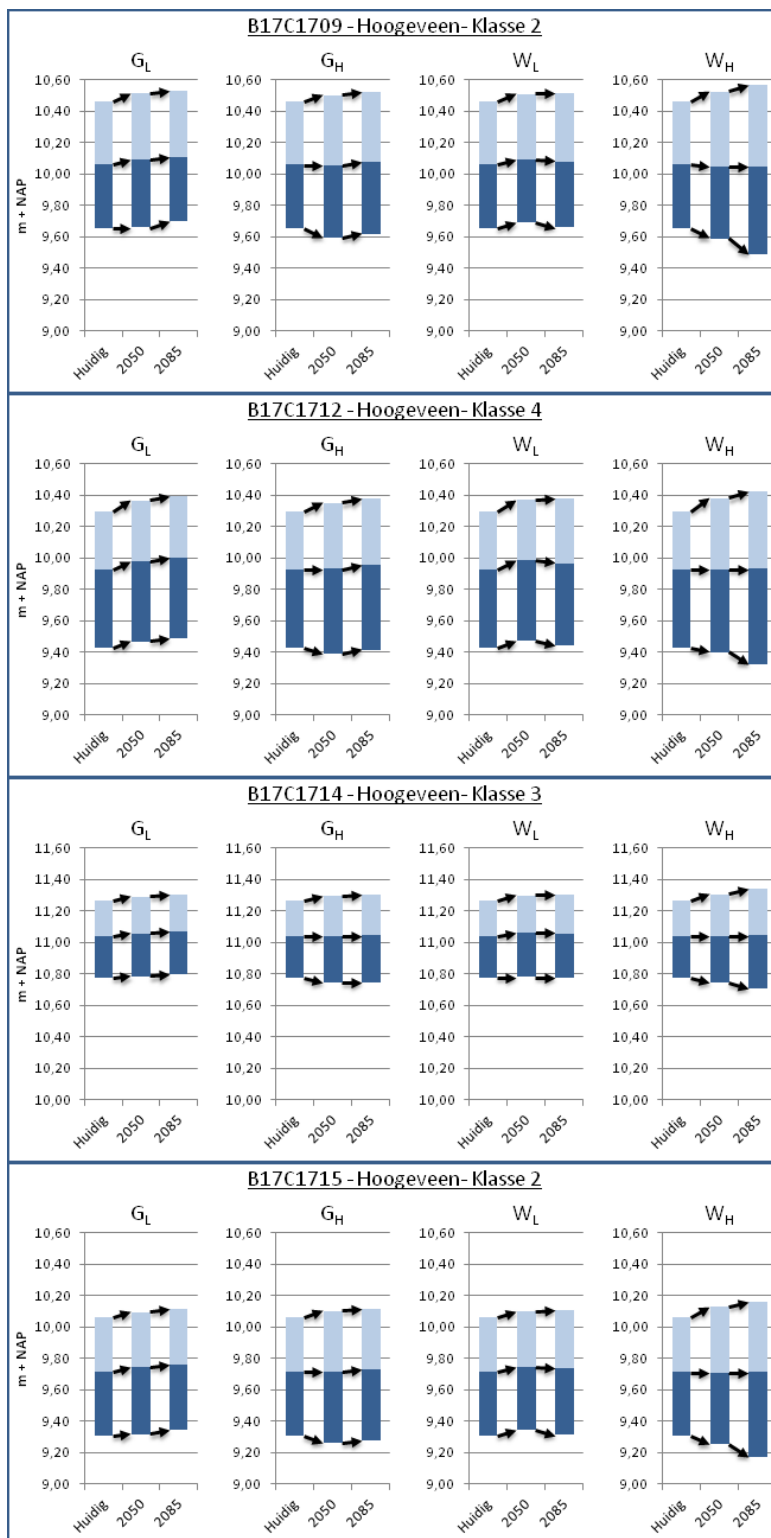


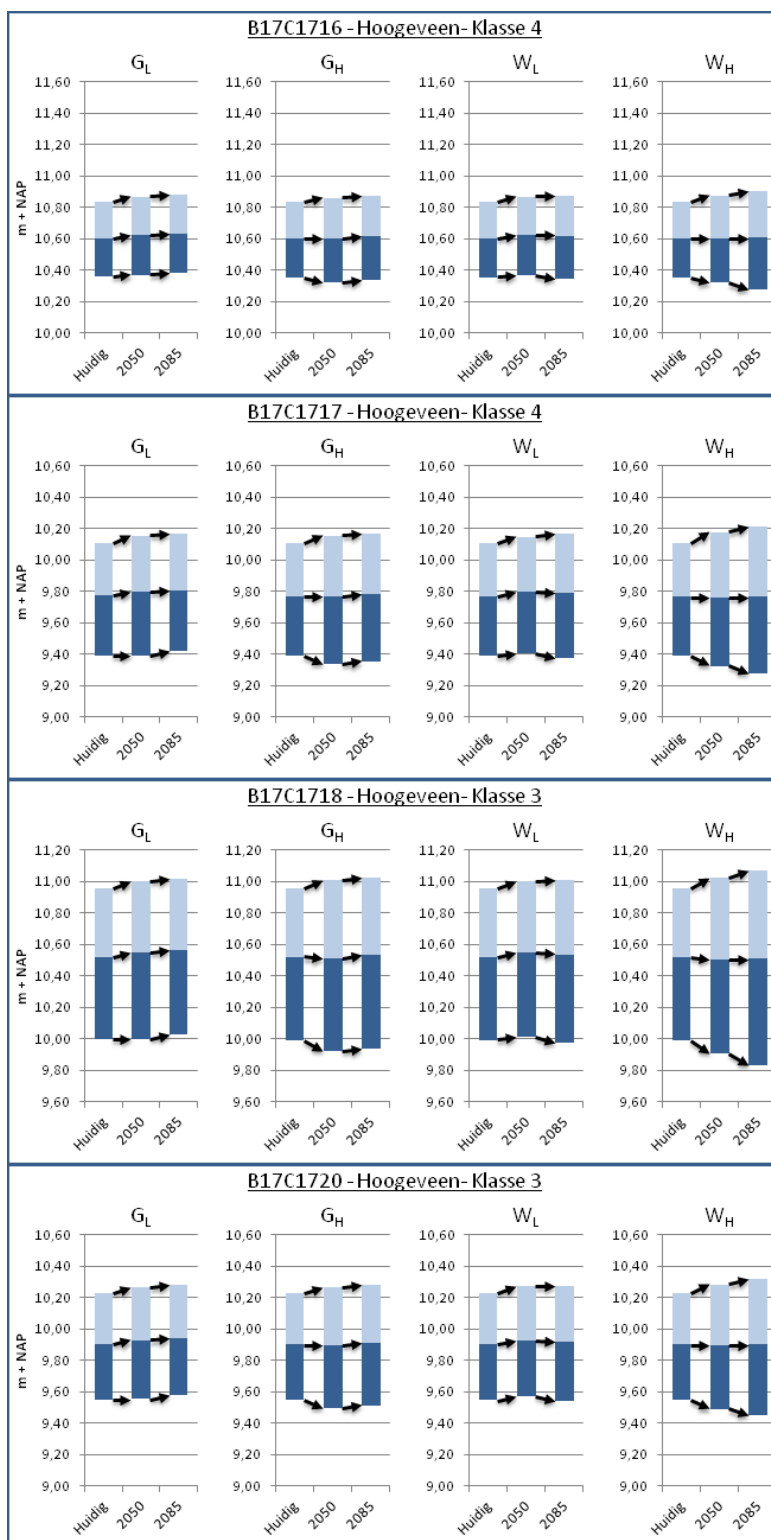


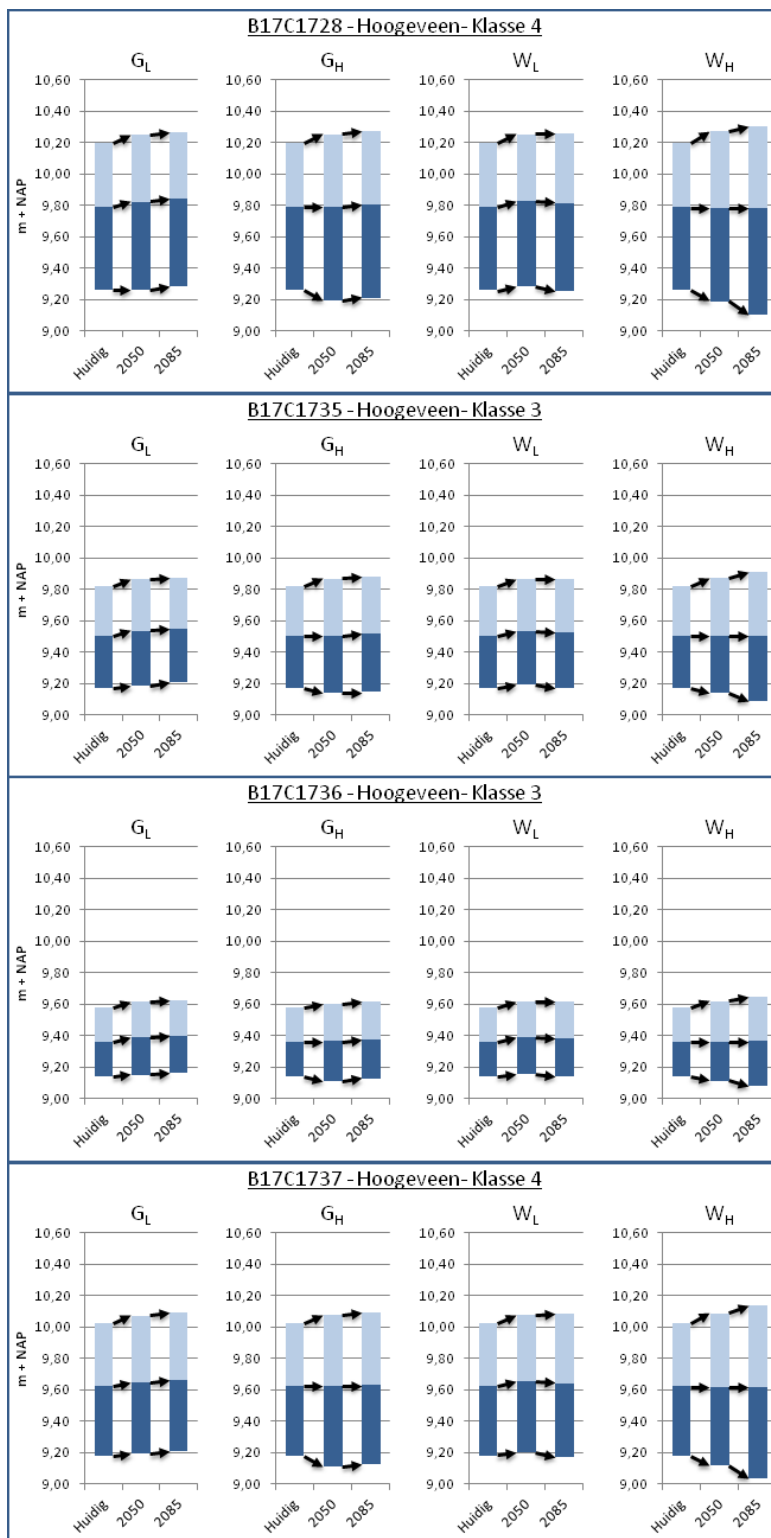


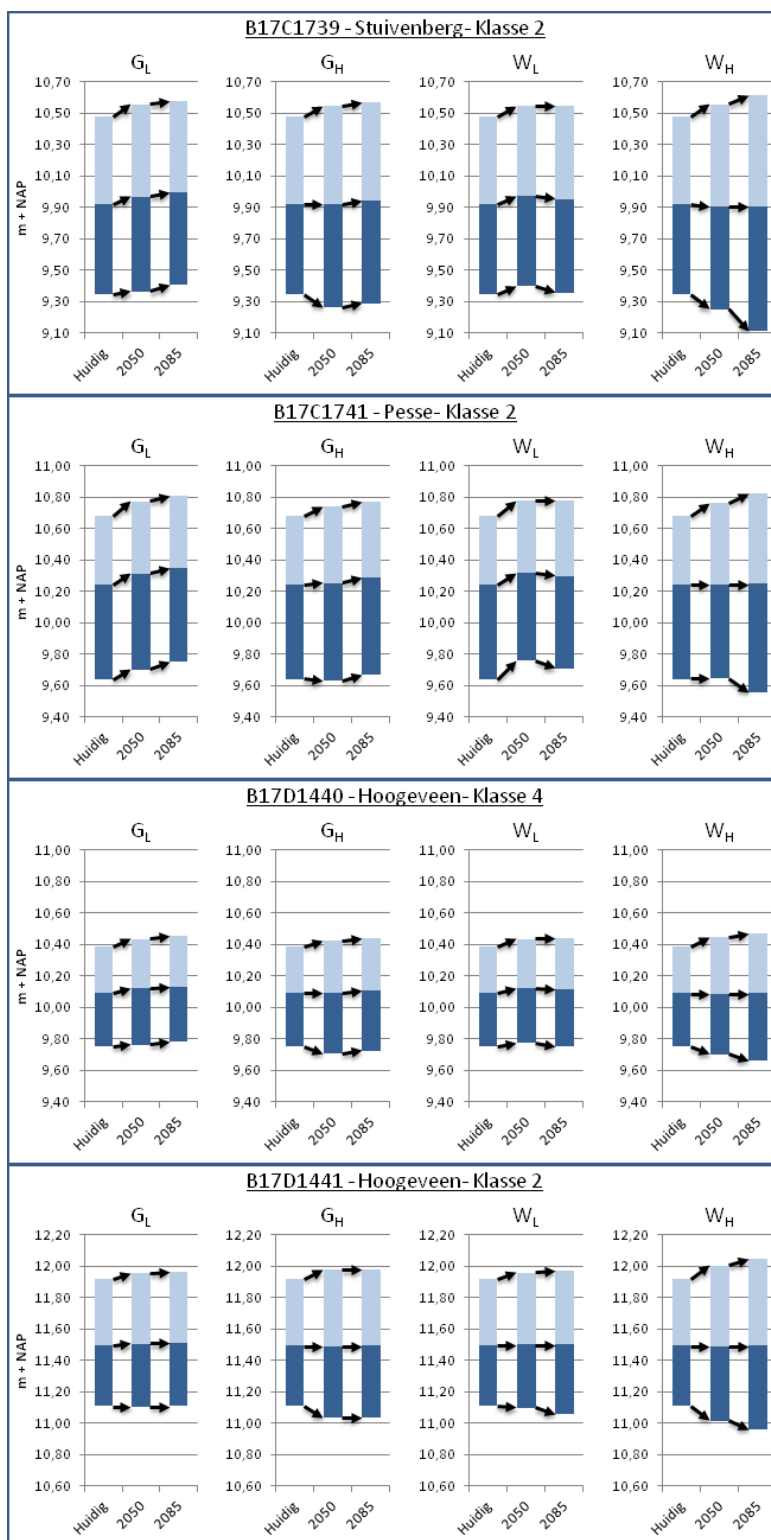


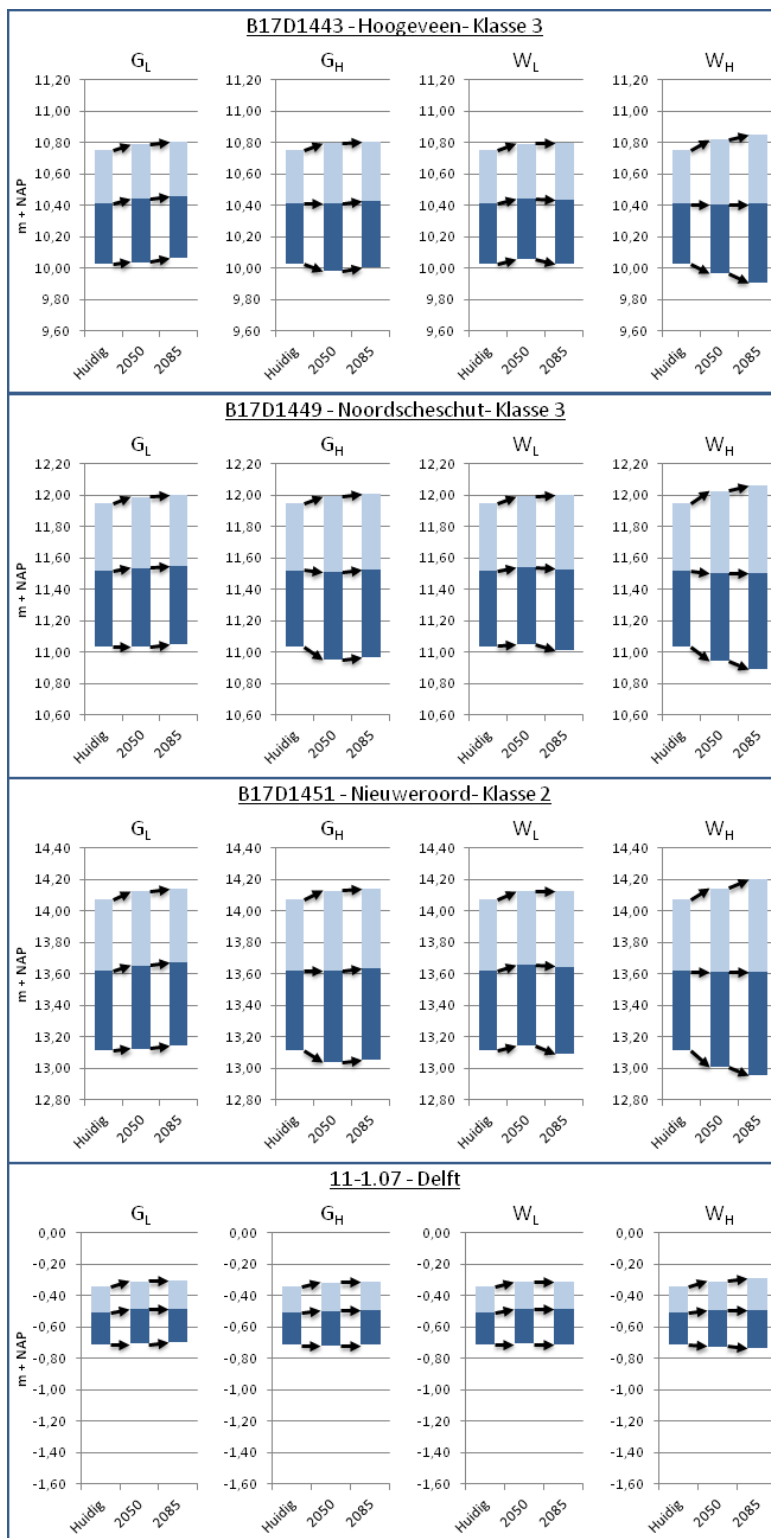


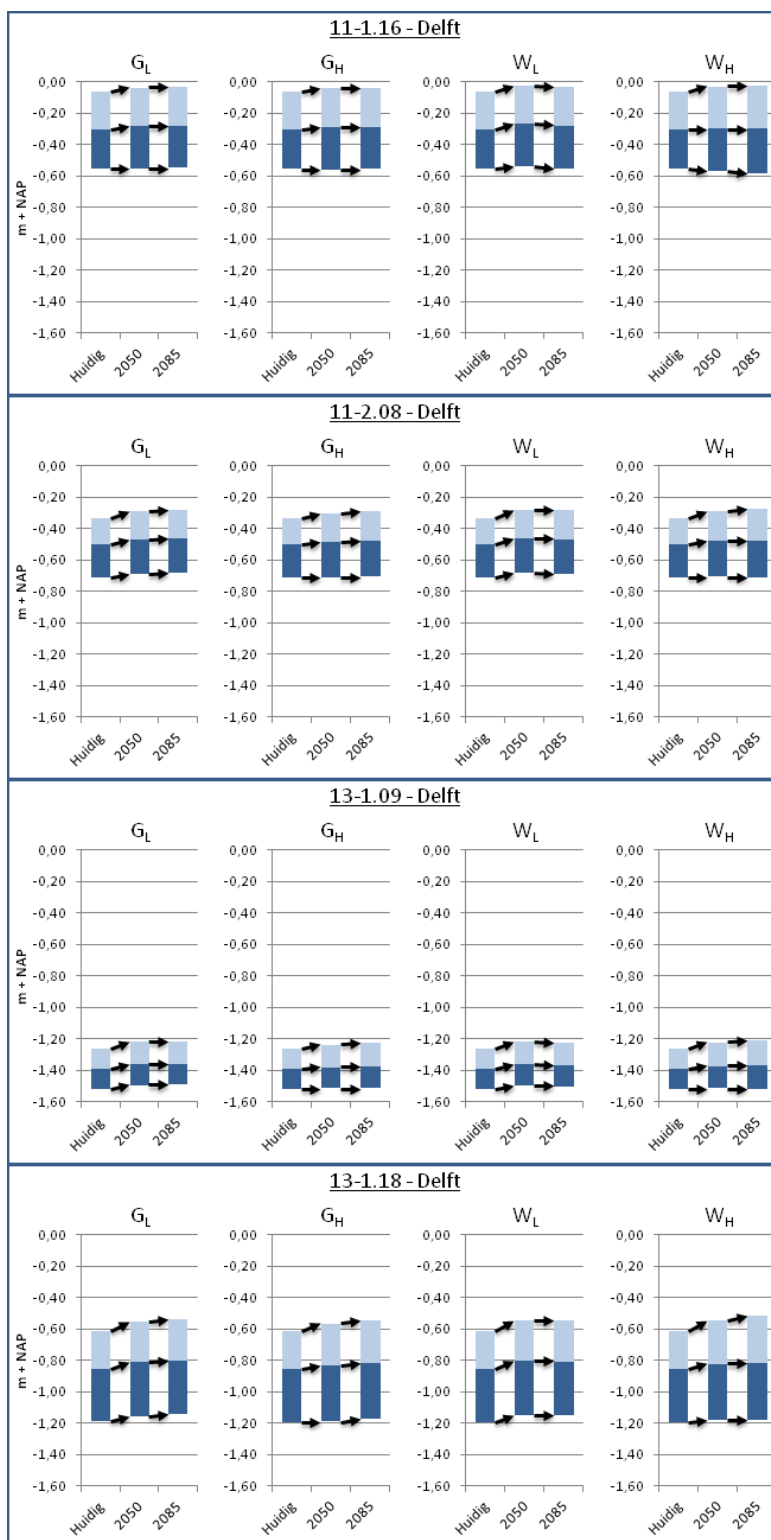


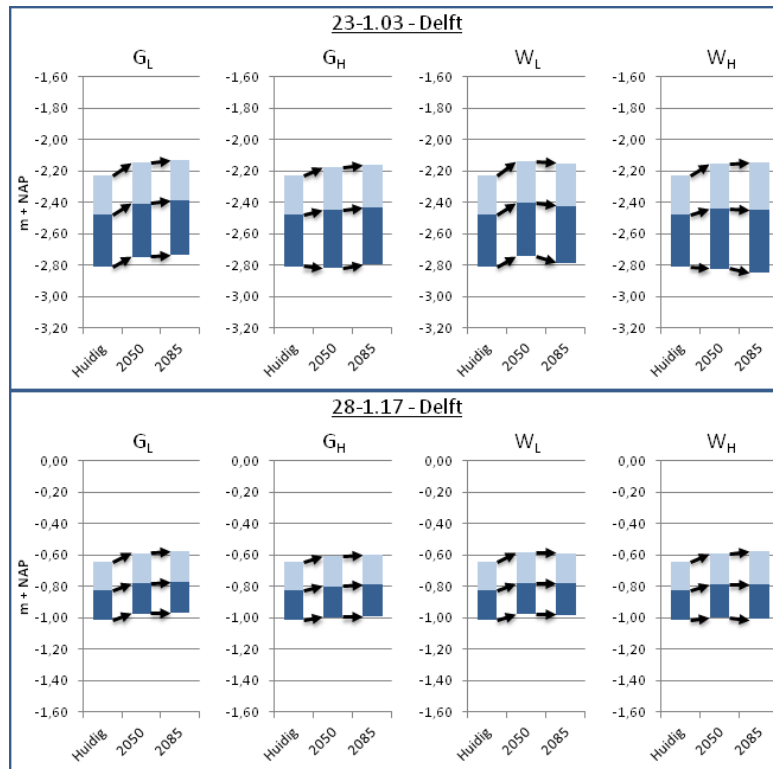












BIJLAGE 5

Opstellen betrouwbaarheidsintervallen

In deze bijlage wordt in meer detail beschreven hoe de betrouwbaarheidsintervallen uit paragraaf 5.1 tot stand zijn gekomen. Ten eerste is er per gemeente per klimaatscenario bepaald of er sprake is van uitschieters. Daarna is bepaald wat de steekproefgrootte (N) zonder uitschieters is. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Tabel 16 tot en met Tabel 18.

Tabel 16: Uitschieters gemeente Almelo

	2050				2085			
	G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L	W _H
Uitschieters	/	/	/	/	19.22	/	/	/
N	25	25	25	25	24	25	25	25

Tabel 17: Uitschieters gemeente Hoogeveen

	2050				2085			
	G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L	W _H
Uitschieters	/	B17C1741	B17C1741	B17C1741	/	B17C1741	/	/
N	25	24	24	24	25	24	25	25

Tabel 18: Uitschieters gemeente Delft

	2050				2085			
	G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L	W _H
Uitschieters	/	/	/	/	/	/	/	/
N	7	7	7	7	7	7	7	7

In onderstaande tabellen is per gemeente en per scenario weergegeven hoe de betrouwbaarheidsintervallen vervolgens zijn opgesteld. Dit is gedaan aan de hand van de methode zoals beschreven in paragraaf 3.4.

Tabel 19: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Almelo scenario G_L

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,918	0,916	0,918	0,916	0,918	0,916	0,918	0,916
W-toetsing	0,966	0,957	0,978	0,979	0,882	0,913	0,970	0,957
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja
Gemiddelde	4,4 %	3,7 %	1,6 %	2,7 %	-0,2 %	0,9 %	-2,7 %	-1,0 %
Standaardafwijking	1,5 %	1,1 %	1,3 %	1,3 %	1,0 %	0,9 %	1,4 %	0,7 %
T	2,064	2,069	2,064	2,069			2,064	2,069
R					8	7		
S					18	18		
Ondergrens	3,8 %	3,3 %	1,1 %	2,1 %	-0,7 %	0,6 %	-3,3 %	-1,3 %
Bovengrens	5,0 %	4,2 %	2,2 %	3,2 %	0,5 %	1,4 %	-2,1 %	-0,8 %

Tabel 20: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Almelo scenario G_H

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
W-toetsing	0,985	0,977	0,957	0,949	0,926	0,892	0,945	0,945
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja
Gemiddelde	12,1 %	12,3 %	2,8 %	3,9 %	-2,7 %	-1,7 %	-9,3 %	8,4 %
Standaardafwijking	1,8 %	2,0 %	1,7 %	1,8 %	1,4 %	1,4 %	2,3 %	2,2 %
T	2,064	2,064	2,064	2,064	2,064		2,064	2,064
R						8		
S						18		
Ondergrens	11,3 %	11,5 %	2,1 %	3,2 %	-3,3 %	-2,3 %	-10,2 %	-9,3 %
Bovengrens	12,8 %	13,1 %	3,5 %	4,6 %	-2,2 %	-0,8 %	-8,3 %	-7,5 %

Tabel 21: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Almelo scenario W_L

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
W-toetsing	0,979	0,976	0,957	0,937	0,899	0,870	0,935	0,965
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja
Gemiddelde	2,2 %	6,9 %	1,7 %	2,7 %	0,3 %	-1,0 %	-0,5 %	-4,2 %
Standaardafwijking	1,7 %	1,9 %	1,3 %	1,8 %	1,0 %	1,3 %	1,1 %	1,8 %
T	2,064	2,064	2,064	2,064			2,064	2,064
R					8	8		
S					18	18		
Ondergrens	1,5 %	6,1 %	1,1 %	1,9 %	-0,1 %	-1,5 %	-0,9 %	-4,9 %
Bovengrens	2,8 %	7,7 %	2,2 %	3,4 %	1,0 %	0,1 %	0,0 %	-3,5 %

Tabel 22: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Almelo scenario W_H

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
W-toetsing	0,976	0,945	0,958	0,954	0,910	0,882	0,951	0,983
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja
Gemiddelde	17,4 %	27,1 %	6,1 %	11,8 %	-2,9 %	-3,1 %	-11,3 %	-15,4 %
Standaardafwijking	2,4 %	2,2 %	2,7 %	3,3 %	1,7 %	2,1 %	3,3 %	2,9 %
T	2,064	2,064	2,064	2,064			2,064	2,064
R					8	8		
S					18	18		
Ondergrens	16,4 %	26,2 %	5,0 %	10,4 %	-3,5 %	-3,9 %	-12,5 %	-16,6 %
Bovengrens	18,4 %	28,0 %	7,2 %	13,1 %	-1,8 %	-1,6 %	-10,2 %	-14,2 %

Tabel 23: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Hoogeveen scenario G_L

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
W-toetsing	0,962	0,974	0,936	0,951	0,909	0,921	0,894	0,952
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Gemiddelde	4,6 %	3,8 %	6,0 %	8,1 %	3,7 %	5,7 %	1,4 %	4,4 %
Standaardafwijking	0,8 %	0,8 %	1,2 %	1,7 %	1,2 %	1,7 %	1,5 %	2,1 %
T	2,064	2,064	2,064	2,064		2,064		2,064
R					8		8	
S					18		18	
Ondergrens	4,3 %	3,4 %	5,5 %	7,4 %	3,1 %	5,0 %	0,6 %	3,5 %
Bovengrens	4,9 %	4,1 %	6,5 %	8,8 %	4,0 %	6,4 %	1,7 %	5,2 %

Tabel 24: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Hoogeveen scenario G_H

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916
W-toetsing	0,906	0,955	0,942	0,939	0,832	0,923	0,976	0,974
Normaal verdeeld	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	12,2 %	12,1 %	5,5 %	7,6 %	-0,6 %	1,5 %	-7,5 %	-5,6 %
Standaardafwijking	13,1 %	13,4 %	6,0 %	8,2 %	-0,3 %	2,2 %	-6,4 %	-4,2 %
T		2,069	2,069	2,069		2,069	2,069	2,069
R	7				7			
S	18				18			
Ondergrens	12,2 %	12,1 %	5,5 %	7,6 %	-0,6 %	1,5 %	-7,5 %	-5,6 %
Bovengrens	13,1 %	13,4 %	6,0 %	8,2 %	-0,3 %	2,2 %	-6,4 %	-4,2 %

Tabel 25: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Hoogeveen scenario W_L

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,916	0,918	0,916	0,918	0,916	0,918	0,916	0,918
W-toetsing	0,962	0,921	0,956	0,940	0,938	0,930	0,951	0,922
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	2,9 %	7,5 %	6,0 %	6,9 %	4,0 %	2,6 %	3,1 %	-0,6 %
Standaardafwijking	1,4 %	2,0 %	1,1 %	1,1 %	1,2 %	1,1 %	1,7 %	2,4 %
T	2,069	2,064	2,069	2,064	2,069	2,064	2,069	2,064
R								
S								
Ondergrens	2,3 %	6,7 %	5,5 %	6,5 %	3,5 %	2,2 %	2,4 %	-1,6 %
Bovengrens	3,5 %	8,4 %	6,5 %	7,4 %	4,5 %	3,1 %	3,8 %	0,4 %

Tabel 26: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Hoogeveen scenario W_H

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,916	0,918	0,916	0,918	0,916	0,918	0,916	0,918
W-toetsing	0,959	0,972	0,975	0,964	0,909	0,936	0,945	0,947
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	16,2 %	29,2 %	8,2 %	13,4 %	-0,9 %	-0,3 %	-8,0 %	-15,8 %
Standaardafwijking	2,3 %	2,6 %	1,0 %	1,2 %	0,4 %	0,8 %	2,0 %	2,7 %
T	2,064	2,069	2,064	2,069		2,069	2,064	2,069
R					7			
S					18			
Ondergrens	15,2 %	28,0 %	7,8 %	12,8 %	-1,2 %	-0,7 %	-8,9 %	-16,9 %
Bovengrens	17,2 %	30,3 %	8,6 %	13,9 %	-0,6 %	0,0 %	-7,2 %	-14,7 %

Tabel 27: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Delft scenario G_L

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803
W-toetsing	0,929	0,808	0,940	0,915	0,925	0,946	0,935	0,930
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	5,1 %	4,9 %	11,1 %	13,1 %	8,5 %	10,4 %	6,0 %	8,2 %
Standaardafwijking	1,4 %	0,6 %	3,9 %	4,4 %	3,4 %	4,0 %	4,4 %	4,5 %
T	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447
R								
S								
Ondergrens	3,8 %	4,4 %	7,6 %	9,0 %	5,3 %	6,7 %	2,0 %	4,0 %
Bovengrens	6,4 %	5,4 %	14,7 %	17,1 %	11,6 %	14,1 %	10,1 %	12,4 %

Tabel 28: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Delft scenario G_H

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803
W-toetsing	0,989	0,952	0,905	0,845	0,945	0,934	0,917	0,989
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	7,2 %	8,1 %	7,3 %	10,2 %	3,9 %	6,2 %	0,1 %	2,1 %
Standaardafwijking	1,6 %	1,8 %	1,8 %	3,1 %	1,8 %	2,3 %	2,4 %	2,7 %
T	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447
R								
S								
Ondergrens	5,7 %	6,5 %	5,6 %	7,3 %	2,3 %	4,1 %	-2,0 %	-0,4 %
Bovengrens	8,6 %	9,7 %	9,0 %	13,1 %	5,6 %	8,3 %	2,3 %	4,6 %

Tabel 29: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Delft scenario W_L

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803
W-toetsing	0,925	0,958	0,938	0,866	0,940	0,948	0,916	0,892
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	5,0 %	6,9 %	12,2 %	11,2 %	9,5 %	7,6 %	7,2 %	4,3 %
Standaardafwijking	1,3 %	1,8 %	3,8 %	3,3 %	2,9 %	2,7 %	3,5 %	3,5 %
T	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447
R								
S								
Ondergrens	3,8 %	5,3 %	8,6 %	8,1 %	6,8 %	5,1 %	3,9 %	1,1 %
Bovengrens	6,2 %	8,5 %	15,7 %	14,3 %	12,1 %	10,1 %	10,4 %	7,5 %

Tabel 30: Betrouwbaarheidsintervallen gemeente Delft scenario W_H

	Fluctuatie		RHG		GG		RLG	
	2050	2085	2050	2085	2050	2085	2050	2085
W-kritiek	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803
W-toetsing	0,824	0,959	0,935	0,866	0,961	0,989	0,874	0,817
Normaal verdeeld	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gemiddelde	10,7 %	17,5 %	10,8 %	14,9 %	5,5 %	5,9 %	0,1 %	-2,6 %
Standaardafwijking	2,5 %	2,7 %	2,8 %	3,5 %	2,5 %	2,6 %	3,6 %	4,0 %
T	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447	2,447
R								
S								
Ondergrens	8,3 %	15,0 %	8,3 %	11,6 %	3,2 %	3,5 %	-3,2 %	-6,3 %
Bovengrens	13,0 %	20,0 %	13,4 %	18,2 %	7,8 %	8,3 %	3,5 %	1,1 %

BIJLAGE 6
Invloed mate van verharding

In deze bijlage wordt de uitvoering van de methode om de invloed van de mate van verharding te toetsen, zoals beschreven in paragraaf 3.5, beschreven. Om te toetsen of er een significant verschil is tussen twee klassen, is gebruik gemaakt van de Mann-Whitney U-test. In Tabel 31 tot en met Tabel 35 wordt de uitvoering van de test gepresenteerd.

Tabel 31: Mann-Whitney U-test gemeente Almelo klasse 1-2

Scenario		m	n	T	U	U-kritiek	Significant
G _L	Fluctuatie	3	8	20	10	3	Nee
	RHG	3	8	20	10	3	Nee
	GG	3	8	14	16	3	Nee
	RLG	3	8	18	12	3	Nee
G _H	Fluctuatie	3	8	22	8	3	Nee
	RHG	3	8	19	11	3	Nee
	GG	3	8	18	12	3	Nee
	RLG	3	8	20	10	3	Nee
W _L	Fluctuatie	3	8	21	9	3	Nee
	RHG	3	8	20	10	3	Nee
	GG	3	8	18	12	3	Nee
	RLG	3	8	19	11	3	Nee
W _H	Fluctuatie	3	8	20	10	3	Nee
	RHG	3	8	17	13	3	Nee
	GG	3	8	18	12	3	Nee
	RLG	3	8	21	9	3	Nee

Tabel 32: Mann-Whitney U-test gemeente Almelo klasse 2-3

Scenario		m	n	T	U	U-kritiek	Significant
G _L	Fluctuatie	8	7	62	30	13	Nee
	RHG	8	7	56	36	13	Nee
	GG	8	7	55	37	13	Nee
	RLG	8	7	83	9	13	Ja
G _H	Fluctuatie	8	7	74	18	13	Nee
	RHG	8	7	50	42	13	Nee
	GG	8	7	76	16	13	Nee
	RLG	8	7	79	13	13	Ja
W _L	Fluctuatie	8	7	64	28	13	Nee
	RHG	8	7	43	49	13	Nee
	GG	8	7	72	20	13	Nee
	RLG	8	7	76	16	13	Nee
W _H	Fluctuatie	8	7	77	15	13	Nee
	RHG	8	7	61	31	13	Nee
	GG	8	7	76	16	13	Nee
	RLG	8	7	79	13	13	Ja

Tabel 33: Mann-Whitney U-test gemeente Almelo klasse 3-4

Scenario		m	n	T	U	U-kritiek	Significant
G _L	Fluctuatie	7	7	48	29	11	Nee
	RHG	7	7	65	12	11	Nee
	GG	7	7	50	27	11	Nee
	RLG	7	7	39	38	11	Nee
G _H	Fluctuatie	7	7	56	21	11	Nee
	RHG	7	7	57	20	11	Nee
	GG	7	7	49	28	11	Nee
	RLG	7	7	49	28	11	Nee
W _L	Fluctuatie	7	7	54	23	11	Nee
	RHG	7	7	58	19	11	Nee
	GG	7	7	53	24	11	Nee
	RLG	7	7	42	35	11	Nee
W _H	Fluctuatie	7	7	55	22	11	Nee
	RHG	7	7	56	21	11	Nee
	GG	7	7	49	28	11	Nee
	RLG	7	7	53	24	11	Nee

Tabel 34: Mann-Whitney U-test gemeente Hoogeveen klasse 2-3

Scenario		m	n	T	U	U-kritiek	Significant
G _L	Fluctuatie	7	10	66	32	17	Nee
	RHG	7	10	72	26	17	Nee
	GG	7	10	71	27	17	Nee
	RLG	7	10	68	30	17	Nee
G _H	Fluctuatie	7	10	75	23	17	Nee
	RHG	7	10	77	21	17	Nee
	GG	7	10	66	32	17	Nee
	RLG	7	10	83	15	17	Ja
W _L	Fluctuatie	7	10	65	33	17	Nee
	RHG	7	10	79	19	17	Nee
	GG	7	10	67	31	17	Nee
	RLG	7	10	78	20	17	Nee
W _H	Fluctuatie	7	10	84	14	17	Ja
	RHG	7	10	81	17	17	Ja
	GG	7	10	75	23	17	Nee
	RLG	7	10	78	20	17	Nee

Tabel 35: Mann Whitney U-test gemeente Hoogeveen klasse 3-4

Scenario		m	n	T	U	U-kritiek	Significant
G _L	Fluctuatie	10	8	88	47	20	Nee
	RHG	10	8	91	44	20	Nee
	GG	10	8	100	35	20	Nee

Scenario		m	n	T	U	U-kritiek	Significant
G _H	RLG	10	8	95	40	20	Nee
	Fluctuatie	10	8	97	38	20	Nee
	RHG	10	8	97	38	20	Nee
	GG	10	8	106	29	20	Nee
	RLG	10	8	98	37	20	Nee
W _L	Fluctuatie	10	8	86	49	20	Nee
	RHG	10	8	91	44	20	Nee
	GG	10	8	106	29	20	Nee
	RLG	10	8	87	48	20	Nee
W _H	Fluctuatie	10	8	100	35	20	Nee
	RHG	10	8	96	39	20	Nee
	GG	10	8	91	44	20	Nee
	RLG	10	8	99	36	20	Nee