



Meer met Bodemenergie Interferentie

Effecten van
bodemenergiesystemen op
hun omgeving - modellering
grootschalige inpassing in
stedelijke gebieden

Rapport 7 – Interferentie

Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving -
modellering grootschalige inpassing in stedelijke gebieden

Eindrapport

Colofon

Dit is een gezamenlijk rapport van Bioclear, Deltares, IF Technology en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie.

Opdrachtgever

SKB duurzame ontwikkeling ondergrond
Postbus 420
2800 AK GOUDA
T 0182 – 54 06 90
E info@skbodem.nl
Contactpersoon: Arno Peekel

Auteurs

Niels van Oostrom, Deltares
Mahmoud Bakr, Deltares

Datum

29 juni 2012

Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie

Maurice Henssen, Bioclear
Hans Gehrels, Deltares
Guido Bakema, IF Technology
Tim Grotenhuis, Wageningen Universiteit
Huub Rijnaarts, Wageningen Universiteit

Penvoerder

Marc Koenders, IF Technology

Secretariaat

Marion Hetterscheid, IF Technology

Website

www.meermetbodemenergie.nl

Copyright © cover Identim 2012

Copyright © MMB 2012

Delen uit dit rapport mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Meer met Bodemenergie (MMB), de titel van de publicatie en jaar van uitgave'.

Participanten

Agentschap NL / Bodem+
Arcadis
Brabant Water - Hydreco
Eneco
Essent
gemeente Almelo
gemeente Amersfoort
gemeente Apeldoorn
gemeente Den Bosch
gemeente Deventer
gemeente Haarlem
gemeente Hengelo
gemeente Tilburg
gemeente Utrecht
gemeente Zwolle
Havenbedrijf Rotterdam
NVOE
Productschap Tuinbouw
provincie Drenthe
provincie Flevoland
provincie Friesland
provincie Gelderland
provincie Groningen
provincie Limburg
provincie Noord-Brabant
provincie Noord-Holland
provincie Overijssel
provincie Utrecht
provincie Zeeland
provincie Zuid-Holland
SKB
Stichting Bodemsanering NS
Vewin
Vitens
Waterschap Groot Salland
Waterschap Regge en Dinkel

Samenvatting

Dit rapport behandelt het onderwerp interferentie bij open WKO-systemen. Verwacht wordt dat interferentie in drukke gebieden al optreedt of anders bij een (grote) groei van het aantal systemen zal optreden. Door beleidsmakers en beheerders van WKO-systemen wordt interferentie als onwenselijk gezien indien dat leidt tot een verminderd rendement van WKO-installaties zelf of tot vergroting van effecten op andere (kwetsbare) functies. Vanuit de huidige praktijk bij de vergunningverlening is met name de juridische vraag of de buurman het rendement verlaagt de belangrijkste vraag. Voor de vaststelling van interferentie wordt daarom vaak een vergelijking gemaakt tussen het (theoretische) functioneren van een enkele WKO-installatie en de situatie met meerdere WKO-installaties. In de praktijk hoeft het echter niet zo te zijn dat een systeem ook zelfstandig al het rendement haalt dat bij het ontwerp voorspeld is. Dan wordt het modelmatig lastig om op voorhand een juiste wederzijdse beïnvloeding te bepalen. Interferentie is dan namelijk niet de enige factor waardoor het (ondergrondse) rendement lager wordt.

Het onderzoek dat beschreven is in dit rapport verkent het optreden van interferentie in Den Haag, een gebied waarvan wordt verwacht dat door de grote hoeveelheid aan WKO-installaties al interferentie optreedt. Het onderzoek had twee doelstellingen:

- Evaluatie van de (theoretische) rendementen van de aanwezige WKO-installaties,
- Bepalen of er merkbare regionale effecten op kunnen treden als gevolg van cumulatieve van kleine effecten per systeem.

Voor het onderzoek zijn simulaties uitgevoerd om vast te stellen of interferentie optreedt en welke parameters bepalend zijn voor het optreden van interferentie in Den Haag centrum. In de simulaties zijn daartoe de temperatuur van het injectiewater, de debieten van de systemen en het aantal systemen gevarieerd. Op enkele (4) plaatsen blijkt negatieve interferentie op te treden, echter in grote lijnen (72 van de 76 bronnen) kan uit de simulaties geconcludeerd worden dat er geen grootschalige negatieve interferentie optreedt. Gezien het gegeven dat Den Haag centrum een van de drukste gebieden van Nederland is ten aanzien van WKO, is deze uitkomst een contra-indicatie voor het aanwezig zijn van grootschalige interferentie in Nederland. Klaarblijkelijk voldoen de huidige ontwerpregels nog om negatieve effecten op bestaande WKO-installaties te voorkomen. Het is bij de auteurs echter niet bekend in hoeverre initiatieven voor nieuwe WKO-installaties zijn gestrand door de aanwezigheid van een bestaand systeem en/of een andere ordening van de systemen middels een masterplan tot een grotere benutting van de ondergrondse capaciteit had kunnen leiden.

De bovenstaande conclusie is uiteraard gebaseerd op de aannames die bij de simulatie gemaakt zijn. De belangrijkste daarvoor zijn:

- Systemen hebben een volume- en energiebalans (wel zijn ook scenario's doorgerekend waarbij over een periode van 10 jaar weliswaar sprake is van een energiebalans, maar van jaar tot jaar verschillende maten van onbalans).
- Systemen verpompen niet (structureel) meer water dan de ontwerphoeveelheid
- Lokaal homogene ondergrond
- Er is gerekend met het ontwerpdebiet (gelijkgesteld aan $2/3^{\text{de}}$ van het vergunde debiet)

De ondergrondse rendementen per systeem zijn volgens de uitgevoerde scenarioberekeningen ruim voldoende (80-90%) in dit gebied, waarmee deze dichtheden aan systemen in combinatie met alleen ontwerpgerichte ordening geen probleem hoeven te zijn. De grootste verschillen in uitkomsten tussen de scenario's treden op bij het veranderen van de aannames ten aanzien van de injectietemperatuur of het debiet. De rendementen lijken zelfs heel licht toe te nemen naarmate er meer systemen in het gebied gesimuleerd worden (positieve interferentie).

De simulaties laten zien dat de systemen leiden tot een groter uitstralingsgebied dan de individuele invloedsszones waar de stijghoogten in het betreffende watervoerende pakket (enkele tot 10-tal centimeters) beïnvloed worden door een samenspel van de WKO's.

De vrij grote marge tussen de gemiddeld te verpompen waterhoeveelheden volgens het ontwerp en de maximaal te verpompen waterhoeveelheden volgens de vergunning leidt er toe dat hier, uitgezonderd enkele bronnen, geen negatieve interferentie aangetroffen is (in de simulaties), maar leidt ook tot mogelijk te groot ruimtebeslag. Dit kan daarmee de implementatie van toekomstige systemen onmogelijk of moeilijker maken. In het beleid zou hier rekening mee gehouden moeten worden en vereist het een uitspraak hoe om te gaan met deze marges (voorkomen negatieve interferentie versus meer mogelijkheden voor inpassing).

Focus op alleen interferentie zonder het stand-alone rendement van een systeem (of van enkele bronnen van een systeem) daarbij mee te nemen, kan leiden tot een juridisch verklaarbare aanpak (de buurman mag geen schade veroorzaken), maar hoeft niet te leiden tot een gebiedsgerichte optimalisatie in energiebesparing (hoe verhoudt interferentie zich tot mogelijke eigen inefficiënties?).

Ten aanzien van de ontwikkeling van een methodiek om interferentie in de praktijk beter te kunnen simuleren, worden de volgende aanbevelingen gedaan. Het bepalen van een debietreeks is een belangrijke stap die gezet moet worden om in situaties waarin het debiet achteraf of vooraf niet zeker vast te stellen is, te kunnen rekenen aan mogelijke toekomstige interferentie. Er is behoefte aan het goed bepalen van een definitie van ondergronds rendement en de invloed van de onttrekking- en injectietemperatuur op het behalen van een goede energiebesparing.

Effecten op de grondwaterkwaliteit als gevolg van de aanwezigheid van meerdere systemen in een gebied zijn niet onderzocht. Hierbij kan worden gedacht aan cumulatieve effecten op verzilting of het verspreiden van verontreinigingen. Meer informatie hierover staat in het MMB-rapport Gebiedsgericht Grondwaterbeheer.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	8
1.1 Doelstelling	8
1.2 Aanpak	9
1.3 Leeswijzer	10
2 Interferentie	11
2.1 Algemene Maatregel van Bestuur Bodemenergie	12
2.2 Verdere overwegingen	13
2.3 Masterplannen	14
3 Praktijkvoorbeeld: Den Haag centrum	17
3.1 Kans op interferentie	17
3.2 Casusbeschrijving	19
3.3 Uitgangspunten modelberekeningen	22
3.3.1 Temperatuur injectiewater	22
3.3.2 Debieten	22
3.3.3 Aantal systemen	23
3.3.4 Scenariokeuze	23
4 Resultaten van de scenarioberekeningen	26
4.1 Effecten op stijghoogte	26
4.2 Temperatuurverdeling in de ondergrond	31
4.3 Temperatuurverloop bij de bronnen	35
4.4 Berekeningen van het rendement	43
5 Conclusies	48
5.1 Aanbevelingen	50
5.1.1 Voor het beleid	50
5.1.2 Voor vervolgonderzoek	50
Literatuur	52
Bijlage I Overzicht van WKO-systemen in Den Haag	LIV
Bijlage II Modelaannames grondwatermodel	LVII
Bijlage III Fluctuaties bij sommen met variabel debiet	LXV
Bijlage IV Figuren temperatuurverdeling in de ondergrond	LXXI

1 Inleiding

Deze rapportage is geschreven in het kader van het project Meer met bodemenergie. In dit project werken 4 partijen (Deltares, IF Technology, Bioclear en Wageningen Universiteit) gezamenlijk aan onderzoek naar kansen voor en effecten van warmte- en koudeopslag in opdracht van een brede maatschappelijke groep van opdrachtgevers. Voor meer informatie over het project kunt u terecht op de website www.meermetbodemenergie.nl. Binnen dit onderzoeksproject wordt een serie aan rapporten uitgebracht over uiteenlopende aspecten van bodemenergie.

Dit rapport behandelt het onderwerp interferentie bij WKO-systemen¹. Verwacht wordt dat interferentie in drukke gebieden van Nederland al optreedt of anders bij een (grote) groei van het aantal systemen zal gaan optreden. Door beleidsmakers en beheerders van WKO-systemen wordt interferentie als onwenselijk gezien indien dat leidt tot een verminderd rendement van de WKO-installaties zelf of tot een vergroting van effecten op andere (kwetsbare) functies. In deze rapportage wordt ingegaan op effecten die mogelijk optreden als een grote dichtheid van open WKO-installaties in een gebied aanwezig is. Gefocust wordt op (afgeleide) effecten ten aanzien van de stijghoogte en thermische invloedszones.

1.1 Doelstelling

De doelstelling van dit rapport is om meer inzicht te krijgen in de onderlinge beïnvloeding van WKO's in gebieden met veel WKO's dicht bij elkaar. Dit inzicht kan dan bijdragen aan de beleidsmatige en/of modelmatige benadering van interferentie.

De centrale vraagstelling in dit rapport is in hoeverre interferentie tussen WKO's in drukbezette gebieden achteraf te bepalen is en tot welke verandering in rendement en omgevingseffecten dit kan leiden.

Om dit te bereiken worden in dit rapport de volgende twee hoofdactiviteiten uitgevoerd:

- het evalueren van de rendementen van WKO-installaties in een gebied waar een hoge dichtheid aan WKO-installaties bestaat.
- bepalen of er merkbare regionale effecten op kunnen treden als gevolg van cumulatie van kleine effecten die per systeem optreden.

¹ Hoewel in de praktische uitvoering vooral ingegaan wordt op open opslagsystemen, kan een vergelijkbare aanpak gevolgd worden bij andere ondergrondse energiesystemen.

De resultaten van dit onderzoek dragen daarmee bij aan een discussie over het voorkomen van (ongewenste) cumulatieve effecten door inzicht te verschaffen in de huidige praktijk waarbij geen masterplannen gebruikt zijn. De doelstelling van het rapport is daarmee niet om een universeel oordeel te geven over de huidige vergunningverlening, maar wel om handvatten te bieden bij de gebiedsgerichte beoordeling van het risico op interferentie.

In dit rapport zal daarom ook niet specifiek ingegaan worden op vormgeving, nut en inbedding van masterplannen. In andere rapportages zoals de Handreiking masterplannen en studies naar de optimale inrichting van gebieden met WKO's wordt hier namelijk al veel over gezegd. Wel zal deze studie vanuit de evaluatie van de uitkomsten van de modelbenadering enkele conclusies geven die raken aan de meerwaarde van masterplannen.

1.2 Aanpak

Om antwoord te kunnen geven op de centrale onderzoeksvraag zijn de onderstaande stappen doorlopen. Hiermee wordt een theoretische beschouwing gegeven die zoveel mogelijk aansluit bij de praktijk.

- Selectie van een gebied met een grote kans op interferentie (hoge dichtheid van WKO-bronnen) en de beschikbaarheid van een grondwatermodel. In dit rapport is onderbouwd gekozen voor het gebied Den Haag Centrum. Van dit gebied zijn zoveel mogelijk gegevens verzameld omtrent de ligging van de bronnen en vergunde debieten.
- Vaststellen van een realistische reeks aan invoergegevens voor debieten en infiltratietemperaturen zonder informatie over werkelijke debieten van alle systemen te hebben
- Aanpassen van bestaande modelcode om fluctuerende infiltratietemperaturen te kunnen doorrekenen die afhankelijk zijn van de onttrekkingstemperatuur
- Ontwikkelen modelscenario's waarbij debiet of temperatuur variëren.
- Bepaling effecten en rendementen afhankelijk van veranderingen in modelparameters.

Bij het evalueren van de bestaande situatie bij WKO's ontstaat veel databehoeft die niet eenvoudig verkregen kan worden. Om die reden worden er in dit rapport enkele variabelen (zoals fluctuaties in debieten en infiltratietemperatuur) in scenario's doorgerekend om te bepalen wat de invloed van deze variabelen op het risico van interferentie is. De aanpak is daarmee gestoeld op de gedachte om zoveel mogelijk aan te sluiten bij de reële situatie van de casus (Den Haag Centrumgebied), terwijl daarbij tevens keuzes gemaakt moeten worden voor parameters die niet eenvoudig in de praktijk achterhaald of bepaald kunnen worden. Bij de conclusies wordt dus niet alleen stilgestaan bij de resultaten voor de casus, maar ook bij de gevolgen van het veranderen van modelparameters.

In het gebied Den Haag centrum zijn alleen gegevens bekend van open doubletsystemen. Om die reden zal dit rapport met name ingaan op dit type WKO.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is ingegaan op het begrip interferentie en hoe dit in het beleid (AMvB Bodemenergie) verwoord wordt. In hoofdstuk 3 wordt de selectie van het gebied Den Haag centrum onderbouwd en besproken welke scenario's doorgerekend zijn. In hoofdstuk 4 staan de resultaten van de berekeningen van het proefgebied. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de voor het beleid generieke conclusies die uit de doorlopen stappen getrokken kunnen worden.

2 Interferentie

Interferentie is in de meest brede zin van het woord het samenkomen van effecten vanuit verschillende bronnen (oorzaken) die daarmee elkaar versterken of afzwakken. In het kader van bodemenergie wordt het woord interferentie gebruikt als het fenomeen waarbij twee of meer WKO-installaties dermate dichtbij elkaar staan of komen dat hun beïnvloedingsgebied begint te overlappen.

De fysieke beïnvloeding tussen 2 of meer systemen in een gebied kan op meerdere manieren tot uiting komen:

- De thermische zones van twee of meer systemen leiden tot het ontstaan van een grote gedeelde thermische zone (warm met warm of koud met koud), hetgeen kan leiden tot een effectievere benutting van opgeslagen energie (hogere rendementen).
- Twee tegenovergestelde thermische zones van twee systemen (koud en warm) beïnvloeden elkaar, hetgeen leidt tot verminderde rendementen omdat de temperatuur van het opgepompte grondwater dicht bij de natuurlijke achtergrondtemperatuur komt te liggen en de toegevoegde energie (warmte en koude) geneutraliseerd wordt.
- De stijghoogteveranderingen van twee systemen overlappen elkaar waardoor de thermische zones er anders uit komen te zien, doordat de stromingssnelheid en -richting van het water verandert.
- De stijghoogteveranderingen van twee systemen versterken elkaar, waardoor er cumulatieve effecten op kunnen treden die mogelijk kunnen leiden tot grotere effecten dan per systeem individueel voorzien was.

Interferentie wordt positief gewaardeerd als het (gezamenlijk) rendement van de systemen toeneemt of als (bestaande), negatieve grondwatereffecten aan het maaiveld afnemen. Interferentie wordt negatief gewaardeerd als rendementen van de systemen afnemen of negatieve grondwatereffecten juist vergroot worden. In de huidige praktijk heeft interferentie een negatieve connotatie door de nadruk op aantasting van rendementen en omdat de aanwezigheid van een bestaand systeem de mogelijkheid voor een ander toekomstig systeem blokkeert of vermindert. Interferentie is overigens niet alleen iets dat speelt tussen WKO-systemen onderling, maar kan ook betrekking hebben op andere (grondwater)functies die in een gebied aanwezig zijn.

2.1 Algemene Maatregel van Bestuur Bodemenergie

Het voorkomen van interferentie is een doel van de AMvB en in de toelichting en de tekst van de AMvB Bodemenergie wordt interferentie dan ook vaak genoemd. In onderstaande cursieve tekst is de letterlijke tekst van de AMvB weergegeven.

“[Een doel van de AMvB is:] voorkomen van interferentie tussen bodemenergiesystemen buiten interferentiegebieden (beoogd resultaat: voorkomen dat door interferentie tussen bodemenergiesystemen conflicten tussen burens ontstaan en het energierendement van investeringen wordt geschaad)”

Het blokkeren of verminderen van de mogelijkheden van een in de toekomst mogelijk gewenst nieuw systeem wordt ook als knelpunt in de AMvB signaleerd omdat dit het totale te leveren energierendement van de bodem in een gebied beperkt:

“Bovendien kan een klein gesloten bodemenergiesysteem de toepassing van andere bodemenergiesystemen verhinderen doordat het als eerste geïnstalleerde systeem beschermd is tegen interferentie door latere systemen en die systemen dan niet geïnstalleerd kunnen worden. Het aldus op slot zetten van een gebied voor de toepassing van bodemenergie leidt tot inefficiënt gebruik van de ook in de ondergrond steeds schaarser en kostbaarder wordende ruimte. Indien sprake is van interferentie tussen bodemenergiesystemen zijn de energierendementen voor de initiatiefnemers namelijk suboptimaal.”

In de AMvB is in het kader van het rendement van een enkel bodemenergiesysteem ook aandacht voor interferentie tussen de eigen warme en koude bronnen, aangezien dit een verlaagd rendement oplevert. Dit is ongewenst vanuit het perspectief dat er dan meer grondwater verpompt moet worden voor dezelfde hoeveelheid energieretragwinning uit de ondergrond in vergelijking met een goed functionerend systeem. Dit wordt ondoelmatig genoemd.

“De warmte- en koudebron van een bodemenergiesysteem moeten goed gescheiden blijven, omdat de werking van een bodemenergiesysteem wordt verstoord indien tussen de bronnen uitwisseling van koude en warmte plaatsvindt. Dit wordt negatieve (ongewenste) interferentie genoemd. Hierdoor neemt de rentabiliteit van de (aanzienlijke) investering in het bodemenergiesysteem af. Er is dan geen sprake van een doelmatig gebruik van bodemenergie. Interferentie kan ook optreden tussen bodemenergiesystemen die in naburige percelen zijn geïnstalleerd omdat interferentie zich uiteraard niet stoort aan administratieve grenzen.”

Maar het gaat niet alleen om de functie energiebesparing als er over ondoelmatigheid gesproken wordt.

“Er is geen sprake van een doelmatig gebruik van de eindige hoeveelheid bodemenergie indien deze wordt gebruikt voor systemen met een laag energierendement of bij interferentie tussen bodemenergiesystemen. Toepassing van dergelijke systemen is ongewenst vanuit een oogpunt van bodembescherming omdat hierdoor onnodige gevolgen en risico's optreden.”

“Uit de geschiedenis van de totstandkoming van de Waterwet blijkt nog dat toepassing van grondwater ten behoeve van een open bodemenergiesysteem één van de maatschappelijke functies van grondwater is. Daarnaast gebruiken² open bodemenergiesystemen grote hoeveelheden grondwater. Er is een grote vraag naar grondwater, zodat doelmatig gebruik van de totale hoeveelheid grondwater steeds belangrijker wordt. Bodemenergiesystemen met een hoog energierendement kunnen deze maatschappelijke functie beter vervullen.”

Interferentie is nadrukkelijk niet alleen een zaak voor de overheid (eerlijk verdelen van de middelen in de ondergrond). Het zijn vooral de eigenaren/beheerders van WKO-systemen die belang hebben om negatieve interferentie te voorkomen, omdat dit kan leiden tot (te) lage energetische en financiële rendementen op hun systeem.

“Het is uiteraard in de eerste plaats in het belang van degene die het systeem wil installeren om rekening te houden met alle bodemenergiesystemen die al aanwezig zijn, omdat hiermee een aanzienlijke investering is gemoeid, die dan niet het verwachte rendement oplevert.”

Bij het definiëren en beleidsmatig omgaan met interferentie blijken uit bovenstaande passages/opmerkingen enkele gemeenschappelijke noties te bestaan:

- Het is een verstoring van de werking van een nabij gelegen systeem of het eigen te ontwikkelen systeem.
- De verstoring (negatieve interferentie) moet leiden tot een lager rendement (of rentabiliteit) dan het systeem had voordat het tweede systeem geïnstalleerd werd.
- Als een systeembeheerder een uitbreiding van de vergunning aanvraagt, wordt zijn systeem beschouwd als een nieuw systeem en mag deze dus geen negatieve interferentie opleveren bij andere systemen in de omgeving. Oudere systemen hebben dus niet meer rechten op uitbreiding dan nieuwe systemen. Dit kan consequenties hebben voor systemen waarbij een verwachting is dat deze mee zullen groeien met het gebouw of een wijk in de toekomst.
- Het doelmatig gebruik van de ondergrond mag niet aangetast worden.
- Het vermengen of verkleinen van de thermische zones is het primaire versturende effect.

2.2 Verdere overwegingen

Interferentie wordt veelal als negatief gezien, maar in sommige gevallen kan het positief gewaardeerd worden. De positieve effecten zijn bij de huidige praktijk van vergunningverlening echter vaak hooguit een soort meevaller waar slechts sporadisch doelgericht op gestuurd wordt.

² De term “gebruiken” wil bij WKO’s echter niet zeggen dat dit water definitief aan het grondwatersysteem onttrokken wordt. Het water wordt immers na verwarming/koeling weer teruggebracht in de bodem. Wel leggen WKO-systemen een claim op het ondergronds ruimtegebruik omdat hun thermische zones beschermd moeten worden tegen mogelijk nadelig ander gebruik van de ondergrond.

Interferentie is niet alleen van belang voor bestaande functies, maar ook voor toekomstige (nog onbekende) functies. Bij toekomstige interferentie telt niet alleen het eigen bestaande invloedsgebied een rol, maar ook die van een toekomstige functie. Die laatste is niet op voorhand in te schatten, tenzij er al voornemens voor die toekomstige functie bekend zijn. De blokkerende werking van een bestaand systeem jegens een toekomstig systeem kan dus verder reiken dan alleen het eigen invloedsgebied.

Bij de beoordeling van (mogelijke) interferentie wordt een vergelijking gemaakt tussen het stand-alone functioneren van een WKO-systeem en de situatie met meerdere WKO-systemen. In de praktijk is het mogelijk dat een stand-alone systeem niet het rendement haalt dat bij het ontwerp voorspeld is. In die gevallen is het lastig om op voorhand te bepalen in hoeverre een wederzijdse beïnvloeding verantwoordelijk is voor het lagere rendement. Interferentie is dan namelijk niet de enige factor. Eisen dat een (geringe) aantasting van het rendement van de buurman tegengegaan moet worden terwijl het rendement van het betreffende systeem eigenlijk al laag is, is dan mogelijk niet de juiste oplossing voor het verbeteren van het rendement. Vanuit de huidige praktijk bij de vergunningverlening is echter met name de juridische vraag of de buurman het rendement verlaagt de belangrijkste vraag. Bij ordening van de ondergrond krijgt bovenstaande overweging een belangrijkere rol.

2.3 Masterplannen

Masterplannen zijn vrijwillige planfiguren waarmee de overheid, eventueel in samenwerking met de ontwikkelende partijen, het ondergronds ruimtegebruik vooraf wil afstemmen. Doel hiervan is om zo optimaal mogelijk de ondergrondse ruimte te benutten en tegelijkertijd de bodem zelf en de bodemgebruiksfuncties te beschermen. In het beleid wordt gestreefd naar een zo doelmatig mogelijk gebruik van de ondergrond.

Het definiëren van doelmatig gebruik van de ondergrond is echter niet eenvoudig. Ten aanzien van het doelmatig gebruik van de ondergrond kan bijvoorbeeld de vraag gesteld worden of er gewerkt zou moeten worden met een optimalisatie op het aantal Joules per m^3 opgepompt grondwater of op het aantal Joules dat per m^2 in de ondergrond gerealiseerd wordt.

De fysieke effecten hangen samen met de verpompte hoeveelheid water (en in zekere mate ook de temperatuur), maar de potentie van de ondergrond voor het leveren van energiebesparing is relevanter te beschouwen per vierkante meter. Bij de lay-out van de bronnen wordt dit spanningsveld zichtbaar. Door de bronnen relatief ver uit elkaar te plaatsen om (eigen) interferentie tegen te gaan kan het aantal Joules per m^3 opgepompt water worden geoptimaliseerd maar wordt eveneens een groter oppervlakte gebruikt. Dichter bij elkaar plaatsen levert misschien (iets) grotere verliezen op, maar levert bij benutting van de ruimte door andere systemen wel een grotere energieopbrengst per m^2 totale ruimte.

Een masterplan kan een bijdrage leveren aan het vergroten van de doelmatigheid van het gebruik van de ondergrond. Door het aanwijzen van koude en warme zones kan positieve interferentie gestimuleerd worden. Ook kan de grootte van systemen afgestemd worden op de bovengrondse grootte van percelen, waardoor minder leidingen in openbaar terrein nodig zijn. De afstand tussen de bronnen kan ook optimaler afgestemd worden door samenhangend rekening te houden met:

- Bronafstand en kans op (eigen) interferentie.
- Leidingafstand tussen bronnen en afnemers.
- Maximalisatie van de winbare hoeveelheid koude en warmte uit de ondergrond.
- Ordelijke inpassing energiefunctie en andere ondergrondse doelen en functies.

Het vaststellen van een masterplan met vooraf bepaalde thermische zones kan echter ook leiden tot minder geneigdheid om een WKO-systeem aan te leggen voor de eerste gebruikers. Zij zouden dan namelijk mogelijk hun bronnen verder van het eigen perceel moeten plaatsen om in de gereserveerde thermische zones terecht te komen dan wanneer zij alleen rekening hoeven te houden met hun eigen systeem of een enkel buursysteem.

Om de bovenstaande voordelen te bereiken is tijdens het opstellen van het masterplan aandacht voor het integraal bekijken van de effecten en randvoorwaarden van de functies. Door deze gelijktijdige aandacht voor alle mogelijke functies is het mogelijk om de cumulatie van kleine(re) effecten van individuele activiteiten goed in beeld te brengen en af te wegen. Dit is een belangrijk voordeel ten opzichte van de gangbare vergunningsverleningspraktijk waarin steeds weer een nieuwe activiteit afgezet wordt tegenover de situatie vlak voor deze nieuwe activiteit. Mogelijke stapeling van effecten die uiteindelijk mogelijk tot suboptimale situaties leiden, worden hiermee voorkomen.

Masterplannen hoeven zich – en zullen zich daarom ook vaak - niet te beperken tot alleen het thema energie. Ook thema's als waterwinning, bemalingen, saneringen, archeologie, tunnels en andere ondergrondse bouwwerken kunnen geïntegreerd worden in de masterplannen.

De voordelen van masterplannen zijn het duidelijkst in die gebieden waar de beschikbare ruimte in de ondergrond of bovengrond relatief beperkt is ten opzichte van de behoefte aan ondergronds ruimtegebruik. Dit ondergronds ruimtegebruik kan bestaan uit bijvoorbeeld de thermische zones nabij de bronnen, maar ook de ondergrondse leidingnetwerken naar gebouwen en bronnen. Het zullen dus vooral de dichtgebouwde gebieden, eventueel in combinatie met een beperkte ondergrondse capaciteit tot leveren van energieopslag. De ondergrondse capaciteit hangt van de geohydrologie maar ook van andere functies af (zie de thema's in de vorige alinea).

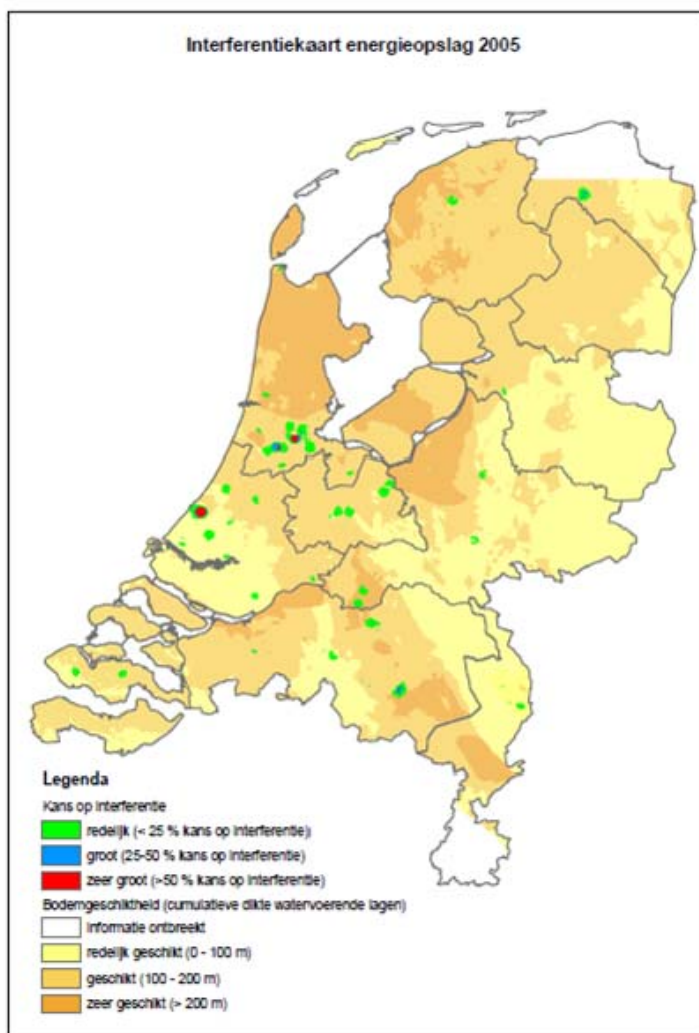
In een masterplan kan ook een afweging gemaakt worden tussen individuele belangen en de algemene belangen. Zo kan er gericht gewerkt worden met toewijzing van ondergrondse gebieden voor koude of warme zones. Als het over het geheel genomen (gebiedsgericht) voordelig is om bij enkele systemen iets minder rendement of langere leidingen te accepteren (door negatieve of eigen interferentie), zou dat in het masterplan vastgelegd kunnen worden. Het werken met deze toewijzingsgebieden voor zones en bronnen kan voor het gehele gebied een toename in de robuustheid van het functioneren van de systemen op langere termijn betekenen.

Omdat de huidige praktijk (nog) gebaseerd is op de vergunningverlening, zal in deze rapportage een casus genomen worden waarin de situatie zonder masterplan centraal staat. Bij de vergunningverlening voor WKO's ligt het zwaartepunt op het voorkomen van negatieve interferentie tussen het nieuwe en andere bestaande systemen en ondergrondse functies. De berekeningen verderop in deze rapportage zullen zich primair toespitsen op de vraag of er in de huidige situatie sprake is van negatieve interferentie.

3 Praktijkvoorbeeld: Den Haag centrum

3.1 Kans op interferentie

Gezien de voorgaande discussie omtrent het theoretische voorkomen van interferentie, is de behoefte opgekomen om een realistische casus te bekijken. In eerdere studies is vaak gewerkt aan een optimale inrichting van drukke gebieden in termen van een goede planning. Daarmee blijft de vraag of er in bestaande, niet vooraf geordende, situaties interferentie optreedt. In de studie Interferentie Ondergrondse Energieopslag [IF Technology, 2006] is een kaart van Nederland gemaakt waarin de kans op interferentie ruimtelijk zichtbaar gemaakt is. De onderstaande kaart geeft op basis van de dikten van de bruikbare aquifers en de dichtheid van het aantal gerealiseerde systemen een onderling vergelijkbare kans dat er in een bepaald gebied interferentie kan optreden. Deze analyse heeft geen rekening gehouden met de exacte afstanden tussen de bronnen, maar is bedoeld om een indicatie te geven van de “drukke” in de ondergrond. De genoemde kansen zijn gebaseerd op expert-inschatting.



figuur 3.1 Kans op interferentie (situatie 2005) ingeschat op basis van de dikte van de aquifers en de dichtheid van het aantal WKO-systemen [bron: IF Technology, 2006]

Uit figuur 3.1 blijkt dat het centrum van Den Haag 1 van de 3 gebieden met de grootste kans op interferentie is in 2005. Van dit gebied is het Modflow grondwatermodel beschikbaar dat gebruikt is om de effecten van mogelijke stopzetting van de DSM-winning te bepalen (verdere details staan in bijlage B en het achtergrondrapport van het model (Meer Met Bodemenergie rapport 3 en 4, Effecten op de ondergrond)). De thermische processen zijn berekend met het programma MT3D. Een beschrijving van de meegenomen thermische processen in dit model is eveneens opgenomen in bijlage B.

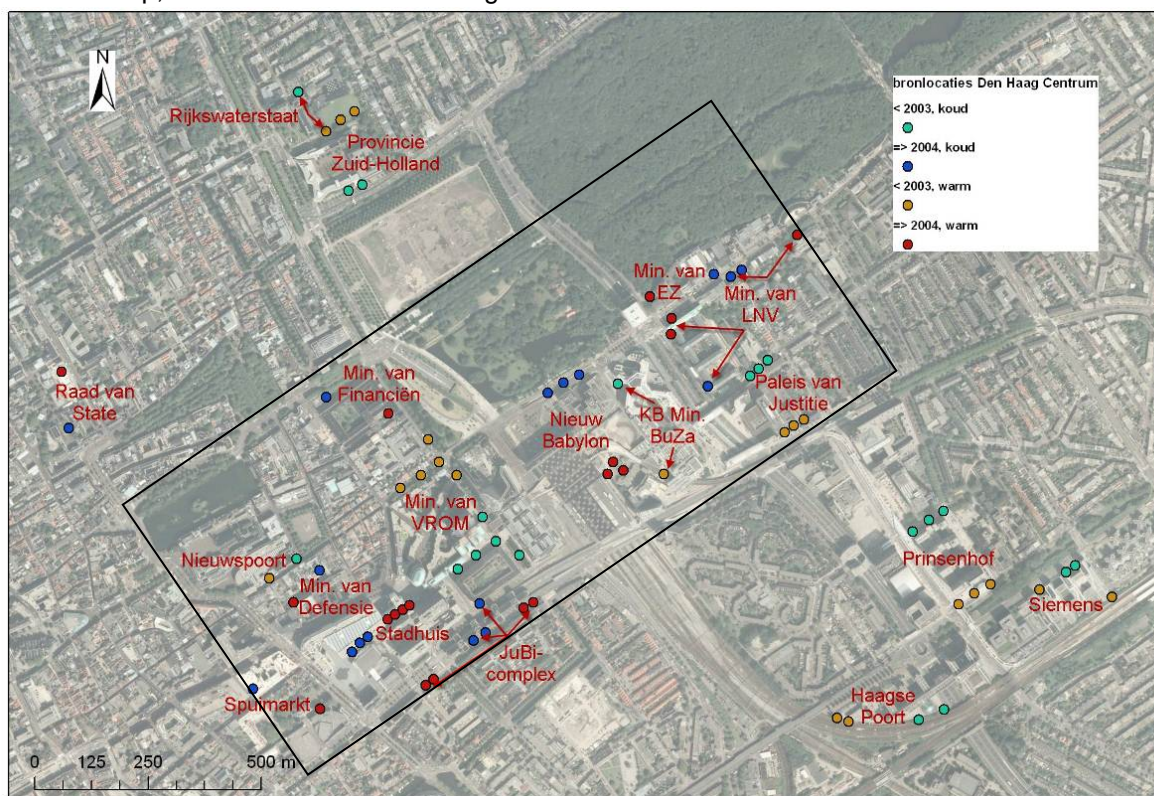
In dit model is regionale heterogeniteit (bekend vanuit de boringen en geologisch topmodel) in de geohydrologische opbouw meegenomen, maar mogelijke lokale heterogeniteit (in ieder geval kleiner dan 25x25 meter) binnen de invloedszones van bronnen is hierin niet opgenomen.

De uitkomsten van de modellering dienen dan ook geïnterpreteerd worden als zijnde dat er gerekend is met een homogene ondergrond op de schaal van de individuele systemen.

Er is dus gezocht naar een gebied waar een grote kans op interferentie bestaat en waarvan een goed grondwatermodel beschikbaar is. Om deze redenen is besloten de casus Den Haag te modelleren om te bekijken hoeveel interferentie er in de praktijk optreedt in een scenario waarin er geen planning vooraf gemaakt is. Hoewel geen sprake is van een overkoepelend (master)plan, is er wel sprake van het ontwerpen van de systemen waarbij rekening gehouden wordt met dan al bestaande systemen.

3.2 Casusbeschrijving

In onderstaande figuur staan de vergunde systemen in het eerste watervoerende pakket (WVP1) weergegeven. De systemen vanaf 2008 worden door de provincie Zuid-Holland alleen nog in het tweede/derde watervoerende pakket toegestaan. Aangezien deze systemen geen invloed hebben op de bestaande systemen in WVP1, zijn deze buiten beschouwing gelaten. Het eerste watervoerend pakket in Den Haag zit op ongeveer 18 tot 60 meter diep, dus heeft een dikte van ongeveer 40 meter.



figuur 3.2

Locatie van de bronnen van de vergunde WKO-systemen in het eerste watervoerende pakket. De groen/gele bronnen zijn vóór of in 2003 vergund, de blauw/rode bronnen zijn vanaf 2004 (t/m 2007) vergund. De rechthoek is arbitrair gekozen rondom het gebied met de hoogste dichtheid aan bronnen

In totaal zijn er 19 systemen in WVP1 vergund met 76 bronnen. Bovenstaande kaart is een gebied van ca. 4,5 km², waarmee de dichtheid op 17 bronnen/km² komt. In de recht-hoek in het centrum komt de dichtheid zelfs op 48 bronnen/km²³.

In onderstaand figuur staat in klassen weergegeven hoeveel grondwater deze bronnen per seizoen oppompen of infiltreren. Van de meeste systemen is alleen bekend hoeveel zij volgens de vergunning mogen oppompen en infiltreren. Vaak is het vergunningdebiet een factor 1,5 keer zo groot als het gemiddelde (ontwerp)debiet. In deze studie is gerekend met tweederde van het vergunningdebiet en dit is ook weergegeven in onderstaande figuur.

Bij voorkeur zou er voor deze studie gerekend worden met de werkelijke verpompte hoeveelheden water om een zo goed mogelijk inzicht te krijgen in de huidige mate van interferentie. Echter, het nagaan van de werkelijke hoeveelheden bij 19 systemen kost veel tijd en het is onzeker of daaruit voldoende lange reeksen van hoeveelheden verpompt water verkregen kan worden (sommige systemen zijn vrij recentelijk aangelegd). Om toch zoveel mogelijk aan te sluiten bij de verwachtingswaarde van de verpompte hoeveelheden water is gerekend met het ontwerpdebiet.

³ *Het vermelden van deze dichtheden is uiteraard arbitrair, want hoe verder er ingezoomd wordt, hoe groter de dichtheid van de bronnen per km² zal worden. Bovendien zegt het aantal bronnen niets over hoeveel water er dan per km² verpompt wordt (het ene systeem is aanmerkelijk groter dan het andere). De reden om dit toch te doen, is om dit in de toekomst met andere gebieden te kunnen vergelijken, waar deze informatie ook eventueel genoemd wordt.*



figuur 3.3 Gemiddeld debiet per seizoen per bron in klassen (<50.000, 50.000-100.000, 100.000-150.000, >150.000 m³/seizoen)

Deze systemen hebben gezamenlijk een vergund debiet van 12,5 miljoen m³/jaar. In deze rapportage wordt om bovenstaande redenen gerekend met 4,2 miljoen m³/seizoen. Het volledige overzicht van de systemen en debieten staat vermeld in bijlage A. Gegeven het gebied van 4,5 km² betekent dit dat gemiddeld een waterschijf van ongeveer 1 meter. Gegeven een porositeit van 0,3 betekent dit dat “ongeveer 3 meter aquifer benut wordt als het gebruikte water allemaal netjes uitgespreid zou worden”. Gegeven een dikte van het watervoerend pakket van 40 meter, wordt ongeveer 8% van het watervoerende pakket direct benut. Ter vergelijking: de grote onttrekking bij DSM bedraagt rond de 12 miljoen m³/jaar (maar die infiltreert niet). De neerslag in Nederland bedraagt rond de 0,8 meter per jaar.

3.3 Uitgangspunten modelberekeningen

Om de effecten van de aanwezige WKO-systemen op de stijghoogte(verandering) en de temperatuurverdeling van de ondergrond te kunnen berekenen zijn per systeem gegevens met betrekking tot de temperatuur van het injectiewater en het pompdebiet nodig. Aangezien meetgegevens niet beschikbaar zijn bij de projectgroep, is gekozen om deze te schatten. Om inzichtelijk te maken in hoeverre deze gegevens van invloed zijn op het ontstaan van interferentie in het studiegebied, worden de injectietemperaturen en debieten gevarieerd in een zestal scenario's. In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de methode van schatten en de gekozen scenario's.

3.3.1 Temperatuur injectiewater

In de standaard situatie wordt gerekend met een vaste injectietemperatuur van 13 graden voor warm water en 7 graden voor koud water. De natuurlijke achtergrondtemperatuur wordt hier verondersteld 10 graden⁴ te zijn.

Als alternatief is de injectietemperatuur afhankelijk gemaakt van de temperatuur van het onttrokken water in de andere bron van het systeem. Aangenomen is dat in de zomer de temperatuur van het te infiltreren water in de warme bron 6 graden⁵ hoger is dan de temperatuur van het water dat onttrokken is aan de koude bron. Andersom in de winter wordt aangenomen dat de temperatuur 6 graden verlaagd wordt.

De realiteit zal zijn dat het injectiewater een temperatuur heeft dat ergens tussen de twee scenario's (variabele of vaste temperatuur) in zal liggen. De injectietemperatuur is immers een resultante van de onttrekkingstemperatuur en de afstellingen in het klimaatbeheersingssysteem die veelal ook gericht zijn op het bereiken van een gewenste injectietemperatuur.

3.3.2 Debieten

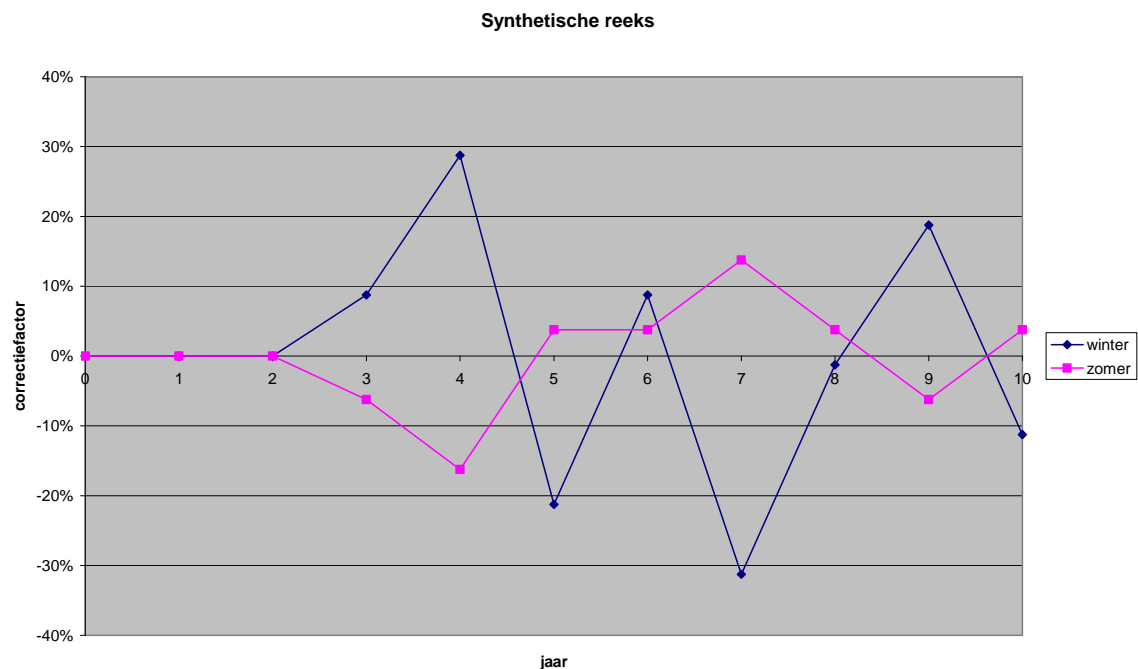
In paragraaf 3.2. is uitgelegd hoe de vergunningsdebieten omgerekend zijn naar gemiddelde ontwerpdebieten per seizoen. De debieten per dag zijn verondersteld constant ($1/182^{\text{ste}}$ van het seizoensdebiet) te zijn gedurende een seizoen.

Om een indruk te krijgen van het mogelijke effect van fluctuaties van de debieten per seizoen als gevolg van bijvoorbeeld een warme winter of bovengemiddeld warme zomer, is er ook gerekend met aangepaste debieten per seizoen. Hiervoor is een synthetische reeks opgesteld (voor details en totstandkoming, zie bijlage C). In de onderstaande grafiek staan de afwijkingen ten opzichte van het ontwerpdebiet per seizoen weergegeven.

⁴ Uit metingen blijkt overigens de achtergrondtemperatuur rond de 12-13 graden te zijn in het eerste watervoerend pakket. Voor het berekenen van de ondergrondse temperatuureffecten heeft dit geen consequenties (het verschil tussen warm en koud blijft hetzelfde, alleen op een ander temperatuurniveau). Voor het nuttig toepassen van het water (bovengronds rendement) kan dit wel verschil maken.

⁵ In de werkelijkheid fluctueert het temperatuurverschil over de bronnen van enkele graden tot meer dan 10 graden.

Voor de reeks geldt dat na 10 jaar er weer evenveel water van koud naar warm en omgekeerd is gepompt. In de combinatieberekening met een variërend debiet wordt deze reeks op alle systemen toegepast.



figuur 3.4 Verloop van de afwijkingen in de seizoensdebieten ten opzichte van het ontwerpdebiet zoals die in de berekeningen met variabel debiet gehanteerd zijn

3.3.3 Aantal systemen

De berekeningen worden standaard uitgevoerd met alle WKO-systemen in het eerste watervoerende pakket. Om te kunnen beoordelen wat het effect is van toenemende drukte in de ondergrond, zijn er ook berekeningen gemaakt met alleen de systemen die gerealiseerd/aangevraagd zijn tot en met 2003. Dit zijn 10 systemen (van de 19). Deze 10 systemen verpompen 3,9 miljoen m³ per jaar. Alle 19 systemen verpompen 8,3 miljoen m³ per jaar.

3.3.4 Scenariokeuze

Om de effecten van interferentie inzichtelijk te maken, is gebruik gemaakt van een 6-tal scenario's. De scenario's verschillen onderling ten aanzien van het aantal systemen, de aannames ten aanzien van de injectietemperatuur en het debiet. De volgende combinatieberekeningen (scenario's) zijn uitgevoerd:

tabel 3.1 Overzicht van berekende scenario's

Scenario	Aantal systemen	Injectietemperatuur	Debiet
1	Alle	13 en 7 graden	Constant
2	Alle	+6 / -6 graden	Constant
3	Alle	13 en 7 graden	Fluctuerend
4	t/m 2003	13 en 7 graden	Constant
5	t/m 2003	+6 / -6 graden	Constant
G	Alle	13 en 7 graden	Constant, maar bij de helft van de systemen sterk verhoogd en bij de andere helft sterk verlaagd

Voor de vergelijking van de stijghoogte-effecten tussen de situatie met alleen de systemen voor 2003 en alle systemen, maakt de wijze van berekenen van de temperatuur niet uit. De stijghoogte-effecten worden bepaald ten opzichte van de situatie zonder WKO-systemen. De stijghoogte-effecten uit scenario's 1 en 4 zullen bij de bespreking van de resultaten getoond worden. De verschillen tussen deze plaatjes zijn toe te wijzen aan de nieuwere systemen (na 2003).

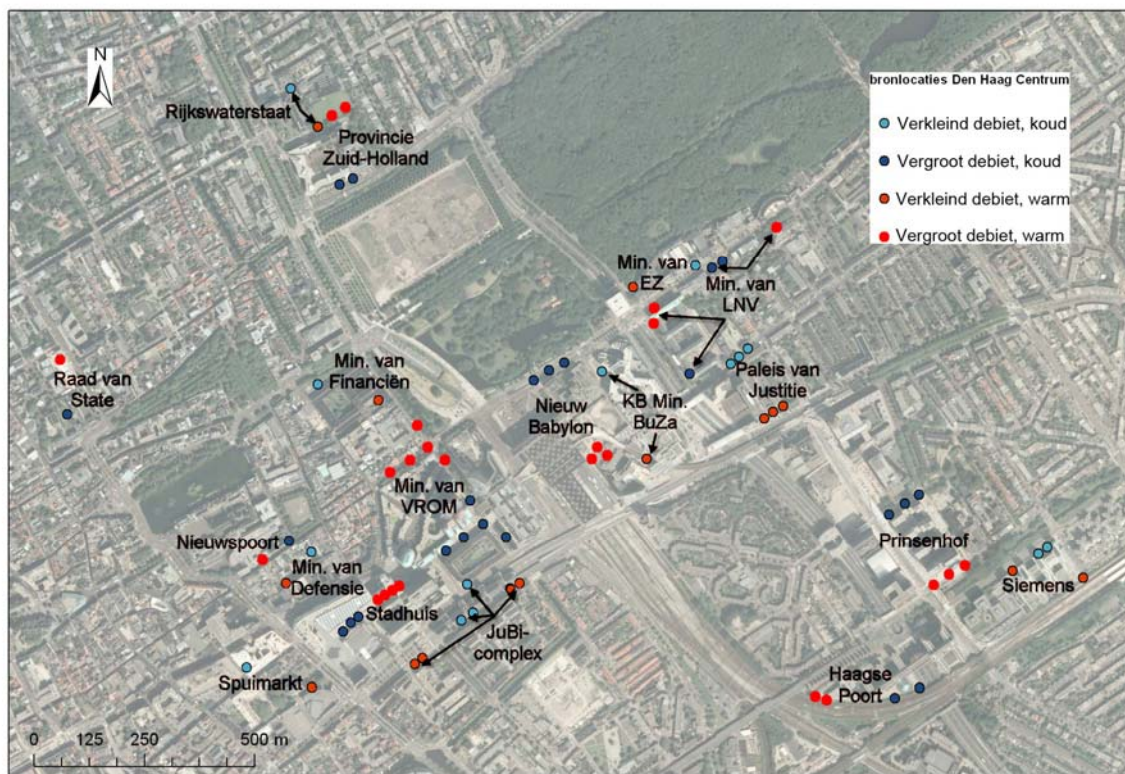
Het scenario G is toegevoegd om te bepalen wat er gebeurt als de helft van de systemen anderhalf keer het ontwerpdebiet (=de volle vergunningshoeveelheid) zou benutten en andere systemen juist minder verpompen (20% van het vergunningsdebiet = 30% van het ontwerpdebiet). Dit scenario zal voor de eenvoud verderop in dit rapport de gevoeligheidsanalyse genoemd worden.

In tabel 3.2 staat weergegeven welke informatie wordt verkregen door de vergelijking tussen 2 scenario's.

tabel 3.2 Vergelijkbaarheid van de uitkomsten van de scenario's voor de thermische aspecten

Scenario's	
1 en 2	Invloed van de injectietemperatuur op het rendement
1 en 3	Invloed van fluctuerend debiet op het rendement
1 en 4 (2 en 5)	Invloed van de toevoeging van 9 nieuwere systemen op het rendement en de stijghoogtepatronen
1 en G	Gevoeligheidsanalyse wat er gebeurt als een deel van de systemen juist meer (+50%) of minder (-70%) verpompen

Om een beeld te krijgen van de gevoeligheid voor de aanname van het gebruik van de ontwerpgegevens is de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met extremere debieten (zowel naar boven als naar beneden). Omdat ook de hypothese opgeworpen is dat lagere debieten ook de rendementen van andere systemen negatief zouden kunnen beïnvloeden, is bij de bepaling welke systemen in het model meer of juist minder zullen gaan verpompen, gezocht naar een verdeling waarbij vergrote en verkleinde systemen elkaar afwisselen. Dit heeft geresulteerd in onderstaande keuze voor vergroting of verkleining (figuur 3.5). Overigens wil dit niet zeggen dat de vergrote systemen ook daadwerkelijk groter in omvang zijn dan de andere systemen (de ontwerpdebieten van de systemen verschillen onderling zeer sterk).



figuur 3.5 Selectie van de systemen die in de gevoeligheidsanalyse (scenario G) vergroot of verkleind zijn

4 Resultaten van de scenarioberekeningen

In dit hoofdstuk zullen eerst de effecten op de stijghoogte van de systemen tot 2003 en van alle systemen getoond worden ten opzichte van de situatie zonder WKO-systemen (paragraaf 4.1). In paragraaf 4.2 zullen de temperatuurzones getoond worden. In paragraaf 4.3 zal het temperatuurverloop bij de bronnen onder verschillende scenario's geanalyseerd worden. In paragraaf 4.4 zullen de verschillen in het rendement van de systemen en de (modelmatige) oorzaken daarvan besproken worden.

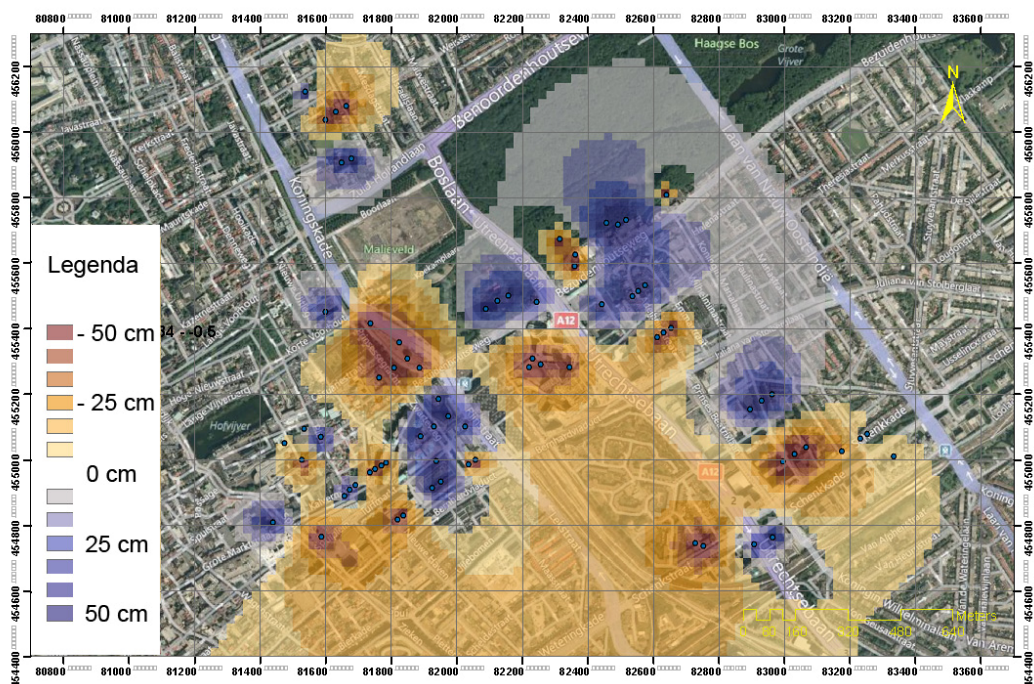
4.1 Effecten op stijghoogte

Het doel van deze berekeningen ten aanzien van de stijghoogte-effecten is om het patroon te laten zien dat optreedt bij grootschalige inzet van WKO's en de regionale langdurige uitstraling. Om die reden zijn geen aparte sommen gemaakt bij een kortdurende (dagen tot week) piek in de waterverplaatsing tijdens extremere weersomstandigheden. Deze omstandigheden zijn vaak wel maatgevend bij de vergunningaanvraag omdat deze mogelijk invloed kunnen hebben op de piekgrondwaterstanden (in het freatische grondwater).

De effecten van de WKO's op stijghoogte zijn weergegeven voor scenario's 1 en 4. De temperatuur van het injectiewater maakt bij het hier gekozen temperatuurbereik immers geen noemenswaardig verschil op de stijghoogte.

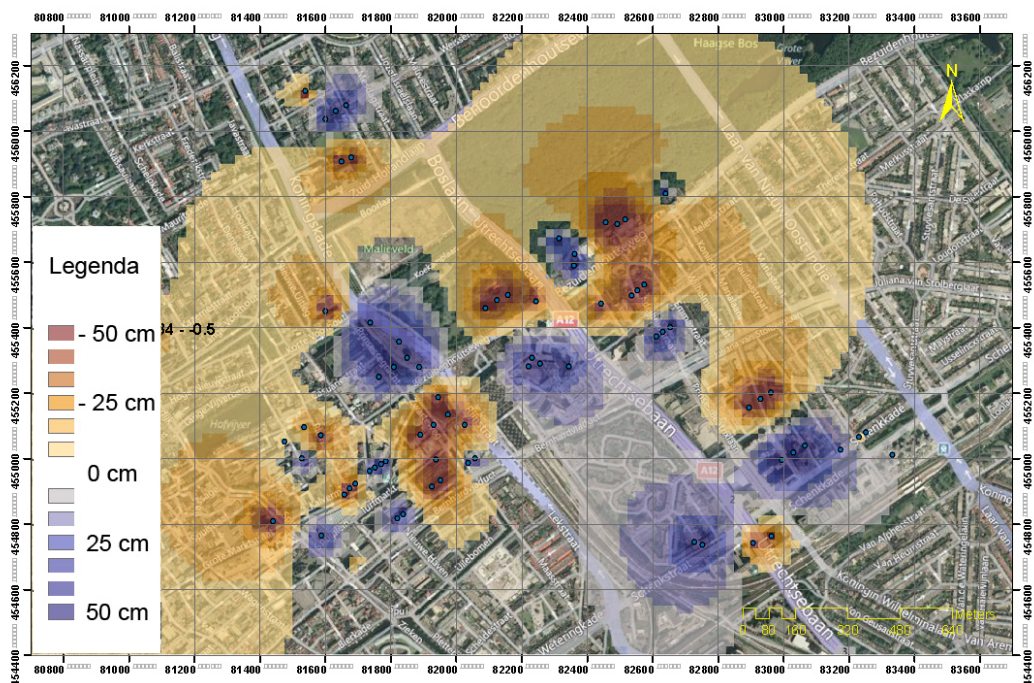
Bij de scenario's met de wisselende debieten (scenario's 2 en 3) zal de stijghoogteverandering in een jaar met een groter debiet uiteraard groter zijn, maar in andere jaren zal deze weer kleiner zijn. Aangezien het hier gaat om de regionale uitstraling die invloed heeft op de stromingspatronen in het regionale systeem, is de langjarige situatie relevanter dan de omstandigheden in een specifiek jaar.

De regionale grondwaterstroming is gericht naar de DSM-winning in Delft (zuidoostelijke stroming).



figuur 4.1

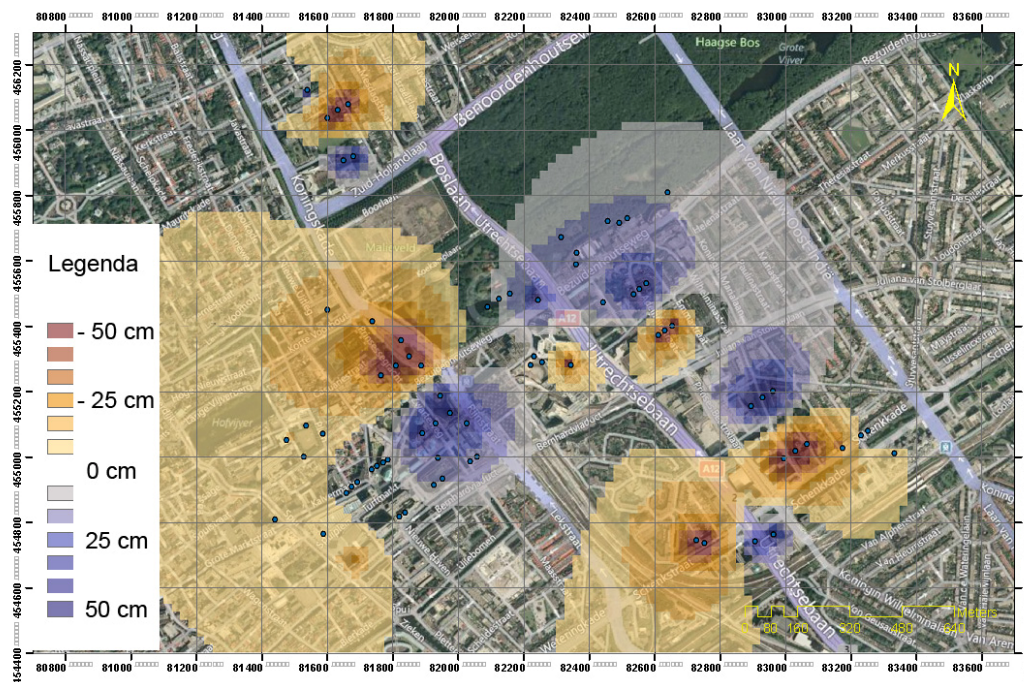
Stijghoogteverschil als gevolg van de WKO's (alle systemen) in de winterperiode (scenario 1). Blauw is een verhoging, rood is een verlaging



figuur 4.2

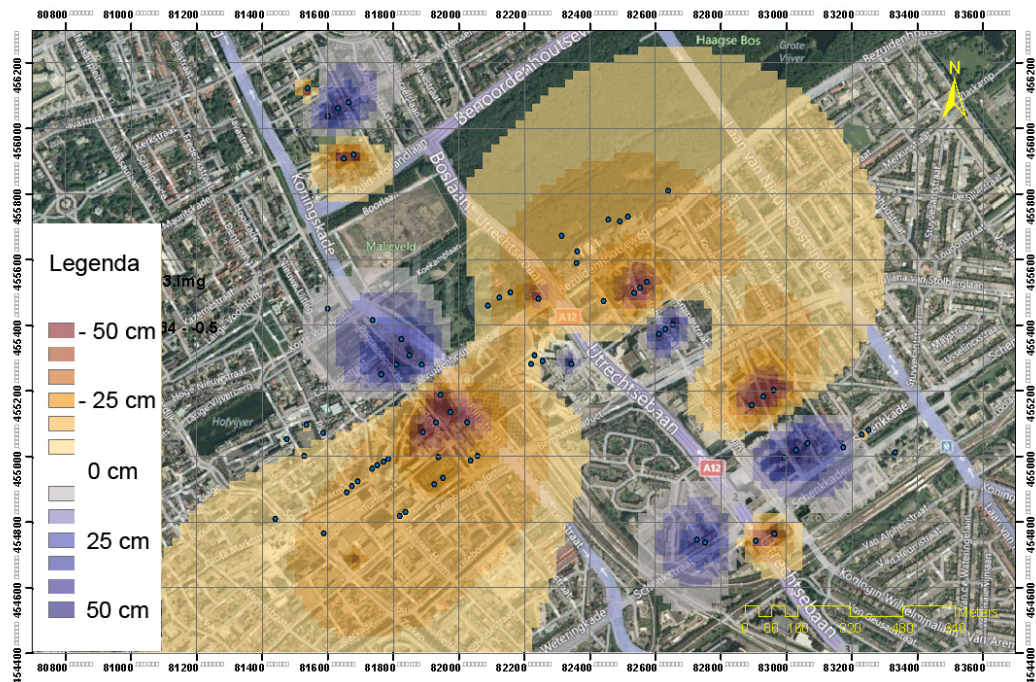
Stijghoogteverschil als gevolg van de WKO's (alle systemen) in de zomerperiode (scenario 1). Blauw is een verhoging, rood is een verlaging

In figuur 4.3 en figuur 4.4 is weergegeven hoeveel de stijghoogte verandert met alleen de systemen t/m 2003 ten opzichte van de toestand waarin er geen WKO's in dit gebied in werking zouden zijn. De figuren geven de stijghoogte in de onttrekkingslaag weer.



figuur 4.3

Berekend stijghoogteverschil in het eerste watervoerend pakket als gevolg van de WKO's (systemen t/m 2003) (scenario 4) in de winterperiode. Blauw is een verhoging, rood is een verlaging.



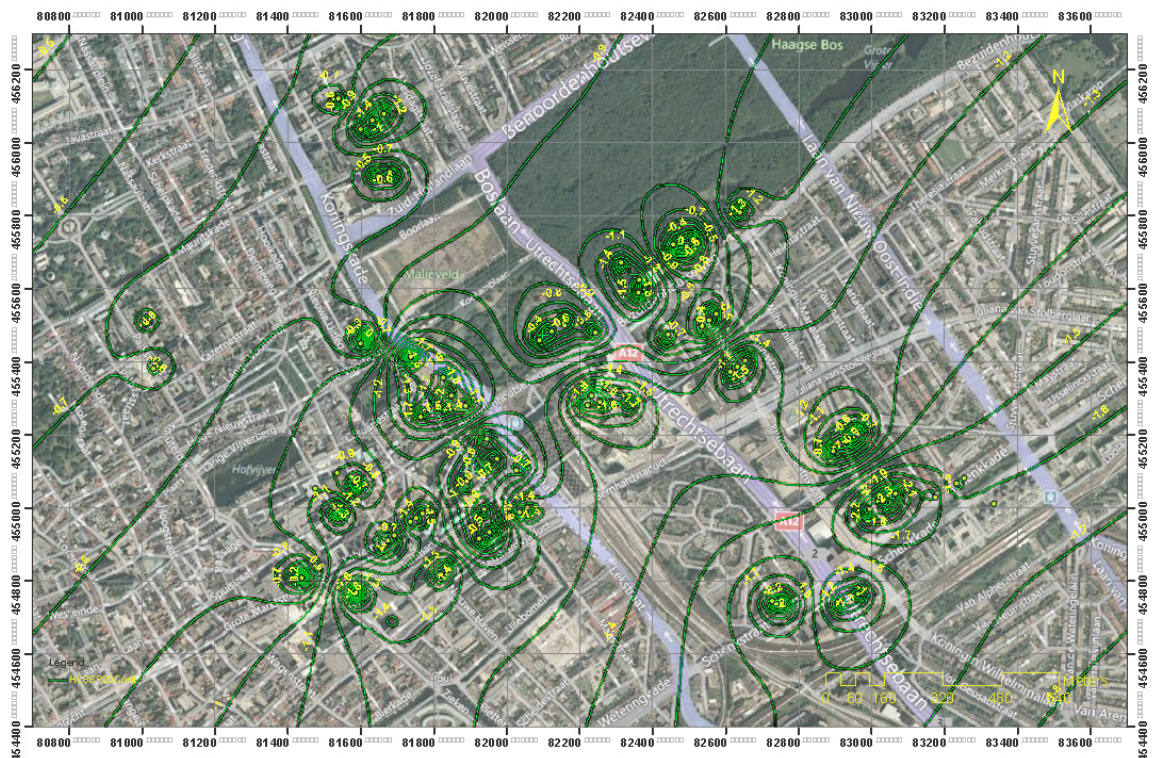
figuur 4.4 Berekend stijghoogteverschil in het eerste watervoerend pakket als gevolg van de WKO's (systemen t/m 2003) (scenario 4) in de zomerperiode. Blauw is een verhoging, rood is een verlaging.

Met alle systemen in werking is het regionale uitstralingseffect uiteraard groter in het gebied, maar met name in de zomer ook in de grootte van de verlaging in het zuiden. Voor zowel de situatie met alleen de bronnen <2003 als met alle bronnen, lijkt de achtergrondstroming (in zuidoostelijke richting) een verklaring te kunnen zijn voor het gevonden beeld. Het beeld laat namelijk in grote lijnen zien dat de verlaging van de stijghoogten in het noordwesten e.o. in de zomer groter is dan de verhoging in het noordwesten in de winter.

Van de veranderingen in de stijghoogte in het freatische grondwater zijn ook kaarten gemaakt, maar deze bleken in deze simulaties een zeer kleine verandering (millimeters) te bevatten als gevolg van de WKO's. De veranderingen waren dermate klein dat deze net zo goed toewijsbaar zijn aan de nauwkeurigheid van het model als aan mogelijke effecten door de WKO's. Deze kaarten bieden dan ook geen ruimtelijke informatie, behalve de conclusie dat de weerstand in de bovenliggende lagen in dit gebied volgens het model dermate groot is dat er geen sprake is van significante effecten op de freatische grondwaterstand.

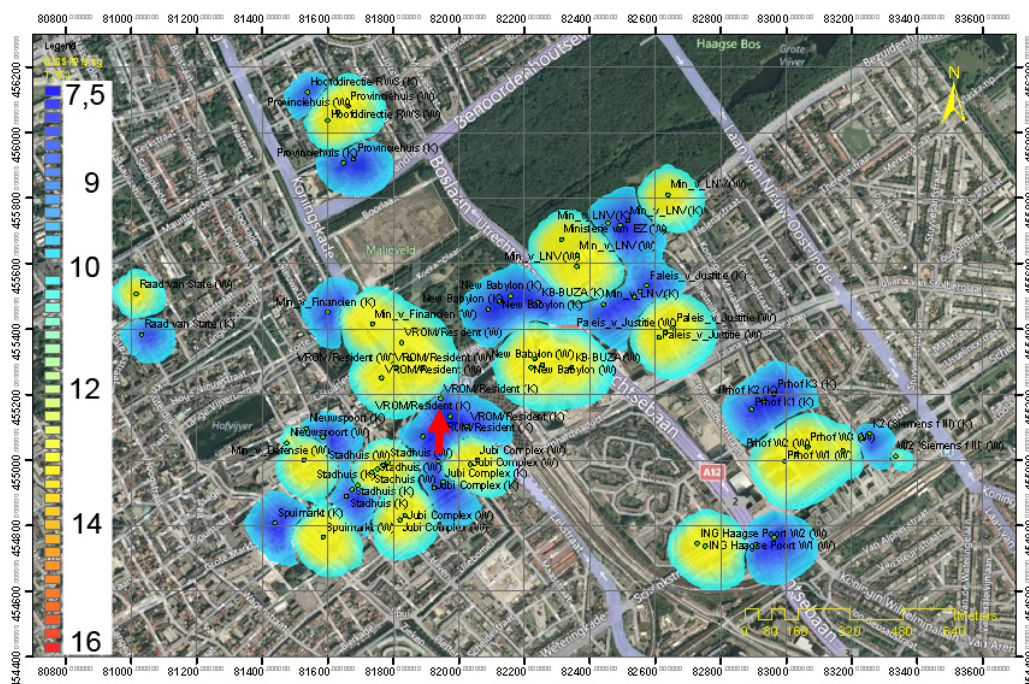
Uit figuur 4.3 en figuur 4.4 is af te leiden dat er sprake is van een regionale uitstraling in noordoostelijke en zuidwestelijke richting als gevolg van de systemen t/m 2003. Deze uitstraling is echter in de ordegrrootte 5 tot 10 cm. Opvallend is dat de uitstraling richting het zuidwesten onafhankelijk van het seizoen een verlaging van de stijghoogte betekent, terwijl die in de richting van het noordoosten wel seizoensafhankelijk is. Deze verlaging in de stijghoogte naar het zuidwesten is echter wel het gevolg van andere bronnen.

Eerdere berekeningen met een ander model gebruikt bij enkele effectstudies toonden wel invloed op de freatische grondwaterstanden aan. Daarom is een vergelijking gemaakt tussen dit model en het hier gebruikte model. De overeenkomsten en de verschillen tussen deze modellen staan weergegeven in bijlage B. Naast deze modelmatige verschillen, moet ook gerealiseerd worden dat in de berekeningen voor deze rapportage is gerekend met een gemiddeld debiet over het seizoen. Bij berekeningen voor effectstudies wordt gerekend met de broncapaciteit, wat een bepaalde piek vertegenwoordigt.



figuur 4.5 Berekend stijghoogtepatroon in het eerste watervoerende pakket in de winter bij alle systemen (scenario 1)

Een ander aspect van de grote hoeveelheid systemen die “ongeordend” geplaatst zijn, is de grote grilligheid van de stijghoogtepatronen (zie bovenstaand figuur). In de zomer draaien deze patronen vervolgens ook weer om. Bij het plannen van nieuwe toepassingen in de ondergrond (bemalingen, tunnels) kan het daarmee lastig zijn een goed beeld van de lokale stroomsnelheid en –richting te verkrijgen. Ook voor het voorspellen of volgen van de verspreiding van eventueel aanwezige grondwaterverontreinigingen is dit een complicerende factor. Opgemerkt wordt dat sommige nieuwe toepassingen en sommige verontreinigingen zich in het bovenste deel van de ondergrond zullen bevinden, waar de invloed van de WKO's in het geval van Den Haag door de weerstand van de deklaag klein is.

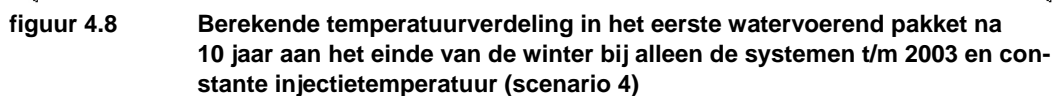


figuur 4.7 Berekende temperatuurverdeling in het watervoerend pakket na 10 jaar aan het einde van de zomer bij alle systemen en constante injectietemperatuur (scenario 1)

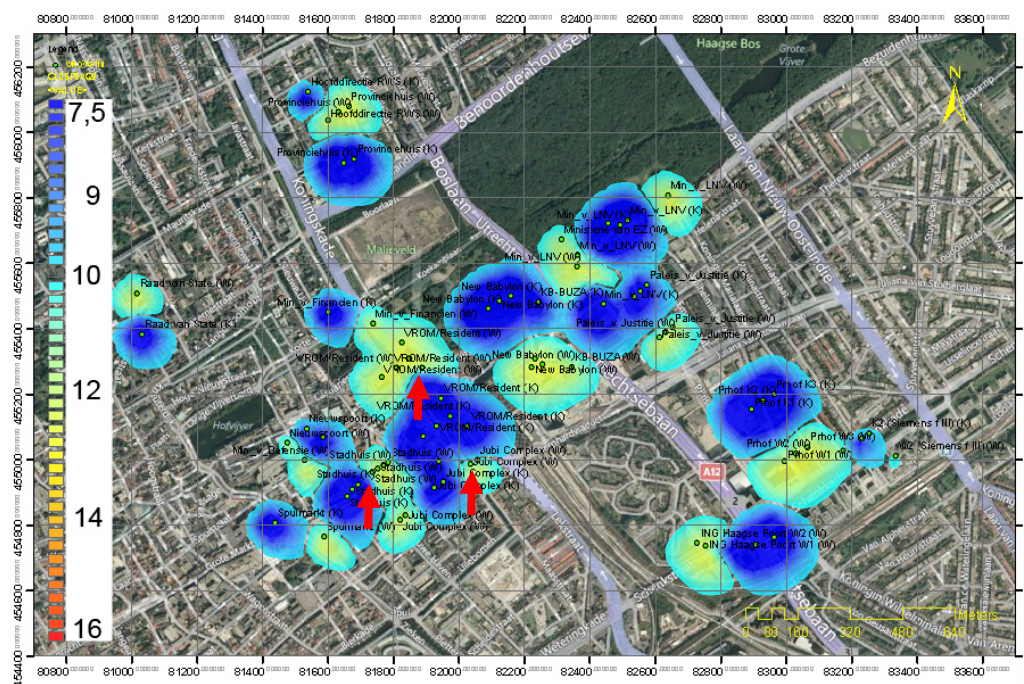
In figuur 4.7 is te zien dat een koude bron van het VROM/Resident systeem dichtbij de warme zone van het eigen systeem terecht gekomen is (rode pijl). Ook is in dit figuur te zien dat enkele thermische zones van meerdere systemen gekoppeld geraakt zijn.

De figuren van de andere scenario's laten nagenoeg hetzelfde patroon zien als bovenstaand. Daarom zullen zij niet apart besproken worden in de rapportage, maar zijn de figuren wel opgenomen in bijlage D.

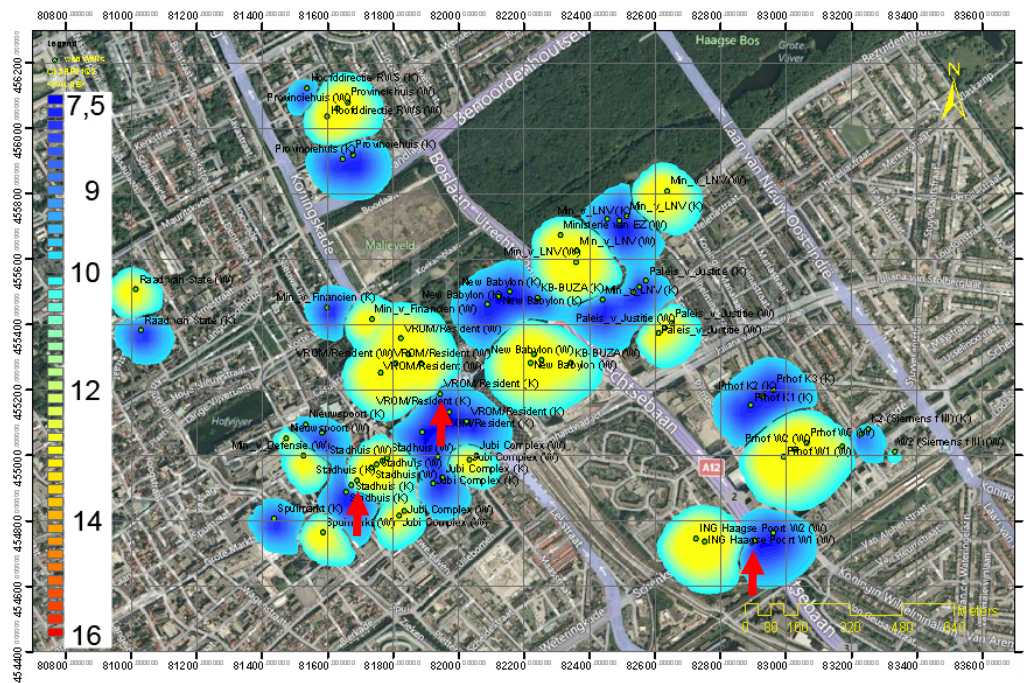
Bij de scenario's met alleen de systemen t/m 2003 zijn er (uitgezonderd de twee systemen van RWS en Provincie Zuid-Holland) nog geen samengegroeide thermische zones ontstaan. Als voorbeeld is de wintersituatie onder die omstandigheden weergegeven.



33



figuur 4.9 Berekende temperatuurverdeling in het eerste watervoerend pakket na 10 jaar aan het einde van de winter bij de gevoeligheidsanalyse (scenario G). Vergelijk dit met figuur 4.6

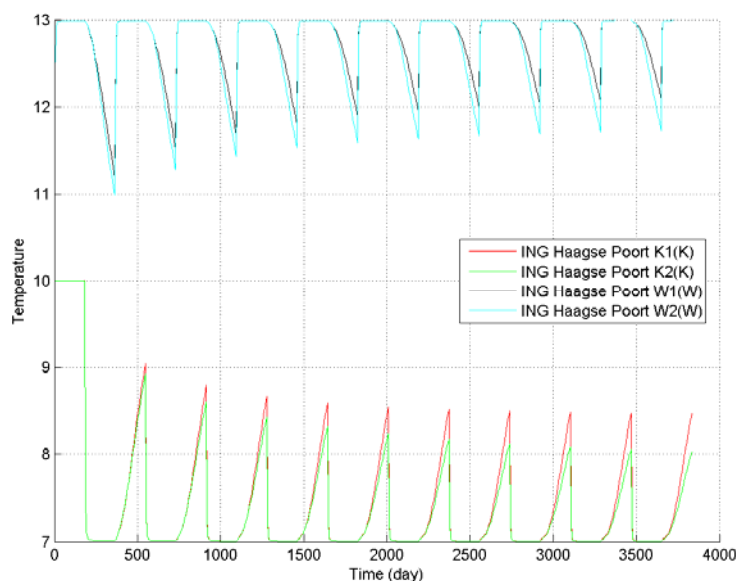


figuur 4.10 Berekende temperatuurverdeling in het eerste watervoerend pakket na 10 jaar aan het einde van de zomer bij de gevoeligheidsanalyse (scenario G). Vergelijk dit met figuur 4.7

Met rode pijlen zijn de bronnen aangegeven waarbij een lager rendement ten opzichte van andere bronnen is geconstateerd in de berekening. Hoewel er wel enkele bronnen zijn die in de gevoeligheidsanalyse juist wel of niet meer lagere rendementen laten zien, blijft het patroon van de warme en koude zones in ieder geval visueel nagenoeg gelijk. De geconstateerde lagere rendementen bij Stadhuis, JuBi-complex en VROM worden hier ook weer gezien. Het ministerie van Defensie heeft in deze gevoeligheidsanalyse geen verlaagd rendement meer (is in deze berekening ook verkleind). Dit systeem profiteert als het ware van de grotere bellen van het ministerie van LNV, doordat de warme bronnen bij elkaar staan. Bij ING Haagse Poort is nu wel een bron gevonden waarvan het rendement achterblijft (maar nog geen water onder de achtergrondtemperatuur onttrekt). Dit is echter te wijten aan “eigen interferentie” en niet aan interferentie met een ander systeem. Dit geldt ook voor het ministerie van VROM en het stadhuis. Alleen bij het JUBI-complex lijkt in dit scenario nadelige interferentie op te treden: de noordwestelijk gelegen warme bronnen worden weggedrukt door de grote koude bel van het ministerie van VROM.

4.3 Temperatuurverloop bij de bronnen

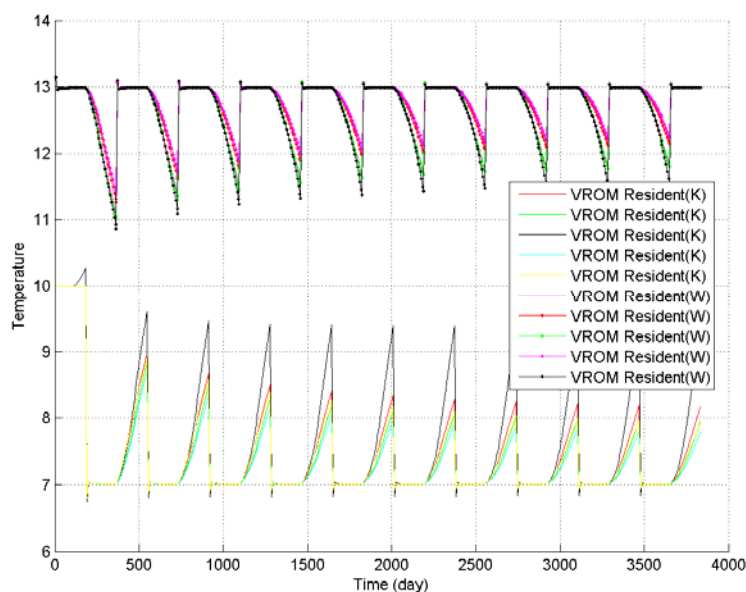
Het temperatuurverloop bij de bronnen is de belangrijkste indicator voor het bereiken van een goed rendement. Immers, als er eerst water met 13 graden geïnjecteerd is, en dit wordt vervolgens met bijvoorbeeld maar 11 graden teruggewonnen, is er een groot deel van de thermische energie ondergronds verloren gegaan. Om dezelfde hoeveelheid warmte te leveren moet dan meer water worden verpompt bij hogere debieten en kan bij hoge warmtevraag de capaciteit van de WKO ontoereikend zijn. Een minder gunstige onttrekkingstemperatuur betekent echter niet automatisch dat de beoogde energiebesparing door de WKO verloren gaat. Ook recirculatiesystemen besparen immers veel energie en maken voor zowel koeling als verwarming gebruik van de natuurlijke grondwatertemperatuur. In onderstaande grafiek staat het verloop van de berekende temperatuur bij de onttrekkings- en infiltratiebronnen van het systeem ING Haagse Poort weergegeven als voorbeeld.



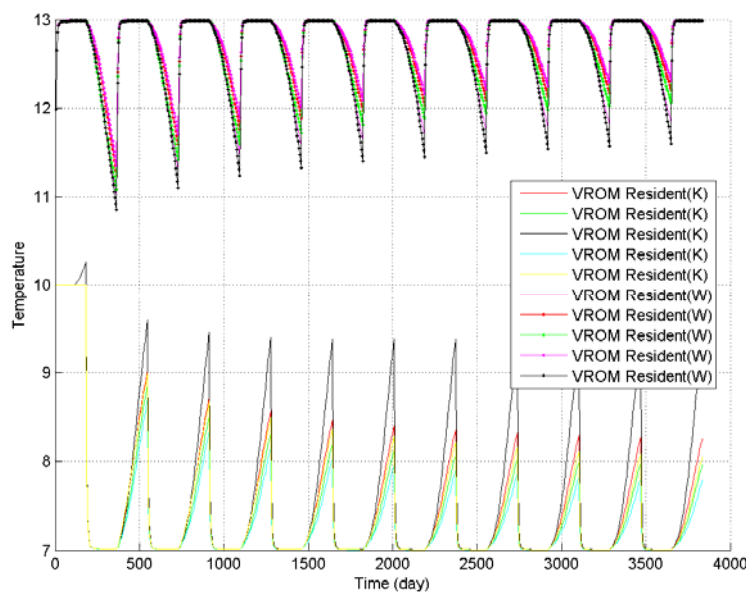
figuur 4.11 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem Haagse Poort (scenario met vaste injectietemperaturen) (scenario 1)

In figuur 4.11 is te zien dat de onttrekkingstemperatuur aan het einde van de onttrekkingperiode begint af te nemen bij de warme bron (of bij de koude bron begint toe te nemen). Ook is duidelijk te zien dat naarmate het systeem langer loopt, de verliezen kleiner worden. Geconcludeerd kan worden uit deze grafiek dat er sprake zal zijn van een goed rendement op beide bronnen.

In de vorige paragraaf is geconstateerd dat een van de koude bronnen van het VROM systeem aan het eind van de zomer binnen bereik van de warme zone dreigt te komen. In onderstaande figuren staat het verloop van de temperaturen bij de bronnen weergegeven voor de situatie met alleen systemen t/m 2003 en alle systemen.



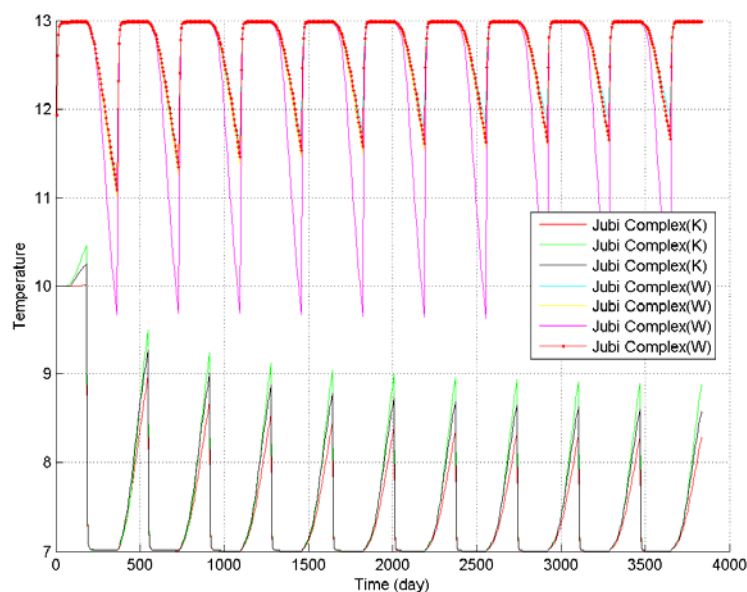
figuur 4.12 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de 5 warme en 5 koude bronnen van het systeem VROM/Resident (scenario met vaste injectietemperaturen en alleen systemen t/m 2003) (scenario 4)



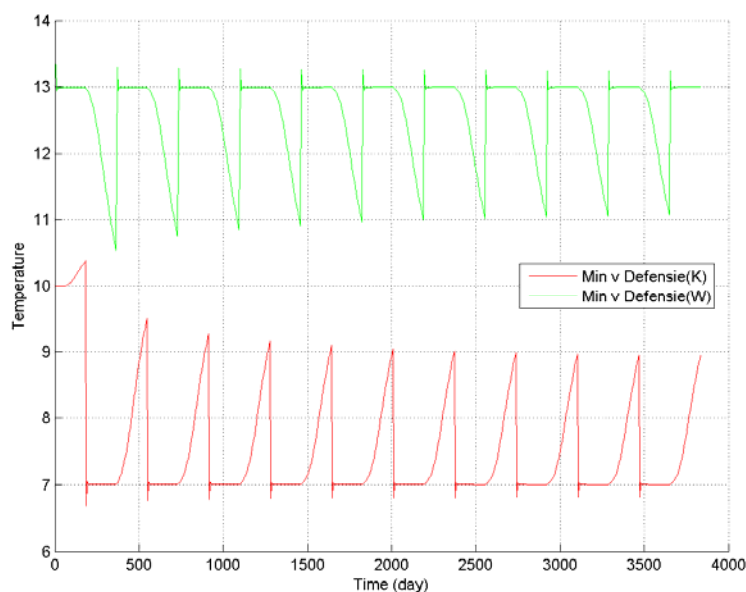
figuur 4.13 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de 5 warme en 5 koude bronnen van het systeem VROM/Resident (scenario met vaste injectietemperaturen en alle systemen) (scenario 1)

In figuur 4.12 en figuur 4.13 is duidelijk te zien dat bij de koude bron met de grijze lijn de onttrekkingstemperatuur het hoogst oploopt. De temperatuur blijft echter nog wel onder de natuurlijke temperatuur (10 graden). De toename van het aantal systemen na 2003 heeft geen positief of negatief effect op het verloop van de temperatuur.

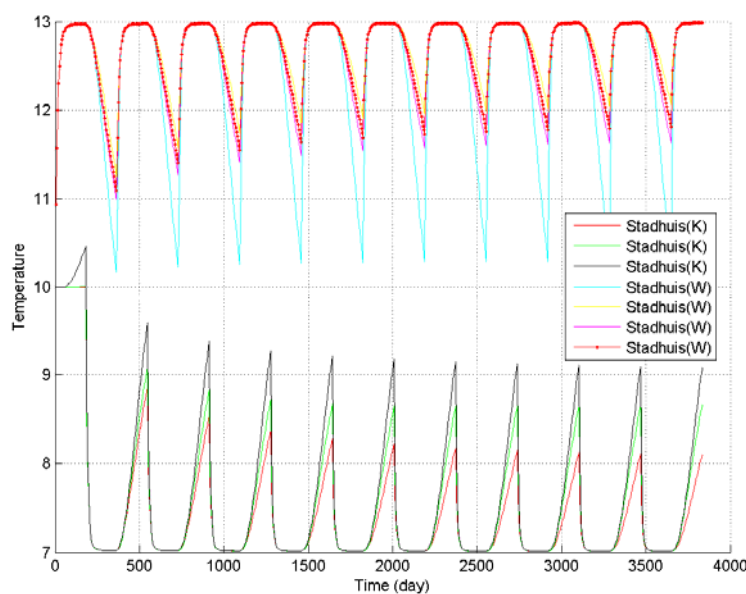
De andere drie bronnen waar mogelijk interferentie zou kunnen voorkomen, zijn van systemen die na 2003 gerealiseerd zijn. Bij het ontwerp van deze nieuwere systemen is (als het goed is) rekening gehouden met de bestaande systemen. Een vergelijking tussen de situatie voor en na de installatie van andere systemen is bij deze bronnen dus niet mogelijk. In figuur 4.14, figuur 4.15 en figuur 4.16 staat het temperatuurverloop van de in paragraaf 4.2 genoemde systemen waar interferentie lijkt op te treden, weergegeven.



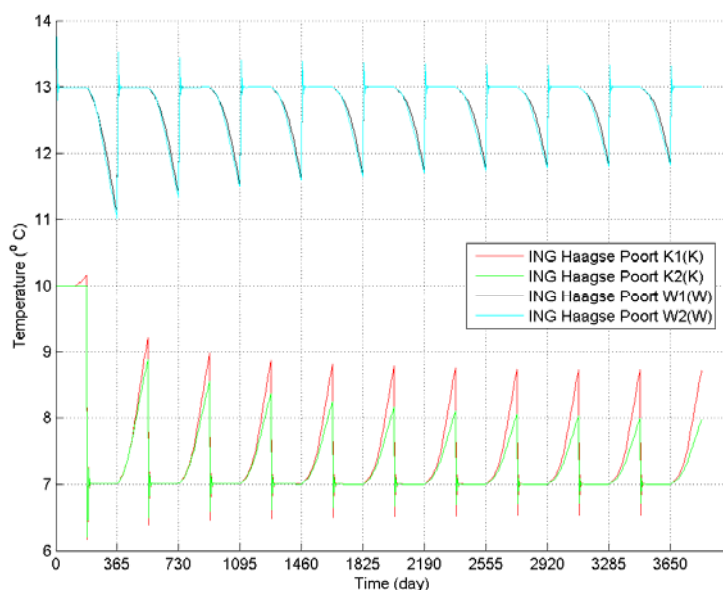
figuur 4.14 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem Justitie/Binnenlandse Zaken (scenario met vaste injectietemperaturen en alle systemen) (scenario 1)



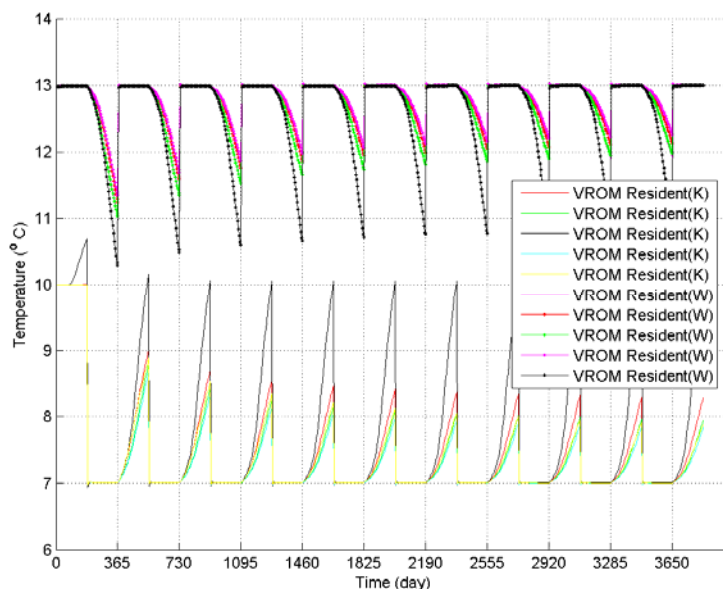
figuur 4.15 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem Ministerie van Defensie (scenario met vaste injectietemperaturen en alle systemen) (scenario 1)



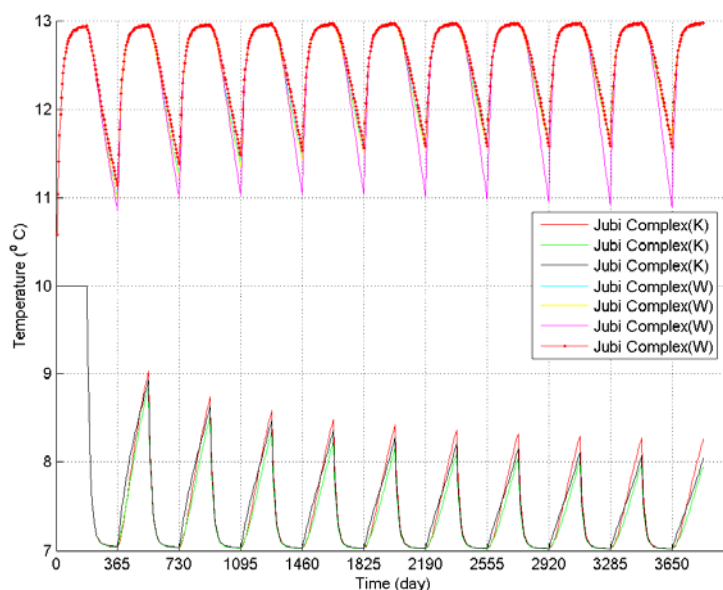
figuur 4.16 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem Stadhuis (scenario met vaste injectietemperaturen en alle systemen) (scenario 1)



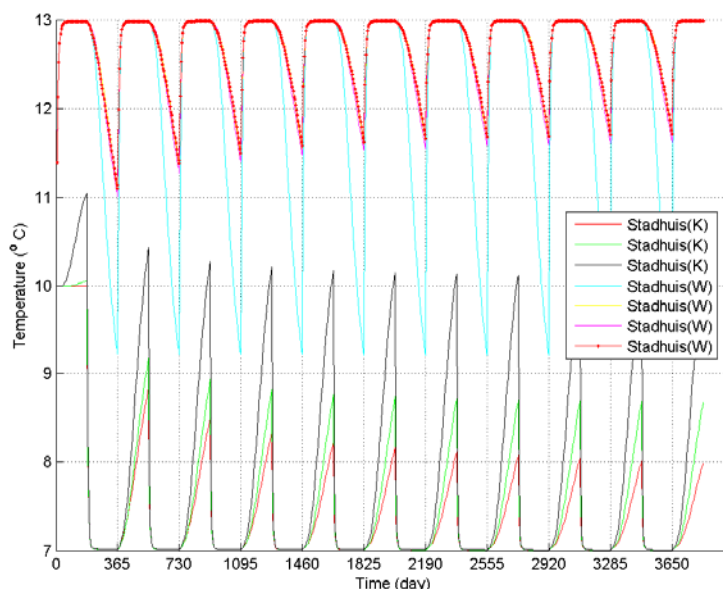
figuur 4.18 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem ING Haagse Poort (scenario G, dit systeem is vergroot). Vergelijk deze met figuur 4.11. Uit de vergelijking blijkt dat de rode koude bron in deze situatie een structureel hogere onttrekkingstemperatuur heeft



figuur 4.19 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem VROM/Resident (scenario G, dit systeem is vergroot). Vergelijk deze met figuur 4.13. Uit de vergelijking blijkt dat de zwarte koude bron in deze situatie een structureel hogere onttrekkingstemperatuur heeft. In de oorspronkelijke berekening stijgt deze tot 9,5 graad, maar is hier 10 graden. De zwarte warme bron heeft een structureel lagere onttrekkingstemperatuur dan de andere bronnen. Waar bij de oorspronkelijke berekening de onttrekkingstemperatuur daalt tot 11,5 graad, is dat hier tot iets onder de 11 graden



figuur 4.20 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem JuBi-complex (scenario G, dit systeem is verkleind). Vergelijk deze met figuur 4.14. Uit de vergelijking blijkt dat de roze warme bron in deze situatie een structureel lagere onttrekkingstemperatuur heeft, maar dat deze aanzienlijk hoger ligt dan in de oorspronkelijke berekening

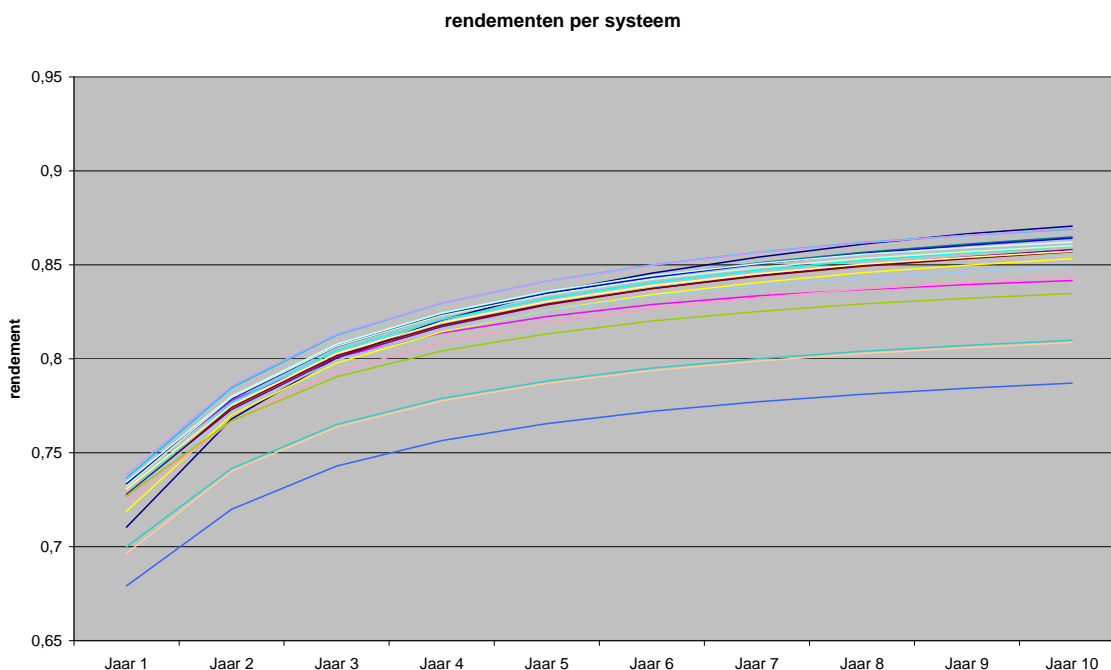


figuur 4.21 Berekend temperatuurverloop van onttrekking en infiltratie van de warme en koude bronnen van het systeem Stadhuis (scenario G, dit systeem is vergroot). Vergelijk deze met figuur 4.16. Uit de vergelijking blijkt dat de zwarte koude bron in deze situatie een structureel hogere onttrekkingstemperatuur heeft. In de oorspronkelijke berekening stijgt deze tot 9 graden, maar is hier tot iets boven de 10 graden. De lichtblauwe warme bron heeft een structureel lagere onttrekkingstemperatuur dan de andere bronnen, zelfs tot duidelijk onder de achtergrondtemperatuur. Waar bij de oorspronkelijke berekening de onttrekkingstemperatuur daalt tot 10,2 graden, is dat hier tot iets boven de 9 graden

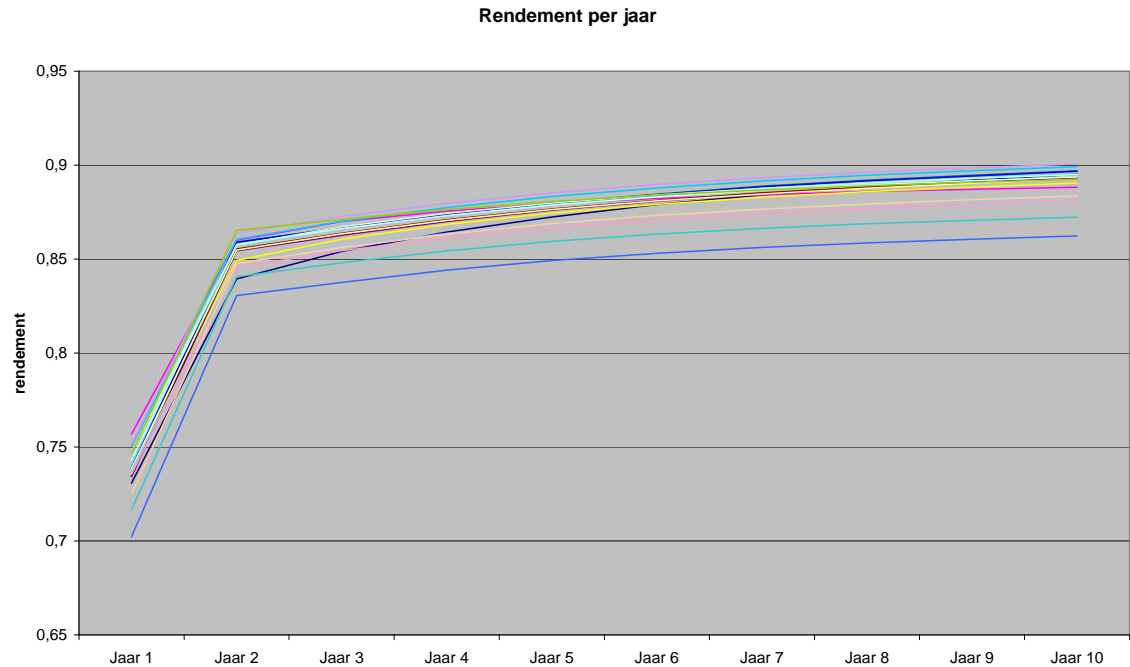
4.4 Berekeningen van het rendement

In dit onderzoek ligt de focus op de ondergrondse energiebalans en de terugwinbaarheid van eerder ingebrachte energie (waarbij koude ook wordt gedefinieerd als een positieve vorm van energie, hoewel het eigenlijk een verminderde hoeveelheid thermische energie is). Het rendement wordt hier dan ook gedefinieerd als de verhouding tussen de onttrokken hoeveelheid energie en de ingebrachte energie in het seizoen daaraan voorafgaand, gemeten ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Dit is een andere definitie van rendement dan bijvoorbeeld de ook veel gebruikte definitie omtrent de energiebesparing van een systeem.

Zolang de debieten constant zijn, is dit een goed werkbaar definitie. In het geval van de wisselende debieten levert dit per jaar niet bruikbare waardes. Deze waardes worden dan immers niet volledig bepaald door de thermische verliezen in de ondergrond, maar ook door een scheve verhouding van geïnjecteerde en onttrokken hoeveelheden water (ook met water van de natuurlijke grondwatertemperatuur kan nog koude dan wel warmte worden geleverd, zonder dat nog sprake is van opgeslagen energie). Aangezien de in deze studie gebruikte synthetische reeks voor de debieten na 10 jaar weer in balans is, hebben alleen de gemiddelde uitkomsten over die 10 jaar een nuttige betekenis. Geconstateerd kan worden uit de resultaten dat de rendementen bij normaal functionerende systemen na verloop van tijd toenemen. Dit is fysisch goed verklaarbaar. Dit komt omdat de omgeving van de bronnen opgewarmd (of afgekoeld) raken door de eerste hoeveelheden warmte (of koude) en daardoor later minder verlies optreedt. Dit is goed zichtbaar in onderstaande figuur.



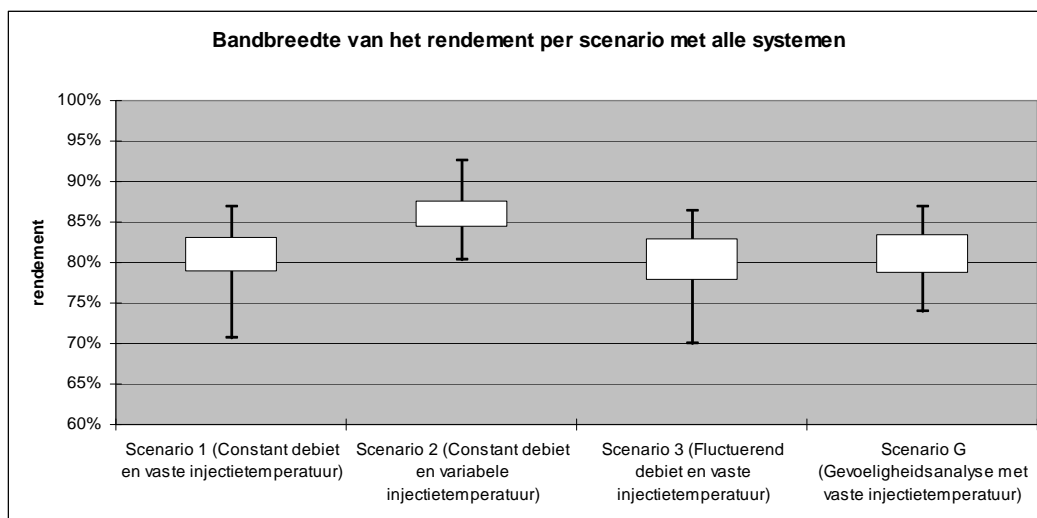
figuur 4.22 **Ontwikkeling van het rendement per jaar voor alle systemen met een constante injectietemperatuur (scenario 1)**



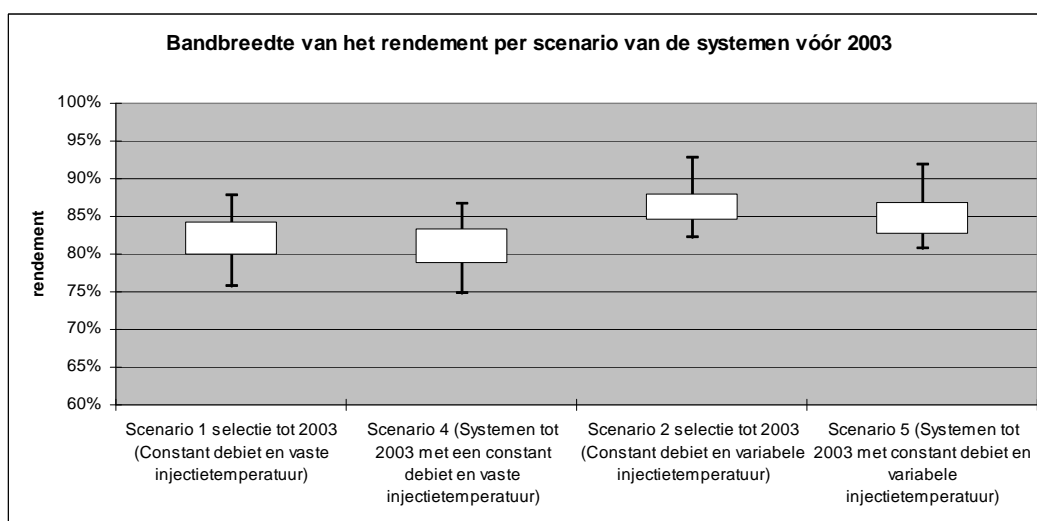
figuur 4.23 Berekende ontwikkeling van het rendement per jaar voor alle systemen met een variabele injectietemperatuur (scenario 2)

De rendementen van de systemen verschillen niet veel en liggen na 10 jaar allemaal in de orde grootte 85-90% bij het scenario met de variabele injectietemperatuur. In het scenario met de constante injectietemperatuur zijn de verschillen iets groter (80-90%) en duurt het bereiken van de hoge rendementen langer.

Om de verschillende scenario's te vergelijken, zijn onderstaande grafieken gemaakt. In deze grafieken staat de bandbreedte van de rendementen van de systemen per scenario weergegeven. De brede balk is de 50%-bandbreedte en de smalle lijn is de 90%-bandbreedte. In figuur 4.24 staan de scenario's waarin alle systemen aan staan. In figuur 4.25 staan alleen de rendementen van de systemen tot 2003 zodat het verschil gezien kan worden tussen de rendementen van die systemen in de situatie van voor 2003 en in de situatie dat de nieuwe buursystemen ook aan staan.



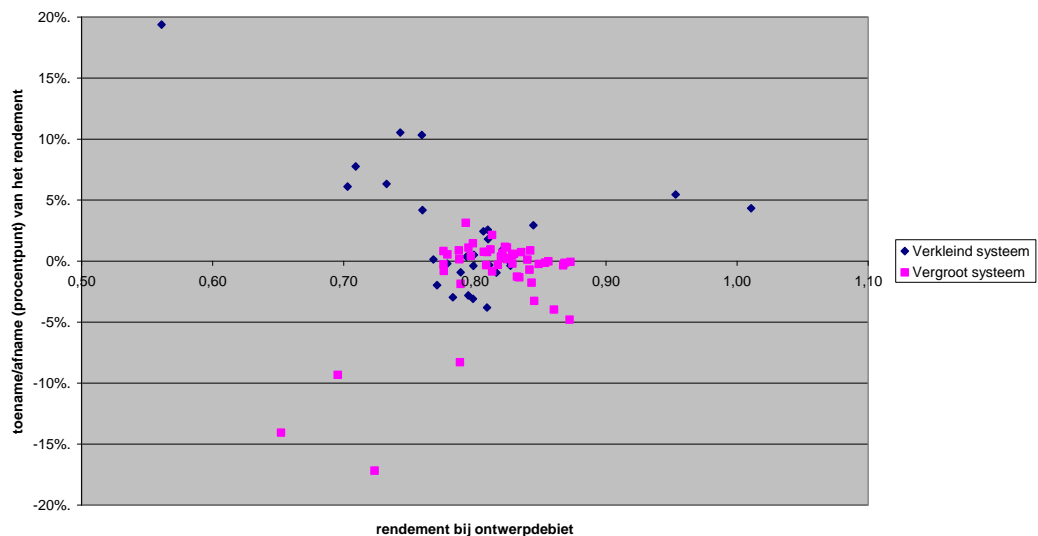
figuur 4.24 Bandbreedte van het rendement (per bron) van de systemen in de 4 scenario's waarin alle systemen aan staan. De dikke balken representeren de 50%-bandbreedte, de dunne lijnen de bandbreedte van 90%



figuur 4.25 Bandbreedte van het rendement van de systemen (per bron) tot 2003 in de scenario's waarin alleen de systemen tot 2003 aan staan en een selectie van deze systemen uit de scenario's met alle systemen. De dikke balken representeren de 50%-bandbreedte, de dunne lijnen de bandbreedte van 90%

Bij de meeste bronnen ligt het rendement bij het constante debiet en fluctuerende injectietemperatuur tussen de 80 en 90% en functioneren de systemen dus goed. Omdat de uitschieters naar boven en beneden onderdeel zijn van een systeem met meerdere bronnen, hebben eigenlijk alle systemen binnen 3 tot 4 jaar een rendement van 85% of hoger bereikt. Van grootschalige negatieve interferentie is onder de condities van deze scenario's zeker geen sprake, hoewel een aantal bronnen in rendement duidelijk lager scoren door negatieve beïnvloeding.

Met in het achterhoofd dat de verdeling van welke systemen vergroot of verkleind zijn, kan de gevoeligheidsanalyse iets zeggen over de invloed van de gehanteerde ontwerpdebieten op de uitkomsten over het ondergrondse rendement. Ten opzichte van het scenario 1 met constante debieten en constante injectietemperatuur volgt uit de berekeningen dat het gemiddelde rendement van de systemen gelijk is. De uitschieters per systeem naar boven en beneden nemen echter wel licht toe (met verschillen van 4 procentpunt).



figuur 4.26 Verandering van het rendement in procentpunten door verandering van het debiet volgens de uitgangspunten van de gevoeligheidsanalyse ten opzichte van scenario 1

Uit dit figuur blijkt dat de grootste afname van het rendement van individuele bronnen optreedt bij de bronnen van de vergrote systemen en dat bij de verkleinde systemen de grootste toename van het rendement optreedt. Overigens blijft het grootste deel van de bronnen binnen de -5%-punt tot +5%-punt verschil. Gezien de, over de hele linie beschouwd, bescheiden verschillen tussen de scenario's, blijkt wel dat de verplaatste waterhoeveelheid een gevoelige parameter is.

Ten aanzien van de verschillen tussen de scenario's valt het volgende op te merken:

- Het grootste verschil in het rendement wordt gezien tussen de scenario's met een variabele temperatuur of een constante temperatuur. Dit scheelt gemiddeld ongeveer 5% in rendement in het voordeel van de fluctuerende infiltratietemperatuur. Bij enkele systemen kan dit verschil echter oplopen tot 15%.
- Het verschil in rendement tussen scenario's met een fluctuerend debiet en die met een constant debiet (beiden met een vaste injectietemperatuur) is nihil. Dit betekent dat het gemiddelde rendement na 10 jaar niet beïnvloed wordt door tijdelijke fluctuaties (er is wel sprake van een energiebalans en gelijke energiehoeveelheden na 10 jaar).

- De gevoeligheidsanalyse laat zien dat een vergroting of verkleining van het debiet enkele procenten verschil in ondergronds rendement betekenen. Bij bronnen die reeds lager presteren dan gemiddeld (veelal door interferentie) bij ontwerpdebiet betekent een vergroting of verkleining een dominant verschil in rendement t.o.v. bovenstaande parameters.
- De rendementen van de systemen die gerealiseerd zijn t/m 2003, zijn na inpassing van de nieuwe systemen niet achteruit gegaan, maar zijn er zelfs marginaal licht op vooruit gegaan.

Uit de geringe verschillen tussen de scenario's kan echter niet geconcludeerd worden dat verschillen in injectietemperatuur of debiet niet relevant zijn bij de bepaling van de rendementen. In de praktijk zullen onttrekkingstemperatuur, injectietemperatuur en debieten interactief aan elkaar gekoppeld zijn. Als het onttrekkingswater in de zomer warmer wordt, zal er meer gepompt moeten worden om dezelfde hoeveelheid koude uit de ondergrond te halen of zal de infiltratietemperatuur hoger kunnen worden. Hoe dit precies uitpakt heeft mede te maken met de instellingen van het gebouwstelsel en de mogelijkheden koeling of verwarming uit andere systemen te verkrijgen.

Voor deze studie is gerekend met uiteindelijk een volumebalans over de koude en warme bronnen. Door de vaste koppeling met de injectietemperatuur zal er sprake zijn van ongeveer een energiebalans (de onttrekkingstemperatuur kan iets afwijken). Deze aanname komt overeen met de eis vanuit de vergunning om dit na te streven. In de praktijk kan dit echter wel (enigszins) afwijken van een volledige energiebalans.

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van ontwerpgegevens. Om de werkelijkheid beter te benaderen is meer informatie nodig over de verdeling van de debieten in de praktijk. De gevoeligheidsanalyse geeft iets meer informatie in de gevoeligheid voor duidelijk hogere of lagere onttrekkingsdebieten, maar biedt geen uitsluitend over de gevoeligheid voor deze parameter.

Daarnaast zullen de berekeningen aan de energierendementen van de systemen als geheel verbeteren als er meer informatie beschikbaar komt over het energiegebruik in de gebouwen. Immers, er geldt voor de WKO's zelf dat het totale rendement van het systeem niet alleen afhankelijk is van het ondergronds rendement, maar ook van de gebouwinstellingen en dergelijke.

5 Conclusies

In de simulaties van het centrum van Den Haag zijn de effecten van het gebruik van open WKO-systemen op de stijghoogte en de temperatuurverdeling in de ondergrond bekend. De locatie Den Haag is gekozen vanwege de aanwezigheid van een groot aantal WKO-systemen (de dichtheid aan WKO's is hier een van de hoogste van Nederland) en vermoed werd dat sprake zou zijn van (grootschalige) interferentie. In de situatie van Den Haag is nooit gewerkt volgens een masterplan, dus de enige ordening die heeft plaatsgevonden is uitgevoerd door bij de ontwerpen van de nieuwe WKO's rekening te houden met bestaande WKO-systemen (organisch groeimodel).

Het ordenen van WKO-installaties volgens het huidige principe dat nieuwe systemen moeten passen tussen de oude, blijkt in ieder geval in het geval Den Haag in grote lijnen afdoende om negatieve interferentie tussen de systemen te voorkomen. Bij enkele bronnen (4) in Den Haag centrum blijkt negatieve interferentie op te treden, echter het merendeel van de bronnen (72) wordt niet of nauwelijks negatief beïnvloed door de aanwezigheid van nabijgelegen systemen. Wel moet daarbij bedacht worden dat bij een vergunningaanvraag vaak een groter debiet (en dus ruimtebeslag) wordt gevraagd dan het ontwerpdebiet. Gezien het gegeven dat Den Haag centrum een van de drukste gebieden van Nederland is ten aanzien van WKO, is deze uitkomst een contra-indicatie voor het aanwezig zijn van grootschalige interferentie in Nederland.

Deze observatie is uiteraard gebaseerd op de aannames die bij de simulatie gemaakt zijn. De belangrijkste daarvoor zijn:

- Systemen hebben een volume- en energiebalans.
- Systemen verpompen niet (structureel) meer water dan de ontwerphoeveelheid.
- Lokaal homogene ondergrond.
- De hoeveelheid water die volgens ontwerp verpompt wordt is in de praktijk meestal en daarom in de berekening gelijkgesteld aan 2/3de deel van het vergunde debiet.

In hoeverre de aannames overeenkomen met de daadwerkelijk verpompte hoeveelheden grondwater en de grondwatertemperaturen is niet bekend omdat benodigde praktijkgegevens niet beschikbaar waren voor dit onderzoek.

De ondergrondse rendementen per systeem zijn volgens de uitgevoerde scenarioberekeningen ruim voldoende (80-90%) in dit gebied, waarmee deze dichtheden aan systemen in combinatie met alleen ontwerpgerichte ordening geen probleem hoeven te zijn. De grootste verschillen in uitkomsten tussen de scenario's treden op bij het veranderen van de aannames ten aanzien van de injectietemperatuur of het debiet. De rendementen lijken zelfs heel licht toe te nemen naarmate er meer systemen in het gebied gesimuleerd worden (positieve interferentie).

Deze marge tussen ontwerp en vergunde hoeveelheid wordt nu veelal gebruikt als buffer om extremen op te vangen, maar als deze ruimte daadwerkelijk benut gaat worden, kan bovenstaande conclusie niet zonder meer gestand blijven.

De simulaties laten zien dat de combinatie van systemen leidt tot een groter uitstralingsgebied dan de individuele invloedszones waar de stijghoogten (enkele tot 10-tal centimeters in het gebruikte watervoerende pakket) beïnvloed worden door een samenspel van de WKO's. Een zeer gering effect treedt echter op ten aanzien van de freatische grondwaterstand. Een hoge weerstand van de deklaag is de reden hiervoor (er is gerekend met een regionaal gemiddelde beste inschatting, niet met extremen).

Uit de scenario vergelijkingen blijkt dat de gekozen temperatuur modellering (constant of variabele injectietemperatuur) de grootste invloed heeft op de berekende rendementen van de systemen. Dit scheelt gemiddeld ongeveer 5% in rendement in het voordeel van de fluctuerende infiltratietemperatuur. Bij enkele systemen kan dit verschil echter oplopen tot 15%.

Het verschil in rendement tussen scenario's met een fluctuerend debiet en die met een constant debiet (beiden met een vaste injectietemperatuur) is nihil. Dit betekent dat het gemiddelde rendement na 10 jaar niet beïnvloed wordt door tijdelijke fluctuaties (er is wel sprake van een energiebalans en gelijke energiehoeveelheden na 10 jaar).

De rendementen van de systemen die gerealiseerd zijn t/m 2003, zijn na inpassing van de nieuwe systemen niet achteruit gegaan, maar zijn er zelfs marginaal licht op vooruit gegaan.

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat een vergroting of verkleining van het debiet enkele procenten verschil in ondergronds rendement betekenen. Bij bronnen die reeds lager presteren dan gemiddeld (veelal door interferentie) bij ontwerpdebiet betekent een vergroting of verkleining een dominant verschil in rendement t.o.v. bovenstaande parameters.

In de simulatie voor deze rapportage is niet specifiek gekeken naar kwalitatieve aspecten. Als er bijvoorbeeld verontreinigingen aanwezig zijn in het eerste watervoerende pakket, dan is het goed denkbaar dat bestaande verontreinigingen een onvoorspelbare verspreiding kunnen ondergaan door het grote aantal systemen en onoverzichtelijke stromingsrichtingen daartussen. Zie voor meer informatie hierover het MMB-rapport Gebiedsgericht Grondwaterbeheer.

5.1 Aanbevelingen

5.1.1 Voor het beleid

Het ordenen van WKO-installaties volgens het huidige principe dat nieuwe systemen moeten passen tussen de oude, blijkt in ieder geval in het geval Den Haag in grote lijnen afdoende om negatieve interferentie tussen de systemen te voorkomen. De bij een vergunningaanvraag gehanteerde debieten zijn echter veelal groter dan nodig is wat zorgt voor een groter ruimtebeslag per systeem. Dit kan ertoe leiden dat realisatie van toekomstige systemen soms onterecht wordt verhinderd waardoor uiteindelijk de ondergrondse ruimte minder doelmatig wordt gebruikt. In het beleid zou hier rekening mee gehouden kunnen worden maar dat vereist een uitspraak over hoe om te gaan met deze marges (voorkomen negatieve interferentie versus meer mogelijkheden voor inpassing).

Masterplannen hebben om bovenstaande redenen met name nut bij nog hogere (gewenste) dichtheden of bij inpassing met andere functies. Voor gebieden met een lagere (verwachte) dichtheid aan systemen is het vaststellen van masterplannen voor alleen de functie WKO mogelijk minder zinvol dan gedacht. Nagegaan dient te worden om welke redenen de masterplannen opgesteld worden en wat de meerwaarde ter plaatse zal zijn.

Focus op alleen interferentie zonder het stand-alone rendement van een systeem (of van enkele bronnen van een systeem) daarbij mee te nemen, kan weliswaar leiden tot een juridisch verklaarbare aanpak (de buurman mag geen schade opleveren), maar hoeft niet te leiden tot een gebiedsgerichte optimalisatie in energiebesparing (hoe verhoudt interferentie zich tot mogelijke eigen inefficiënties?).

5.1.2 Voor vervolgonderzoek

Het onderzoek naar interferentie heeft zich toegespitst op een enkele locatie. Hierdoor is het niet mogelijk om meer algemene uitspraken te doen over de relatie tussen de kenmerken van de ondergrond en het uiteindelijke optreden van interferentie. Weliswaar werd verwacht dat de kans op interferentie in Den Haag groot was, maar kan het ontbreken van grootschalige interferentie bij de gehanteerde uitgangspunten niet 1 op 1 worden vertaald naar andere gebieden waar een groot aantal WKO-systemen aanwezig zijn of worden geplaatst.

Het bepalen van een realistische debietreeks is een belangrijke stap die gezet moet worden om in situaties waarin het debiet achteraf of vooraf niet zeker vast te stellen is, te kunnen rekenen aan mogelijke toekomstige interferentie. Bij masterplannen zal een aanname gedaan moeten worden welk debiet er in de praktijk op zal (kunnen) treden. Het is aannemelijk dat het ontwerpdebiet uiteindelijk niet het debiet is wat er in de praktijk zal optreden (hoewel dat ontwerpdebiet natuurlijk wel een basis biedt). Een statistisch onderbouwde reeks of nog geavanceerder een aantal mogelijke reeksen kan een bijdrage leveren aan een betere inschatting of interferentie in de praktijk op zal treden (of optreedt in bestaande situaties).

Het definiëren van het ondergronds rendement wordt gecompliceerder als er geen sprake is van een volume- of energiebalans over de seizoenen. Voor toekomstige simulaties zal het nodig zijn om een definitie en methode van het ondergronds rendement te bepalen. Het is aanbevelenswaardig om (eenvoudige) relaties te leggen met het bovengronds functioneren van de gebouwssystemen om daarmee een realistische (fluctuerende) injectietemperatuur aan te kunnen nemen en het overall rendement te kunnen beoordelen. Een belangrijke vraag die hieraan gerelateerd is, is wat de consequenties zijn van een ongunstiger onttrekkingstemperatuur voor de behaalde energiebesparing: hoe erg is beïnvloeding van de onttrekkingstemperatuur eigenlijk?

Effecten op de grondwaterkwaliteit als gevolg van de aanwezigheid van meerdere systemen in een gebied zijn niet onderzocht. Hierbij kan worden gedacht aan cumulatieve effecten op verzilting of het verspreiden van verontreinigingen. Beide aspecten zijn theoretisch logisch voor te stellen, maar zijn nog niet gesimuleerd of gemonitord om te bepalen of deze effecten significant zijn. Het maken van een simulatie zou een eerste logische stap zijn.

Literatuur

Algemene Maatregel van Bestuur Bodemenergie, ontwerpbesluit 5 april 2011.

De Marsily, G. (1986), Quantitative Hydrogeology, groundwater hydrology for engineers. Academic Press: 440pp., New York.

IF Technology, Interferentie Ondergrondse Opslag, Deel 1 – Technische analyse, april 2006.

Iwaco, model voor het bepalen van effecten van stopzetting van grootschalige onttrekkingen in de provincie Zuid-Holland, in opdracht van de Provincie Zuid-Holland, december 1998.

Meer Met Bodemenergie, rapport 2 Literatuuronderzoek. Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Meer Met Bodemenergie, rapport 3/4 Effecten op de ondergrond. Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in de praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Meer Met Bodemenergie, rapport 8, Autonome opwarming. Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012

Meer Met Bodemenergie, rapport 11 Gebiedsgericht grondwaterbeheer. Inpassing van bodemenergie in gebiedsgericht grondwaterbeheer – kansen en aandachtspunten. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Niels van Oostrom, Roelof Stuurman, Gualbert Oude Essink, David Rodriguez Aguilera, Evaluatie monitoringsvoorschriften WKO van de provincie Flevoland, for: Provincie Flevoland, Deltares-rapport, 2008-U-R0885/A, September 2008.

Roelofsen, F., Goorden, N. et al. 2008. Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht), Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft - Technisch rapport, Deltares rapport 2008-U-R1084/A, 196 p.

R. Caljé, Future use of Aquifer Thermal Energy Storage below the historic centre of Amsterdam, afstudeerrapport TU Delft, januari 2010.

Roelofsen, F., Goorden, N. et al. 2008. Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht), Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft - Technisch rapport, Deltares rapport 2008-U-R1084/A, 196 p.

SKB, Arcadis, ministerie van I&M,, TTE, Witteveen en Bos, Tauw en Agentschap NL, Handreiking masterplannen, 22 oktober 2011.

Bijlage I

Overzicht van WKO-systemen in Den Haag

Hieronder staat de lijst van WKO-systemen in Den Haag die onttrekken en infiltreren in het eerste watervoerende pakket. In een (duidelijk vermeld) deel van de berekeningen is gerekend met alleen de systemen t/m 2003. De debieten zijn 2/3^{de} deel van het vergunningdebit.

Project	Temp	Vergunningjaar	m ³ /seizoen
KB-BUZA	K	1996	133.333
KB-BUZA	W	1996	133.333
Paleis_v_Justitie	K	1996	100.000
Paleis_v_Justitie	K	1996	100.000
Paleis_v_Justitie	K	1996	100.000
Paleis_v_Justitie	W	1996	100.000
Paleis_v_Justitie	W	1996	100.000
Paleis_v_Justitie	W	1996	100.000
VROM/Resident	K	1996	103.333
VROM/Resident	K	1996	103.333
VROM/Resident	K	1996	103.333
VROM/Resident	K	1996	103.333
VROM/Resident	K	1996	103.333
VROM/Resident	W	1996	103.333
VROM/Resident	W	1996	103.333
VROM/Resident	W	1996	103.333
VROM/Resident	W	1996	103.333
VROM/Resident	W	1996	103.333
VROM/Resident	W	1996	103.333
Provinciehuys	K	1997	100.000
Provinciehuys	K	1997	100.000
Provinciehuys	W	1997	100.000
Provinciehuys	W	1997	100.000
Siemens fase II	K	1998	36.667
Siemens fase II	W	1998	36.667
Hoofddirectie RWS	K	2000	96.000
Hoofddirectie RWS	W	2000	96.000
Siemens fase III	K	2000	2.500
Siemens fase III	W	2000	2.500
Nieuwspoot	K	2002	6.067
Nieuwspoot	W	2002	6.067
Prhof K1	K	2002	133.333
Prhof K2	K	2002	133.333
Prhof K3	K	2002	133.333
Prhof W1	W	2002	133.333
Prhof W2	W	2002	133.333
Prhof W3	W	2002	133.333
ING Haagse Poort K1	K	2003	130.000
ING Haagse Poort K2	K	2003	130.000
ING Haagse Poort W1	W	2003	130.000
ING Haagse Poort W2	W	2003	130.000
Min_v_LNV	K	2004	136.778
Min_v_LNV	K	2004	136.778
Min_v_LNV	K	2004	136.778

Project	Temp	Vergunningjaar	m³/seizoen
Min_v_LNV	W	2004	136.778
Min_v_LNV	W	2004	136.778
Min_v_LNV	W	2004	136.778
Raad van State	K	2005	55.833
Raad van State	W	2005	55.833
Spuimarkt	K	2005	260.000
Spuimarkt	W	2005	260.000
Min_v_Financiën	K	2006	250.000
Min_v_Financiën	W	2006	250.000
New Babylon	K	2006	109.333
New Babylon	K	2006	109.333
New Babylon	K	2006	109.333
New Babylon	W	2006	109.333
New Babylon	W	2006	109.333
New Babylon	W	2006	109.333
Jubi Complex	K	2007	133.333
Jubi Complex	K	2007	133.333
Jubi Complex	K	2007	133.333
Jubi Complex	W	2007	100.000
Jubi Complex	W	2007	100.000
Jubi Complex	W	2007	100.000
Jubi Complex	W	2007	100.000
Min_v_Defensie	K	2007	173.333
Min_v_Defensie	W	2007	173.333
Ministerie van EZ	K	2007	146.667
Ministerie van EZ	W	2007	146.667
Stadhuis	K	2007	64.444
Stadhuis	K	2007	64.444
Stadhuis	K	2007	64.444
Stadhuis	W	2007	48.333
Stadhuis	W	2007	48.333
Stadhuis	W	2007	48.333
Stadhuis	W	2007	48.333

Bijlage II Modelaannames grondwatermodel

Het model dat gebruikt is voor de berekeningen van de grondwaterstroming in Den Haag is een uitsnede van het regionale grondwatermodel dat gebruikt is om de effecten van een mogelijke stopzetting van de grondwateronttrekking van DSM-Gist te onderzoeken. Voor een beschrijving van dit model wordt verwezen naar de technische rapportage van het Delfland-model.

De uitsnede bestrijkt een gebied van 4,4 bij 5,8 km rondom het centrum van Den Haag. De grid-grootte van de cellen is 25 bij 25 meter. De bovenste 16 modellagen zijn gebruikt. De filters zijn allen geplaatst in modellaag 8. De figuren in dit rapport laten het beeld zien van modellaag 8.

Er is gerekend met de volgende parameters voor de thermische processen in de ondergrond:

- Porositeit is 0,35
- Thermische geleidbaarheid is 2,3 W/mK
- Retardatiefactor is 2

Beschrijving van thermische processen in de ondergrond

Warmte wordt getransporteerd door poreus materiaal door zowel geleiding, convectie en dispersie. Geleiding treedt zelfs op in stilstaand water. Het wordt bepaald door de thermische geleidbaarheid van de geologische formaties en het grondwater. Warmtetransport treedt altijd op van warmer water naar kouder water. De vergelijking die de relatie tussen de warmteflux door geleiding (H_c) en de temperatuurgradiënt (∇T) beschrijft is de wet van Fourier:

$$H_c = -\lambda_{bulk} \nabla T \quad (1)$$

met λ_{bulk} de bulk thermische geleidbaarheid (Energie/Tijd/Lengte/Temperatuur). De bulk thermische geleidbaarheid wordt uitgedrukt als

$$\lambda_{bulk} = \lambda_w \theta + \lambda_s (1 - \theta) \quad (2)$$

met

- λ_w de thermische geleidbaarheid van water [$\text{ML}^2\text{T}^{-2} \text{T}^{-1}\text{L}^{-1} \text{°C}^{-1}$],
- λ_s de thermische geleidbaarheid van het bodemmateriaal [$\text{ML}^2\text{T}^{-2} \text{T}^{-1}\text{L}^{-1} \text{°C}^{-1}$],
- θ de effectieve porositeit [-],

Convectie treedt alleen op in bewegend grondwater. Het is de warmte die meegenomen wordt door het stromende grondwater. In de meeste systemen is convectie groter dan de geleiding. De convectieve warmte flux (H_a) kan worden beschreven door

$$H_a = q \rho_w c_w T \quad (3)$$

met

q specifiek debiet [LT^{-1}],

ρ_w dichtheid van water [ML^{-3}]

c_w specifieke warmtecapaciteit van water [$\text{L}^2\text{T}^{-2}\text{C}^{-1}$].

Thermische dispersie is een schaalafhankelijk transportproces als gevolg van heterogeniteit van de ondergrond. De Marsily (1986) stelt dat de thermische dispersie en de hydrodynamische dispersie gelijk kunnen zijn. De dispersieve warmte flux (H_d) kan beschreven worden door (H_d)

$$H_d = -\rho_w c_w \alpha q \nabla T \quad (4)$$

Met α de thermische dispersiviteit [L].

Met inachtneming van mixen door infiltratie en onttrekking en onder behoud van energiebalans, de partiële differentiaalvergelijking voor warmtetransport in poreuze materialen is

$$(\rho c)_{bulk} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[(\rho_w c_w \alpha q + \lambda_{bulk}) \nabla T \right] - \rho_w c_w \nabla q T - \rho_w c_w q_s T_s \quad (5)$$

retardatie dispersie geleiding convectie mixen

met

q_s infiltratie of onttrekkingshoeveelheid [T^{-1}] van water met een dichtheid ρ_w en een specifieke warmtecapaciteit c_w ,

T_s brontemperatuur [$^{\circ}\text{C}$].

Hier, $(\rho c)_{bulk}$ wordt bepaald door

$$(\rho c)_{bulk} = \rho_w c_w \theta + \rho_s c_s (1 - \theta) \quad (6)$$

met

ρ_s dichtheid van het bodemmateriaal (de massa van de vaste bodemdeeltjes gedeeld door het volume van het bodemmateriaal) [ML^{-3}],

ρ_w dichtheid van water [ML^{-3}],

Elk deel van de vergelijking (5) is onder de vergelijking gelabeld met het betreffende transportmechanisme zoals die eerder uitgelegd zijn. De linkerzijde van vergelijking (5) komt voort uit het feit dat warmte uitgewisseld wordt tussen zowel met vloeistof gevulde poriën als de geologische formatie en wordt om die reden vertraagd ten opzichte van de stroomsnelheid van het water. Dit verschijnsel wordt retardatie genoemd. Vergelijking (5) kan worden versimpeld tot

$$\left(1 + \frac{\rho_s c_s (1 - \theta)}{\rho_w c_w \theta} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[\left(\frac{\lambda_{bulk}}{\rho_w c_w \theta} + \alpha \nu \right) \nabla T \right] - \nabla (\nu T) - \frac{q_s}{\theta} T_s \quad (7)$$

waarbij ν [LT^{-1}] is de watersnelheid welke bepaald wordt door het specifiek debiet (q) te delen door de porositeit (θ). Deze vergelijking kan nog verder gereduceerd worden tot

$$R_T \frac{\partial(\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \cdot \nabla T) - \nabla(\nu T) - \frac{q_s}{\theta} T_s \quad (8)$$

De thermische retardatiefactor R_T [-] en de thermische dispersie coefficient D_T [L^2T^{-1}] worden bepaald door

$$R_T = \left(1 + \frac{1-\theta}{\theta} \frac{\rho_s}{\rho_w} \frac{c_s}{c_w} \right) \quad (9)$$

en,

$$D_T = D_m + \alpha \nu \quad (10)$$

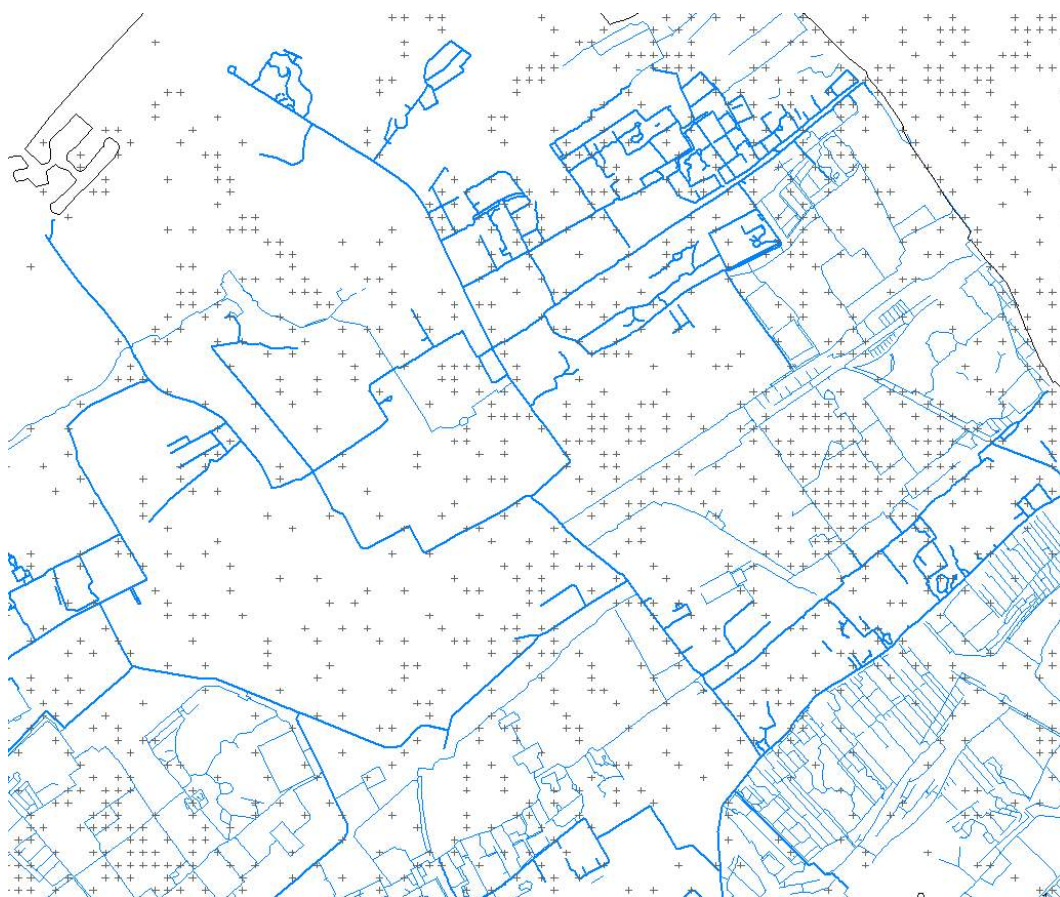
De thermische moleculaire diffusie coëfficiënt D_m [L^2T^{-1}] wordt bepaald door

$$D_m = \frac{\lambda_{bulk}}{\theta \rho_w c_w} \quad (11)$$

Vergelijking (8) heeft eenzelfde structuur als de vergelijking die massatransport in poreuze materialen beschrijft. Dit betekent dat de modelcodes die ontwikkeld zijn voor massatransport (bijv. MT3D) gebruikt kan worden om warmtetransport in poreuze media te simuleren.

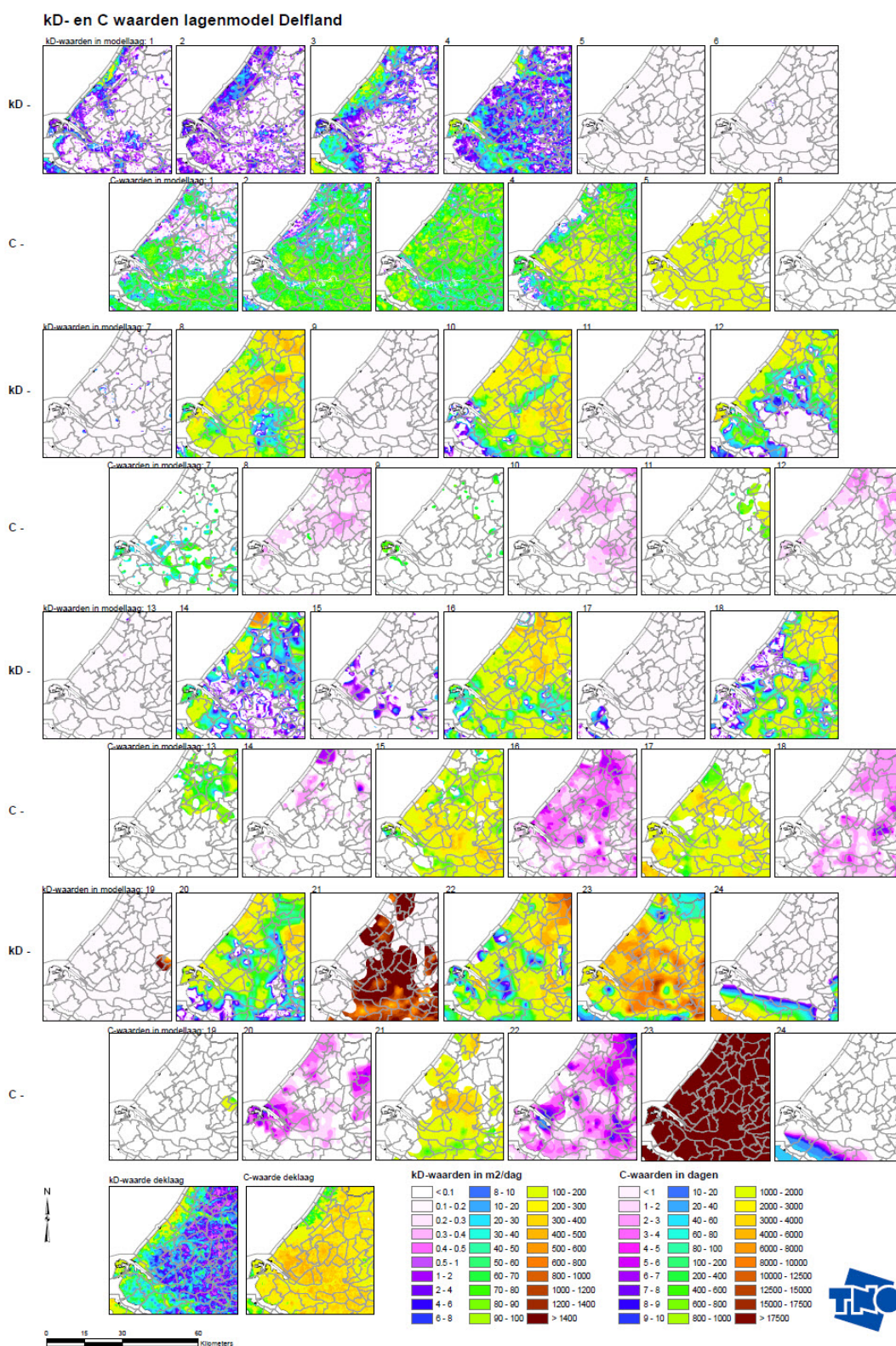
Vergelijking opbouw deklaag Delflandmodel met andere modellen

Het Delfland-model is een regionaal model dat gebaseerd is op boringen uit het verleden. In het Geotop-project zijn de boringen vertaald naar hydrologische parameters. In onderstaand figuur staat weergegeven welke boringen hiervoor gebruikt zijn. Overigens moet vermeld worden dat er boringen tussen zitten die niet diep genoeg reiken om informatie over de waterscheidende laag tussen het eerste watervoerend pakket en de toplaag te bieden.



figuur B.1 Gebruikte boringen voor het Delfland-model in het centrum van Den Haag

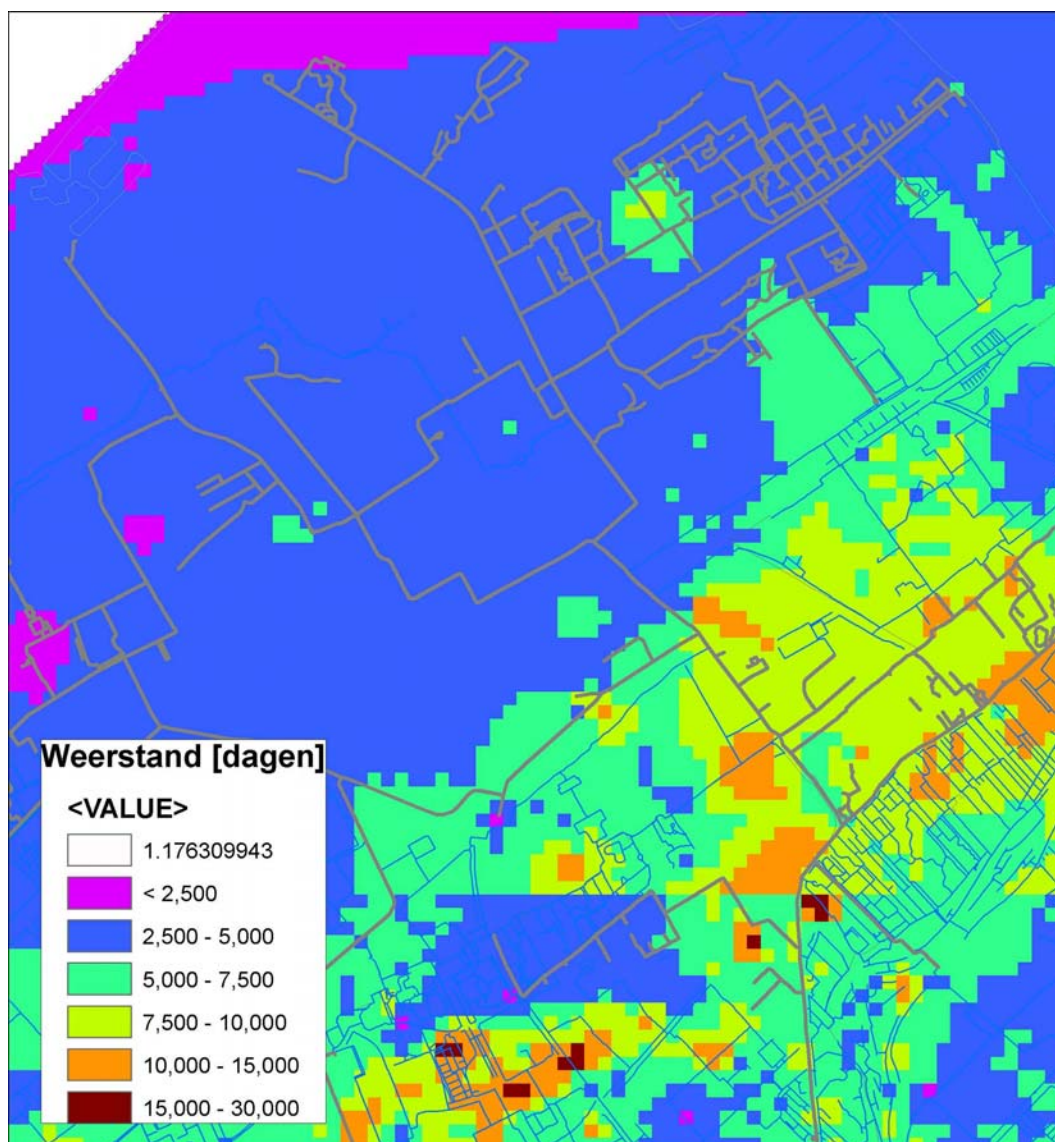
De vertaling van de boringen en andere gegevens heeft geresulteerd in onderstaande laagopbouw van het model.



figuur B.2

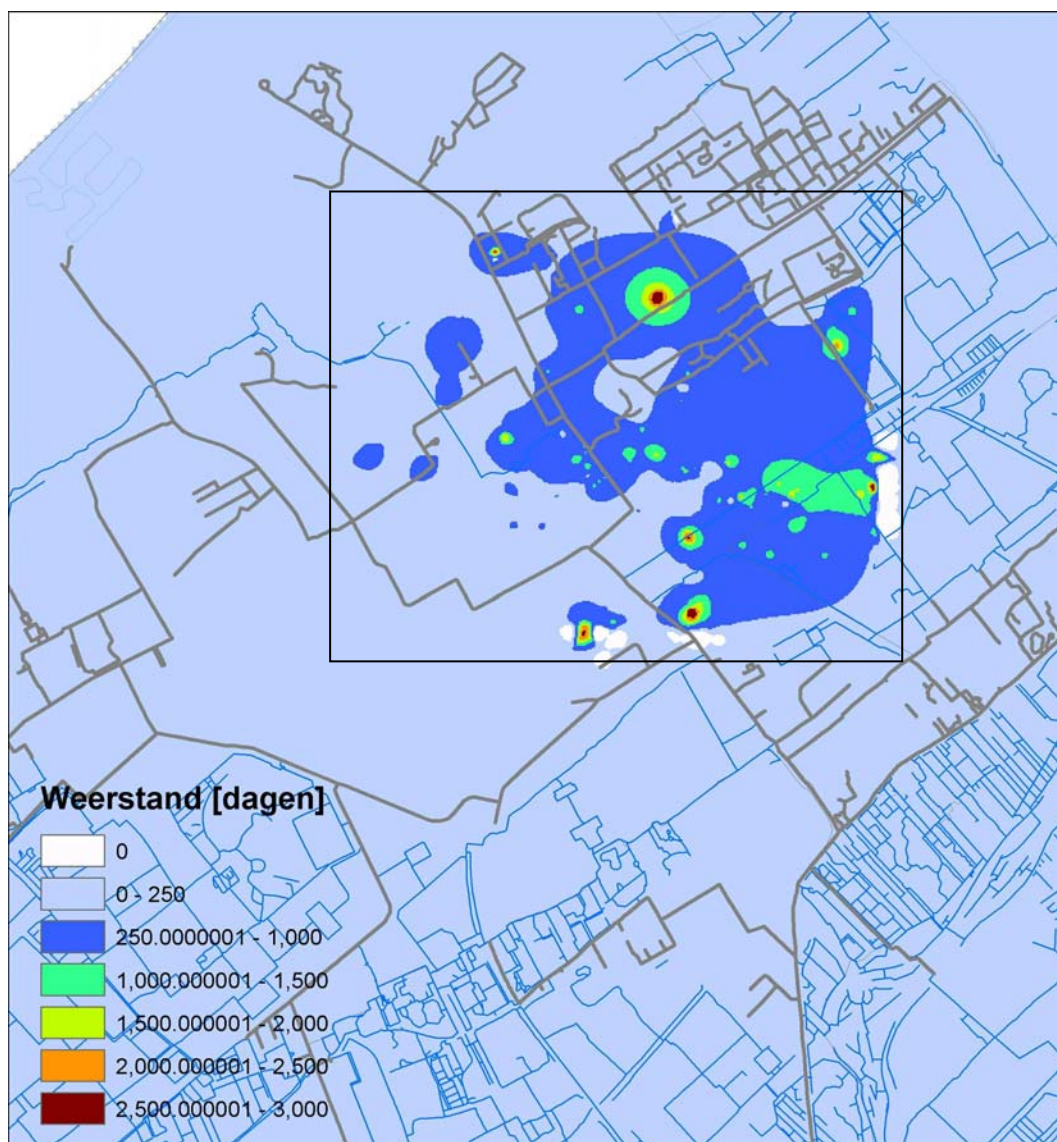
Overzicht van de weerstand en doorlatendheid van de modellagen in het Delflandmodel. De lagen 1 t/m 8 worden beschouwd als het topsysteem

Optelling van de weerstand in de modellen die de waterscheidende laag representeren tussen het eerste watervoerende pakket en het freatische grondwater, levert onderstaand figuur met de weerstand op.



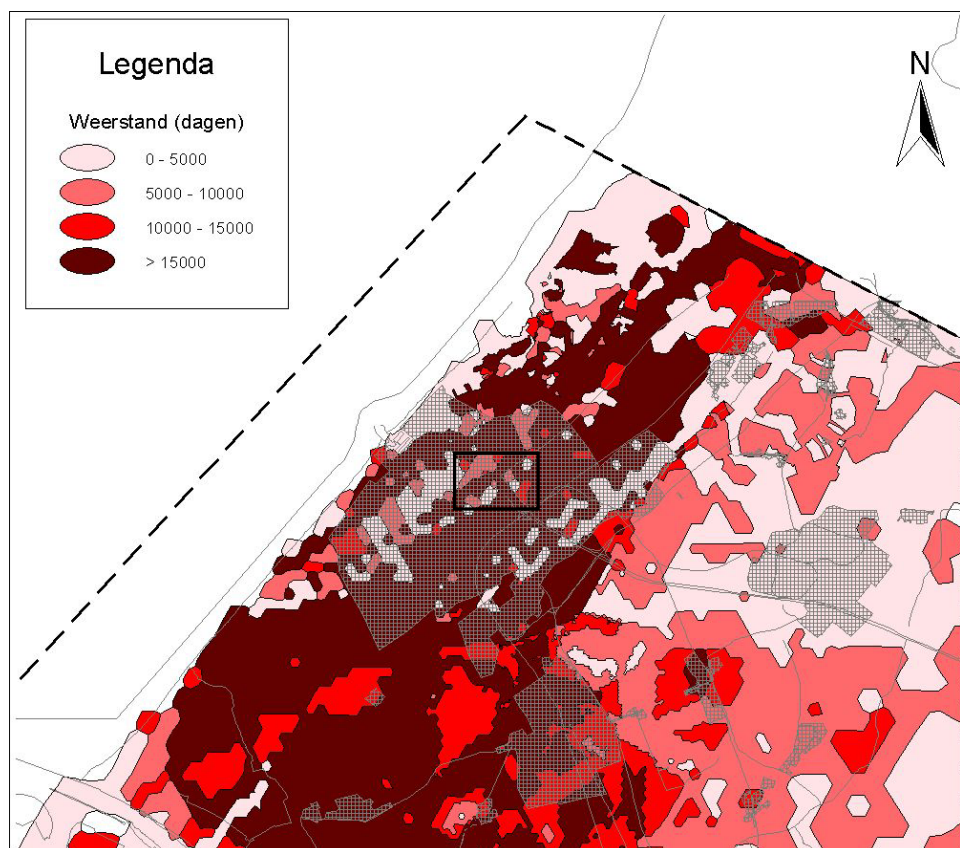
figuur B.3 Weerstand van de eerste waterscheidende laag in het Delfland model.

Van het lokale model dat gebruikt is voor de effectstudies van enkele WKO-systemen, is de weerstand van de waterscheidende laag ook berekend op basis van de dikte van de in boorbeschrijvingen aangetroffen klei- en veenlaagjes. Hierbij zijn alleen gegevens gebruikt uit het centrum van Den Haag. In onderstaand figuur staat deze weergegeven.



figuur B.4 Weerstand van de eerste waterscheidende laag in het lokale model voor de effectstudies. Het model bestrijkt het gebied binnen het kader

Ter vergelijking is ook de weerstand van de deklaag in een ouder regionaal model van Iwaco hier opgenomen.



figuur B.5 Weerstand van de deklaag in het regionale model van Iwaco voor het bepalen van effecten van het stopzetten van grootschalige onttrekkingen in de provincie Zuid-Holland

Er blijken tussen de modellen grote verschillen te bestaan in de weerstand van de waterscheidende laag. In het Delflandmodel ligt deze in de ordegrootte van 2500 dagen en in het effectstudiemodel in de ordegrootte 250-1000 dagen.

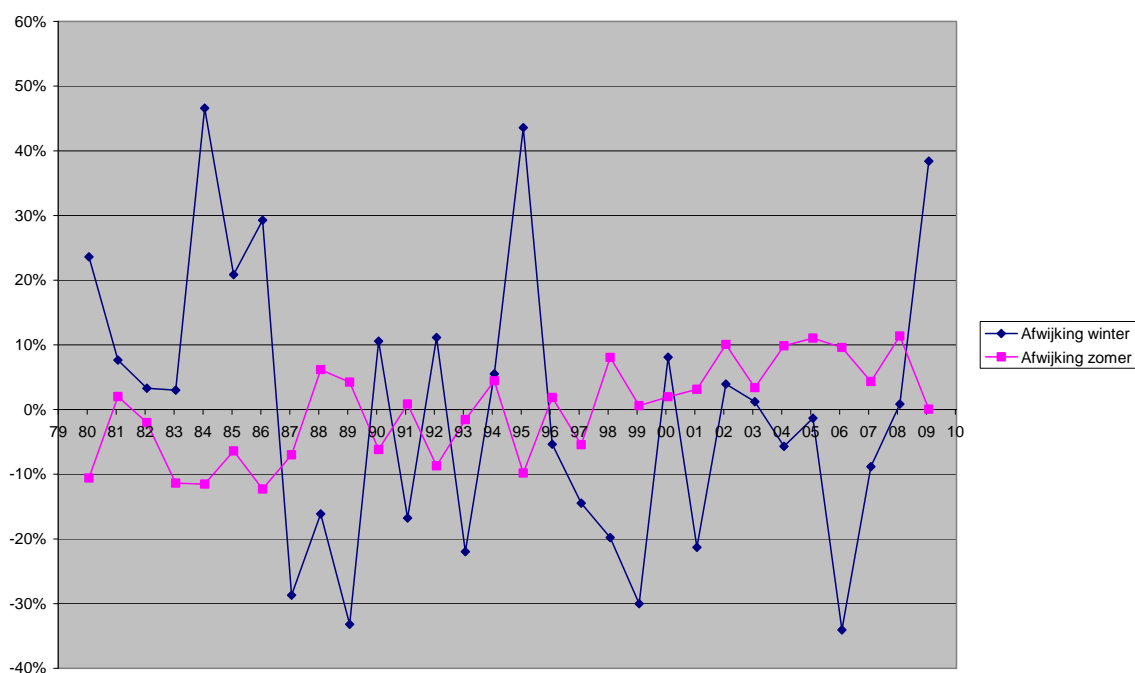
De verschillen kunnen mogelijk verklaard worden vanuit verschillen in doelstellingen van de modellen. Het doel van het Delflandmodel is om een zo goed mogelijke inschatting van de lokaal gemiddelde omstandigheden. Dit is gedaan op basis van beschikbare boorbeschrijvingen. Het doel van het effectstudiemodel is om op lokale schaal de mogelijke gevolgen van een WKO te laten zien, waarbij vanuit voorzichtigheid juist met lage weerstanden gerekend wordt om maximale potentiële effecten inzichtelijk te maken. Dit model is gebaseerd op boorbeschrijvingen en een pompproef nabij een van de WKO's.

Bijlage III

Fluctuaties bij sommen met variabel debiet

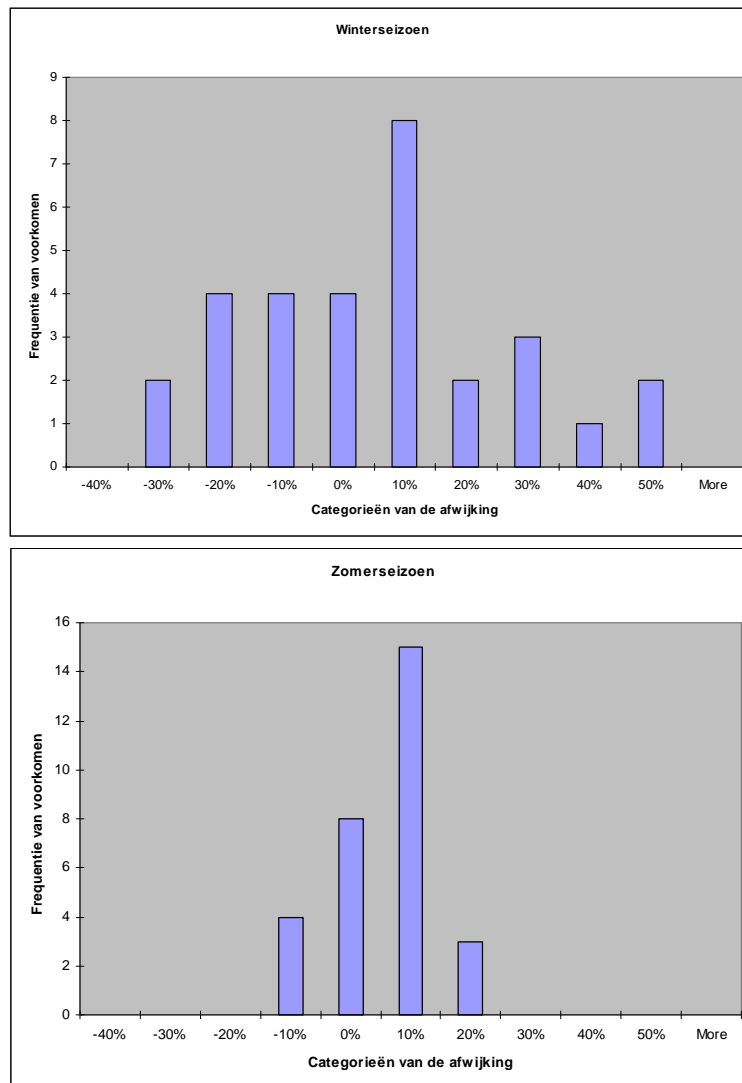
Om te kunnen rekenen met een situatie waarin de debieten fluctueren per seizoen is het nodig om een enigszins realistische aanname te maken van de fluctuatie tussen de jaren in de energiebalans. Aangezien de temperatuur volgens de vaste patronen bepaald wordt in de simulaties, zal de fluctuatie in de energiebalans rechtstreeks te vertalen zijn richting de verplaatste hoeveelheden water in de seizoenen.

Van 1 systeem is een lange reeks van de afgelopen 30 jaar bekend waarbij dit systeem over deze periode een (vrijwel) sluitende energiebalans had. Uit deze reeks blijkt dit systeem een verschil in energiebalans over 30 jaar van 1% te hebben. In onderstaande grafiek is de afwijking van de hoeveelheid verplaatste energie per seizoen ten opzichte van het gemiddelde weergegeven.



figuur C.1 Verloop van de onttrokken energiehoeveelheden per kalenderjaar (koude is hier ook positief gewaardeerd). De waarden zijn per jaar genoteerd, dus het winterseizoen is feitelijk gesplitst over 2 “halve” winters

Van deze afwijkingen kunnen 2 histogrammen gemaakt worden van de mate van afwijking ten opzichte van het gemiddelde voor de winter- en zomerperiode.



figuur C.2 Histogrammen van het voorkomen van een afwijking in een categorie met stappen van 10%. Bijvoorbeeld: de 0%-categorie geeft een afwijking weer van tussen de -10% en 0%. In het zomerseizoen zijn er dus 15 jaren waarin de afwijking ten opzichte van het gemiddelde 0 tot +10% bedroeg

Wat hierbij opvalt is dat de spreiding van de afwijkingen in het winterseizoen aanmerkelijk groter is dan die van het zomerseizoen (en dat ondanks dat het winterseizoen feitelijk verdeeld is over 2 jaren).

Het doel is om te komen tot een 10 jarige reeks die doorgerekend kan worden met het grondwatermodel. Tevens wordt gestreefd naar een reeks die uiteindelijk na 10 jaar een volumebalans zal kennen. Dit om de vergelijkbaarheid met de uitkomsten van de omstandigheden met een constant debiet te waarborgen. Uit de berekeningen met de constante debieten blijkt ook dat met name de eerste 2 jaar het systeem nog moet inregelen. In de synthetische reeks hebben de eerste 2 jaar daarom het constante debiet volgens ontwerp.

Kortom, de bovenstaande gegevens moeten gefit worden in een reeks die voldoet aan de volgende kenmerken:

- 2 inloopjaren met het gemiddelde debiet (afwijking 0%)
- 10 jarige reeks (dus 8 jaar met fluctuaties)
- Na 10 jaar cumulatief geen afwijking ten opzichte van het gemiddelde en geen onbalans

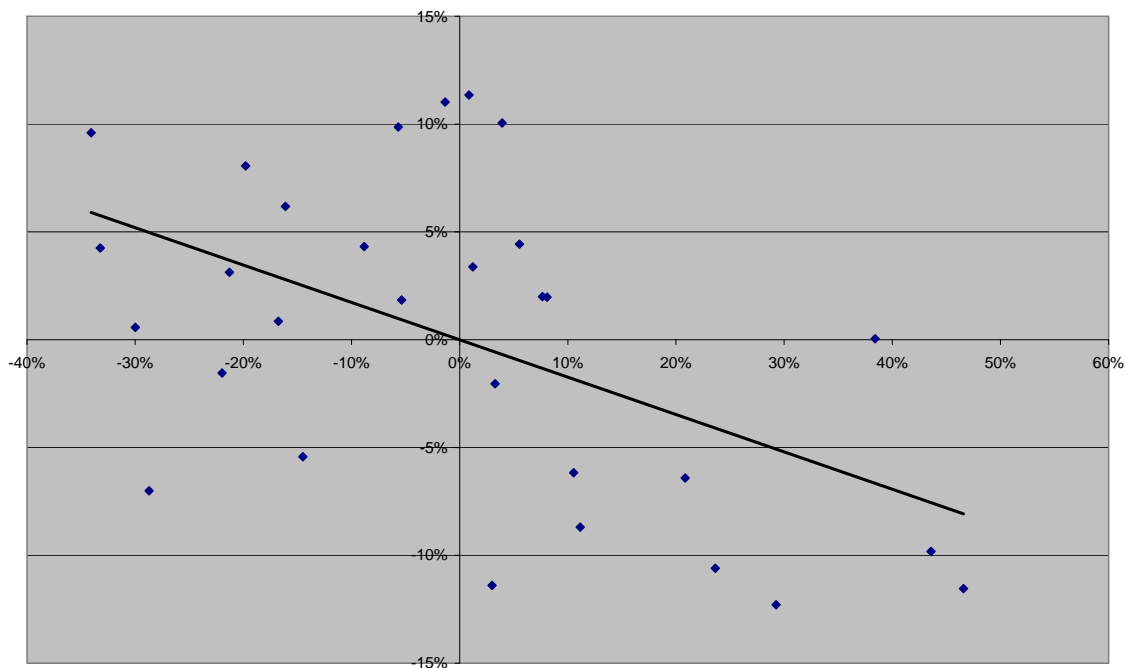
Voor het rekenen is uitgegaan van het gemiddelde van iedere categorie uit de bovenstaande histogrammen. De 30-jaarreeks is teruggebracht tot 8 jaar. Doordat er alleen gerekend kan worden met hele jaren (en geen veelvouden van $30/8^{ste}$) ontstaan er onbalansen in zomer en winter. Om dit te voorkomen zijn de rekenwaarden (de 0%-categorie uit bovenstaande histogrammen beslaat de jaren met een afwijking tussen -10% en 0% en krijgt daarom de rekenwaarde -5%) enigszins structureel verhoogd of verlaagd om op een totaalafwijking van 0 uit te komen. In de zomerperiode is de rekenwaarde daarvoor met 1,25% verlaagd en in de winterperiode met 3,75% verhoogd.

In onderstaande tabel is weergegeven hoe vaak een bepaalde afwijking ten opzichte van het langjarige gemiddelde voorkomt.

tabel C.1 Berekend aantal jaren waarin een vastgestelde afwijking ten opzichte van het langjarig gemiddelde op zal treden in de synthetische reeks

Zomer		
Aantal jaren	Vast te stellen afwijking	
	1	-16%
	2	-6%
	4	4%
	1	14%
Winter		
Aantal jaren	Vast te stellen afwijking	
	1	-31,25%
	1	-21,25%
	1	-11,25%
	1	-1,25%
	2	8,75%
	1	18,75%
	1	28,75%

In onderstaand figuur is weergegeven wat de correlatie is tussen een afwijking in de zomer (verticale as) en winter (horizontale as) per jaar. Uit dit figuur blijkt dat een relatief kleine waterverplaatsing in de zomer vaak gepaard gaat met een relatief grote waterverplaatsing in de winter en omgekeerd. Uit grafiek C.1 blijkt dat het ook niet onwaarschijnlijk is dat afwijkingen dezelfde kant op, elkaar kunnen herhalen.

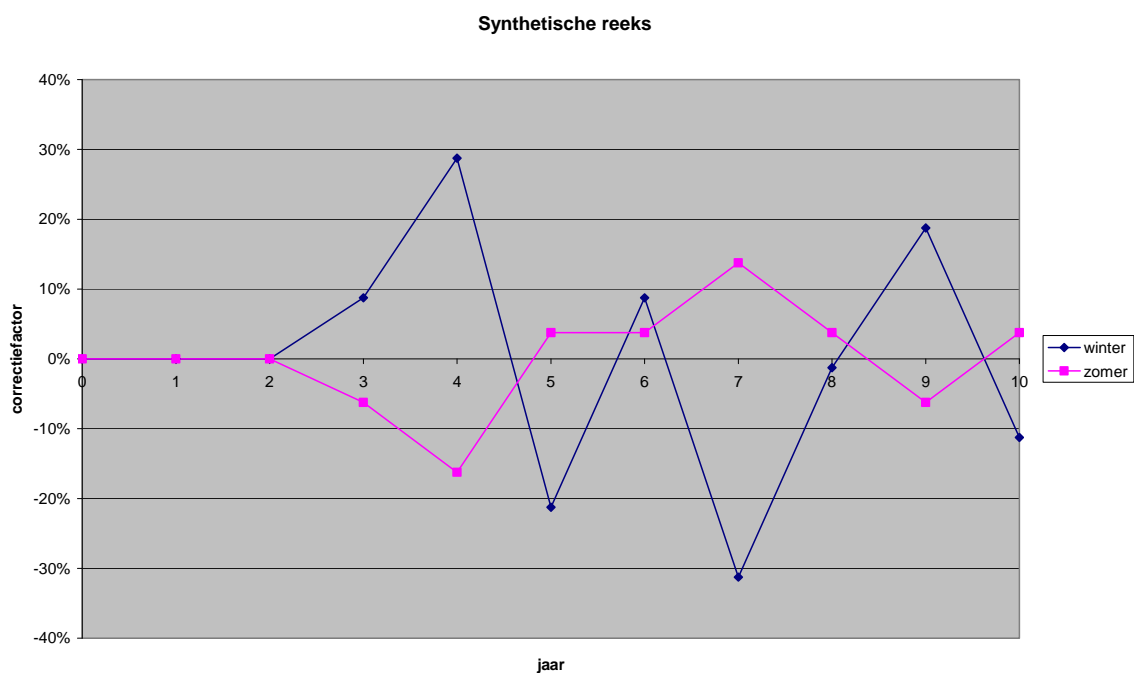


figuur C.3 Relatie tussen de afwijking van de waterverplaatsing per seizoen ten opzichte van de gemiddelde waterverplaatsing per seizoen in de zomer (verticale as) en de winter (horizontale as). $R^2=0,264$

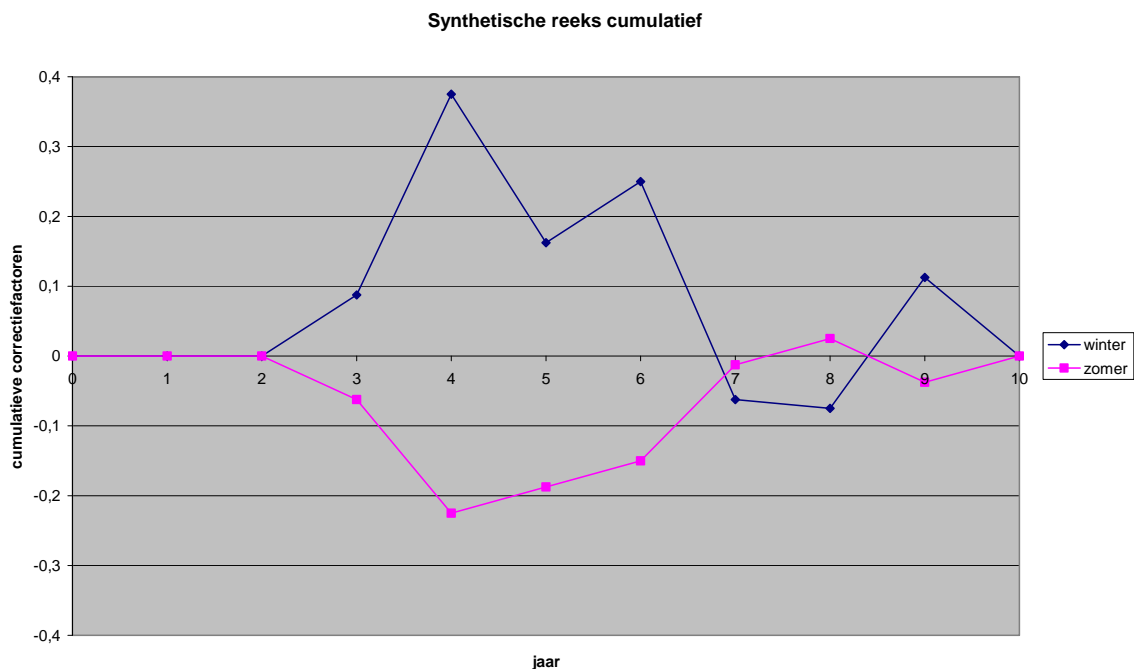
Op basis van bovenstaande is gekozen voor de onderstaande reeks met afwijkingen ten opzichte van het langjarig gemiddelde. In de figuur daaronder staat de reeks grafisch weergegeven. In het laatste figuur staat de afwijking cumulatief weergegeven.

tabel C.2 Correctiefactoren per jaar op het ontwerpdebiet voor de synthetische reeks. Hiermee wordt na 10 jaar bij beide bronnen evenveel water verplaatst als in het scenario met de constante debieten

jaar	winter	zomer
1	0%	0%
2	0%	0%
3	8,75%	-6,25%
4	28,75%	-16,25%
5	-21,25%	3,75%
6	8,75%	3,75%
7	-31,25%	13,75%
8	-1,25%	3,75%
9	18,75%	-6,25%
10	-11,25%	3,75%



figuur C.4 Correctiefactoren per jaar op het ontwerpdebiet voor de synthetische reeks

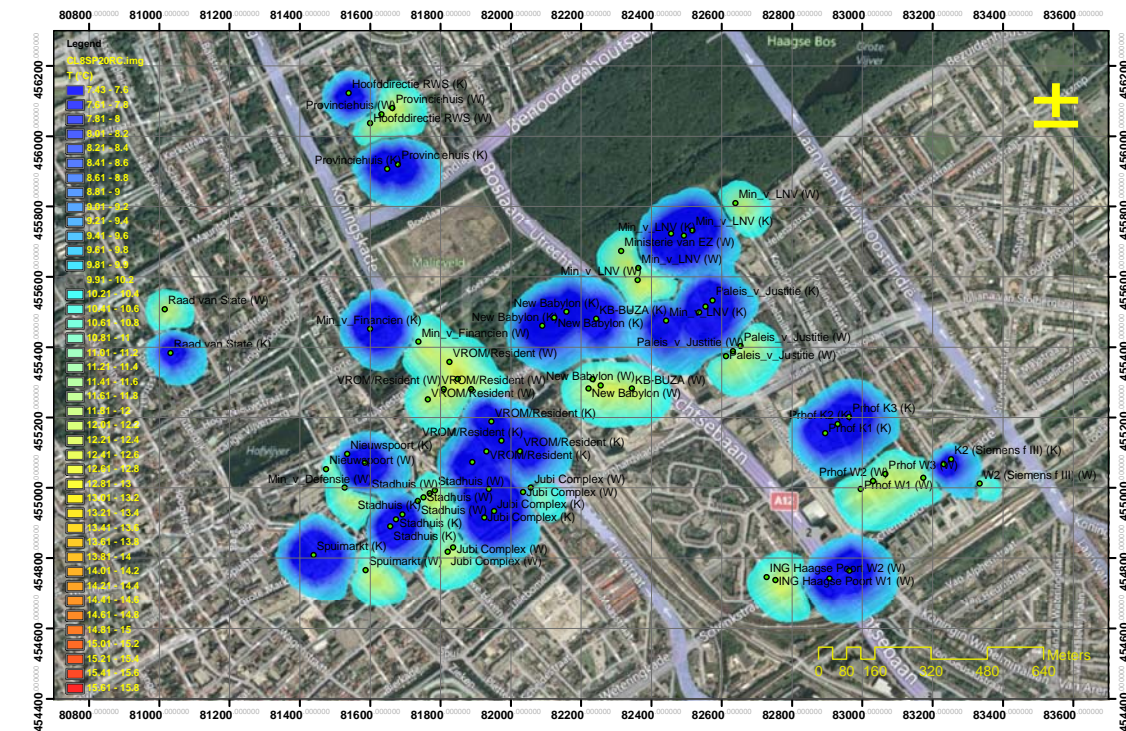


figuur C5 Cumulatieve afwijking van het langjarig gemiddelde bij toepassing van de correctiefactoren

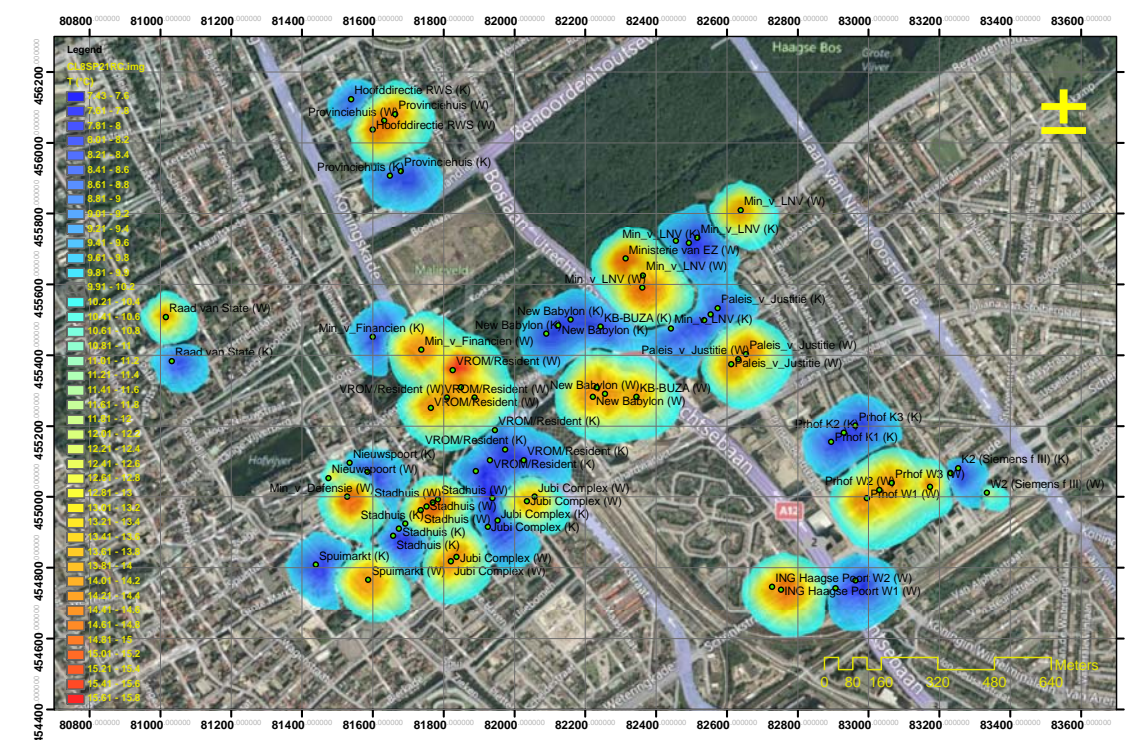
Bijlage IV

Figuren temperatuurverdeling in de ondergrond

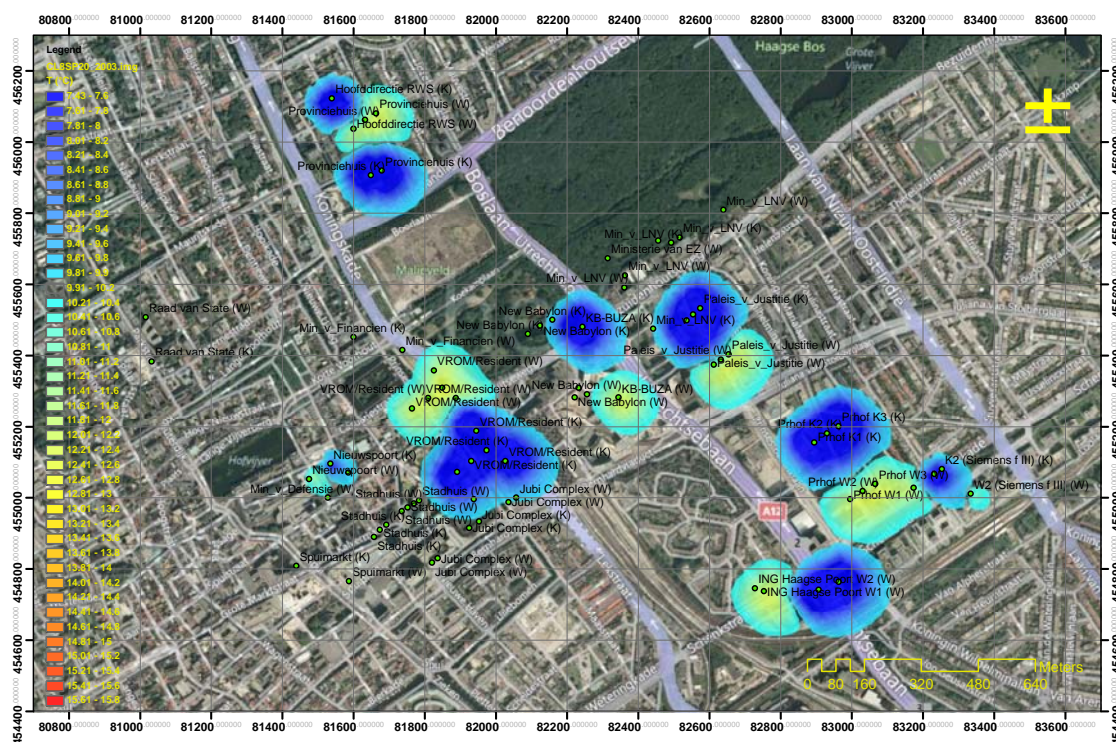
In deze bijlage zijn de overige figuren van de temperatuurverdeling in het eerste watervoerend pakket na 10 jaar weergegeven.



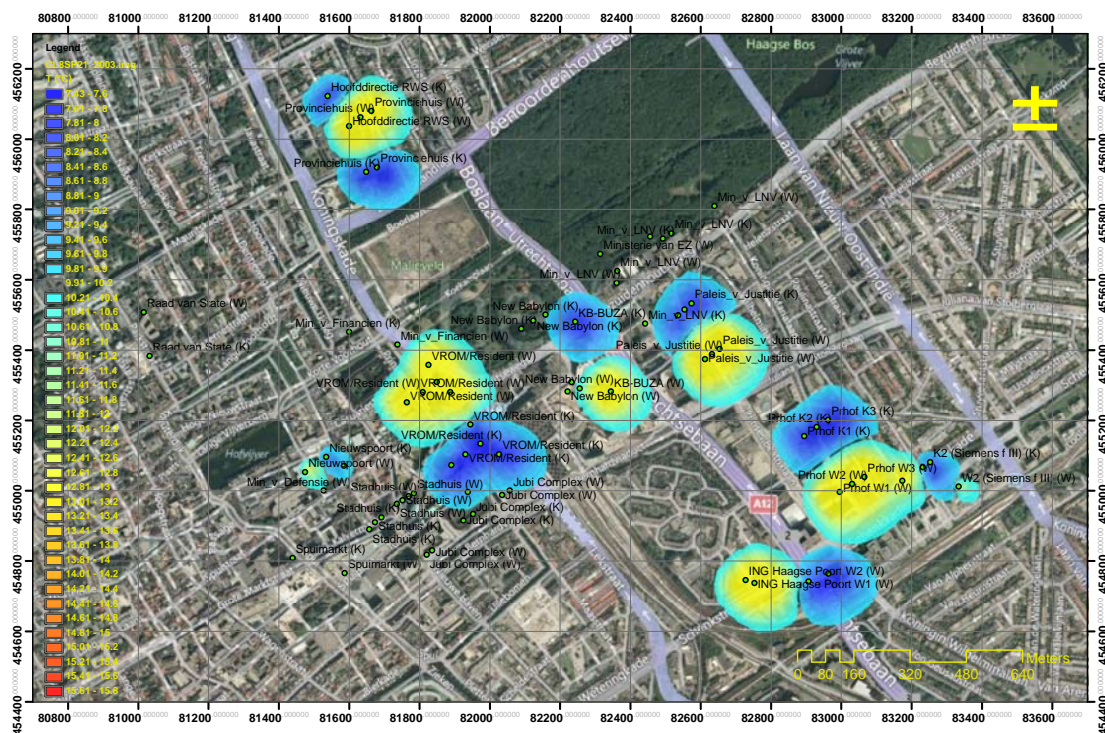
figuur D.1 Temperatuurverdeling bij alle systemen met injectietemperatuur +6/-6 graden einde winter



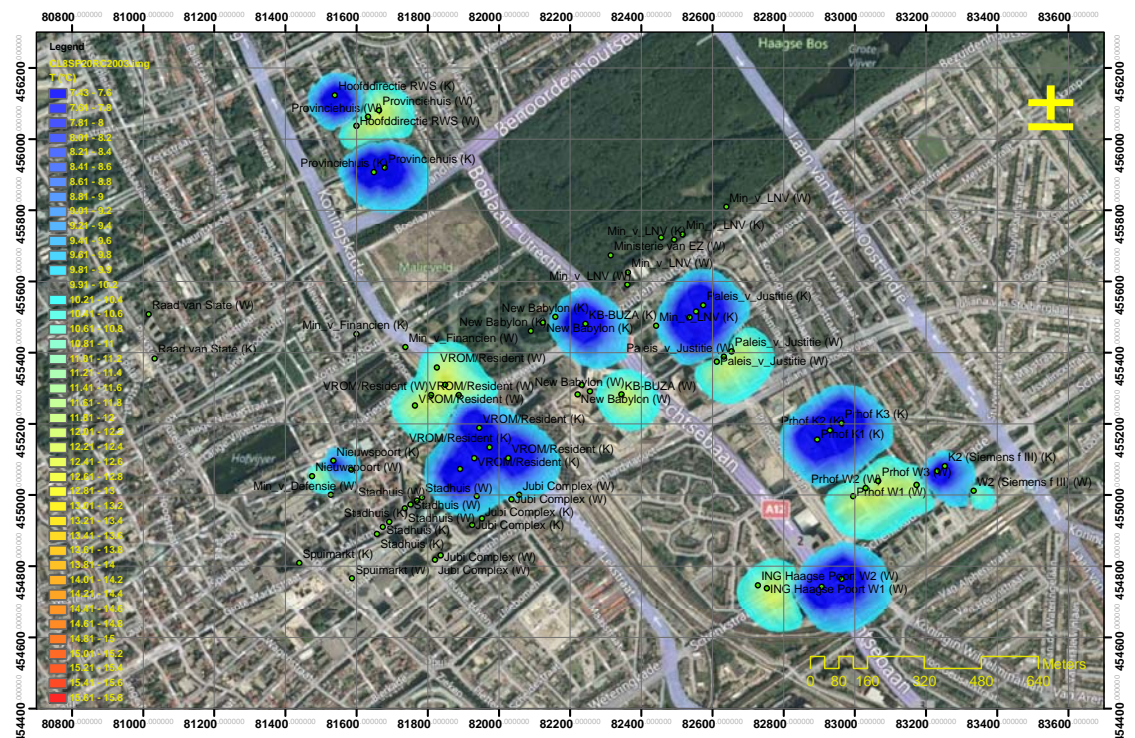
figuurD.2 Temperatuurverdeling bij alle systemen met injectietemperatuur +6/-6 graden einde zomer



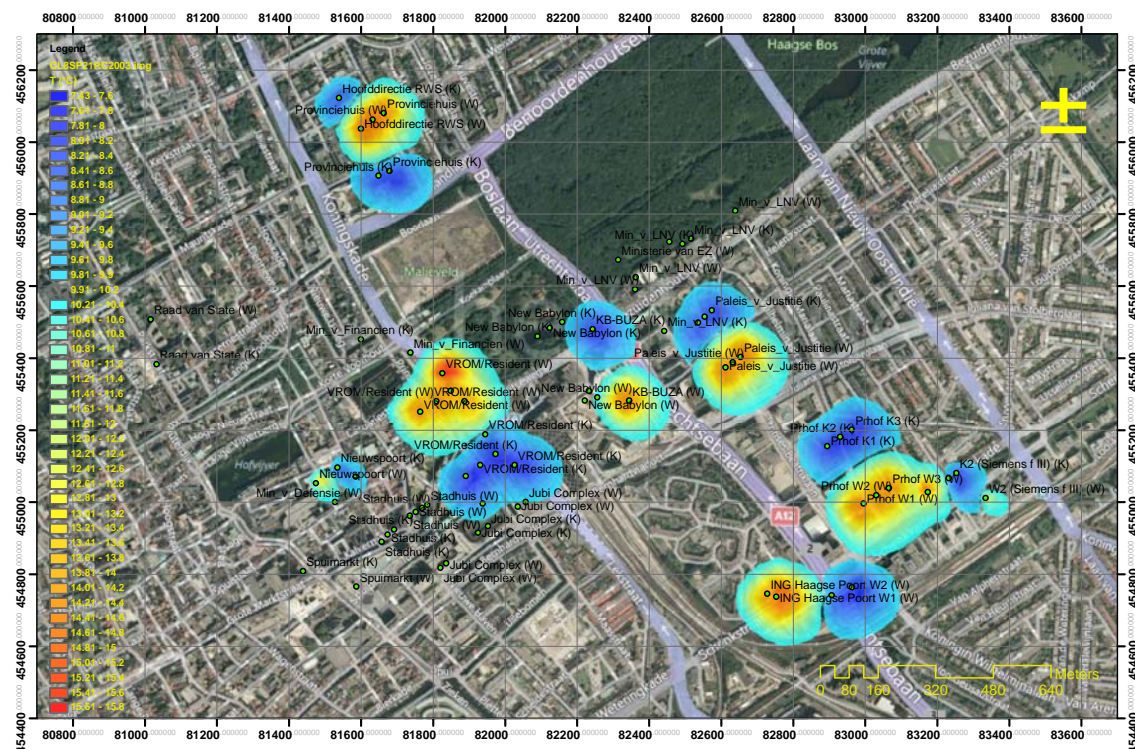
figuur D.3 Temperatuurverdeling bij de systemen t/m 2003 met constante injectietemperatuur einde winter



figuur D.4 Temperatuurverdeling bij de systemen t/m 2003 met constante injectietemperatuur einde zomer



figuur D.5 Temperatuurverdeling bij de systemen t/m 2003 met injectietemperatuur +6/-6 graden einde winter



figuur D.6 Temperatuurverdeling bij de systemen t/m 2003 met injectietemperatuur +6/-6 graden einde zomer

Deelnemende bedrijven en instanties

Agentschap NL / Bodem+

Arcadis

Bioclear

Brabant Water - Hydreco

Deltares

Eneco

Essent

Gemeente Almelo

Gemeente Amersfoort

Gemeente Apeldoorn

Gemeente Den Bosch

Gemeente Deventer

Gemeente Haarlem

Gemeente Hengelo

Gemeente Tilburg

Gemeente Utrecht

Gemeente Zwolle

Havenbedrijf Rotterdam

IF Technology

Ministerie van Infrastructuur & Milieu

NVOE

Productschap Tuinbouw

Provincie Drenthe

Provincie Flevoland

Provincie Friesland

Provincie Gelderland

Provincie Groningen

Provincie Limburg

Provincie Noord-Brabant

Provincie Noord-Holland

Provincie Overijssel

Provincie Utrecht

Provincie Zeeland

Provincie Zuid-Holland

SBNS

SKB

Vewin

Vitens

Wageningen Universiteit

Waterschap Groot Salland

Waterschap Regge en Dinkel

