

BACHELOR EINDWERK

Ondergrondse waterberging en bodemenergie; conflict of synergie

EVELIEN VAN DEN BREKEL

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT, FACULTEIT CIVIELE TECHNIEK
BEGELEIDER 1: IR. MARTIN BLOEMENDAL
BEGELEIDER 2: DR. IR. FRANS VAN DE VEN

VOORWOORD

Voor U ligt het eindrapport van het bachelor eindwerk waarin onderzoek wordt gedaan naar de interactie tussen bodemenergie en hemelwater opslag rond het Jaarbeurskwartier te Utrecht. Dit rapport is geschreven in het kader van de afronding van mijn opleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Bodemenergie en hemelwaterinfiltratie worden beide in toenemende mate toegepast, maar over de mogelijkheid om deze op dezelfde locatie toe te passen is nog weinig bekend. Deze probleemstelling is geformuleerd door Ir. Martin Bloemendal en Dr. Ir. Frans van de Ven. Naar aanleiding hiervan ben dit gaan onderzoeken voor het stationsgebied in Utrecht.

In dit voorwoord wil ik graag een bijzonder woord van dank richten aan Ir. Martin Bloemendal voor zijn begeleiding en betrokkenheid gedurende het hele onderzoek. Dr. Ir. Frans van de Ven wil ik bedanken voor zijn frisse kijk en feedback na het tussenrapport als tweede begeleider. Tot slot wil ik graag Marit Linckens, projectleider leefomgeving van de Gemeente Utrecht, bedanken voor het verschaffen van informatie over de case study van het Jaarbeurskwartier te Utrecht.

Ik wens U veel leesplezier toe.

Evelien van den Brekel

Delft, 23 oktober 2017

SAMENVATTING

Dit onderzoek is uitgevoerd om meer inzicht te verkrijgen over de invloed van ondergrondse waterberging (owb) systemen op warmte- koudeopslag (wko) systemen. Meer specifiek is er onderzoek gedaan naar de situatie in Utrecht. In Utrecht zijn meerdere wko-systemen aanwezig en de Gemeente heeft plannen geformuleerd om in de buurt hiervan een plantsoen aan te leggen om hemelwater op te vangen en in de ondergrond te bergen. In deze studie is de invloed van deze owb op de omliggende wko-systemen onderzocht. Bij het bepalen van de invloed van een owb-systeem is zijn de neerslag- en ontwerp dimensies variabel.

Het onderzoek is gestart met de inventarisatie van de bodem in Utrecht. Hierbij is gekeken naar eigenschappen die van belang zijn voor de toepassing van beiden systemen. De bodem in Utrecht is opgebouwd uit twee verschillende typen lagen: de scheidende klei- en veenlagen en de watervoerende zandpakketten (aquifers). De dikte van de eerste scheidende laag is ca. 4 meter en de dikte van de eerste aquifer is ca. 40 meter. Met deze opbouw kan water in de aquifer worden geborgen zonder dat dit voor wateroverlast op het maaiveld (mv) zorgt.

De bodemenergiesystemen rondom het plantsoen betreffen die van de Jaarbeurs en de Rabobank. De omvang van de bron (het volume in de aquifer waar warme of koude wordt opgeslagen) is onderverdeeld in de thermische- en de hydraulische omvang en de vorm is cilindervormig beschouwd. Alle bronnen hebben een filterlengte van 18 meter die begint op 8 meter -mv. De grootte van de type bronnen en de grondwaterstromingsrichting verschillen per seizoen door de warmte- en koude vraag en beschikbaarheid.

Voor de ondergrondse waterberging zijn de KNMI-neerslaggegevens van de Bilt sinds 2000 geanalyseerd en is het gemiddelde neerslag per meteorologisch seizoen bepaald. Het percentage hiervan dat beschikbaar komt voor owb is op basis van drie verschillende scenario's bepaald met als variabelen het verharde oppervlakte en het percentage van de neerslag dat op verhard oppervlakte valt én naar het owb-systeem wordt geleid. Voor iedere scenario is de minimale afstand tussen de owb-bron en de wko-systemen bepaald aan de hand van (1) de hydraulische straal, (2) de zuurstof spreiding en (3) de radiaal afgelegde afstand van het infiltratiewater. De afgelegde afstand van het infiltratiewater is bepaald op de tijd die nodig is voor de bodem om alle zuurstof om te zetten op 25 meter van de put. De grootste waarde van (1), (2) en (3) is maatgevend genomen.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt de hydraulische straal van de owb in geen enkel scenario te overlappen met de wko-bronnen. Dit geldt ook voor de zuurstofspreiding op basis van zowel een lineair- als een exponentieel verband tussen de zuurstofconcentratie en afstand van de owb-put. Afhankelijk van de ontwerpdimensies en het scenario overlapt de radiale afstand afgelegd door het infiltratiewater wel met de wko-bronnen en wordt de installatie van een owb-systeem afgeraden.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Inhoudsopgave	4
1. Introductie	6
1.1. <i>Bodemenergie</i>	6
1.2. <i>Ondergrondse waterberging</i>	7
1.3. <i>Doel onderzoek</i>	7
1.4. <i>Aanpak</i>	8
2. Beschrijving studielocatie te Utrecht	9
2.1. <i>Omschrijving casestudy te Utrecht</i>	9
2.2. <i>Bodemopbouw</i>	10
2.2.1. <i>scheidende lagen</i>	10
2.2.2. <i>Watervoerende pakketten</i>	10
2.3. <i>Grondwater</i>	11
2.3.1. <i>Stijghoogte en stromingsrichting</i>	11
2.3.2. <i>Grondwaterkwaliteit</i>	11
2.4. <i>Bodemgebruik</i>	11
3. Bodemenergiesystemen in Utrecht	12
3.1. <i>typen bodemenergiesystemen</i>	12
3.2. <i>wko-systemen</i>	12
3.3. <i>Thermische en hydraulische straal</i>	14
3.3.1. <i>Oorzaken thermische energieveranderingen</i>	14
3.3.2. <i>Thermische straal wko-systemen in Utrecht</i>	15
3.3.3. <i>Hydraulische straal wko-systemen in Utrecht</i>	16
3.4. <i>Grondwaterstroming bij wko-systemen</i>	18
3.5. <i>grondwaterkwaliteits aspecten</i>	18
3.5.1. <i>Thermische effecten op grondwaterkwaliteit</i>	18
3.5.2. <i>Hydrologische effecten op grondwaterkwaliteit</i>	19
4. Ondergrondse waterberging Utrecht	20
4.1. <i>Kwantitatieve analyse ondergrondse waterberging in Utrecht</i>	20
4.1.1. <i>Infiltratievolume per scenario</i>	20
4.1.2. <i>Hydraulische straal owb per scenario</i>	21
4.2. <i>Kwalitatieve analyse ondergrondse waterberging in Utrecht</i>	21
4.2.1. <i>Zuurstofverloop in de bodem</i>	21
4.3. <i>temperatuur van hemelwater</i>	25
5. Onderlinge interactie WKO en OWB te Utrecht	26
5.1. Resultaten worst-case scenario	26
5.2. Resultaten waarschijnlijke scenario	27
5.3. Resultaten best-case scenario	28

6. Discussie	30
6.1. Discussiepunten ontwerp ondergrondsewaterberging	30
6.2. Alternatieve toepassingen hemelwater verwerking	31
7. Conclusie	32
Referentie	33
Bijlage A: Gegevens onderzoek Herten door Anthonie et al. (2012)	35
Bijlage B: Excel bepaling lineair en exponentieel verband afstand tot de bron en zuurstofconcentratie	36
Bijlage C: Excel bepaling radiaal afgelegde afstand infiltratiewater in Utrecht per tijd	36

1. INTRODUCTIE

De wereld is aan het verstedelijken. En volgens de Verenigde Naties zal dit alleen nog maar toenemen, zij hebben voorspeld dat in 2050 zesenzestig procent van de wereldbevolking in steden leeft (Ritzen, 2016). Grond in stedelijk gebied wordt door deze ontwikkeling kostbaarder, gebouwen worden steeds hoger de lucht in gebouwd en de inrichting van ieder stuk land wordt steeds belangrijker. Door de schaarse ruimte in steden wordt ook steeds meer gekeken naar functies in de bodem zoals, ondergrondse infrastructuur en bouwwerken. De bodem kan ook worden ingezet voor seizoensopslag van warmte en koude en voor het ondergronds bergen van hemelwater. Echter, of deze twee functies tezamen kunnen functioneren is nog onbekend, omdat het effect van menging van verschillende watertypen in de bodem niet bekend is.

In deze studie wordt meer inzicht hierover verkregen voor een locatie bij het stationsgebied in Utrecht. Hier zijn al meerdere bodemenergiesystemen aanwezig in de ondergrond en heeft de gemeente in de omgevingsvisie aangegeven ook ondergrondse waterberging te willen toe passen.

Ter introductie wordt eerst de relevantie en werking van beiden technieken toegelicht. Daarna wordt de casestudy geïntroduceerd.

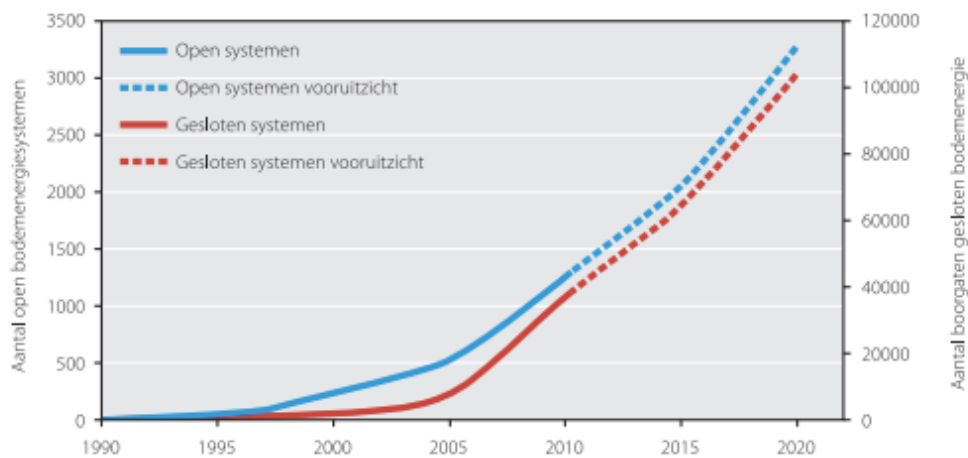
1.1. BODEMENERGIE

In de winter hebben gebouwen energie nodig om te verwarmen en is er veel koude beschikbaar. Maar in de zomer gebruiken we energie om gebouwen te verkoelen en is er warmte over. Wanneer het te veel aan koude in de winter kan worden opgeslagen om in de zomer te verkoelen en vice versa kan er veel energie bespaard worden en neemt de uitstoot van broeikasgassen af. Op dit moment wordt namelijk nog een derde van de energie van fossiele brandstoffen in Nederland gebruikt voor de levering van warmte of koude (Bloemendal, M., Mathijssen, H., 2013).

Bodemenergie is een techniek waarbij de warmte en koude wordt opgeslagen in de bodem als seizoensopslag. Systemen kunnen gebruik maken van twee typen bronnen, open- en gesloten bronnen. Bij open bronnen wordt het grondwater in de bodemlaag gebruikt als transport- en opslagmedium. Bij gesloten systemen wordt het water, vaak met een antivriesmiddel, rondgepompt door een leidingen systeem. Bij gesloten systemen wordt er dus geen gebruik gemaakt van grondwater als transportmiddel, maar door geleiding neemt het wel warmte en koude op van het grondwater (NVOE, 2016).

In Nederland wordt bodemenergie erg veel gebruikt wegens verschillende succes factoren. Ten eerste heeft Nederland het geschikte klimaat en de juiste ondergrond. In Nederland kennen we namelijk een groot temperatuurverschil tussen seizoenen. Daarnaast laat de ondergrond zich makkelijk doorboren en heeft het veel watervoerende zandlagen, aquifers, waar open systemen geïnstalleerd kunnen worden. De internationale en nationale afspraken over het reduceren van broeikasgassen zorgen er daarbij voor dat men op zoek gaat naar duurzame alternatieven voor het verbruiken van fossiele brandstoffen. Hierdoor wordt Nederland ook minder afhankelijk van landen die fossiele brandstoffen

produceren en financieel zal het uiteindelijk ook beter uitpakken wegens de stijgende energieprijzen (Bloemendal, M., Mathijssen, H., 2013). In Afbeelding 1.1 is de hoeveelheid open- en gesloten bodemenergiesystemen in Nederland weergegeven.



AFBEELDING 1.1 WEERGAVE VAN DE (VERWACHTTE) GROEI VAN HET AANTAL OPEN- EN GESLOTEN BODEMENERGIESYSTEMEN IN NEDERLAND.

1.2. ONDERGRONDSE WATERBERGING

In het de huidige verwerkingsmodel van hemelwater wordt hemelwater vaak gemengd met rioolwater. Dit zorgt ervoor dat het relatief zuivere hemelwater het niet meer geschikt is als bron voor irrigatiewater of schoon drinkwater (Hoogvliet, et al. 2016). Daarbij is het zuiveren van afvalwater moeilijker wanneer het verdund is met regenwater (Stichting RIONED, 2009). Een methode die deze problemen vermijdt en is het opslaan van hemelwater in de een watervoerende laag in een watervoerende laag in de ondergrond, een aquifer (Hoogvliet, et al. 2016). Dit wordt ook wel ondergrondse waterberging (owb) genoemd.

Een ander voordeel van een owb-systeem is het voorkomen van wateroverlast door middel van het vertraagd afvoeren van het hemelwater via de bodem. Wateroverlast treedt op wanneer een gemaal niet voldoende capaciteit heeft om intensieve neerslagbuien verwerken. Door klimaatveranderingen krijgen we steeds vaker te maken met extreme regenbuien (Hoogvliet, et al., 2016-01). Daarbij zorgt het de toenemende verharde oppervlakte voor een vergrote kans op wateroverlast (Claessens, et al., 2012).

Naast extreme regenbuien zorgt klimaatverandering voor langdurige periodes van droogte in de zomer (Hoogvliet, et al. 2016). Dit brengt problemen met zich mee voor de instandhouding van het oppervlaktewater- en grondwaterpeil en voor de hoeveelheid en de kwaliteit van de zoetwatervoorziening. De twee extreme weersomstandigheden kunnen met elkaar worden verbonden door owb-systemen waarbij het hemelwater later wordt hergebruikt. De aquifer dient zo natuurlijke buffer. Deze techniek wordt steeds vaker toegepast in de glastuinbouw, omdat uit een aantal pilots is gebleken dat dit een erg duurzame en rendabele oplossing is (De Doelder, et al., 2016).

1.3. DOEL ONDERZOEK

Het doel van dit onderzoek is om meer inzicht te krijgen over de mogelijkheid om OWB toe te passen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een casestudie; bij het Jaarbeurskwartier in Utrecht waar al veel bodemenergiesystemen zijn en waar door herontwikkeling nu ook OWB gewenst is. De uitkomsten worden vertaald naar de mogelijke functie combinatie in andere gebieden.

1.4. AANPAK

Om de mogelijkheid voor het implementeren van een OWB-systeem in Utrecht te onderzoeken eerst de huidige infrastructuur in de eerste watervoerende laag in kaart gebracht. Aan de hand van deze gegevens wordt de mogelijkheid en wenselijkheid van een OWB-systeem besproken en getoetst in verschillende scenario's. Tot slot wordt er een aanbeveling gedaan en een vergelijking gemaakt met alternatieve oplossingen.

Beschrijving studielocatie Utrecht

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** zijn alle bodemeigenschappen die invloed hebben op de ondergrondse watersystemen toegelicht en gespecificeerd voor de locatie in Utrecht.

Bodemenergiesystemen te Utrecht

Hoofdstuk 3 gaat over de technische aspecten van bodemenergie systemen. De ruimtelijke spreiding van de effecten van de huidige systemen in Utrecht wordt bepaald.

Toepassing ondergrondse waterberging te Utrecht

In Hoofdstuk 4 is de toepassing van ondergrondse waterberging uitgewerkt voor verschillende scenario's. De variabelen per scenario zijn de benodigde opslagcapaciteit, de filterlengte en het infiltratiedebiet van een OWB-systeem.

Toetsing en vergelijking alternatieven

De ondergrondse waterberging systemen voor de verschillende scenario's worden getoetst op de kwaliteit en kwantiteit. Daarnaast komen enkele alternatieve oplossingen aan bod voor de verwerking van hemelwater. Alle uitkomsten in acht nemend wordt er een aanbeveling gedaan.

2. BESCHRIJVING STUDIELOCATIE TE UTRECHT

In dit hoofdstuk staan de case locatie beschreven en de geohydrologische eigenschappen van Utrecht die relevant zijn voor de werking van ondergrondse waterberging en bodemenergiesystemen beschreven. Om deze informatie te ondersteunen wordt ook een deel achtergrondinformatie besproken over de opbouw en werking van de bodemparameters in het algemeen.

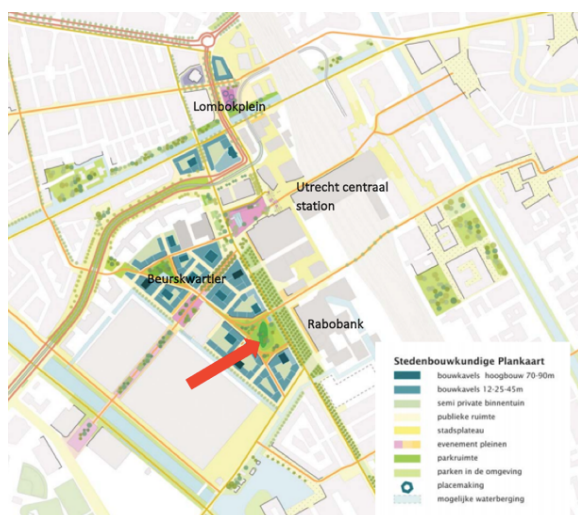
2.1. OMSCHRIJVING CASESTUDY TE UTRECHT

De verstedelijking is ook in de stad Utrecht merkbaar. Het bevolkingsaantal zal naar verwachtingen in 2028 met 21 procent ten opzichte van nu zijn gestegen. Dit kan worden vertaald naar een totaal van 400.000 inwoners, 70.000 meer dan het huidige aantal. Om mee te groeien met deze ontwikkeling is de Gemeente Utrecht gestart met het verbouwen rondom het stationsgebied en het formuleren van een Omgevingsvisie. In een Omgevingsvisie staan de ambities van de gemeente over de ruimtelijke ontwikkeling van een gebied. De verwerking van afvalwater, hemelwater en grondwater vallen onder de gemeentelijke watertaken. Twee belangrijke aspecten die worden nagestreefd in de Omgevingsvisie zijn duurzaamheid en meer groen in de omgeving. (Gemeente Utrecht, 2017) (Arcadis, 2017)

Wat betreft duurzaamheid is een van de doelen om het terrein op termijn energie neutraal te maken door het duurzaam opwekken van energie. De afgelopen jaren zijn hiervoor meerdere partijen in het gebied begonnen met het aanleggen van bodemenergiesystemen. Deze systemen zitten in de eerste watervoerende laag in de bodem.

Wat betreft meer groen in de omgeving zijn er parken ingepland, onder andere om overtollig regenwater op te vangen. De geplande locatie van dit park is in

Afbeelding 2.1 aangegeven met de rode pijl. In deze studie zal voor deze locatie worden geëvalueerd of het haalbaar en wenselijk is om het hemelwater van het Lombokplein en het Beurskwartier op te vangen en ondergronds te bergen.



AFBEELDING 2.1 STEDENBOUWKUNDIGE PLANKAART MET EEN PIJL NAAR DE GEPLANDE LOCATIE VOOR ONDERGRONDSE WATERBERGING

2.2. BODEMOPBOUW

De ondergrond in Nederland bestaat uit verschillende lagen. Watervoerende zandlagen worden afgewisseld met klei- en/of veenlagen. Deze samenstelling is zeer gunstig voor bodemenergie- en hemelwaterinfiltratie systemen. Het water kan dan tijdelijk worden opgeslagen in een watervoerend pakket zonder dat dit overlast veroorzaakt bij het maaiveld. De verticale grondwaterstroming wordt immers tegengehouden door de minder waterdoorlatende lagen, de klei- en/of veenlagen (NVOE, 2006). Hieronder worden de verschillende lagen verder toegelicht en de relevante gegevens van Utrecht besproken.

2.2.1. SCHEIDENDE LAGEN

Klei- en veenlagen worden ook wel scheidende lagen genoemd, waarbij de eerste laag onder het maaiveld de deklaag wordt genoemd en de dieper gelegen lagen de 2^e, 3^e scheidende laag etc. In Utrecht varieert de dikte van de deklaag per locatie tussen de nul en de vier meter. De oorspronkelijke kleilaag is bijna nergens meer aanwezig door vergravingen en ophogingen. Op dit moment bestaat deze laag meestal uit een combinatie van het oorspronkelijke kleiige zand, restanten van de klei of veenlagen en ophooggrond.

In deze lagen is de waterdoorlaatbaarheid zo laag dat er bijna geen grondwaterstroming in kan plaatsvinden. Door het drukverschil in de boven- en onderliggende lagen vindt er wel verticale grondwaterstroming plaats, maar met een hele lage snelheid. De bodemparameter voor deze laag is de weerstand, die wordt bepaald door de verticale doorlatendheid en de dikte van de laag. De eenheid van weerstand is dagen (NVOE, 2006). De weerstand van de deklaag varieert in Utrecht tussen de 10 en de 100 dagen en kan per locatie worden vastgesteld door de dikte van de laag te delen door het doorlaatvermogen. Het doorlaatvermogen van een klei laag met enige poriën en delen veen kan genomen worden op 0,30 meter per dag. Bij een dikte van 4 meter geeft dit een weerstand van ca. 13 dagen (Rijksoverheid, 2010).

2.2.2. WATERVOERENDE PAKKETTEN

Een watervoerend pakket bestaan uit zand en wordt ook wel een aquifer genoemd. De bovenste aquifer, indien deze niet wordt afgesloten door een deklaag, wordt een freatische aquifer genoemd. Het eerste watervoerende pakket, afgesloten door twee scheidende lagen, begint op circa -4 m mv en eindigt op -45 à 50 meter mv. Op sommige locaties kan er een lokale kleilaag zijn op 30 m-mv, daar wordt in dit onderzoek geen rekening mee gehouden.

Zandlagen kunnen variëren in de grootte van de diameter van de zandkorrels. Er wordt onderscheid gemaakt in de volgende drie verschillende grootte-categorieën:

<u>Korrelgrootte</u>	<u>Benaming</u>
50-150 μ m	uiterst fijn tot fijn
150-300 μ m	Matig fijn tot matig grof
300-2000 μ m	Grof tot uiterst grof

De ruimte tussen de zandkorrels worden de poriën genoemd. De verhouding van het poriën volume ten opzichte van het zandkorrel volume wordt de porositeit genoemd. In watervoerende lagen zijn deze poriën helemaal gevuld met water. Het water kan door de poriën stromen, wat aangeeft dat de waterdoorlatendheid van deze lagen hoog is. De porositeit in de bodem van Utrecht wordt in iedere

laag geschat op 0,25 (Bloemendal & Boerefijn, 2010). De grondwaterstroming vindt vooral in horizontale richting plaats, door de drukverschillen van plek tot plek en door menselijke activiteiten zoals het onttrekken van grondwater. De doorlatendheid van een zandlaag is onder andere afhankelijk van de korrelgrootte; hoe groter de korrel, hoe hoger de doorlatendheid. In het eerste watervoerende pakket in Utrecht wordt het doorlaatvermogen geschat op 2100 m²/dag. Er wordt onderscheid gemaakt in de horizontale doorlatendheid en de verticale doorlatendheid. De anisotropie-factor is de horizontale doorlatendheid gedeeld door de verticale (NVOE, 2006). In een worst-case scenario wordt deze factor op 2 geschat, maar in de realiteit ligt dit vaak rond de 10 (Bloemendal & Boerefijn, 2010).

2.3. GRONDWATER

Alle poriën tussen het korrelskelet in een verzadigde grondlaag zijn gevuld met grondwater. De stijghoogte, stromingsrichting en kwaliteit van het grondwater in Utrecht wordt hieronder toegelicht.

2.3.1. STIJGHOOGTE EN STROMINGSRICHTING

De stijghoogte is de waterstand tot waar het water zou reiken wanneer er een peilbuis in de betreffende bodemlaag zou worden geslagen. De stijghoogte van de deklaag wordt ook wel de grondwaterstand genoemd. In Utrecht ligt de grondwaterstand tussen de -0,5m NAP en +0,9m NAP. Door de hoge ligging van de stad en historische ophogingen ligt deze grondwaterstand enkele meters onder het maaiveld. Water stroomt altijd van een hoge stijghoogte naar een lage stijghoogte. Het verschil in stijghoogte op het maaiveld en in het eerste watervoerende pakket bepaalt de snelheid waarmee het water onder vrij verval vanaf maaiveld geïnfilterd kan worden. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket op de locatie in Utrecht is in droge perioden +0,20m NAP en in natte perioden +0,40m NAP (Bloemendal & Boerefijn, 2010). De stromingsrichting in het eerste watervoerende pakket is noordelijk of westelijk, maar door de huidige bodeminfrastructuur varieert dit sterk per locatie. De stromingssnelheid is 10 meter per jaar.

2.3.2. GRONDWATERKWALITEIT

Er kan worden aangenomen dat in Utrecht rondom het centraal station het grondwater in de eerste watervoerende laag overal verontreinigd is. De verontreinigingen zijn voornamelijk afkomstig van metaalverwerkende bedrijven en chemische wasserijen uit het verleden. De mate van verontreinigingen verschilt per locatie, maar bestaat voor het grootste gedeelte uit gechloreerde koolwaterstoffen (Bloemendal & Boerefijn, 2010).

2.4. BODEMGEBRUIK

In de deklaag is al een uitgebreid infrastructuur aan leidingen, kabels, kelders e.d. aanwezig. Ook in de eerste watervoerende pakketten zijn al WKO-systemen aanwezig en gepland en door de voorspelling is dat dit bodemgebruik alleen maar zal toenemen. In het volgende hoofdstuk zal verder worden ingegaan op de aanwezige infrastructuur rondom het plantsoen van bodemenergiesystemen (Bloemendal & Boerefijn, 2010).

3. BODEMENERGIESYSTEMEN IN UTRECHT

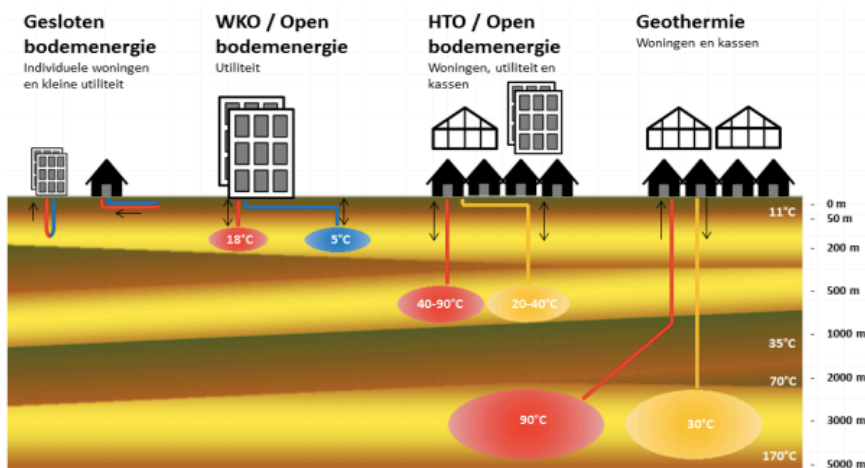
In dit hoofdstuk wordt inzicht verkregen in de ruimtelijke spreiding van de bodemenergiesystemen effecten in Utrecht. Om dit te onderbouwen wordt ook de nodige technische achtergrondinformatie over bodemenergie toegelicht.

3.1. TYPEN BODEMENERGIESYSTEMEN

Bodemenergiesystemen zijn er in meerdere soorten en maten, afhankelijk van de gebruikers en de locatie. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen vier verschillende typen systemen, deze zijn schematisch weergegeven in Afbeelding 3.1, met de bijbehorende functie, diepte, natuurlijke temperaturen en bron temperaturen (Bloemendal, Hoogendoorn, & Rijk, 2016).

De vier categorieën zijn:

- Gesloten bodemenergiesystemen
- Open bodemenergiesystem:
 - o Warmte- koude opslag (WKO)
 - o Hoge temperatuur warmteopslag(HTO)
- Geothermie



AFBEELDING 3.1 VIER TYPEN BODEMENERGIE SYSTEMEN MET BIJBEHORDEN FUNCTIE, DIEPTE EN TEMPERATUREN.

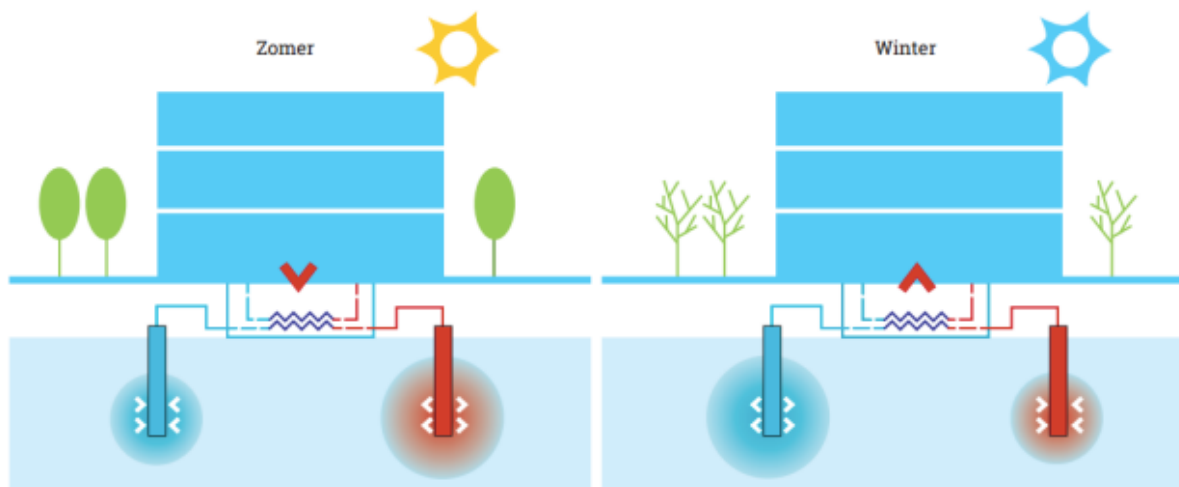
De bodemenergiesystemen rond het stationsgebied Utrecht zijn open bodemenergiesystemen, warmte- en koude (WKO) systemen genaamd. De wko-systemen rondom het plantsoen betreffen die van de Jaarbeurs en die van de Rabobank. In Afbeelding 3.3 is de ligging van deze bronnen schematisch weergegeven.

3.2. WKO-SYSTEMEN

De bodemenergiesystemen rond het stationsgebied Utrecht zijn open bodemenergiesystemen, warmte- en koude (WKO) systemen genaamd. Bij een WKO-systeem is er altijd sprake van een warme-

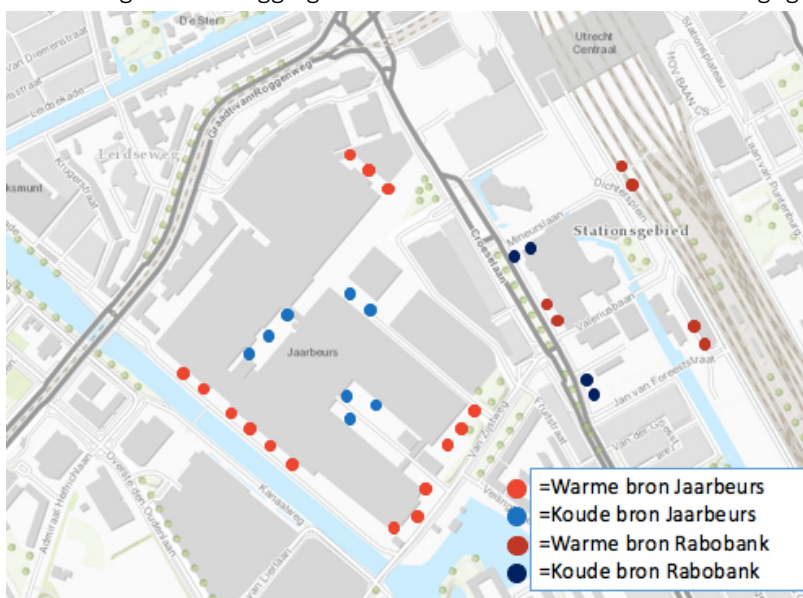
en een koude bron. Deze bronnen vormen een grondwaterbubbel in de bodem, waarbij de grootte varieert door het jaar heen. In de winter is er meer koude beschikbaar waardoor de koude bron groeit en in de zomer vice versa. In de winter is er ook meer warmte nodig, waardoor het volume van de warme bron afneemt. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de warmte- en koude vraag en van de hoeveelheid die beschikbaar is. Het verschil in omvang tussen de bronnen per seizoen is schematisch weergegeven in Afbeelding 3.2. Aan het eind van een seizoen kan één van de twee bronnen zelfs helemaal 'leeg' zijn.

De grootte van een warmte en een koude bron is op twee manieren uit te drukken, de hydraulische omvang en de thermische omvang. Het verschil tussen deze twee grootheden wordt hieronder toegelicht en berekend voor de situatie in Utrecht.



AFBEELDING 3.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WARMTE EN KOUDE BRON OMVANG PER SEIZOEN.

De wko-systemen rondom het plantsoen betreffen die van de Jaarbeurs en die van de Rabobank. In Afbeelding 3.3 is de ligging van deze bronnen schematisch weergegeven.



AFBEELDING 3.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE LIGGING WKO-BRONNEN VAN DE RABOBANK EN DE JAARBEURS

3.3. THERMISCHE EN HYDRAULISCHE STRAAL

Voor wko-bronnen zijn er richtlijnen opgesteld voor de minimale afstand tussen de bronnen aan de hand van het thermische invloed gebied rondom deze bronnen. Deze richtlijnen voorkomen naast het structureel opwarmen of afkoelen van de ondergrond ook het optreden kortsluiting. De benodigde afstand tussen de owb-systemen en de wko-systemen daarentegen is in deze studie op basis van het hydraulische invloed gebied bepaald.

3.3.1. OORZAKEN THERMISCHE ENERGIEVERANDERINGEN

Door processen in de bodem gaat er opgeslagen energie uit het injectiewater verloren en reikt de thermische energie minder ver van de bron dan het geïnjecteerde water zelf. Deze processen zijn diffusie, advectie, conductie en thermische retardatie. Diffusie wordt in deze studie als verwaarloosbaar klein aangenomen. In de volgende alinea's zijn de andere drie processen afzonderlijk toegelicht en er is uitgelegd hoe deze te minimaliseren zijn. Dit energieverlies zorgt ervoor dat er bij het bepalen van de omvang van wko-systemen onderscheid wordt gemaakt tussen de thermische straal (r_{th}) en de hydraulische straal (r_h). De bron wordt bij het bepalen van deze lengtes cilindervormig aangenomen. De lengte van de bron waardoor het water de bodem in infiltreert wordt de filterlengte genoemd (H).

Advectie

Advectie houdt in dat de thermische energie van het geïnjecteerde water worden meegenomen met de stroming van het grondwater. Als de energie daardoor buiten het beïnvloedingsgebied van de bron komt, kan die energie niet meer worden teruggewonnen en gaat hierdoor verloren. De grootte van de advectie warmteoverdracht (f_a) hangt af van de warmtecapaciteit van het grondwater (c_w), de temperatuur (T) en de effectieve snelheid van het grondwater (v_{eff}) (Peeters, 2003). Hoe groter deze parameters zijn, des te groter de advectie coëfficiënt wordt. De warmtecapaciteit van het grondwater mag worden gezien als een constante. Hoe groter de grondwater stroomsnelheid ten opzichte van de thermische straal is, hoe groter de verliezen aan thermische energie. Om dit effect te minimaliseren is een kleinere filterlengte wenselijk, want dat maakt de thermische straal groter (Bloemendal, M., Hartog, N., 2016). De toetsing om te kijken of de verliezen aan advectie acceptabel zijn luidt als volgt: $\frac{r_{th}}{v_{eff}} < 4$. De toetsing voor de situatie in Utrecht zal per type bron in paragraaf

Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. worden gedaan.

Conductie

Ten tweede treedt warmtetransport op door conductie, ook wel geleiding genoemd. Dit is warmteoverdracht binnen dezelfde stof, waarbij de warmte stroomt van een hoge naar een lage temperatuur. De mate waarin conductie optreedt wordt bepaald door de temperatuurgradiënt en de warmtegeleidingscoëfficiënt van zowel het grondwater als het korrelskelet. De warmtegeleidingscoëfficiënt van het grondwater neemt toe bij een hogere temperatuur. Echter, deze toename is verwaarloosbaar klein en beiden warmtegeleidingscoëfficiënten mogen als constante waarden worden beschouwd (Peeters, 2003). Hierdoor is de grootte van conductie alleen afhankelijk van het temperatuurverschil. De constante waarden voor warmtegeleidingscoëfficiënten per grondsoort is te zien in Tabel 3.1 (Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag, 2006).

TABEL 3.1 WARMTEGELEIDINGSCOËFFICIËNT PER TYPE BODEMMATERIAAL

Bodemateriaal	Warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) [W/(mK)]
Zand	2,4
Kleilig zand (80% zand en 20% klei)*	2,3
Zandige klei (80% klei en 20% zand)*	1,8
Klei	1,7
Klei met veenlagen (80% klei en 20% veen)*	1,4
Veen	0,4
Water	0,6

* De verdeling van klei en zand of klei en veen zijn aannames.

Thermische retardatie

Het derde warmtetransport proces is thermische retardatie. Hierbij neemt het korrelskelet de thermische energie op. De thermische energie wordt hierdoor vertraagd ten opzichten van het water en gaat daarmee niet verloren voor de bron. Hierdoor is de snelheid van de verspreiding van thermische energie gelijk aan de helft van de achtergrond grondwaterstromingsnelheid (Bloemendal, M., Hartog, N., 2016). Door dit verschil wordt er onderscheid gemaakt tussen een thermische- en een hydraulische straal van een bron.

3.3.2. THERMISCHE STRAAL WKO-SYSTEMEN IN UTRECHT

De thermische straal staat voor de afstand vanaf de bron tot de plaats waar de grondwatertemperatuur beïnvloed is door de thermische energie van deze bron, indien er geen sprake is van menging of geleiding (Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag, 2006).

De thermische straal hangt af van de volgende omgevingsparameters:

- De warmtecapaciteit van water (c_w)
Deze parameter geeft weer hoeveel energie er nodig is om een bepaald gewicht water met één graad Kelvin in temperatuur te laten stijgen. Dit is gelijk aan $c_w = 4,186 * \frac{10^6 J}{kg * K}$. De warmtecapaciteit is temperatuur afhankelijk, maar dit effect is verwaarloosbaar klein en daarom mag dit als een constante worden aangenomen (Peeters, 2003).
- De warmtecapaciteit van de aquifer (c_a)
Deze parameter geeft weer hoeveel energie er nodig is om een bepaald gewicht van de ondergrond met één graad Kelvin in temperatuur te laten stijgen. Des te hoger deze waarde is, des te kleiner de thermische straal is. In Tabel 3.2 is de waarde hiervan per type bodem weergegeven (Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag, 2006). Voor de situatie in Utrecht wordt uit gegaan van $c_a = 2,8 * 10^6 \frac{10^6 J}{kg * K}$.
- Het onttrokken of geïnjecteerde volume water per seizoen in $m^3(Q)$
Deze parameter hangt af van de warmte en koude vraag en de capaciteit van het systeem. Des te hoger deze waarde is, des te groter de thermische straal is. Het infiltratievolume per jaar is gelijk aan 96.250 m^3 voor de Rabobank, 39909 m^3 voor de koude bronnen van de Jaarbeurs en 21.285 m^3 voor de warme bronnen van de jaarbeurs.
- De filterlengte in meters (H)
Deze parameter geeft de lengte van de bronfilter weer. De bronfilter is een filter in de ondergrond waar het water doorheen kan stromen. Hoe deze filterlengte wordt bepaald zal later in dit hoofdstuk aan bod komen. Des te hoger deze waarde is, des te kleiner de

bijbehorende thermische straal wordt. Alle bronnen in Utrecht die in deze studie in beschouwing genomen worden hebben een filterlengte van 18 meter en beginnen bij 8m-mv.

TABEL 3.2 SOORTELIJKE WARMTE PER TYPE BODEMMATERIAAL

Bodemmateriaal	Soortelijke warmte (* $10^6 \frac{J}{kg \cdot K}$)
Zand	2,2-2,9
Kleilig zand ($\pm 80\%$ zand en 20% klei)	2,1-3,0
Zandige klei ($\pm 80\%$ klei en 20% zand)	1,7-3,3
Klei	1,6-3,4
Klei met veenlagen ($\pm 80\%$ klei en 20% veen)	1,4-3,5
Veen	0,5-3,8
Water	4,186

Aan de hand van het infiltratie debiet per half jaar van de huidige wko-systemen is er per type bron een inschatting gemaakt van de bijbehorende thermische straal. Hierbij is uitgegaan van een thermisch evenwicht tussen de seizoenen, waarbij de thermische straal dus wordt berekend met de volgende formule:

$$r_{th} = \sqrt{(c_w * Q_{0,5y}) / (c_a * H * \pi)} \quad (1)$$

De resultaten voor de thermische straal zijn in Tabel 3.3 weergegeven. De vuistregel die wordt aangehouden voor de minimale afstand tussen twee verschillende type bronnen is gelijk aan driemaal de thermische straal. Echter, indien de natuurlijk grondwatertemperatuur boven of beneden beide brontemperaturen ligt, is de optimale bronafstand slechts één tot twee keer de thermische straal. In dit geval is het namelijk gunstig om kortsluiting te creëren.

TABEL 3.3 THERMISCHE STRAAL BRONNEN UTRECHT

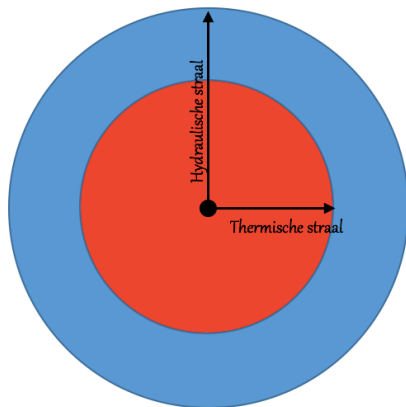
Type bron	Thermische straal (m)
Rabo warm	30
Rabo koud	30
Jaarbeurs warm	13
Jaarbeurs koud	19

3.3.3. HYDRAULISCHE STRAAL WKO-SYSTEMEN IN UTRECHT

Het geïnjecteerde water zelf heeft een bredere spreiding dan de geïnjecteerde thermische energie. De totale spreiding van het water wordt uitgedrukt in de hydraulische straal. In Afbeelding 3.4 zijn de thermische straal en de hydraulische straal schematisch weergegeven vanaf een bovenaanzicht van de bron.

De formule voor de hydraulische straal hangt in tegendeel tot de thermische straal niet af van de warmtecapaciteit van water of de aquifer; maar van de porositeit van de aquifer (n), de filterlengte en het water volume.

De formule voor de hydraulische straal (r_h) is: $r_h = \sqrt{Q / (n * H * \pi)} \quad (2)$



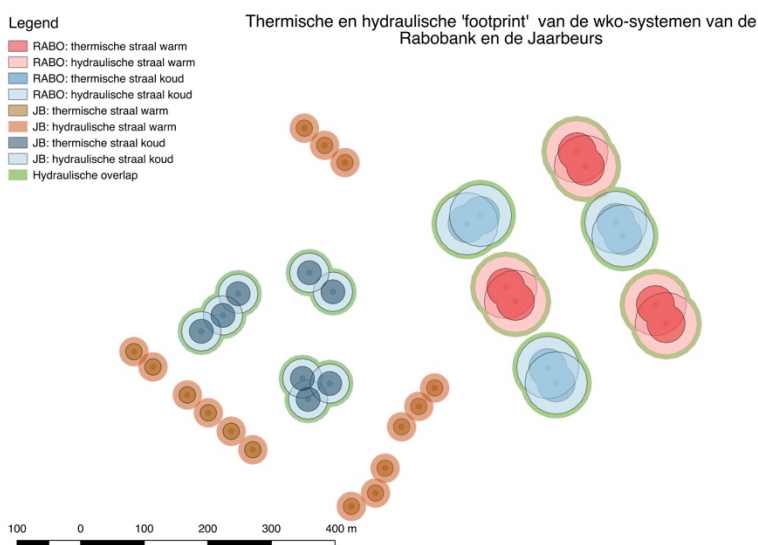
AFBEELDING 3.4 SCHEMATISCHE WEERGAVE BOVENAANZICHT BRON ('FOOTPRINT').

De uitkomsten van de hydraulische straal per type bron in Utrecht is in Tabel 3.4 weergegeven. Hiernaast is het bijbehorende maximale volume van de bron met weergegeven aan het eind van ieder seizoen. De bron is cilindervormig aangenomen, waardoor het volume met de volgende formule te bepalen is: $\pi * r_h^2 * H * n$

In Afbeelding 3.5 is een bovenaanzicht van van de onderzochte wko-systemen met de bijbehorende hydraulische- en thermische gebieden weergegeven.

TABEL 3.4 HYDRAULISCHE STRAAL EN VOLUME BRONNEN UTRECHT

Type bron	Hydraulische straal (m)	Volume (m ³)
Rabo warm	49	48
Rabo koud	49	48
Jaarbeurs warm	23	11
Jaarbeurs koud	31	20



AFBEELDING 3.5 BOVENAANZICHT THERMISCHE EN HYDRAULISCHE INVLOEDSGEBIED WKO-SYSTEMEN VAN DE RABOBANK EN DE JAARBEURS

3.4. GRONDWATERSTROMING BIJ WKO-SYSTEMEN

Zoals eerder genoemd in paragraaf 2.3.1 is de richting en snelheid van grondwaterstroming in de buurt van wko-systemen erg locatie afhankelijk. De grondwaterstroming is in dit onderzoek van belang omdat het water dat geïnjecteerd wordt bij een owb-put kan worden meegevoerd met de achtergrondstroming en op die manier in het hydraulische invloedsgebied van een wko-systeem terecht zal komen. De factoren die invloed hebben op de grondwaterstroming en beïnvloed worden door wko-systemen zijn in de volgende alinea's nader toegelicht.

Grondwaterstroming hangt nauw samen met de doorlatendheid (k). De doorlatendheid heeft een recht evenredig verband met de vloeistofdichtheid van het grondwater (ρ_f), de zwaartekracht (g) en de intrinsieke doorlatendheid (κ). De doorlatendheid is omgekeerd evenredig met de dynamische viscositeit van het grondwater (μ). Van deze parameters is viscositeit de enige die weer afhankelijk is van de temperatuur in een WKO-systeem. De doorlatendheid wordt hierdoor circa 43% groter bij een warmwaterinjectie van 25 graden Celsius en circa 14% kleiner bij een koudwaterinjectie van 5 graden Celsius (Peeters, 2003). Hieruit volgt dat voor een koud water een groter drukverschil nodig zal zijn dan voor een warm water om het met hetzelfde debiet de grond in te injecteren of onttrekken. De grondtemperatuur is dus van belang voor het bron ontwerp. Het effect wat de grondwaterstroming in combinatie met het verhang op temperatuurverliezen heeft is in Tabel 3.1 weergegeven (Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag, 2006).

TABEL 3.5 INVLOED VAN DOORLATENDHEID IN COMBINATIE MET HET VERHANG OP TEMPERATUURVERLIEZEN

Doorlatendheid w.v.p.	Verhang	Verliezen koude en/of warmte
Klein (5 m/d)	Klein (0,1 ‰)	(Zeer) weinig
Klein (5 m/d)	Groot (1,0 ‰)	Matig
Groot (40 m/d)	Klein (0,1 ‰)	Matig
Groot (40 m/d)	Groot (1,0 ‰)	(Zeer) veel

Naast de doorlatendheid spelen ook verschillen in dichtheden van het grondwater een rol in de grondwaterstroming. Warm water heeft een kleinere dichtheid dan koud water en zal daardoor opstijgen, waartegenover het koude water zal uitzakken. Uit het onderzoek van Marte Peeters (2003) blijken echter de drukverschillen die optreden door dit verschil in dichtheid zijn verwaarloosbaar klein voor het ontwerpen van een WKO-systeem.

3.5. GRONDWATERKWALITEITS ASPECTEN

WKO-systemen kunnen op verschillende manieren de grondwaterkwaliteit beïnvloeden. In deze paragraaf is onderscheid gemaakt in de veranderingen in grondwaterkwaliteit door temperatuurverschillen en door het mengen van verschillende typen water.

3.5.1. THERMISCHE EFFECTEN OP GRONDWATERKWALITEIT

De chemische samenstelling van de bodem verandert bij veranderingen in temperaturen. Daarbij beïnvloedt de temperatuur de biodegradatie en kunnen verontreinigingen mobieler worden. Echter, de veranderingen die plaatsvinden door temperatuurveranderingen kunnen worden verwaarloosd bij wko-systemen. Het verschil in temperatuur tussen de bodemtemperatuur en de brontemperaturen is namelijk te klein om een significant effect te hebben op de grondwaterkwaliteit. De effecten moeten enkel in acht genomen worden bij temperatuurverschillen boven de twintig graden Celsius of bij

brontemperaturen boven de 25 graden Celsius (Bonte, van Breukelen, & Stuyfzand, 2013) (Bloemendal & Boerefijn, 2010).

Uit onderzoek in Utrecht is gebleken dat de temperatuur die in de winter uit de warme bron wordt onttrokken kan stijgen tot 18 graden Celsius. Dit water wordt vóór gebruik door een warmtepomp verwarmd tot 50 graden Celsius. Na gebruik is het water afgekoeld tot 8-10 graden Celsius en wordt vervolgens naar de koude bron toegevoerd. In Utrecht daalt de temperatuur in de koude bellen tot 8 graden Celsius. In de zomer wordt dit water weer gebruikt voor koeling. Het opgewarmde koelwater in de zomer kan vervolgens weer de warme bron aanvullen wanneer het een temperatuur heeft van 18-16 graden Celsius (RVO, z.j.).

De grondwater temperatuur in Nederland tot 200 meter onder het maaiveld ligt rond de 10 à 13 graden Celsius. Hoe dieper in de grond, des te hoger de temperatuur. De toename is ongeveer 2-3 graden Celsius per 100 meter. In stedelijke gebieden kan tot een diepte van 50 meter door de bebouwing de grondwater temperatuur hoger liggen. Daarbij is tot ongeveer 20 meter diepte de grondwatertemperatuur onder invloed van de atmosfeer (Zuurbier, et al., 2015). In Utrecht is de oorspronkelijke, homogene grondwatertemperatuur in de eerste aquifer 10-12 graden Celsius. Het duurt 50 tot 100 jaar om verstoringen in de temperatuur door wko-systemen te herstellen.

Uit de bovenstaande gegevens over Utrecht blijkt dat de effecten op de grondwaterkwaliteit hier verwaarloosd mogen worden. Bij geothermie en HTO-systemen daarentegen zijn de effecten wel significant (Bonte, van Breukelen, & Stuyfzand, 2013).

3.5.2. HYDROLOGISCHE EFFECTEN OP GRONDWATERKWALITEIT

De hydrologische effecten op de grondwaterkwaliteit spelen een grotere rol bij wko-systemen. Deze effecten kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën: dispersie en het mengen van verschillende typen water. Dispersie is in deze studie niet meegenomen bij de interactie met owb-systemen, maar zal in de discussie worden toegelicht. De volgende alinea gaat over het mengen van verschillende typen water.

De grondwaterkwaliteit wordt beïnvloed wanneer verschillende typen grondwater met elkaar in contact komen. Dit kan invloed hebben op de samenstelling van het grondwater. Wanneer er bijvoorbeeld aerob water in en een anaerobe aquifer wordt geïnfiltreerd kunnen er neerslag reacties ontstaan. Hiermee wordt niet alleen de grondwaterkwaliteit beïnvloed, maar het kan ook zorgen voor put verstoppingen. Dit is een veel voorkomend probleem bij ondiepe wko-systemen. Daarnaast speelt dit probleem ook bij het ondergrondse bergen van hemelwater. In het volgende hoofdstuk zal hier verder op in worden gegaan.

4. ONDERGRONDSE WATERBERGING UTRECHT

In dit hoofdstuk wordt voor verschillende scenario's inzichtelijk gemaakt wat het volume en vorm van een ondergrondse waterberging bij het Jaarbeursplein in Utrecht zou moeten zijn. Daarnaast wordt gekeken de invloed van ieder scenario op kwalitatieve aspecten van de bodem.

4.1. KWANTITATIEVE ANALYSE ONDERGRONDSE WATERBERGING IN UTRECHT

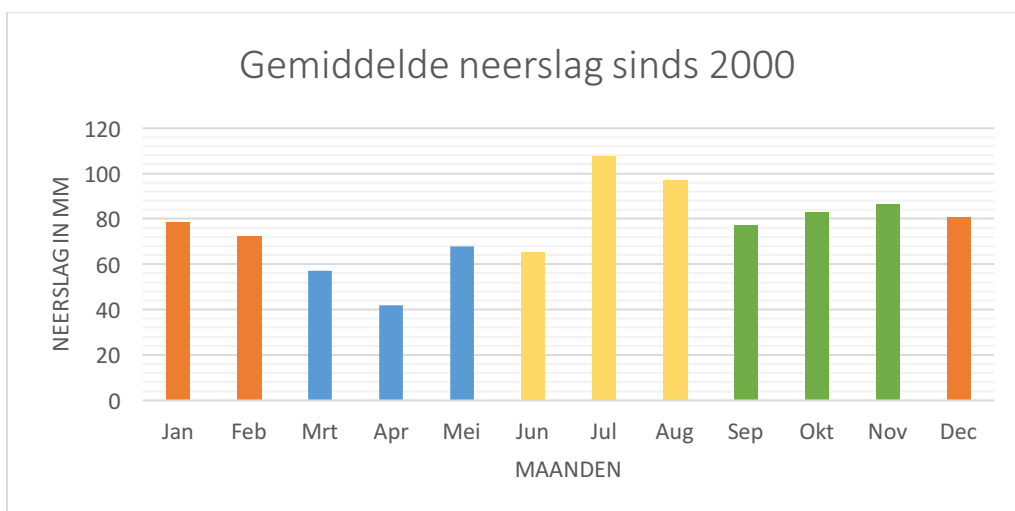
4.1.1. INFILTRATIEVOLUME PER SCENARIO

Aan de hand van de neerslag metingen in de Bilt door het Koninklijke Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) zijn de gemiddelde neerslag in mm per maand bepaald. De resultaten van het KNMI-station de Bilt zijn gehomogeniseerd. Dit betekent dat systematische afwijkingen zoals meetstationsverplaatsingen en verandering van het type weerhut uit de data zijn gefilterd. Slechts gehomogeniseerde data mag gebruikt worden voor klimaatonderzoek (Brandsma, Koek, Wallbrink, & Können, 2000).

Om een inschatting te maken van de hoeveelheid te infiltreren neerslag per seizoen wordt tussen onderscheid gemaakt in drie scenario's. De worst-case scenario, de meest waarschijnlijke realiteit en de best-case scenario.

De drie scenario's verschillen in twee variabelen. Ten eerste het percentage verharde oppervlakte van de totale oppervlakte. Een hectare stad bestaat uit onverhard oppervlakte, oppervlaktewater en verhard oppervlakte zoals daken en wegen. De tweede variabele is het percentage van de neerslag dat op het verharde oppervlakte valt én beschikbaar is voor ondergrondse waterberging. Het andere deel van deze neerslag verdampt of infiltreert. De waarden voor deze variabelen zijn in Tabel 4.1 weergegeven. Het oppervlak waar mee wordt gerekend in Utrecht bij alle scenario's omvat zowel die van het Beurskwartier (8 ha) als die van het Lombokplein (2 ha). In totaal is dit oppervlakte dus 10 hectare.

GRAFIEK 4.1 GEMIDDELDE NEERSLAG GEGEVENS KNMI IN DE BILT PER MAAND SINDS 2000. (ORANJE = WINTER, BLAUW = LENTE, GEEL = ZOMER, GROEN = HERFST)



TABEL 4.1 WAARDEN VARIABELEN PER SCENARIO

	Worst-case scenario	Waarschijnlijke realiteit	Best-case scenario
% verharde oppervlakte	100	50	30
% neerslag ter beschikking OWB	80	65	20

De uitkomsten voor het totale infiltratie volume is in Tabel 4.2 weergegeven. Hierbij is het jaar verdeeld in de meteorologische seizoenen.

TABEL 4.2 TOTALE INJECTIEVOLUME IN $\cdot 10^3 \text{ M}^3$ PER SCENARIO

	Worst-case scenario	Waarschijnlijke realiteit	Best-case scenario
Winter	18,5	7,0	1,3
Lente	13,4	5,4	1,0
Zomer	21,6	8,8	1,6
Herfst	19,7	8,0	1,5

4.1.2. HYDRAULISCHE STRAAL OWB PER SCENARIO

De straal van het infiltratievolume hangt af van de filterlengte (H). Indien de filterlengte de hele aquifer bestrijkt zal de straal afnemen, waardoor er minder kans is dat het geïnfiltreerde water in contact komt met andere ondergrondse systemen die op een kleine horizontale afstand van de put liggen. Indien de filterlengte korter is, is er minder kans dat het water in contact komt met andere ondergrondse systemen die op een kleine verticale afstand van de put liggen. De verschillende filterlengtes waar in deze studie mee is gerekend zijn 40 meter en 4 meter. 40 Meter is gelijk aan ongeveer de hele diepte van de aquifer en 4 meter is gekozen omdat dit precies zou passen tussen de deklaag en de bovenkant van de wko-filters in Utrecht. De resultaten voor de bijbehorende straal is hieronder in Tabel 4.3 weergegeven.

TABEL 4.3 STRAAL INFILTRATIEVOLUME PER SCENARIO VOOR EEN LANGE- EN EEN KORTE FILTERLENGTE IN METERS (BEPaald MET VERGELIJKING (2))

	Worst-case scenario		Waarschijnlijke realiteit		Best-case scenario	
	$H = 40 \text{ m}$	$H = 4 \text{ m}$	$H = 40 \text{ m}$	$H = 4 \text{ m}$	$H = 40 \text{ m}$	$H = 4 \text{ m}$
Winter	24	77	15	47	6	20
Lente	21	65	13	41	6	18
Zomer	26	83	17	53	7	23
Herfst	25	79	16	51	7	22

4.2. KWALITATIEVE ANALYSE ONDERGRONDSE WATERBERGING IN UTRECHT

4.2.1. ZUURSTOFVERLOOP IN DE BODEM

Bij het mengen van zuurstofrijk hemelwater met een zuurstofloos grondwater treden neerslag reacties op. Dit gebeurt wanneer stoffen, zoals ijzer en mangaan die zijn opgelost in het grondwater, reageren met zuurstof. Deze redoxreacties resulteren in de vorming van mangaan- en ijzeroxide die als vaste stof neerslaan in de bodem. Wanneer deze neerslag reacties in de buurt komen van een put kunnen deze neerslag producten voor putverstopping zorgen. In Nederland (Herten) is er onderzoek

gedaan naar de chemische processen die in de bodem plaatsvinden bij het infiltreren van drinkwater in de ondergrond (Antoniou, van Breukelen, Putters, & Stuyfzand, 2012).

Om putverstoppingen te voorkomen wordt in de volgende alinea's een inschatting gemaakt van de tijd en afstand dat het geïnfilterd hemelwater erover doet om zuurstofloos te worden via zuurstof consumptie. Eerst worden de factoren die hier een rol in spelen toegelicht en vervolgens wordt er aan de hand van resultaten van het onderzoek door Antoniou et al. (2012) de minimaal benodigde tijd en afstand bepaald.

Chemische samenstelling aquifer

De chemische samenstelling kan per aquifer verschillen, maar ook binnen dezelfde aquifer kunnen er verschillen zijn. Dit heeft invloed op de hoeveelheid redoxreacties die er zullen plaatsvinden. In Utrecht gaan we uit van een homogene chemische samenstelling over de lengte en breedte van de aquifer.

Zuurstofconcentratie in het infiltratiewater

Bij een hogere zuurstofconcentratie in het hemelwater zal ook de zuurstofconcentratie in de bodem toenemen. De zuurstofconcentratie wordt in Utrecht als een constante beschouwd en gelijk aan de concentratie bij het onderzoek in Herten door Antoniou et al. (2012). In dit onderzoek is infiltratiewater gebruikt met een zuurstofconcentratie van 0,27 mmol/L. De zuurstofconcentratie van water dat in contact staat met lucht (25 °C) is 0,25 mmol/L O₂. Bij lagere temperaturen neemt het vermogen van water om zuurstof op te nemen toe en vice versa (Lenntech BV, 1998-2017). De concentratiewaarde van het onderzoek in Herten en de zuurstofconcentratie van hemelwater komen dus nauw overeen.

Injectiefase versus opslagfase

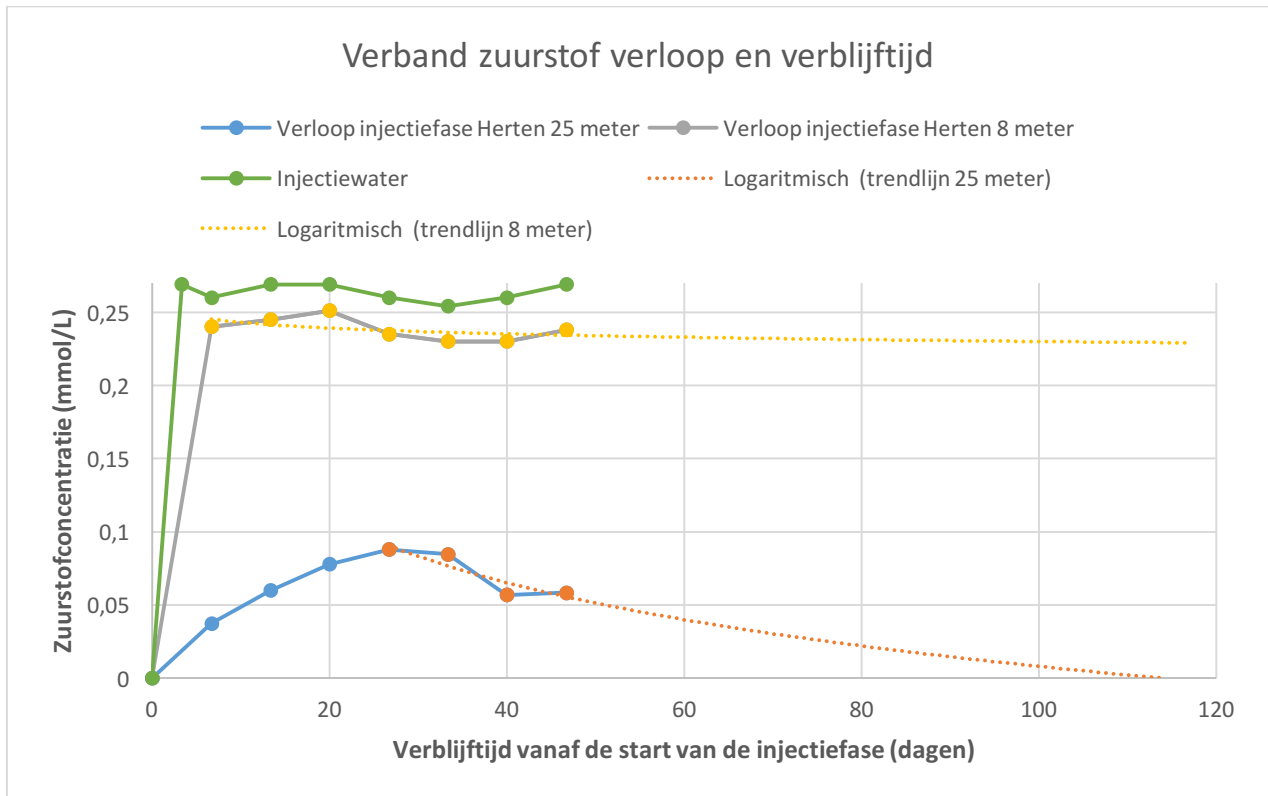
Bij de ondergrondse waterberging is er sprake van twee verschillende soorten fasen, de injectiefase en de opslagfase. Tijdens de injectiefase is er een constante toevoer aan zuurstofrijk hemelwater. Tijdens de opslagfase stopt deze toevoer en neemt de concentratie zuurstof in de bodem met een min of meer logaritmisch verloop af (Antoniou, van Breukelen, Putters, & Stuyfzand, 2012). Omdat er uit de neerslaggegevens in Utrecht van het KNMI is gebleken dat er iedere maand neerslag valt wordt er in deze studie uit gegaan van de situatie in de infiltratiefase. Indien in de werkelijkheid de ondergrondse waterberging in de opslagfase verkeerd, wanneer er enkele dagen geen regen valt, zal dit voor een lagere concentraties van zuurstof zorgen. De onzekerheid over tijd en duur van het optreden van dit positieve scenario is echter groot, en derhalve is er in deze studie geen rekening mee wordt gehouden.

Verblijftijd

Tijdens de injectieperiode verandert de zuurstofconcentratie over de tijd, deze veranderingen kunnen worden onderverdeeld in twee delen. Tijdens het eerste deel neemt de zuurstofconcentratie toe en tijdens de tweede fase neemt de zuurstofconcentratie af. Tijdens het begin van het eerste deel neemt de concentratie snel toe, de snelheid van deze toename neemt echter na een paar dagen af. De duur van de periode waarin de concentratie toeneemt is afhankelijk van de afstand tot de infiltratiebron. Door Antoniou et al. (2012) is de zuurstofconcentratie gemeten op een afstand van 8 en 25 meter van de bron tijdens een injectieperiode van ongeveer ca. 47 dagen. De resultaten voor dit onderzoek zijn in grafiek 4.2 weergegeven. Voor het deel waarin de zuurstofconcentratie afneemt, zijn er

logaritmische trendlijnen toegevoegd. Hieruit wordt een inschatting gemaakt hoelang het duurt voor geïnfiltreerd regenwater om zuurstofloos te worden. Op een afstand van 25 meter blijkt dit ca. 120 dagen te duren, wat gelijk is aan 4 maanden. Op een afstand van 8 meter van de bron blijkt de concentratie bijna niet af te nemen tijdens de injectiefase.

GRAFIEK 4.2 VERBAND TUSSEN ZUURSTOFCONCENTRATIE EN VERBLIJFTIJD VAN HET INJECTIEWATER IN DE AQUIFER OP 8 EN OP 25 METER VAN DE PUT.



Afstand tot de bron

De zuurstofconcentratie in de bodem verschilt per afstand tot de bron. De zuurstofconcentratie neemt af naarmate de afstand van tot infiltratieput toeneemt (Antoniou, van Breukelen, Putters, & Stuyfzand, 2012). Dit komt deels doordat zuurstof onderweg al met stoffen redoxreacties is aangegaan en is omgezet tot neerslag producten. Uit het onderzoek van Antoniou et al. (2012) blijkt dat de afname in zuurstofconcentratie echter niet met dezelfde snelheid op iedere afstand van de bron verloopt tijdens de injectiefase. Door de langzame reactietijd van de optredende redoxreacties in combinatie met de afnemende snelheid van het water op een grotere afstand van de put neemt de reactiviteit van zuurstof en daarmee de snelheid van de afname in zuurstofconcentratie toe bij een grotere afstand. Dit is echter niet meegenomen in de onderstaande bepaling voor de de afstand, waardoor in werkelijkheid de afstand korter kan zijn.

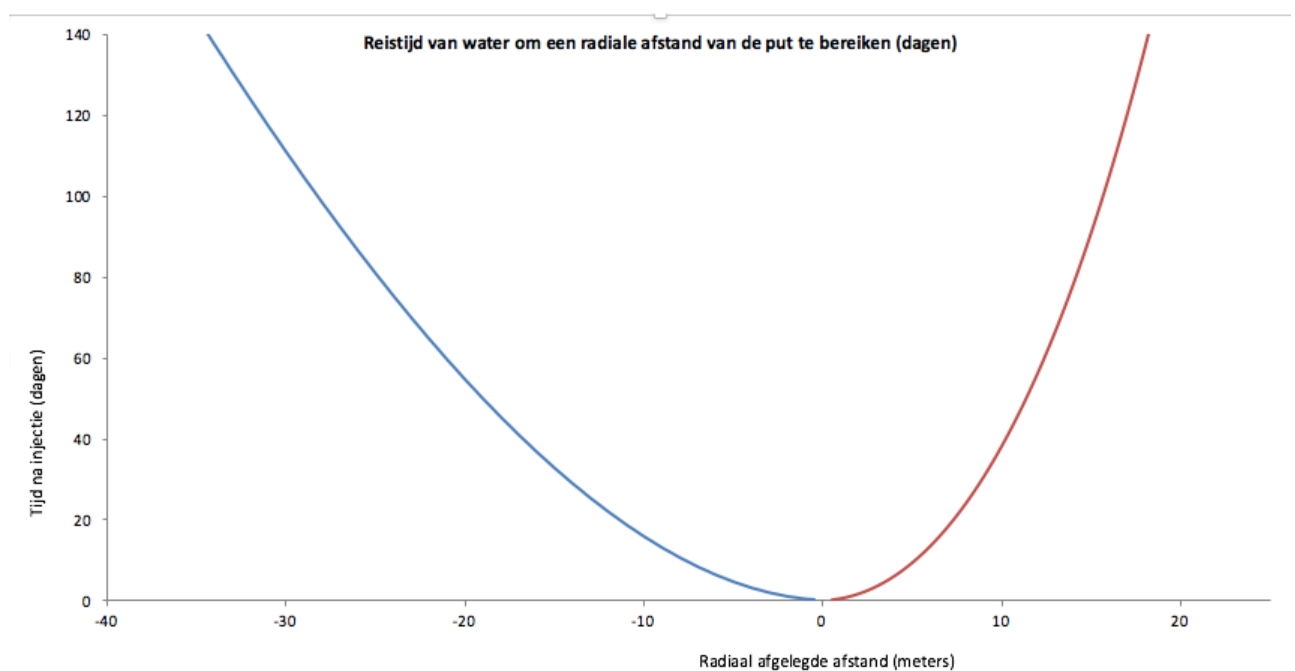
De afstand tot de bron vanaf waar de bodem (s_{O_2}) zuurstofconcentratie ongeveer gelijk aan nul is is op basis van de resultaten van Antoniou et al. (2012) gelijk aan 38 meter voor een lineair verband en gelijk aan 95 meter voor een exponentieel verband.

In de alinea hieronder is de afgelegde radiale afstand van het geïnfiltreerde owb-water op 120 dagen ($s_{H20,120}$) bepaald. Na 120 dagen zou de bodem immers zuurstofloos zijn op op 25 meter afstand van

de bron tijdens de injectiefase. Indien $s_{o2} > s_{H2O,120}$ kan s_{o2} worden aangenomen als de minimale afstand tussen de owb-bron en de hydraulische omvang van de wko-bron. Indien $s_{H2O,120} > s_{o2}$ dan kunnen de ontwerpcondities worden aangepast of moet $s_{H2O,120}$ worden aangenomen als de minimale afstand tussen de owb-bron en de hydraulische omvang. In de alinea hieronder is uitgelegd hoe $s_{H2O,120}$ is bepaald.

De stroomsnelheid van het water neemt af naarmate de radiale afstand groter wordt. De tijd die het water erover doet in een aquifer om op een radiale afstand te komen is afhankelijk van de richting en snelheid van de achtergrond grondwaterstroming, de porositeit, het infiltratiedebiet en de filterlengte. De afgelegde radiale afstand benedenstrooms van de owb put is groter dan bovenstrooms door het effect van de achtergrondstroming. Een hogere snelheid van de achtergrondstroming zorgt voor een groter verschil hiertussen. De grondwaterstromingsrichting in Utrecht zal rond het plantsoen per seizoen verschillen door de drainerende wko-systemen. De natuurlijke richting is noordwestelijk en heeft een snelheid van 10 meter/jaar. De tijd per afstand die het owb-water nodig heeft in Utrecht is in grafiek 4.3 weergegeven voor de meest waarschijnlijke situatie met een filterlengte van 40 meter. De rode lijn geeft het bovenstroomse tijdsverloop weer en de blauwe lijn de benedenstroomse tijdsverloop.

GRAFIEK 4.3 REISTIJD IN DAGEN VAN OWB-WATER IN UTRECHT OM EEN RADIALE AFSTAND TE BEREIKEN BIJ HET MAXIMAAL BENODIGDE INFILTRATIEDEBIET VAN DE ZOMER IN DE MEEST WAARSCHIJNLIJKE SITUATIE EN EEN FILTERLENGTE VAN 40 METER.



In Tabel 4.4 zijn de resultaten voor de afgelegde afstand van het owb-water in 120 dagen weergegeven. Deze zijn bepaald aan de hand van het maximale infiltratievolume per scenario. Een hoger infiltratiedebiet en een kleinere filterlengte zorgen beide voor hogere afgelegde afstanden per tijd.

TABEL 4.4 RADIALE AFSTAND AFGELEGD DOOR HET OWB-WATER NA 120 DAGEN. HET INFILTRATIEDEBIET PER DAG IS BEPAALD AAN DE HAND VAN HET MAXIMALE INFILTRATIEVOLUME VOOR IEDER SCENARIO.

	Radiale afstand bovenstrooms (meters)	Radiale afstand benedenstrooms (meter)	Radiale afstand bovenstrooms (meters)	Radiale afstand benedenstrooms (meter)
	<i>H = 40 meter</i>		<i>H = 4 meter</i>	
Worst-case scenario	28	47	94	140
Waarschijnlijke situatie	17	32	59	91
Best-case scenario	6	16	24	41

4.3. TEMPERATUUR VAN HEMELWATER

Over de temperatuur van het hemelwater in Utrecht zijn geen gegevens bekend, maar in deze studie is aangenomen dat dit min of meer overeenkomt met gemiddelde temperatuur van de atmosfeer gedurende het seizoen. Uit de temperatuurmetingen door het KNMI van de Bilt zijn de maandgemiddelden bepaald en aan de hand van de meteorologische seizoenen is het seizoengemiddelde berekend (KNMI, 2016). De uitkomsten hiervan zijn in Tabel 4.5 weergegeven.

TABEL 4.5 SEIZOENGEMIDDELDE TEMPERATUREN DE BILT

Seizoen	Gemiddelde temperatuur de Bilt
Winter	3,4 °C
Lente	9,5 °C
Zomer	17,0 °C
Herfst	10,6 °C

5. ONDERLINGE INTERACTIE WKO EN OWB TE UTRECHT

5.1. RESULTATEN WORST-CASE SCENARIO

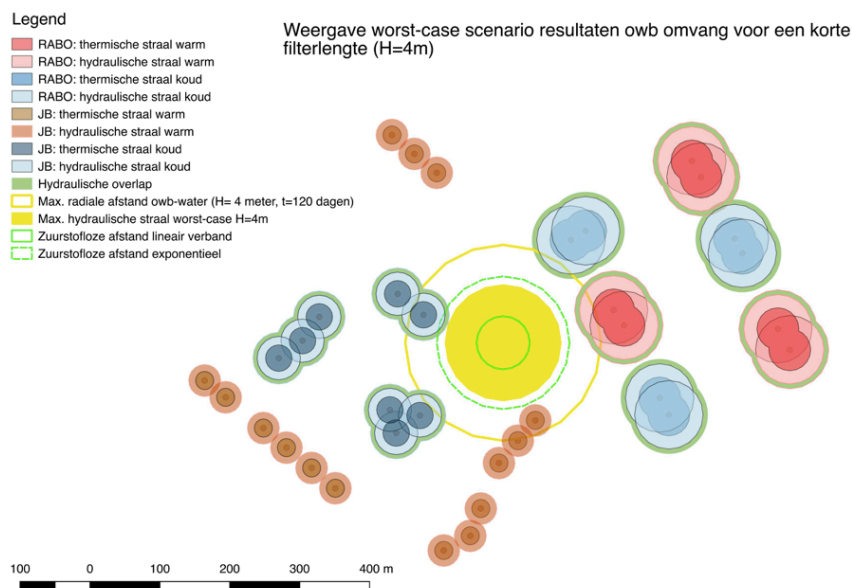
De resultaten naar het onderzoek voor de worst-case scenario zijn weergegeven in Afbeelding 5.1.1 en Afbeelding 5.1.2.

Korte filterlengte

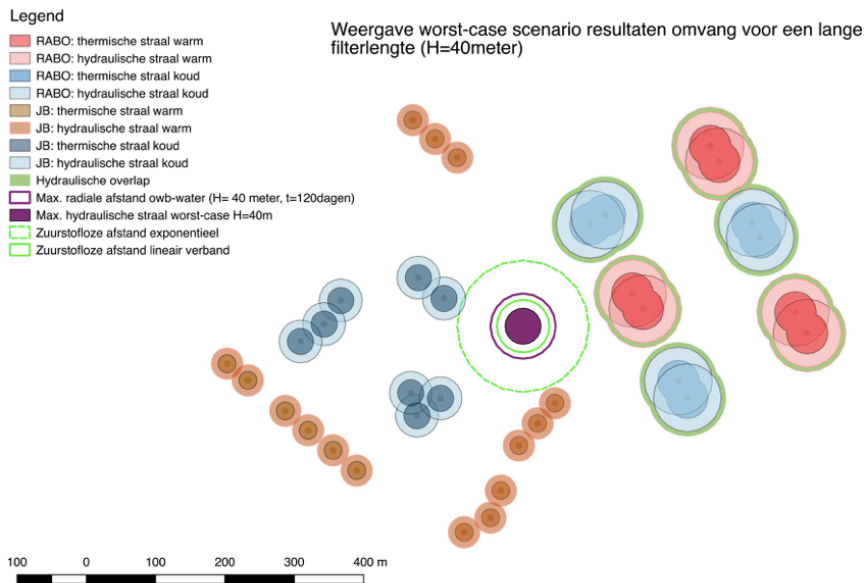
Bij het gebruik van een korte filterlengte is er geen sprake van een overlap tussen de maximale hydraulische straal van het owb-systeem en die van de wko-systemen. De benedenstroomse maximale radiale afstand die het owb-water aflegt in 120 dagen is groter dan de afstand tot waar zuurstof komt op basis van de resultaten van Antoniou et al. (2012). Dit geldt zowel voor de afstand bepaald aan op basis van een lineair verband tussen concentratie en afstand als voor de waarde op basis van een exponentieel verband.

Lange filterlengte

Bij het gebruik van een lange filterlengte is er geen sprake van een overlap tussen de maximale hydraulische straal van het owb-systeem en die van de wko-systemen. De benedenstroomse maximale radiale afstand die het owb-water aflegt in 120 dagen is kleiner dan de afstand tot waar zuurstof komt op basis van de resultaten voor het exponentiele verband van Antoniou et al. (2012). Deze afstand is echter groter dan de zuurstofgrens op basis van een lineair verband.



AFBEELDING 5.1.1 BOVENAANZICHT RESULTATEN WORST-CASE SCENARIO BIJ HET GEBRUIK VAN EEN KORTE FILTERLENGTE (H=4M)



AFBEELDING 5.1.2 BOVENAANZICHT RESULTATEN WORST-CASE SCENARIO BIJ HET GEBRUIK VAN EEN LANGE FILTERLENGTE (H=40M)

5.2. RESULTATEN WAARSCHIJNLIJKE SCENARIO

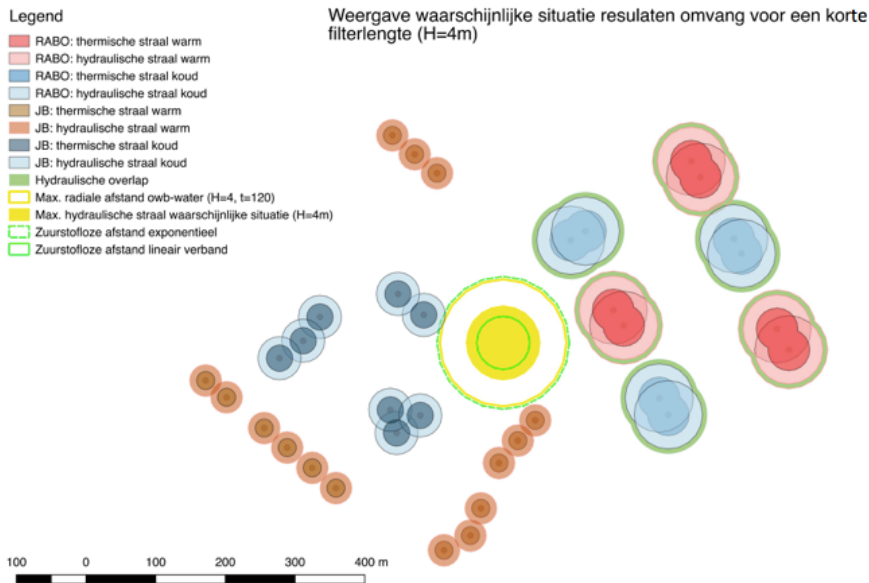
De resultaten naar het onderzoek voor het waarschijnlijke scenario zijn weergegeven in Afbeelding 5.2.2 en Afbeelding 5.2.1

Korte filterlengte

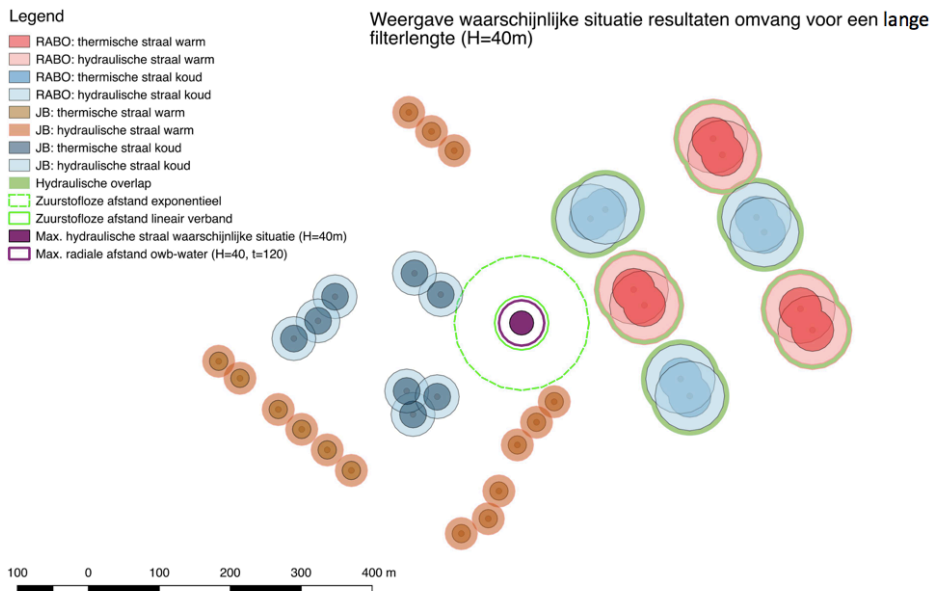
Bij het gebruik van een korte filterlengte is er geen sprake van een overlap tussen de maximale hydraulische straal van het owb-systeem en die van de wko-systemen. De benedenstroomse maximale radiale afstand die het owb-water aflegt in 120 dagen is net kleiner dan de afstand tot waar zuurstof komt op basis van de resultaten voor het exponentieel verband van Antoniou et al. (2012). Deze afstand is echter groter dan de zuurstofgrens op basis van een lineair verband.

Lange filterlengte

Bij het gebruik van een lange filterlengte is er ook geen sprake van een overlap tussen de maximale hydraulische straal van het owb-systeem en die van de wko-systemen. De benedenstroomse maximale radiale afstand die het owb-water aflegt in 120 dagen is kleiner dan de afstand tot waar zuurstof komt op basis van de resultaten van Antoniou et al. (2012). Dit geldt zowel voor de de afstand bepaald aan op basis van een lineair verband tussen concentratie en afstand als voor de waarde op basis van een exponentieel verband.



AFBEELDING 5.2.1 BOVENAANZICHT RESULTATEN WAARSCHIJNLIJKE SCENARIO BIJ HET GEBRUIK VAN EEN KORTE FILTERLENGTE (H=4M)



AFBEELDING 5.2.2 BOVENAANZICHT RESULTATEN WAARSCHIJNLIJKE SCENARIO BIJ HET GEBRUIK VAN EEN LANGE FILTERLENGTE (H=40M)

5.3. RESULTATEN BEST-CASE SCENARIO

De resultaten naar het onderzoek voor het waarschijnlijke scenario zijn weergegeven in Afbeelding 5.3.1 en Afbeelding 5.3.2.

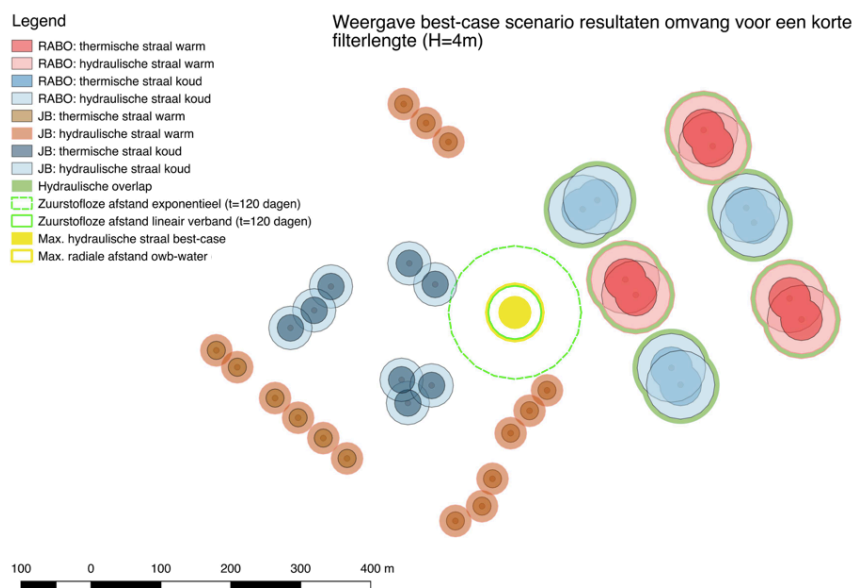
Korte filterlengte

Bij het gebruik van een korte filterlengte is er geen sprake van een overlap tussen de maximale hydraulische straal van het owb-systeem en die van de wko-systemen. De benedenstroomse maximale radiale afstand die het owb-water aflegt in 120 dagen is kleiner dan de afstand tot waar

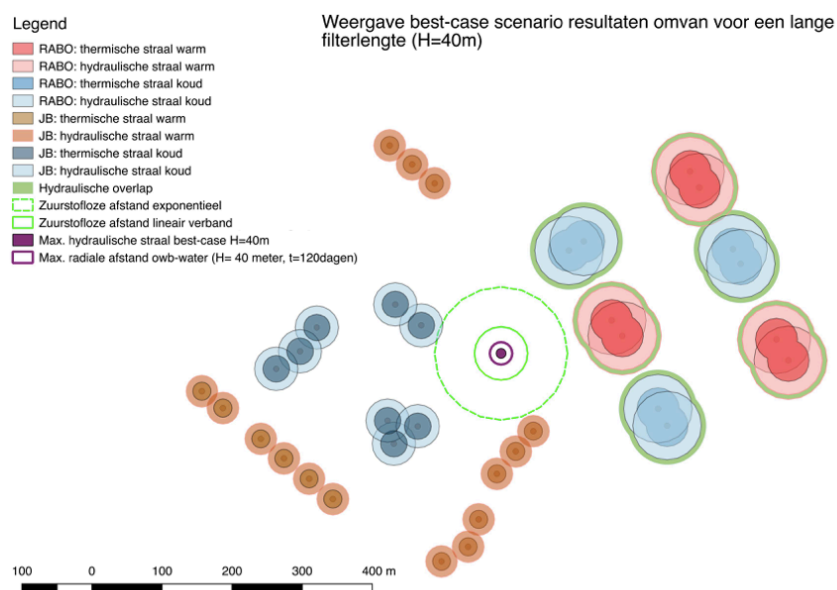
zuurstof komt op basis van de resultaten voor het exponentieel verband van Antoniou et al. (2012). Deze afstand is echter net groter dan de zuurstofgrens op basis van een lineair verband.

Lange filterlengte

Bij het gebruik van een lange filterlengte is er ook geen sprake van een overlap tussen de maximale hydraulische straal van het owb-systeem en die van de wko-systemen. De benedenstroomse maximale radiale afstand die het owb-water aflegt in 120 dagen is veel kleiner dan de afstand tot waar zuurstof komt op basis van de resultaten van Antoniou et al. (2012). Dit geldt zowel voor de de afstand bepaald aan op basis van een lineair verband tussen concentratie en afstand als voor de waarde op basis van een exponentieel verband.



AFBEELDING 5.3.1 BOVENAANZICHT RESULTATEN BEST-CASE SCENARIO BIJ HET GEBRUIK VAN EEN KORTE FILTERLENGTE (H=4M)



AFBEELDING 5.3.2 BOVENAANZICHT RESULTATEN BEST-CASE SCENARIO BIJ HET GEBRUIK VAN EEN LANGE FILTERLENGTE (H=40M)

6. DISCUSSIE

6.1. DISCUSSIEPUNTEN ONTWERP ONDERGRONDSEWATERBERGING

Natuurlijke infiltratie vs. injectiepomp

Natuurlijke infiltratie van het hemelwater kan een lange tijd duren bij een klein stijghoogteverschil. Hier moet rekening mee worden gehouden bij het ontwerp van het owb-systeem. Enerzijds zorgt dit voor een langzame verwerking van het hemelwater en anderzijds zorgt dit voor een minder grote owb-water verspreiding.

Meegevoerd vuil

Bij het afvoeren van het regenwater dat op tien hectare verhard oppervlakte valt naar het plantsoen brengt veel vuil met zich mee. Hier moet rekening mee worden gehouden bij het ontwerpen van het owb-systeem om (put)verstoppingen te voorkomen.

Verontreinigde aquifer

Door het drukke netwerk aan wko-systemen in Utrecht is het grondwater in de eerste watervoerende laag verontreinigd (Phernambucq, 2015). De oorzaak hiervan is het verspreiden en verdunnen van de verontreinigingen door wko-systemen. Dit gebeurt wanneer het geïnjecteerde volume, vermengt met het reeds verontreinigde grondwater, weer wordt onttrokken en vervolgens wordt geïnjecteerd in een andere bron. De verontreiniging is hierdoor weliswaar verdund, maar het totale hoeveelheid neemt toe door de verspreiding. Dit is niet meegenomen in deze studie, maar het zou wel degelijk invloed kunnen hebben op de reactie met het zuurstofrijke hemelwater.

Diepte owb-filter

De korte filterlengte is gekozen op 4 meter omdat dit de mogelijkheid lijkt te geven om het owb-systeem boven de filter van de wko-systemen in de aquifer te plaatsen. Dit zou ervoor zorgen dat de radiale stroming van het geïnjecteerde water nooit mengt met de wko-bronnen. Om deze toepassing verder uit te werken zou nader onderzoek gedaan moeten worden naar onder andere het verticale verloop van zuurstof en neerslag reacties. In de conclusie is deze optie mogelijkheid buiten beschouwing gelaten.

Resultaten Antoniou et. Al (2012) vs. Radiaal afgelegde afstand water

De representativiteit van de onderzoeksresultaten van Antoniou et al. (2012) zou nader onderzocht kunnen worden aan de hand van een vergelijking tussen de chemische samenstellingen tussen de aquifer in Herten en in Utrecht. Indien er is over is onderzocht of het lineaire of exponentiele verband tussen de concentratie en afstand accurater is kan er voor ieder scenario een preciezere zuurstofgrens worden bepaald. Daarbij kan onderzoek naar het verband tussen afstand die zuurstof aflegt en de radiaal afgelegde stroming door water duidelijkheid geven over welke afstand maatgevend moet zijn:

S_{O_2} of $S_{H_2O,120}$.

6.2. ALTERNATIEVE TOEPASSINGEN HEMELWATER VERWERKING

Meerdere owb-bronnen

De locatie van de drainerende bronnen ten opzichte van de owb bron verschilt per seizoen en daarmee verschilt ook het maximale zuurstofbereik per seizoen. Indien er meerdere infiltratieputten zijn kan er altijd geïnfilteerd worden in de bron op de langste afstand van drainerende wko-bron. Zuurstof heeft dan minder kans om de bron te bereiken.

Daarnaast is het afwisselend gebruiken van meerdere bronnen een effectieve manier om putverstoppingen in de filter te voorkomen. Putverstoppingen ontstaan door neerslag reacties bij de putfilter zelf. Verstoppingen beginnen vaak aan de top van het filter en na een langere tijd kan de hele put verstopt raken. Dit heeft een negatief effect op de productiviteit van de put. Een opslagperiode zorgt ervoor dat micro-organismen die de neerslag vormen geen voedingsstoffen meer krijgen en afbreken. (Hoogvliet, et al., 2016-01). Een andere manier is het terugwinnen van hemelwater.

Verschillende locaties bronnen

Om de ondergrondse waterberging te realiseren zal een groot en nieuw netwerk aan infrastructuur nodig zijn om al het hemelwater naar het plantsoen te leiden. Een alternatieve methode kan zijn om op meerdere locaties in het plangebied infiltratieputten te maken zodat er minder aanleg van nieuwe infrastructuur nodig is. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan bestaande plantsoenen of in geulen van het verharde oppervlakte.

Terugwinnen hemelwater

Het omkeren van de stromingsrichting in een filter zorgt ervoor dat neerslagproducten loslaten. Wanneer er ook daadwerkelijk water terug wordt gewonnen voor de put zorgt dit na een paar weken voor bijna een totale verdwijning van de neerslag producten in de filter (Antoniou, van Breukelen, Putters, & Stuyfzand, 2012).

Hemelwater gebruiken voor neutrale energiebalans

Uit het milieueffectenrapport van de wko-systemen in Utrecht blijkt dat bij veel wko-systemen sprake is van een thermische onbalans. Dit komt deels door de energieverliezen in de grond (Bloemendal & Boerefijn, 2010). Het hemelwater kan dienen als opvulling voor het eventuele warmte- en/of koude tekort. Immers, uit paragraaf 4.3 blijkt dat het regenwater in de zomer rond de 17 graden is en dit is dezelfde temperatuur als de warmte bronnen in de bodem. Het regenwater in andere seizoenen kunnen ter aanvulling van de koude bron dienen.

Voorbehandelen hemelwater

Indien het hemelwater anaeroob gemaakt wordt door middel van een voorzuivering wordt zuurstofverspreiding vermeden.

Opvang in deklaag bassins

Een hemelwateroverschot kan tijdelijk worden opgeslagen in ondergrondse bassins en hierna worden hergebruikt of afgevoerd via de hiervoor aangelegde infrastructuur in de deklaag. Hierbij zal geen menging tussen met het grondwater plaatsvinden.

7. CONCLUSIE

Uit de onderzoeksresultaten kan geconcludeerd worden dat er een mogelijkheid is om een owb-put te implementeren op de locatie in Utrecht tussen de Rabobank en de Jaarbeurs onder bepaalde condities.

Voor ieder scenario geldt dat de hydraulische straal van het owb-systeem bij het gebruik van filterlengtes tussen de 4-40 meter geen overlap heeft met de hydraulische straal van de omliggende wko-systemen bij het kiezen van de juiste locatie.

Daarnaast zorgt ook de zuurstofgrens op basis van de de onderzoeksresultaten in Herten geen overlap met de systemen bij het kiezen van de juiste locatie van de put. Om de minimale afstand per scenario tussen een wko-bron en owb-bron echter preciezer te bepalen zal er meer onderzoek moeten worden gedaan over de representativiteit van resultaten op basis van het exponentiele- en het lineaire verband.

Hieronder worden de ontwerpcondities per scenario behandeld.

Worst-case scenario

Bij een filterlengte van 4 meter geldt $s_{H20,120} > s_{o2}$. Daarbij is $s_{H20,120}$ zo groot dat het menging veroorzaakt van het geïnfilterde owb-water met de wko-bronnen in 120 dagen. Hierdoor is in deze situatie het gebruik van de korte filter af te raden.

Bij het gebruik van een filterlengte van 40 meter geldt $s_{o2,lineair} < s_{H20,120} < s_{o2,exponentieel}$. De minimale afstand tussen een wko- en owb-bron moet bij deze filterlengte dus gelijk zijn aan het zuurstofbereik op basis van de exponentiele verhouding. Dit is gelijk aan 95 meter.

Waarschijnlijke scenario

Bij een filterlengte van 4 meter geldt $s_{o2,lineair} < s_{H20,120} < s_{o2,exponentieel}$. De minimale afstand tussen een wko- en owb-bron moet bij deze filterlengte dus gelijk zijn aan het zuurstofbereik op basis van de exponentiele verhouding. Dit is gelijk aan 95 meter.

Bij het gebruik van een filterlengte van 40 meter geldt $s_{H20,120} < s_{o2}$. Menging met de omliggende wko-systemen lijkt in deze situatie niet op te treden op een afstand van de hydraulische wko stralen tussen de $s_{o2,lineair}$ en $s_{o2,exponentieel}$.

Best-case scenario

De conclusie die getrokken kan worden op basis van de best-case resultaten komt overeen met die van de waarschijnlijke scenario.

REFERENTIE

- Antoniou, E., van Breukelen, B., Putters, B., & Stuyfzand, P. (2012). Hydrogeochemical patterns, processes and mass transfers during aquifer storage and recovery (ASR) in an anoxic sandy aquifer. *Elsevier, Applied Geochemistry*(27), 0883-2927.
- Arcadis. (2017). *2E ACTUALISATIE AANVULLEND MER STATIONSGBIED UTRECHT*. Utrecht: Gemeente Utrecht.
- Bloemendal, M., & Boerefijn, M. (2010). *Samenvatting M.e.r. KWO Stationsgebied Utrecht*. Hoog Catharijne BV, gemeente Utrecht, NS-Vastgoed en ProRail . Utrecht: Tauw bv.
- Bloemendal, M., Hoogendoorn, J., & Rijk, S. (2016, november 8). Bodemenergie & Drinkwaterwinningen. *H2O online*, 2191873.
- Bonte, M., van Breukelen, B., & Stuyfzand, P. (2013). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water research*(47(14)), 5088-5100.
- Brandsma, T., Koek, F., Wallbrink, H., & Können, G. (2000). *Het KNMI-programma HISKLIM (Historisch Klimaat)*. De Bilt. De Bilt: KNMI.
- Gemeente Utrecht. (2017). *Naar een groter centrum (Beurskwartier en Lombokplein)*. Utrecht: gemeente Utrecht.
- Hoogvliet, M., van Meerten, H., Paalman, M., van der Schans, M., Stuurman, R., & Broks, K. (2016-01). *Ondergronds bergen en terugwinnen van water in stedelijk gebied*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- KNMI. (2016). *Weerstatistieken De Bilt - 2016Maandgemiddelde temperaturen* . Opgeroepen op oktober 18, 2017, van Weerstatistieken De Bilt - 2016: <https://weerstatistieken.nl/de-bilt/2016>
- Lenntech BV. (1998-2017). *WATER TREATMENT SOLUTIONS: Zuurstof en water: reacties, milieu- en gezondheidseffecten* . Opgeroepen op Oktober 18, 2017, van Lenntech: <https://www.lenntech.nl/periodiek/water/zuurstof/zuurstof-en-water.htm>
- Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag. (2006). *Werkwijzen en richtlijnen voor ondergrondse energieopslag (Methods and Guidelines Underground Energy Storage)*. report, NVOE, Woerden, The Netherlands.
- Peeters, M. (2003). Hydrologische effectenberekening bij thermische energieopslagsystemen . *Stromingen*, Nummer 2(9), 13-24.
- Phernambucq, I. (2015). *Contaminant spreading in areas with a high density of Seasonal Aquifer Thermal Energy Storage (SATES) systems : describing and quantifying the causes and*

consequences of spreading by SATES systems in the Dutch subsurface. University of Utrecht, Earth Surface and Water. The Netherlands: KWR, Watercycle Research Institute.

Rijksoverheid. (2010, januari 1). *Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit*. Opgehaald van Bodemrichtlijn: <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemsaneringstechnieken/b-in-situ-reiniging/b1-algemene-aspecten-in-situ-reiniging/in-situ-sanering-doorlatendheid-van-de-bodem>

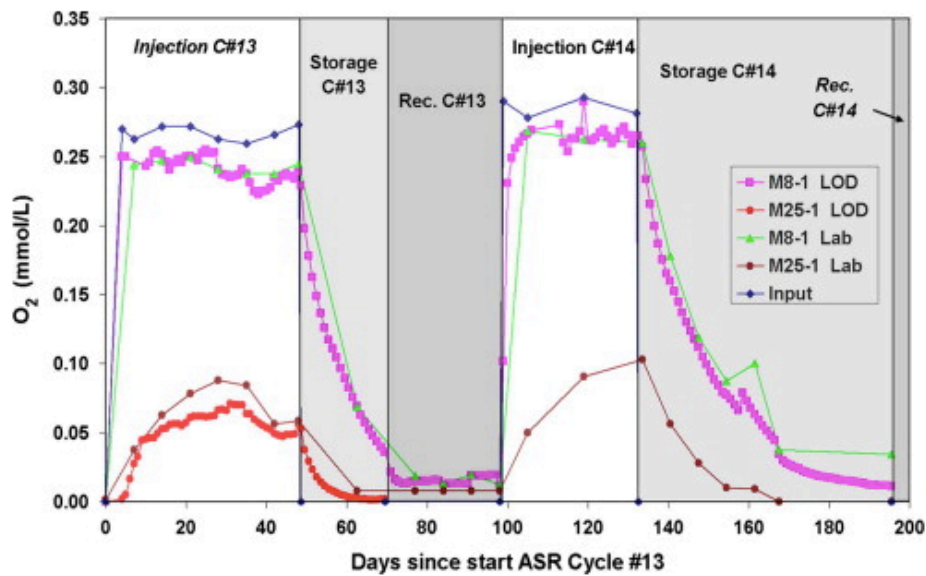
Ritzen, G. (2016, juli 6). Kijken: zo neemt de verstedelijking de wereld over. *NRC*.

Stichting RIONED. (2009). *Hoe werkt het riool: Rioolstelsels in Nederland*. Opgehaald van Website van stichting RIONED: <https://www.riool.info/rioolstelsels-in-nl>

Zuurbier, K., van der Schans, M., Paalman, M., de Putter, P., te Winkel, T., Velstra, J., & Oude Essink, G. (2015). *Technisch-juridische handreiking risicobeoordeling 'ondergrondse waterberging'*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).

BIJLAGE A: GEGEVENS ONDERZOEK HERTEN DOOR ANTHONIE ET AL. (2012)

Resultaten zijn gebruikt adhb zuurstofconcentratie tijdens injectiefase 13 op 8 meter en 25 meter van de put in aquifer laag A:



[Download full-size image](#)

Fig. 12. Oxygen behavior in aquifer layer A during ASR cycles 13 and 14, with distinction between samples analyzed in the laboratory (Lab) and on-line measurements in a flow-through cell (LOD).

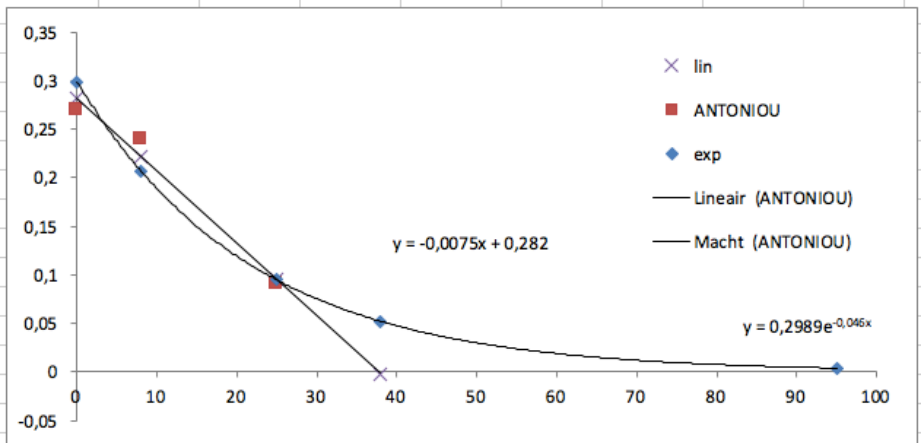
Table 3
Target aquifer characterization. Average values for 1–6 core samples.

Layer	Unit	A	B	C	D
Depth	m BGL	158.6–162.2	162.2–163.3	163.3–168	168–170
No. samples	n	4	1	4	6
K_n	m/d	52	10	22	15
Clay size fraction ^a	% d.w.	1.1	1.6	0.8	1.4
CEC	meq/kg	6.7	124.8	23.8	32.6
SOM	% d.w.	0.08	8.03	1.31	1.76
Pyrite ^b	% d.w.	0.05	0.25	0.07	0.09
Ca1cite ^c	% d.w.	<0.02	0.13	<0.01	0.15
Siderite ^d	% d.w.	<0.06	0.45	<0.07	0.25
<i>Fe speciation</i>					
Total	% d.w.	0.04	0.56	0.05	3.13
Hydroxide (by oxalate)	% d.w.	–	0.30	–	0.62
Exchangeable	% d.w.	<0.001	0.011	0.002	0.002
Pyrite	% d.w.	0.02	0.12	0.03	0.04
Siderite	% d.w.	<0.01	0.22	<0.03	0.12
<i>Mn speciation</i>					
Total	ppm	3	77	7	621
Hydroxide (by oxalate)	ppm	–	33	–	103
Exchangeable	ppm	0.2	4.8	0.7	1.0
Siderite	ppm	<3	40	<6	133
<i>Incubation experiment (Oxymax)</i>					
dO ₂ 12 °C	mmol/L/d	0.03	0.14	0.08	0.08
dCO ₂ 12 °C	mmol/L/d	0.03	0.12	0.06	0.22
dCO ₂ /dO ₂ 12 °C	mmol/L/d	0.86	0.86	0.73	2.88
dO ₂ 26 °C	mmol/L/d	0.09	0.34	0.18	0.17
dCO ₂ 26 °C	mmol/L/d	0.06	0.18	0.09	0.44
dCO ₂ /dO ₂ 26 °C	mmol/L/d	0.61	0.53	0.48	2.63

^a Grain size fraction <2 µm.
^b Containing As, Co, Ni and Zn.
^c Containing Mg.
^d Containing Mn.

BIJLAGE B: EXCEL BEPALING LINEAIR EN EXPONENTIEEL VERBAND AFSTAND TOT DE BRON EN ZUURSTOFCONCENTRATIE

ANTONIOU				
	m afstand	concentratie	lin	exp
	0	0,27	0,282	0,2989
	8	0,24	0,222	0,2068738
	25	0,09	0,0945	0,0946427
lin	38		-0,003	0,052045
exp	95		-0,4305	0,0037815



BIJLAGE C: EXCEL BEPALING RADIAAL AFGELEGDE AFSTAND INFILTRATIEWATER IN UTRECHT PER TIJD

radial distance A	v [m/d]	v tot	radial distar A	v [m/d]	v tot m/d	tijd/0,5m	travel time vanaf bron
0,5	125,66371	3,1194369	3,0920396	0,1617056	0,1617056	-0,5	3,1468341
1	251,32741	1,5597184	1,5323212	0,3234112	0,3234112	-1	1,5811157
2	502,65482	0,7798592	0,7524562	0,6468224	0,6468224	-1,5	1,0672096
3	753,98224	0,5199061	0,4925089	0,9702336	0,9702336	-2	0,8053818
4	1005,3096	0,3899296	0,3625324	1,3036448	1,3036448	-2,5	0,6341487
5	1256,6371	0,3119437	0,2845464	1,637056	1,637056	-3	0,5173934
10	2513,2741	0,1559718	0,1385740	3,274112	3,274112	-5	0,2586967
15	3769,9112	0,1039812	0,0765884	4,911168	4,911168	-7,5	0,1724014
20	5026,5482	0,0779859	0,0505887	6,548224	6,548224	-10	0,1218282
25	6283,1853	0,0623887	0,0349915	8,18528	8,18528	-12,5	0,0879404
30	7539,8224	0,0519906	0,0245934	9,822336	9,822336	-15	0,0653818
40	10053,096	0,0389929	0,015957	13,036448	13,036448	-20	0,0389929
50	12566,371	0,0311944	0,0097971	16,25056	16,25056	-25	0,0274014
60	15079,645	0,0259953	0,0061402	19,464672	19,464672	-30	0,0206874
70	17592,919	0,0222817	0,004116	22,678784	22,678784	-35	0,0163738
80	20106,193	0,0194965	0,0027901	25,892896	25,892896	-40	0,0130602
90	22619,467	0,0173302	0,0019067	29,107008	29,107008	-45	0,0103466
100	25132,741	0,0155972	0,00138	32,32112	32,32112	-50	0,008033

flow velocity at radial distance from well [m/d]

Reistijd van water om een radiale afstand van de put te bereiken (dagen)