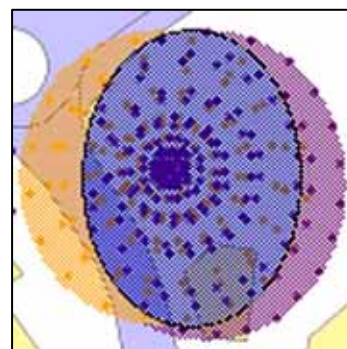
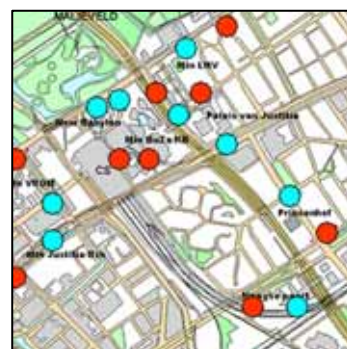
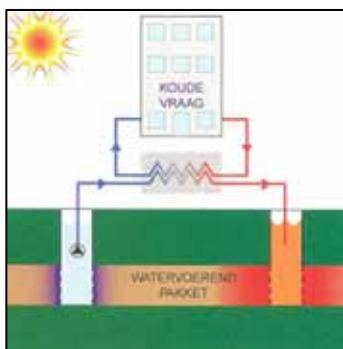




Meervoudige ontwerp- en effectenstudie van koude-warmteopslagsystemen in de binnenstad van Den Haag

Afstudeerrapport
B.G. van de Weerdhof





Meervoudige ontwerp- en effectenstudie van koude-warmteopslagsystemen in de binnenstad van Den Haag

‘De provincie Zuid-Holland zit er warmpjes bij’

referentie ZZWA5122/weeb/001	projectcode ZZWA5122-1	status definitief
projectleider drs. A. Kreleger	projectdirecteur ir. Th.G.J. Witjes	datum 29 juli 2005

autorisatie goedgekeurd	naam drs. A. Kreleger	paraaf
-----------------------------------	---------------------------------	---------------

Witteveen+Bos
Louis Armstrongweg 6
postbus 10095
1301 AB Almere
telefoon 036 548 29 00
telefax 036 533 38 83



Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd volgens ISO 9001 : 2000

© Witteveen+Bos
Niets uit dit bestek/drukwerk mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs b.v., noch mag het zonder een dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd.

Meervoudige ontwerp- en effectenstudie van koude-warmteopslagsystemen in de binnen- stad van Den Haag

‘De provincie Zuid-Holland zit er warmpjes bij’

Björn van de Weerdhof
Juli, 2005

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Watermanagement
Stevinweg 1
2600 GA Delft

Afstudeercommissie:

Dhr. prof. dr. ir. Th. Olsthoorn	-	Technische Universiteit Delft
Mevr. drs. A. Kreleger	-	Witteveen+Bos
Dhr. dr. ir. C. Maas	-	Kiwa
Dhr. dr. ir. G.J.M. Uffink	-	Technische Universiteit Delft
Dhr. dr. E.J.M. Veling	-	Technische Universiteit Delft



VOORWOORD

Voor u ligt mijn afstudeerrapport van de 'MSc Civil Engineering', die ik heb gevolgd bij de afdeling watermanagement aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het rapport behandelt het ontwerptraject en onderlinge beïnvloeding van koude-warmteopslagsystemen.

De voorbereiding van dit rapport is een lang en interessant onderzoek geweest, dat is uitgevoerd bij het raadgevend ingenieurs- en adviesbureau Witteveen+Bos te Almere. Het onderzoek had echter niet kunnen plaatsvinden zonder de aanmoedigingen en steun van familie, vrienden en begeleiders. Een aantal van hen wil ik in het bijzonder bedanken. Mijn hoofdbegeleider Theo Olsthoorn voor het getoonde enthousiasme en altijd positieve inbreng aan kennis op het gebied van de geohydrologie. Amber Kreleger, dagelijks begeleider bij Witteveen+Bos, voor haar vrolijke inzet en kennis om mij vertrouwd te maken met het onderwerp en plezierige discussies en gesprekken tijdens het werken in Almere. Ed Veling, voor het beschikbaar stellen van en hulp bij het programma FLOP3N en kritische kijk op de inhoud van het onderzoek. De overige leden van de afstudeercommissie Kees Maas en Gerard Uffink, voor hun getoonde enthousiasme en interesse in mijn afstudeeronderwerp en opbouwende kritiek en waardevolle aanmerkingen. Leo van Wee, om het afstudeertraject bij Witteveen+Bos in Almere mogelijk te maken. Henk Spruit, hoofd afdeling Bodem en Grondwater van de provincie Zuid-Holland, voor het ter beschikking stellen van gegevens en interesse in het onderzoek. En als laatste, maar zeker niet de minste, mijn vriendin Femke Sanders voor haar steun en het aanhoren van mijn verhalen over dit afstudeeronderzoek.

Björn van de Weerdhof
Juli 2005

SAMENVATTING

Inleiding koude-warmteopslag

Koude-warmteopslag (KWO) in de bodem is een duurzame energievorm waarbij gebruik wordt gemaakt van de winning en opslag van omgevingswarmte met behulp van warmtepompen. Bij KWO wordt grondwater onttrokken uit een watervoerend pakket en daarin weer geretourneerd. Hierbij wordt op seizoensbasis alternerend koude en warmte in de bodem opgeslagen. Deze koude of warmte wordt vervolgens via een warmtewisselaar gebruikt voor koeling respectievelijk verwarming van bijvoorbeeld kantoren of kassen. Op deze manier kunnen aanzienlijke hoeveelheden aardgas worden bespaard en wordt de uitstoot van CO₂, NO_x en SO₂ verminderd.

Voor het onttrekken en retourneren van grondwater voor KWO in de bodem dient een vergunning in het kader van de Grondwaterwet aangevraagd te worden bij de desbetreffende provincie. Hierbij dient een geohydrologische effectrapportage te worden overlegd. Bij het vergunnen van een KWO-systeem eisen de provincies een energiebalans. Dit houdt in dat evenveel warmte uit de bodem dient te worden gehaald als er in wordt opgeslagen.

Probleemstelling

Vanwege het duurzame karakter van KWO en de korte terugverdientijd is het aantal geïnstalleerde systemen de laatste jaren sterk toegenomen. De verwachting is dat deze toename zich in de toekomst zal voortzetten. Inmiddels zijn circa 300 KWO-systemen geïnstalleerd in Nederland. De vraag van veel provincies is echter welke effecten optreden wanneer al deze systemen in hoge concentratie voorkomen. Daarnaast is een eenduidige definitie van de energiebalans onderwerp van discussie bij provincies. Deze discussie wordt gevoed door het feit dat thans veel systemen per saldo warmte lozen. De oorzaak van deze energieonbalans en de effecten zijn niet bekend.

Doel van het onderzoek

Om de probleemstellingen te kunnen onderzoeken zijn de volgende deeldoelen opgesteld:

- Het inzichtelijk maken van een ontwerptraject en het in kaart brengen van de ontwerpeisen die een rol spelen bij het ontwerpen van KWO-systemen.
- Helderheid creëren rondom de definitie van de energiebalans door processen in kaart te brengen die hierbij een rol spelen. Daarnaast oorzaken en effecten bepalen van een energieonbalans.
- Een evaluatie maken van het functioneren van KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag wat betreft de ontwerpeisen en vergunningvoorwaarden.
- Het inzichtelijk maken van onderlinge thermische effecten op korte en lange termijn voor de diverse KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag.

Ontwerptraject en -eisen

Twee type systemen zijn mogelijk om een KWO te installeren:

- het gescheiden systeem, waarbij zowel een koude als een warme bel worden gevormd;
- het recirculatiesysteem, waarbij geen belvorming plaatsvindt en van de natuurlijke grondwatertemperatuur en soms ook van de natuurlijke afstroming gebruik wordt gemaakt.

Het gescheiden systeem heeft als voordeel dat in de zomer voor koelingdoeleinden het water uit de koude bel een lage temperatuur ten opzichte van het grondwater heeft en in de winter voor verwarmingsdoeleinden het water uit de warme bel een hogere temperatuur heeft dan het grondwater. Minder grondwater hoeft te worden onttrokken door het recirculatiesysteem. Het recirculatiesysteem kent als voordeel dat het in de tijd een constante stroomrichting heeft, hetgeen geringere investeringskosten betekent. Bovendien is een recirculatiesysteem minder afhankelijk van de natuurlijke grondwaterstroming en –richting of zelfs baat heeft bij een sterkere grondwaterstroming.

Twee typen bronnen bestaan om de systemen te installeren:

- als een doublet, onttrekken en retourneren van grondwater geschiedt in twee verschillende putten;
- als een monobron, onttrekken en retourneren van grondwater vindt plaats in dezelfde boorgat, waarin een warm en een koud filter op verschillende hoogten worden geplaatst.

Het voordeel van de monobron is de besparing op de boorkosten, maar dit vereist een dik watervoerend pakket. Dit is niet altijd aanwezig. Daarom wordt meestal gekozen voor doubletten.

Het onderzoek was gericht op gescheiden KWO-systemen met doubletten, aangezien deze systemen over het algemeen worden geïnstalleerd in de binnenstad van Den Haag.

Ontwerpaspecten die van belang zijn voor KWO zijn:

- de grondwaterstroming, is van invloed op het type systeem;
- de wateropslagbehoefte, is van invloed op het aantal bronnen;
- het maximaal vermogen, is van invloed op het debiet;
- de filterlengte van de put, is van invloed op het aantal bronnen;
- de doorlatendheid van het watervoerend pakket, is van invloed op het pompvermogen;
- risico van putverstoppingen, is van invloed op het aantal bronnen.

De belangrijkste negatieve effecten van een KWO-systeem, die zoveel mogelijk beperkt dienen te worden, zijn:

- bodemverstoringen door het aantal geïnstalleerde bronnen;
- het opbarsten van bodemlagen;
- het hydraulisch invloedsgebied en zettingen die daar het gevolg van kunnen zijn;
- het thermisch invloedsgebied; dit kan opwarmen van de bodem tot gevolg hebben en nadelig invloed hebben op het invloedsgebied van een nabijgelegen KWO;
- menging van grondwater; dit kan het aantasten van de zoetwatervoorraad tot gevolg hebben

Positieve effecten zijn de vermindering van het primaire aardgasgebruik en de vermindering van de uitstoot van CO₂, NO_x en SO₂.

Een software programma Koude-WarmteOpslag-OntwerpAdviesProgramma (KWO-OAP) is in ontwikkeling om het ontwerpproces van KWO-systemen te ondersteunen en te vereenvoudigen (het programma kon tijdens dit onderzoek niet worden afgerond, wegens het tijdsbeslag dat het modelleren met HST-3D heeft gevegd). Het programma werkt volgens een aantal vuistregels van ontwerpaspecten en het baseert zich onder andere op theorieën over belvorming die tijdens dit onderzoek zijn opgesteld en gerapporteerd, richtlijnen van de Nederlandse Vereniging van Ondergrondse Energieopslag (NVOE) [NVOE, 2001] en onderzoek van IF Technology, [IF Technology, 2001].

Energieverlies

Door het injecteren van grondwater bij een KWO met een andere temperatuur dan de natuurlijke grondwatertemperatuur treedt altijd energieverlies op. De processen die dit veroorzaken zijn convectie (door de natuurlijke grondwaterstroming), conductie en dispersie. Voor elk van deze processen is onderzocht op welke manier zij van invloed zijn op het totale energieverlies bij een bepaalde vorm van een geïnjecteerde bel grondwater.

Het energieverlies door de natuurlijke grondwaterstroming vindt alleen plaats in het horizontale vlak rond het als volkomen beschouwde putfilter. In theorie treden de minste energieverliezen op als een bel wordt gevormd met een minimale filterlengte en een grote thermische straal.

Er is een eenvoudige methode afgeleid om te bepalen bij welke vorm van de bel het minste energieverlies door conductie optreedt. Volgens de theorie is dit als de verhouding tussen de filterlengte en thermische straal ongeveer 1:2 is. Bij kleinere verhoudingen van 1:2 zal het energiever-

lies door conductie nauwelijks toenemen. Voor verhoudingen die veel groter zijn dan 1:2 bestaat wel de kans dat grote energieverliezen zullen optreden naar boven- en onderliggende lagen. Indien meerdere bronnen toegepast worden heeft het voordeel deze relatief dicht bij elkaar te plaatsen.

Theoretisch gezien heeft de vorm van de bel geen invloed op de mate van energieverlies dat door dispersie zal optreden. Het energieverlies door dispersie is afleidbaar nagenoeg uitsluitend van het volume van de bel afhankelijk. Het energieverlies door dispersie kan daarom beperkt worden door een hogere injectietemperatuur toe te passen. Hierdoor zal het volume van de bel minder groot zijn waardoor het energieverlies door conductie zal toenemen vanwege een groter temperatuurverschil en de ongunstiger verhouding tussen omtrek en volume. Het energieverlies door conductie is bij KWO-systemen bovendien dominant, zodat bij kleinere bellen met hogere (of lagere) temperatuur feitelijk meer energie verloren gaat.

Energiebalans

Verwarring bestaat over het gebruik van de term energiebalans voor een KWO. In dit onderzoek is de volgende definitie aangehouden: de energie die in de bodem wordt gebracht moet gelijk zijn aan de energie die teruggewonnen wordt. Dit staat los van de processen die leiden tot energieverlies.

In veel gevallen blijkt een energieonbalans bij KWO-systemen op te treden. De verschillende aspecten van een energie(on)balans zijn onderzocht.

De mogelijke oorzaken van het ontstaan van een energieonbalans kunnen zijn:

- verandering van gebruik van het gebouw;
- foutieve inschatting van energieverliezen van het bovengronds systeem;
- onjuist functioneren van de gebouwinstallatie;
- klimaatverandering (effectieve temperaturen komen niet overeen met het ontwerp, bijv. winters zijn te zacht. Dit effect neemt mogelijk toe in de toekomst).

Nadeel van een gehandhaafde energiebalans kan zijn:

- kans op onnodige energievernietiging

Nadelen van een energieonbalans kunnen zijn

- aantrekken van zout water
- temperatuurverandering in de omgeving van het KWO-systeem en mogelijk aan maaiveld
- structureel opwarming van het grondwater; bij structureel 20% warmte lozen per jaar kan de bodem in het centrum van Den Haag in 30 jaar ongeveer 4,5°C opwarmen
- 'vervuilen' van de eigen bron met achtergebleven warmte of koude

Deze nadelen vormen voor de provincies een onderbouwing om een energiebalans te eisen.

Evaluatie functioneren KWO-systemen binnenstad van Den Haag

Uit de evaluatie van de gegevens van de KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag blijkt dat de grootte van de onttrokken debieten toeneemt met de jaren. Daarnaast zijn de onttrokken debieten veelal kleiner dan is vergund. Alleen het KWO-systeem van het Stadhuis onttrekt incidenteel grotere debieten dan vergund.

Met betrekking tot de energiebalans is ook een aantal opmerkingen te maken. Alle geïnstalleerde KWO-systemen, behalve het systeem van Paleis van Justitie, dienen volgens de vergunning te voldoen aan de energiebalanseis. Echter, hoewel nog te weinig gegevens hierover beschikbaar zijn, is te herleiden dat over het algemeen warmte wordt geloosd. Het systeem van Paleis van Justitie is ontworpen met een bewuste onbalans, waarbij koudelozing is toegestaan. Echter ook het systeem van Paleis van Justitie lost warmte.

Warmtelozing en klimaatverandering zouden met elkaar in verband kunnen worden gebracht aangezien de afgelopen jaren de winters steeds zachter zijn geworden en de zomers steeds warmer.

Om inzicht te krijgen in onderlinge beïnvloeding zijn modelberekeningen gedaan in FLOP3N. Dit is een computercode waarmee stroombanen vanaf bronnen op een analytische manier berekend worden.

Onderlinge beïnvloeding van KWO-systemen

Omdat op het moment van het doen van dit onderzoek onvoldoende gegevens over onttrekkings- en injectiedebieten bekend waren om de werkelijke effecten te bepalen, zijn representatieve scenario's opgesteld om effecten te bepalen voor diverse situaties.

De onderlinge invloed van KWO-systemen is bepaald voor de systemen: Paleis van Justitie, Ministerie van Buitenlandse Zaken, LNV en Babylon. Daarna is ingezoomd op de koude bellen van Babylon en het Ministerie van Buitenlandse Zaken.

Conclusies

Het ontwerp van een KWO-systeem is met name afhankelijk van de lokale geohydrologie en de randvoorwaarden die opgelegd worden door het bovengrondse systeem. Dit gecombineerd levert een pakket aan ontwerpaspecten die door middel van een (nog uit te ontwikkelen) ontwerpshet integraal kunnen worden meegenomen. Een eerste aanzet is gemaakt tot het ontwikkelen van een softwareprogramma dat het ontwerpproces van KWO kan ondersteunen en vereenvoudigen.

De energiebalanseis houdt in dat er evenveel warmte of koude in de bodem wordt gebracht als er ook weer uit wordt gehaald. De NVOE hanteert weliswaar een andere definitie, maar gebleken is dat de energiebalans los staat van processen die leiden tot energieverliezen. Een goed ontwerp van KWO-systemen kan energieverlies beperken. Het uiteindelijke beheer van KWO-systemen moet de energiebalans garanderen.

In de praktijk blijkt dat in Den Haag de meeste systemen per saldo warmte lozen, oftewel in onbalans zijn. Daar staat tegenover dat minder grondwater wordt gebruikt dan van tevoren was verwacht. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de ruime marges die zijn aangehouden bij het ontwerp.

Toch lijkt op basis van berekeningen de onbalans bij de huidige KWO-systemen geen onderlinge problemen op te leveren, doordat thermische interactie uitblijft door de relatief grote afstanden tussen de geïnstalleerde systemen, ook in het "drukke" centrum van Den Haag.

Wel blijkt dat de installatie van een nieuw KWO-systeem kortdurend (gedurende één seizoen) zal leiden tot een rendementsverlies bij bestaande systemen in de buurt. Op de langere termijn worden echter geen problemen verwacht, mits de systemen continu en min of meer synchroon dezelfde debieten blijven onttrekken. Variërende onttrekkings- en retourneringsdebieten per seizoen en asynchroon gebruik van naburige KWO-systemen zullen namelijk wel leiden tot onderlinge beïnvloeding.

Aanbevelingen

Om op basis van werkelijke onttrokken en geretourneerde debieten een uitspraak te doen over het functioneren van geïnstalleerde systemen, dienen de provincies meer gegevens hierover te achterhalen. Tezamen met deze gegevens dienen de hoeveelheden opgeslagen en verbruikte energie te worden aangeleverd door de vergunninghouders.

Ten tijde van voorliggend onderzoek is een hiaat geconstateerd in HST3D, waardoor het programma de ingebrachte energie in en uitgehaalde energie uit de grond en grondwater door de onttrekkings- en retourneringsdebieten van putten verkeerd berekende. De opgestelde theorieën van energieverliesprocessen die bij KWO belangrijk zijn, konden hierdoor onvoldoende worden getoetst. Aanbevolen wordt de theorieën met een verbeterde versie van HST3D te toetsen. Het hiaat is inmiddels door de maker van HST3D hersteld.

Vanwege hetzelfde probleem met HST3D zijn geen rendementsberekeningen uitgevoerd. Met een verbeterde versie van HST3D in combinatie met uitgebreide meetgegevens kunnen rendementsberekeningen worden uitgevoerd.

Provincies wordt aanbevolen bij twijfel over de invloed van een nieuw KWO-systeem bij een vergunningaanvraag aan de hand van een checklist alle mogelijke vragen beantwoord te krijgen. Op deze checklist zouden de volgende punten vermeld kunnen staan:

- Is de onderlinge afstand tussen de koude en warme bronnen van de twee systemen groot genoeg om thermische interactie te voorkomen?
- Hoe groot is het rendementsverlies ten gevolge van het verplaatsen van de koude of warme bellen van het bestaande systeem door het aanzetten van het nieuwe systeem?
- Hoe flexibel is het nieuwe systeem, oftewel hoe gaat het systeem om met verschillende koude- en warmtevragen per seizoen, zijn grote verschillen in onttrekkings- en retourneringsgebieden te verwachten?
- Wat zijn de verwachte extra pompenergiekosten bij het al bestaande systeem ten gevolge van stijghoogteverlagingen of -verhogingen door het nieuwe KWO-systeem?

In het kader van de energiebalanseis lijkt een discussie aangaande het nut hiervan van belang. De provincies dienen hiertoe één beleid te vormen en de voor- en nadelen van een energiebalans duidelijk uiteen te zetten. De watertafel wordt als een geschikt middel hiervoor gezien.

In verband met de energiebalans, is het van belang dat de overheid normen stelt ten aanzien van het temperatuurverloop waarmee bij het ontwerp rekening moet worden gehouden. Het ligt voor de hand een verloop te kiezen dat mede op basis van klimaatsvoorspelling is te verwachten gedurende de levensduur van het systeem.

Aangezien op basis van de huidige geringe hoeveelheid gegevens al duidelijk is dat veel KWO-systemen op seizoensbasis feitelijk warmte lozen, verdient wellicht de werking van met name het bovengronds systeem meer aandacht. Wellicht is het mogelijk deze systemen zo te ontwikkelen dat middels goed beheer en flexibele processen de energiebalans wel kan worden gehandhaafd. In de regel betekent dit de aanleg extra systemen om de overwarmte af te voeren naar de lucht.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	II
SAMENVATTING	III
1. INLEIDING	1
1.1. Aanleiding	1
1.2. Probleemstelling	2
1.3. Doelstelling	2
1.4. Aanpak	2
1.5. Leeswijzer	3
2. ASPECTEN KOUDE- WARMTEOPSLAG	4
2.1. Beleid	4
2.1.1. Provinciaal beleid Zuid-Holland	4
2.1.2. Watertafel 26 mei 2005	5
2.2. Het ondergrondse systeem	6
2.2.1. Onttrekkings- en retourneringsstelsel	6
2.2.2. Bronnen	7
2.3. Het bovengrondse systeem	8
2.4. Ontwerpparameters KWO	8
2.4.1. Utiliteitsbouw	9
2.4.2. Glastuinbouwkassen	10
2.5. Putverstoppingen	10
2.6. Milieuaspecten KWO	11
2.6.1. Negatieve effecten	11
2.6.2. Positieve Effecten	12
2.7. Conclusies aspecten KWO	13
3. THEORETISCHE ACHTERGROND EFFECTBEREKENINGEN KWO	14
3.1. Parameters van grond en grondwater	14
3.2. Processen van hydraulische en thermische effecten	14
3.3. Vergelijkingen	15
4. ENERGIEVERLIES VS. ENERGIEBALANS	16
4.1. Energieverlies: Theoretische achtergrond	16
4.1.1. Energieverlies door convectie	16
4.1.2. Energieverlies door conductie	17
4.1.3. Energieverlies door dispersie	19
4.1.4. Conclusie theoretische achtergrond	21
4.2. Energieverlies versus rendement van een KWO-systeem	21
4.3. Modelleren van energieverliezen en rendement	22
4.4. Energiebalans	23
4.4.1. Voordelen van een energiebalanseis	23
4.4.2. Nadelen van een energiebalanseis	24
4.4.3. Nadelen van een energieonbalans	24
4.4.4. Voordelen van een energieonbalans	25
4.4.5. Nadelen structureel verplaatsen van grondwater	26
4.4.6. Ontstaan van een energieonbalans	26
4.5. Conclusie	26
5. CASE STUDIE BINNENSTAD DEN HAAG	28
5.1. Probleemsituatie binnenstad Den Haag	28

5.2.	Analyse KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag	28
5.2.1.	Ligging KWO-systemen	28
5.2.2.	Vergunde debieten versus onttrokken debieten	29
5.2.3.	Laden en ontladen koude bronnen	30
5.2.4.	Evaluatie functioneren KWO-systemen	30
5.2.5.	Oorzaak van warmte lozen achterhalen	30
5.3.	Modelleren van effecten	32
5.3.1.	Probleemstelling voor het model	32
5.3.2.	Doelstelling voor het model	32
5.4.	Modelberekening met FLOP3N	32
5.4.1.	Scenario's	32
5.5.	Conclusie onderlinge beïnvloeding KWO-systemen; case studie Den Haag	33
5.6.	Aanbevelingen onderlinge beïnvloeding KWO-systemen; case studie Den Haag	33
6.	KOUDE-WARMTEOPSLAG ONTWERP ADVIES PROGRAMMA (KWO-OAP)	35
6.1.	Problemen ontwerpproces KWO-systeem	35
6.2.	Doel van KWO-OAP	35
6.3.	Werking KWO-OAP	35
6.4.	Conclusie	36
7.	CONCLUSIES	37
7.1.	Ontwerptraject	37
7.2.	Energiebalans	37
7.2.1.	Energieonbalans	37
7.2.2.	Effecten energieonbalans	37
7.3.	Functioneren KWO-systemen binnenstad Den Haag	37
7.4.	Onderlinge beïnvloeding van bellen	37
8.	AANBEVELINGEN	39
8.1.	Nader onderzoek naar aanleiding van deze onderzoekstudie	39
8.2.	Witteveen+Bos	39
8.3.	Provincie Zuid-Holland	39
8.4.	Algemeen	40
9.	LITERATUURLIJST	41
	BIJLAGEN	44
1.	VOORBEELD CONVENTIONEEL SYSTEEM	
2.	BEREKENEN WARMTEVRAAG EN VERMOGEN	
3.	PUTVERSTOPPINGEN	
4.	THEORETISCHE ACHTERGROND EFFECTEN KWO	
5.	ENERGIEVERLIES EN ENERGIEBALANS	
6.	BESCHRIJVING COMPUTERCODES	
7.	MODELLEREN VAN EFFECTEN MET HST3D	
8.	GEOHYDROLOGIE BINNENSTAD DEN HAAG	
9.	CASE STUDIE DEN HAAG MET FLOP3N	
10.	PROBLEMEN MET HST3D	
11.	CASESTUDIE DEN HAAG MET HST3D	
12.	BESCHRIJVING HST3D EN FLOP3N	
13.	ONTWERPNORMEN ONTTREKKINGS- EN INFILTRATIEPUTTEN	
14.	INFORMATIE KWO-SYSTEMEN	
15.	WATERTAFEL	
16.	BIJEENKOMST NVOE, 'THERMISCHE BALANS'	
17.	LIJST GEBRUIKTE SYMBOLEN	

1. INLEIDING

Onze huidige samenleving draait hoofdzakelijk op energie die gewonnen wordt uit fossiele brandstoffen: aardolie, aardgas en steenkolen. Fossiele brandstoffen zijn de grondstof van bijvoorbeeld benzine of autogas. Ook energiecentrales leveren elektriciteit die voornamelijk wordt opgewekt uit aardolie, aardgas en steenkolen.

Het in snel tempo verbranden van fossiele brandstoffen is echter de oorzaak van de grootste milieuproblemen. De productie en consumptie van aardolie, aardgas en steenkolen zorgt voor een verhoogde uitstoot van CO₂ en draagt aldus direct bij aan een versterking van het broeikas-effect. Ook zorgt de verbranding van fossiele brandstoffen voor vrijwel alle uitstoot van stikstof-oxiden en zwaveldioxide, waardoor water, bodem en lucht verzuren.

Voor fossiele brandstoffen bestaan alternatieven, zoals kernenergie en duurzame energie. Duurzame energie wordt geput uit hernieuwbare, 'onuitputtelijke' bronnen zoals zon, wind, waterkracht, bio-energie en omgevingsenergie. Hiervan vormen echter biomassa en omgevingswarmte de belangrijkste bronnen [RIVM, 2005].

In 2003 werd anderhalf procent van de Nederlandse energievoorraad gewonnen uit duurzame bronnen. De overheid streeft ernaar om dit percentage in 2020 te laten oplopen tot 10% [RIVM, 2005].

In voorliggend rapport is de duurzame energievorm winning en opslag van omgevingswarmte met behulp van warmtepompen, koude-warmteopslag (KWO), behandeld. Bij KWO wordt gebruik gemaakt van de temperatuur van het grondwater om objecten (kantoorgebouwen en kassen) te koelen of te verwarmen. Momenteel wordt 0,02% van de duurzame energie opgewekt door KWO [RIVM, 2005].

Bij KWO wordt grondwater onttrokken uit een watervoerend pakket en weer geretourneerd. Hierbij wordt koude en warmte in de bodem opgeslagen. Deze koude of warmte wordt vervolgens gebruikt voor koeling respectievelijk verwarming. Op deze manier kunnen aanzienlijke hoeveelheden aardgas worden bespaard en wordt de uitstoot van CO₂, NO_x en SO₂ verminderd.

Vanwege het duurzame karakter van KWO en de korte terugverdientijd (ongeveer 8 jaar voor utiliteitsbouw) is het aantal geïnstalleerde systemen de laatste jaren sterk toegenomen. De verwachting is dat deze toename zich in de toekomst zal voortzetten. De vraag is echter welke effecten optreden, wanneer al deze systemen in grote concentratie voorkomen. Is er bijvoorbeeld genoeg ruimte in de ondergrond aanwezig en zal de duurzaamheid niet in het geding komen?

1.1. Aanleiding

Voor het onttrekken en retourneren van grondwater bij KWO dient toestemming te worden gevraagd bij de betreffende provincie. Veelal dient een vergunning te worden aangevraagd in het kader van de Grondwaterwet. De ervaring leert dat diverse provincies dezelfde problemen onderkennen bij het behandelen van de vergunningaanvraag van KWO-systemen wanneer onderlinge beïnvloeding van meerdere systemen is te verwachten. Gezien de sterke groei van KWO-systemen de laatste jaren zullen deze problemen bij alleen maar toenemen. Eenduidig beleid van ruimtelijke inpassing voor KWO-systemen is gewenst.

Raadgevend ingenieursbureau Witteveen+Bos is betrokken bij het beoordelen van vergunningaanvragen voor KWO onder andere bij de provincie Zuid-Holland. In Zuid-Holland neemt het aantal KWO-systemen in stedelijke gebieden als Den Haag sterk toe. Ook voor kassencomplexen in het Westland komen steeds meer aanvragen binnen. Verwacht wordt dat hierdoor onderlinge beïnvloeding van systemen zal optreden. Niet alleen KWO-systemen kunnen elkaar onderling

beïnvloeden, maar ook grote tijdelijke onttrekkingen bij de aanleg van bijvoorbeeld parkeergarages en tunnels kunnen een invloed hebben op KWO-systemen.

Het berekenen van de thermische effecten van KWO en het opstellen van een haalbaarheidstudie is relatief nieuw voor Witteveen+Bos. Het ingenieursbureau zou hier graag meer kennis over willen opdoen. Dit om de provincie Zuid-Holland, maar ook andere provincies, in de toekomst adequaat te kunnen blijven adviseren. Met name de onderlinge invloed en gezamenlijke effecten van KWO-systemen heeft hierbij de interesse. Daarnaast wil Witteveen+Bos samen met de provincies inventariseren of de voorwaarden die de provincies stellen bij een vergunningverlening, adequaat zijn om eventuele knelpunten bij de vergunningverlening op te lossen of dat aanvullende maatregelen nodig zijn.

Inmiddels zijn in Nederland ongeveer 300 KWO-systemen geïnstalleerd voor de utiliteitsbouw. De advisering, het ontwerp en de aanleg van deze systemen gebeurt veelal door dezelfde kleine groep van bedrijven. Witteveen+Bos heeft zichzelf ten doel gesteld de mogelijkheden te onderzoeken zich ook op deze markt te richten.

Een voorwaarde die vanuit de provincie wordt gesteld, is dat KWO-systemen moeten voldoen aan een energiebalans. Dit houdt in grove lijn in dat evenveel energie in de bodem moet worden teruggewonnen als is ingebracht. Een eenduidige definitie van de energiebalans is onderwerp van discussie bij provincies. Dit wordt mede veroorzaakt door een algemeen beeld dat is ontstaan dat een groot aantal KWO-systemen niet voldoet aan de energiebalans. In veel gevallen wordt warmte geloosd. De oorzaak van de energieonbalans en de effecten zijn niet bekend.

1.2. Probleemstelling

De probleemstelling voor voorliggend onderzoek is vierledig:

1. Witteveen+Bos heeft momenteel onvoldoende inzicht in de geohydrologische aspecten, het ontwerptraject en de ontwerpeisen die aan de basis liggen van KWO.
2. Over de definitie van energiebalans bestaat veel onduidelijkheid. De oorzaken en effecten van een energieonbalans zijn onbekend.
3. Het is onbekend of de KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag voldoen aan de vergunningseisen [provincie Zuid-Holland, 2001](zie paragraaf 2.1.2).
4. De provincie Zuid-Holland heeft onvoldoende inzicht in de onderlinge beïnvloeding en gevolgen van het grote aantal KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag.

1.3. Doelstelling

Aangezien de probleemstelling vierledig is, zijn voor de doelstelling van het onderzoek vier deeldoelstellingen gedefinieerd:

- Het inzichtelijk maken van een ontwerptraject en het in kaart brengen van de ontwerpeisen die een rol spelen bij het ontwerpen van KWO-systemen.
- Helderheid creëren rondom de definitie van de energiebalans door processen in kaart te brengen die hierbij een rol spelen. Daarnaast oorzaken en effecten bepalen van een energieonbalans.
- Een evaluatie maken van het functioneren van KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag wat betreft de ontwerpeisen en vergunningvoorwaarden.
- Het inzichtelijk maken van onderlinge beïnvloeding op korte en lange termijn voor de diverse KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag.

1.4. Aanpak

De onderzoeks aanpak is afgestemd op de deeldoelstellingen. Ten eerste is het principe van KWO onderzocht en de belangrijke aspecten die hierbij een rol spelen. Tevens is nagegaan wel-

ke wet- en regelgeving van belang zijn bij het ontwerpen van KWO-systemen en de effecten na exploitatie.

Vervolgens is nagegaan in hoeverre de eigenschappen van grond en grondwater van invloed zijn op de processen die bij KWO spelen. Een onderscheid is gemaakt in hydraulische en thermische processen.

Met de theoretische kennis over de effecten en literatuuronderzoek is onderzoek gedaan naar de mogelijke manieren waarop energieverlies kan ontstaan bij KWO. Daarnaast is met dit inzicht duidelijkheid verschaft over de energiebalans.

Ten vierde is een case studie uitgevoerd voor de binnenstad van Den Haag. Een probleemsituatie is opgesteld en modelleringen met diverse scenario's zijn gedaan om inzicht te krijgen in de onderlinge effecten van KWO-systemen.

Als laatste is met de opgedane kennis van effecten en ontwerpeisen die worden gesteld aan een KWO-systeem, een ontwerptraject opgesteld. Voor dit ontwerptraject is een softwareprogramma ontwikkeld dat door middel van ontwerpeisen te combineren een snel inzicht kan genereren in het ontwerp van het KWO-systeem.

1.5. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de aspecten beschreven die een rol spelen bij koude- warmteopslag in de bodem. Deze aspecten behelzen het ondergrondse en bovengrondse systeem, de ontwerpaspecten en milieuaspecten en het landelijke en provinciale beleid.

In hoofdstuk 3 is de theoretische achtergrond van de hydrologische en thermische effecten van KWO uitgewerkt.

Met deze theoretische achtergrond zijn de verschillende processen die voor energieverlies kunnen zorgen apart geanalyseerd in hoofdstuk 4.

De uitgangspunten en belangrijkste resultaten van de casestudie voor het centrum van Den Haag zijn uitgewerkt in hoofdstuk 5. Hier is onder andere veel aandacht besteed aan de modelkeuze voor het berekenen van de hydrologische en thermische effecten.

Ter ondersteuning van het ontwerptraject is een ontwerpsheet opgesteld. De theoretische achtergrond hiervan is opgenomen in hoofdstuk 6.

De conclusie is opgenomen in hoofdstuk 7.

In dit hoofdstuk 8 zijn aanbevelingen opgenomen.

Bij voorliggend rapport hoort tevens een bijlagenrapport. Hierin is het onderzoek nader uitgewerkt. In het rapport wordt regelmatig verwezen naar relevante achtergrondinformatie in het bijlagenrapport. Een aantal bijlagen kan als afzonderlijk document worden beschouwd en als zodanig in een organisatie worden verspreid onder geïnteresseerden.

2. ASPECTEN KOUDE- WARMTEOPSLAG

In Nederland zijn de afgelopen jaren steeds meer KWO-systemen geïnstalleerd. KWO-systemen worden veelal geïnstalleerd voor de utiliteitsbouw en de glastuinbouw. Eind 2003 waren er ongeveer 300 energieopslagsystemen geregistreerd bij de provinciale overheden. De verwachting is dat het aantal KWO-systemen de komende jaren sterk zal toenemen. Als voorbeeld is de doelstelling van de provincie Gelderland te noemen die het aantal geïnstalleerde KWO-systemen van momenteel 50 wil laten toenemen tot 250 in het jaar 2010.

Het provinciale beleid geeft in belangrijke mate de uitgangspunten bij het ontwerp van een KWO-systeem. Het bovengrondse systeem geeft belangrijke randvoorwaarden voor de ruimtelijke dimensies van het ondergrondse systeem. Echter de aanwezige geohydrologie is bepalend voor het uiteindelijke ontwerp.

Ontwerpaspecten voor kleine KWO-systemen (tot 80 m³/h) zijn door de Nederlandse Vereniging van Ondergrondse Energieopslag (NVOE) samengevoegd in de NVOE richtlijnen [NVOE, 2001]. De NVOE heeft zichzelf ten doel gesteld om energiebesparing en duurzame energietoepassingen te ontwikkelen, te bevorderen en te optimaliseren bij koel- en warmteopwekkingsprocessen waar dit mogelijk is door middel van milieuvriendelijke, al dan niet tijdelijke, ondergrondse opslag in watervoerende pakketten, alles in de meest ruime zin.

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens het beleid, het ondergrondse systeem en het bovengrondse systeem behandeld.

2.1. Beleid

Het beleid voor grondwateronttrekkingen is op meerdere niveaus georganiseerd. Op landelijk niveau is de Grondwaterwet van kracht. Daarnaast kunnen provincies een aanvulling op deze Grondwaterwet maken in het waterhuishoudingsplan. Momenteel wordt grondwater passief beheerd d.m.v. vergunningverlening en handhaving. Actief beleid over ruimtelijke inpassing van de ondergrond is er (nog) niet. Vanwege de verwachte problematiek rondom ruimtelijke inpassing van KWO-systemen zijn op velerlei vlak discussies gaan over de mogelijkheden van actief beleid. Witteveen+Bos heeft in samenwerking met de provincie Zuid-Holland hebben een watertafel georganiseerd om deze discussie onder vergunningverleners van alle provincies te houden.

In de komende paragrafen zal het beleid van de provincie Zuid-Holland toegelicht worden. Vervolgens zal een samenvatting gegeven worden van de uitkomsten van de Watertafel van 26 mei 2005.

2.1.1. Provinciaal beleid Zuid-Holland

De provincie beheert het grondwater op grond van de Grondwaterwet. De beleidsvoornemens voor dit beheer staan in het 'Grondwaterbeheersplan Zuid-Holland'. De provincie wil zorgen voor voldoende grondwater met een kwaliteit die geschikt is voor alle functies die ervan afhankelijk zijn. De grondwaterhuishouding moet duurzaam en evenwichtig zijn, zodat het beschikbare grondwater juist wordt verdeeld en de kwaliteit gewaarborgd blijft.

Doel van het provinciale beleid is te zorgen voor voldoende grondwater met een kwaliteit die past bij de verschillende functies. Uitgangspunt is het standstill-beginsel: het grondwater mag wel gebruikt maar niet verbruikt worden. Het gebruik van grondwater van goede kwaliteit is alleen toegestaan als de voorraden weer worden aangevuld.

Vanwege positieve effecten voor het milieu staat de provincie niet afwijzend tegenover het toepassen van energiesystemen waarbij het grondwater als medium wordt gebruikt. De mogelijkheden voor energiesystemen met grondwater zijn echter afhankelijk van de effecten op bodem,

grondwater en de omgeving. Verzilting, maaiveldzettingen en invloed op bodemverontreiniging of andere onttrekkingen binnen het invloedsgebied dient te worden voorkomen.

De systemen vragen veel ruimte ondergronds en beperken het gebruik van grondwater voor andere doeleinden. Vooral in de centra van grote steden komt energieopslag onder de grond steeds vaker voor. Dat kan tot problemen leiden als in de invloedssfeer grondwater onttrokken moet worden voor bouwactiviteiten.

De provincie stimuleert onderzoek naar de invloed van koude-warmteopslag op de grondwaterkwaliteit en op de ondergrondse (infrastructurele) werken. De basis voor dit onderzoek is gelegd in samenwerking met NOVEM en andere provincies.

Voor het onttrekken en retourneren van grondwater voor koude-warmteopslag in de bodem dient een vergunning in het kader van de Grondwaterwet te worden aangevraagd. Hierbij dient een geohydrologische onderbouwende rapportage te worden overlegd. Tevens geldt een MER-beoordelingsplicht voor koude-warmteopslagsystemen met een verpompte hoeveelheid grondwater van meer dan 1,5 miljoen m³ per jaar.

Provinciale criteria

De provincie hanteert de volgende criteria aangaande energiesystemen in de bodem (overgenomen uit [provincie Zuid-Holland, 2001]):

- Onttrekken van grondwater voor koeling gevolgd door lozen op het oppervlaktewater of in de bodem is niet toegestaan.
- Thermische energiesystemen moeten gesloten zijn zodat er via het systeem geen verontreinigingen in de bodem kunnen komen.
- Energieopslag mag niet leiden tot verzilting van het grondwater. Het mag alleen worden toegepast in watervoerende pakketten die volledig zoet of zout zijn. Dit geldt ook voor de zogenaamde monobronnen.
- In centra van grote steden waar ondergronds bouwen (infrastructuur) tot de mogelijkheden behoort en interactie is te verwachten tussen ondergrondse infrastructuur en opslagsystemen in het eerste watervoerende pakket moet de energieopslag in een dieper watervoerend pakket worden geplaatst.
- Warmteopslag (met temperaturen boven gemiddeld 25°C) mag geen onaanvaardbare (micro)biologische of chemische gevolgen hebben.
- Bij koudeopslag mag er netto geen warmte in de bodem worden geloosd.

Daarnaast mogen geen onttrekkingen plaatsvinden in een milieubeschermingsgebied voor grondwater.

2.1.2. Watertafel 26 mei 2005

Bij de provincie Zuid-Holland komen regelmatig vergunningaanvragen binnen voor KWO en andere energiesystemen, die gebruik maken van grondwater. Door de toenemende vraag naar duurzame energiebronnen, willen steeds meer bedrijven (maar ook particulieren) overschakelen op KWO in de bodem.

KWO in de bodem is daarom actueel. Binnen veel provincie zijn werkgroepen opgericht die zich op het thema hebben gestort. Ook interprovinciaal vindt hierover overleg plaats. De Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslagsystemen (NVOE) heeft op 10 maart 2005 een themabijeenkomst georganiseerd over de thermische balans bij koude-warmteopslag, zie bijlage 16. Uit monitoringsgegevens van veel KWO-systemen blijkt namelijk dat veel systemen warmte lozen. Dit is wettelijk niet toegestaan, maar de vraag is of dit ernstig is.

Met het oog op de toekomst is bij de vergunningverleners van de provincie Zuid-Holland een andere belangrijke vraag opgerezen: Hoe gaan we in de toekomst om met aan de ene kant het ruimtebeslag van koude-warmteopslagen en aan de andere kant de wens naar steeds meer

duurzame energiebronnen? In het centrum van Den Haag worden bijvoorbeeld KWO-systemen gerealiseerd binnen het invloedsgebied van eerder aangelegd KWO-systemen. De systemen kunnen elkaar gaan beïnvloeden, waardoor wellicht het rendement van een eerder systeem zal worden verminderd. Hier bestaat echter nog veel onduidelijkheid over en ook de Grondwaterwet biedt hiervoor geen leidraad.

De Watertafel is een initiatief geweest van de provincie Zuid-Holland en Witteveen+Bos om de discussie onder vergunningverleners van diverse provincies te laten plaatsvinden.

Bij de uitnodiging tot deze watertafel is een enquête meegestuurd. De belangrijkste resultaten van de enquête zijn:

- de drinkwatervoorziening wordt als belangrijkste criteria gezien bij KWO, gevolgd door bodemverontreinigingen;
- In Noord Holland komen de meeste KWO-systemen voor met 126 systemen, ten opzichte van Limburg en Groningen met 'slechts' 10 systemen;
- het vormen van één beleid voor KWO voor provincies wordt als positief gezien;

Op de watertafel zijn de resultaten gepresenteerd en is een discussie gehouden aan de hand van kernvragen Een uitgebreid verslag van deze watertafel en achtergrond informatie is te vinden in bijlage 15.

2.2. Het ondergrondse systeem

KWO kan gezien worden als een duurzame energiebron, waarbij grondwater diep in de bodem gebruikt wordt als opslagmedium voor energie voor zowel koude- als warmteopslag. Hoe dit grondwater voor energieopslag wordt gebruikt zal in de komende paragrafen besproken worden, het type systeem en het type bron zijn hierbij van belang.

2.2.1. Onttrekkings- en retourneringssysteem

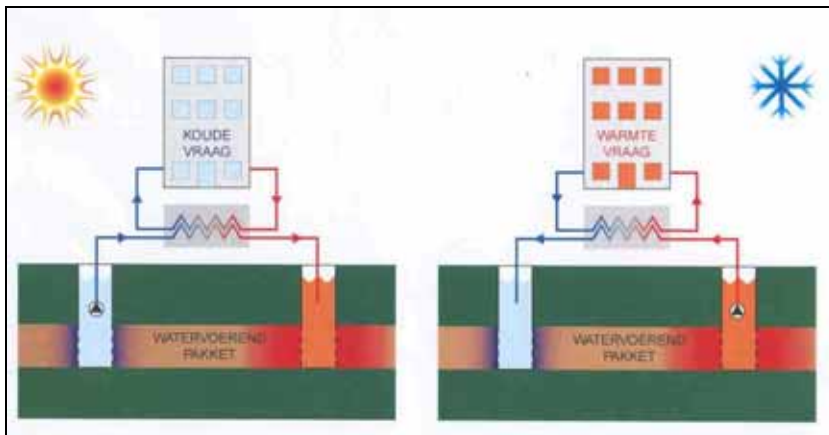
Het ondergrondse systeem van KWO kan op twee manieren gerealiseerd worden: als een gescheiden systeem of als een recirculatiesysteem.

Gescheiden systeem

Het meest toegepaste systeem is het gescheiden systeem. In de winter wordt winterkoude opgeslagen in het grondwater. In de zomer kan deze opgeslagen koude worden gebruikt voor het koelen van kassen of gebouwen. Het grondwater wordt opgepompt en de koude wordt via een warmtewisselaar aan het gebouw of de kas afgestaan. Bij dit koelproces warmt het opgepompte grondwater een aantal graden op.

Dit relatief warme grondwater wordt geretourneerd in een watervoerend pakket waaruit is onttrokken. Zomerwarmte wordt opgeslagen. Transportleidingen tussen de warme en koude bron maken dit mogelijk. Een warme grondwaterbel vormt zich zodoende in de bodem. In de winter wordt de stroomrichting van het grondwater omgedraaid en wordt de opgeslagen zomerwarmte gebruikt voor verwarmingsdoeleinden. Na het afstaan van de warmte met behulp van een warmtewisselaar koelt het grondwater zelf af en wordt geretourneerd in een watervoerend pakket. Hierdoor wordt winterkoude opgeslagen. Een koude grondwaterbel vormt zich in de bodem. Het grondwater bevindt zich in een gesloten systeem het komt niet in aanraking met de atmosfeer en wordt onder druk gehouden.

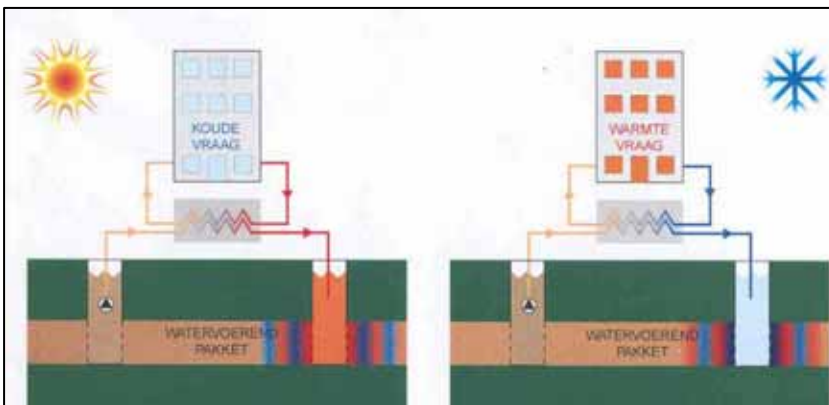
Voor een efficiënt proces is het van belang dat de koude en warme bel strikt gescheiden blijven. Kennis van de grondwaterstroming voor en na de installatie van het KWO-systeem is noodzakelijk. In figuur 2.1 is een schematisatie te zien van een gescheiden systeem.



Figuur 2.1: KWO – gescheiden systeem [NVOE, 2001]

Recirculatiesysteem

Een minder toegepast systeem is het recirculatiesysteem. De werking van dit systeem is erop gebaseerd dat het onttrokken en geretourneerde grondwater volledig met elkaar mengen. In de winter en zomer wordt grondwater continu uit dezelfde bron onttrokken en geretourneerd. De stromingsrichting wordt niet omgedraaid. De onttrekkingstemperatuur is continu gelijk aan de grondwatertemperatuur. Grondwaterbellen worden niet gevormd. In figuur 2.2 is een schematisatie te zien van een recirculatiesysteem.



Figuur 2.2: KWO – recirculatiesysteem [NVOE, 2001]

Afweging systeemtypen

Het gescheiden systeem heeft als voordeel dat in de zomer voor koelingsdoeleinden het water uit de koude bel een lagere temperatuur dan het grondwater heeft en in de winter voor verwarmingsdoeleinden het water uit de warme bel een hogere temperatuur heeft dan het grondwater. Minder grondwater dient te worden onttrokken door het recirculatiesysteem. Het recirculatiesysteem kent als voordeel dat het in de tijd een constante stroomrichting kent, hetgeen geringere investeringskosten betekent. Bovendien is een recirculatiesysteem minder afhankelijk van de stroomrichting en stroomsnelheid van het grondwater.

2.2.2. Bronnen

Afhankelijk van de geohydrologie zijn de ondergrondse systemen op twee verschillende manieren te realiseren: met doubletten of met monobronnen.

Doubletten

Het gebruik van doubletten wordt veelvuldig toegepast bij het realiseren van een KWO. Een doublet bestaat uit twee op enige afstand van elkaar geplaatste putten, zie figuur 2.1 en 2.2. Bij een gescheiden systeem wordt in elke put zowel een onttrekkingspomp als een injectiepomp geplaatst. Beide putten kunnen daarom zowel als onttrekkingsput of als retourput worden gebruikt.

Bij een recirculatiesysteem is slechts een onttrekkingspomp óf injectiepomp geplaatst. De grondwaterverplaatsing is continu in dezelfde richting. Een systeem kan bestaan uit meerdere doubletten.

Monobron

Bij een monobron worden op in één boorgat twee filtertrajecten geïnstalleerd waarbij de ene filterlengte zich op een lager niveau bevindt dan de ander. Dit kan wanneer er een dik watervoerend pakket beschikbaar is. Bij een gescheiden systeem worden een warme bel en koude bel boven elkaar geplaatst. Bij een recirculatiesysteem worden geen grondwaterbellen gevormd en is de grondwaterstroming constant in dezelfde richting. Een systeem kan bestaan uit meerdere monobronnen.

Afweging brontype

Het voordeel van de monobron is de besparing op de boorkosten, maar dit vereist een dik watervoerend pakket. Dit is niet altijd aanwezig. Daarom wordt meestal gekozen voor doubletten.

2.3. Het bovengrondse systeem

Voor verkoeling en verwarming van gebouwen bij een conventioneel klimaatsysteem kan gebruik worden gemaakt van geventileerde lucht. Deze lucht bestaat uit buitenlucht en retourlucht van het gebouw. In de zomer kan de lucht gekoeld worden door koelbatterijen. In de winter wordt de hoeveelheid buitenlucht zodanig gemengd met binnenlucht dat de juiste inblaasttemperatuur wordt bereikt.

In de winter kan de additionele verwarming (door bijvoorbeeld gasketels) worden toegepast om een bepaald interne gebouwtemperatuur te bereiken. In bijlage 1 is een voorbeeld vermeld.

Bij een KWO wordt de geventileerde lucht niet gekoeld door koelbatterijen, maar door de opgeslagen koude in het grondwater. Met behulp van een warmtewisselaar vindt de overdracht van koude plaats.

De benodigde warmte wordt aangeleverd door de opgeslagen warmte in het grondwater. Via een warmtewisselaar wordt deze warmte aan het gebouw afgestaan.

Het is een mogelijkheid dat de warmtevraag en koudevraag van een gebouw niet overeenkomen. Een overschot koude of warmte ontstaat. De meeste provincies eisen echter een energiebalans. Om te voldoen aan de eis van de energiebalans, zal de warmtevraag of koudevraag kunstmatig moeten worden vergroot. In de winter kan het grondwater worden afgekoeld met behulp van koeltorens om extra koude op te slaan. In de zomer kan gebruik worden gemaakt van asfaltcollectoren om extra warmte op te slaan.

2.4. Ontwerpparameters KWO

Indien voor de klimaatbeheersing wordt gekozen voor KWO, dient een zo rendabel mogelijk systeem te worden ontworpen.

In dit hoofdstuk wordt een aantal ontwerpaspecten kwalitatief beschreven dat van invloed is op het KWO-systeem. Deze ontwerpaspecten zijn onderverdeeld voor KWO-systemen voor de glastuinbouw alsmede voor de utiliteitsbouw. In de glastuinbouw is de wateropslagbehoefte namelijk veelal groter dan voor de utiliteitsbouw. Dit gegeven leidt tot andere eisen van het watervoerende pakket. Daarnaast wordt bij het ontwikkelen van een nieuw glastuinbouwcomplex de ondergrond intensiever gebruikt, wat leidt tot een noodzaak voor een goede dimensionering en locatie van de koude en warme bellen. De bellen moeten onder het terrein van de glastuinbouwhouder liggen, zodat bellen van andere glastuinbouwhouders niet beïnvloed worden.

2.4.1. Utiliteitsbouw

In de utiliteitsbouw genoemd zijn de volgende aspecten van belang.

Grondwaterstroming

Afhankelijk van het type systeem dat geïnstalleerd wordt, heeft de grondwaterstroming een grote dan wel minder grote invloed op het KWO-systeem. Voor de eis van de grootte van de grondwaterstroming wordt uitgegaan van het installeren van een gescheiden systeem. In dit geval heeft de grondwaterstroming een invloed op de verplaatsing van de koude dan wel warme bellen. Grote verplaatsingen vanwege een hoge grondwaterstroming leveren thermische verliezen op. Deze verliezen hebben direct invloed op het rendement van de hele installatie. Bijvoorbeeld een hoge grondwaterstroming en een klein injectiedebiet heeft meer kans op verliezen dan bij een hoog injectiedebiet. In het algemeen wordt gesteld dat afhankelijk van het injectiedebiet grondwaterstromingen van maximaal 10 tot 30 meter per jaar zijn toelaatbaar voor KWO-systemen [Aarssen, 2002].

Wateropslagbehoefte

De wateropslagbehoefte wordt bepaald aan de hand van de koudevraag van een gebouw in de zomer en de warmtevraag in de winter. Deze koude- en warmtevraag zijn afhankelijk van:

- de buitencondities (temperatuur);
- de gewenste binnencondities (de gebruiksfuncties van het gebouw);
- de grootte van het gebouw;
- de mate van warmte- en koudeverliezen.

Het is van belang dat koudevraag en warmtevraag min of meer gelijk zijn om het systeem thermisch in balans te houden. Indien dit niet het geval is, zal er op additionele manier grondwater gekoeld, dan wel verwarmd worden om aan de eis van de energiebalans te voldoen. In het algemeen kan gesteld worden dat per jaar 3 á 5 m³/m² bruto vloeroppervlak nodig is.

In bijlage 2 is een voorbeeld opgenomen ter indicatie voor het bepalen van de warmtevraag van een gebouw.

Maximaal vermogen

Het bepalen van het maximale debiet dat onttrokken en geretourneerd dient te worden, hangt af van het piekvermogen dat nodig is om een piekkoude of -warmte te leveren. Dit vermogen hangt wederom af van de plaatselijke geohydrologie en type klimaatsysteem. De berekening van dit piekvermogen gaat op ongeveer dezelfde manier als de berekening van de wateropslagbehoefte. Een voorbeeld is in bijlage 2 opgenomen.

Filterlengte

Primair gezien is de filterlengte afhankelijk van de maximaal te onttrekken en te retourneren debiet in de putten in combinatie met de maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand. Dit maximale debiet is afhankelijk van de piekvraag naar koude of warmte. Voor het onttrekken van grondwater geldt een andere ontwerpnorm dan voor infiltreren van grondwater. Deze ontwerpnormen zijn gebaseerd op het verschijnsel van het verstopt raken van putten (zie paragraaf 2.5). De permeabiliteit van het watervoerende pakket en het aantal equivalente vollasturen van de infiltratieput zijn de belangrijkste parameters van deze ontwerpnormen. Met deze gegevens is te bepalen wat de minimale filterlengte moet zijn om het maximale debiet te kunnen onttrekken dan wel te retourneren. De lokale bodemopbouw is maatgevend of bepaalde filterlengtes mogelijk zijn. Bij een dunner pakket zullen namelijk meer filters moeten worden geplaatst om de totale benodigde filterlengte te bereiken.

Permeabiliteit van het watervoerende pakket

De permeabiliteit van het watervoerende pakket zegt iets over het gemak waarmee grondwater kan worden onttrokken of geretourneerd in dit pakket. Bij een hogere permeabiliteit zijn grotere snelheden op de boorgatwand toegestaan, waardoor met een minder lang filter evenveel grondwater kan worden onttrokken. Als het isohypsepatrijn in een bepaald gebied bekend is, zal de

natuurlijke grondwaterstroming bij een hogere permeabiliteit groter zijn dan bij een lagere permeabiliteit. Het thermisch rendement van een KWO-systeem zal dan waarschijnlijk lager liggen door verliezen.

2.4.2. Glastuinbouwkassen

Hoewel binnen dit onderzoek de nadruk vooral ligt op de onderlinge effecten van KWO-systemen voor de utiliteitsbouw is hieronder kort aandacht besteed aan een aantal belangrijke aspecten van KWO-systemen voor de glastuinbouw.

Grondwaterstroming

Hier geldt dezelfde eis als voor de utiliteitsbouw. De grondwaterstroming mag maximaal 10-30 meter per jaar bedragen [Aarssen, 2002].

Wateropslagbehoefte

Voor het gebruik van koude- en warmteopslag in de glastuinbouw zijn grote hoeveelheden grondwater nodig. Afhankelijk van de teelt varieert deze hoeveelheid per jaar van 10 à 16 m³/m² kasoppervlak [Zwart, 2002]. De wateropslagbehoefte is circa drie keer zo groot als bij de utiliteitsbouw.

Filterlengte van de bronnen

Het is van belang dat de gevormde koude en warme bel geen grote invloed op elkaar uitoefenen. Ook dient rekening te worden gehouden met koude en warme bellen van buurbedrijven. Om de koude en warme bel binnen het terrein van de glastuinder te houden, zonder teveel onderlinge invloed van de bellen, is in het algemeen een filterlengte van 35-50 meter nodig [Braak, 2001]. Dit is afhankelijk van de eigenschappen van het watervoerend pakket en de wateropslagbehoefte van de teelt.

Permeabiliteit van het watervoerende pakket

Om grote hoeveelheden water te produceren voor KWO zonder een excessieve hoeveelheid pompenergie nodig te hebben, wordt in de regel gesteld dat de doorlatendheid van het watervoerend pakket tenminste 15 m/d dient te bedragen [Braak, 2001].

2.5. Putverstoppingen

In de vorige paragraaf zijn belangrijke aspecten genoemd voor het ontwerpen van een KWO-systeem. Echter, een groot probleem bij het ontwerpen van KWO-systemen is nog niet vermeld. Dit is het probleem van putverstoppingen.

De onttrekkings- en retourputten zijn een belangrijk onderdeel van een KWO-systeem. De wens is dat deze putten minimaal 20 jaar goed blijven functioneren. Een intensieve regeneratie mag bij voorkeur niet vaker plaatsvinden dan eens in de vijf jaar. Om aan deze voorwaarden te voldoen is het van belang na te gaan welke mechanismen putverstoppingen kunnen veroorzaken. Om verstoppingen van bronnen tegen te gaan is het in het algemeen van belang dat het grondwater bij menging geen neerslag veroorzaakt en geen bacteriële groei ontstaat.

Bij KWO wordt het grondwater voortdurend heen en weer gepompt en zodoende continu gemengd. Het grondwater verandert voortdurend van eigenschap. Zowel bij onttrekkingsbronnen als bij retourbronnen leidt deze continue menging tot chemische processen. Aangezien deze processen afhankelijk zijn van de temperatuur, verschillen deze processen bij de onttrekkingsbron met de processen bij de retourbron.

Wanneer een onttrekkingsput verstopt dreigt te raken is dit als eerste te merken aan een capaciteitsvermindering en vermindering van kwaliteit van het grondwater. De capaciteitsvermindering vertaalt zich in een grotere verlaging in de put die noodzakelijk is om dezelfde hoeveelheid water

te laten toestromen. Kwaliteitsverslechtering komt tot uitdrukking door een versterkte troebelheid, veranderde kleur en verslechterde 'smaak' en geur.

Wanneer een retourput verstopt dreigt te raken is dit merken aan de vermindering van de infiltratiecapaciteit. Deze verminderde infiltratiecapaciteit kan leiden tot het instabiel worden van de retourput, waarbij de put onderloops kan worden en de bodem mogelijk kan gaan opbarsten. De oorzaken van putverstoppingen kunnen in drie categorieën worden verdeeld: mechanische, chemische en bacteriologische oorzaken. In bijlage 3 staan deze processen in meer detail beschreven.

2.6. Milieuaspecten KWO

Bij het installeren en exploiteren van een KWO wordt de natuurlijke situatie verstoord en heeft dit zodoende effecten op het milieu. De aspecten die een significante rol spelen bij KWO staan in deze paragraaf vermeld. Bij elk aspect is tevens aangegeven hoe het negatieve milieueffect is te beperken.

De gebruikte informatie in deze paragraaf is grotendeels ontleend aan het rapport "Bepaling van de milieueffecten van grondwatersystemen en bodemwarmtewisselaars", deelrapport: "milieueffecten en -afweging, fase 1", NOVEM 2003.

2.6.1. Negatieve effecten

In deze paragraaf staan de belangrijkste negatieve effecten op het milieu door KWO-systemen vermeld.

Het aantal boringen

Het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket speelt een grote rol bij de hoeveelheid boringen dat nodig is voor het KWO-systeem. Hoe groter het doorlaatvermogen hoe minder boringen nodig zijn, des te minder bodemverstoringen.

Opbarsten van bodemlagen

Dit is een aspect dat met name speelt bij doubletten.

Waterdrukken in het watervoerend pakket lopen ter plaatse van de infiltratiebronnen op tijdens het infiltreren van water. Bij KWO in ondiepe watervoerende pakketten kan bij te hoge waterdrukken de korrelspanning in het zand zodanig laag worden dat de bodem kan gaan splijten. Om dit verschijnsel tegen te gaan zijn meer doubletten nodig in ondiepe watervoerende pakketten. In dieper gelegen watervoerende pakketten speelt dit probleem veel minder en kan volstaan worden met minder doubletten. Een andere oplossing kan zijn om de bronnen kruislings te plaatsen. Kruislings plaatsen houdt in dat de koude en warme bronnen om en om geplaatst worden, zodat de hydraulische invloed beperkt wordt. Thermische verliezen zullen dan wel groter zijn.

Hydraulische invloed

Het onttrekken en infiltreren van grondwater zal tot op een bepaalde afstand veranderingen te weeg brengen in het stijghoogtepatroon en zal daarmee de stromingssituatie in het watervoerend pakket beïnvloeden. Met een grondwatermodel is deze invloed te berekenen. De hydraulische invloed zal minder zijn wanneer de filters geplaatst worden in een relatief dik watervoerend pakket met een hoge doorlatendheid. Stijghoogtes in het watervoerend pakket zijn dan minder groot dan bij een lagere doorlatendheid. Het stromingspatroon wordt echter op dezelfde manier beïnvloed. Daarnaast zal, om de freatische grondwaterstand zo min mogelijk te beïnvloeden, gestreefd moeten worden naar een zo hoog mogelijke weerstand tussen de filters en het maaiveld. Dit is te bereiken door de filters diep te plaatsen en gebruik te maken van een eventueel aanwezige slecht doorlatende deklaag of tussenlaag.

Thermische invloed

Door conductie (geleiding), dispersie en afstroming wordt een deel van de geïnjecteerde koude en warmte tot buiten het thermisch invloedsgebied van het koude- warmteopslagsysteem getransporteerd. Met een model kunnen de temperatuursveranderingen berekend worden die het grondwater in de loop der jaren ondergaat. Ook hier geldt dat met een relatief dik watervoerend pakket met een hoge doorlatendheid de invloed minder is. Tevens geldt dat de thermische invloed kan worden beperkt door watervoerende pakketten te kiezen waarin de stromingsnelheid van het grondwater klein is. In hoofdstuk 4 is hier nader op ingegaan.

Gezien de geringe temperatuursverschillen bij de meeste koude- warmteopslagsystemen (7 tot 25°C) worden slechts beperkte effecten verwacht op de chemische en microbiologische samenstelling van het grondwater. Aan maaiveld zijn thermische effecten te verwaarlozen ten opzichte van de dagelijkse in- en uitgaande zonnestraling.

Zettingen

De zettingen die aan maaiveld kunnen optreden zijn een direct gevolg van de optredende stijghoogteveranderingen en zijn daarmee een direct gevolg van de hydraulische invloed. Om schade aan objecten te voorkomen, dienen grote maaiveldzettingen te worden voorkomen. Aangezien veel KWO-systemen een geringe hydraulische invloed aan maaiveld hebben, blijven maaiveldzettingen meestal beperkt.

Menging van grondwater

Door het onttrekken en infiltreren van grondwater zal grondwater van verschillende kwaliteit gemengd worden. Om menging zoveel mogelijk te voorkomen dienen de onttrekkings- en retoureringsfilters in hetzelfde watervoerend pakket te worden geplaatst. Het te retourneren grondwater mag niet van slechtere kwaliteit zijn dan het ontvangende water ter plaatse van de retourputten. Om aantasting van de zoetwatervoorraad te voorkomen dient er naar gestreefd te worden de filters aan te leggen in watervoerende pakketten die geheel zoet of geheel zout zijn.

Injecteren van schadelijke stoffen door lekkage

Bij directe koeling of verwarming geeft het grondwater haar warmte of koude af zonder tussenkomst van een tweede watercircuit of warmtewisselaar. Bij een onjuiste montage of beschadiging van onderdelen van het KWO-systeem kunnen schadelijke stoffen in het grondwater terecht komen. Welke stoffen dit zijn hangt af van het type koude- en/of warmteleveraar die wordt gebruikt. Deze stoffen kunnen zijn: chemische schoonmaakmiddelen (door onderhoud en regeneratie), conditioneringsmiddelen (natte koeltoren), glycol of propyenglycol (droge koeltoren) of freon (warmtepompen). In de meeste gevallen wordt echter gebruik gemaakt van indirecte koeling of verwarming van het grondwatersysteem en wordt gebruik gemaakt van een tweede watercircuit. Indien leidingwater zonder toevoegingen wordt gebruikt in het tweede circuit zal er geen kwaliteitsrisico zijn voor het grondwater [NOVEM, 2001].

2.6.2. Positieve Effecten

Naast een aantal negatieve effecten, die via het ontwerp geminimaliseerd worden, heeft een KWO ook positieve effecten.

Primaire energiebesparing

Door voor verkoeling en verwarming gebruik te maken van de grondwatertemperatuur, wordt het aardgasverbruik gereduceerd. Bij bijvoorbeeld een optimale kasconfiguratie kan 5,6 m³/m² aardgas per jaar worden bespaard ten opzichte van een conventioneel klimaatstelsel.

Reductie van CO₂-, NO_x-, SO₂- uitstoot

De besparing van aardgas geeft een directe besparing op de uitstoot van CO₂, NO_x en SO₂. Op deze manier draagt KWO bij aan de vermindering van het versterkte broeikaseffect.

2.7. Conclusies aspecten KWO

Vanwege de grote onttrekkingen bij KWO, is een KWO vergunningplichtig. Een belangrijk uitgangspunt van de vergunning is de energiebalans.

Vanwege de geohydrologie worden de meeste KWO-systemen in Nederland ontworpen met doubletten in combinatie met een gescheiden systeem.

Een belangrijk aspect waar rekening mee dient te worden gehouden als een KWO-systeem wordt ontworpen, is de mogelijkheid van het verstopt raken van de bronnen. Om verstoppingen van bronnen tegen te gaan is het in het algemeen van belang dat het grondwater bij menging geen neerslag veroorzaakt. Vanwege de primaire aardgasbesparing en reductie van uitstoot van CO₂, NO_x en SO₂ maakt van KWO een duurzame energietoepassing om de versterking van het broeikas effect te verminderen.

3. THEORETISCHE ACHTERGROND EFFECTBEREKENINGEN KWO

In het vorige hoofdstuk zijn het principe van KWO en de belangrijke aspecten bij KWO kwalitatief beschreven. Dit hoofdstuk zal verder gaan met de theoretische achtergrond van de processen die een rol spelen bij KWO. Belangrijke parameters en vergelijkingen die van belang zijn voor de grondwaterstroming en energietransport zijn kort toegelicht. Als laatste wordt geconcludeerd welke processen het meeste van invloed zijn op hydraulische en thermische effecten. In bijlage 4 worden de parameters en vergelijkingen in meer detail behandeld.

3.1. Parameters van grond en grondwater

De eigenschappen van de grond en het grondwater worden uitgedrukt in hydraulische parameters en thermische parameters. In respectievelijk tabel 3.1. en tabel 3.2. worden de hydraulische en thermische parameters gegeven.

Tabel 3.1: hydraulische parameters

medium	parameter	symbool	eenheid
grondwater	dichtheid water	ρ_f	kg/m ³
grondwater	viscositeit	μ	kg/m/s
grondwater	compressibiliteit water	β_f	m ² /N
grond	dichtheid grond	ρ_s	kg/m ³
grond	porositeit	n	-
grond	intrinsieke doorlatendheid	κ	m ²
grond	compressibiliteit grond	β_s	m ² /N

Tabel 3.2: thermische parameters

medium	parameter	symbool	eenheid
grondwater	soortelijke warmte grondwater	c_f	J/kg/°C
grondwater	warmtegeleidingscoëfficiënt grondwater	λ_f	J/m/s/°C
grond	soortelijke warmte korrels	c_s	J/kg/°C
grond	warmtegeleidingscoëfficiënt korrels	λ_s	J/m/s/°C

Tabel 3.3: Samengestelde eenheden

type	samengestelde eenheid	symbool	eenheid
kracht-eenheid	Newton	N	kg*m/s ²
energie-eenheid	Joule	$J (=N*m)$	kg*m ² /s ²

Een aantal van de vermelde parameters is in meer of mindere mate afhankelijk van de temperatuur. Alle parameters zijn afhankelijk van de druk. Echter bij de meeste parameters treden pas significante verschillen op bij zeer grote drukverschillen.

Bij koude- en warmteopslag is sprake van temperatuurveranderingen variërend in ruimte en tijd. Daarnaast resulteren de onttrekkingsdebieten en infiltratiedebieten in veranderingen van de stijghoogte in het watervoerend pakket en dus in een drukverschil. Deze drukverschillen bij KWO-systemen zijn dermate klein dat effecten op de genoemde parameters zijn te verwaarlozen.

3.2. Processen van hydraulische en thermische effecten

De eigenschappen van de grond en het grondwater gecombineerd met de randvoorwaarden van een KWO geven inzicht in een aantal processen waar rekening mee gehouden wordt bij het berekenen van effecten. Voor hydraulische en thermische effecten spelen verschillende processen een invloedrijke rol.

Grond- en grondwaterparameters zijn getoetst aan de hand van de mate van invloed op hydraulische en thermische effecten. Een onderscheid is te maken tussen verwaarloosbare en niet-verwaarloosbare processen op deze effecten. In deze paragraaf worden deze processen kort samengevat.

Processen voor hydraulische effecten

De processen die verwaarloosbaar worden geacht op de hydraulische effecten zijn:

- invloed van de dichtheid op de doorlatendheid
- warmtestraling
- warmteafbraak en warmteproductie

Die processen die niet als verwaarloosbaar worden ingeschat:

- verandering van de doorlatendheid ten gevolge van temperatuurveranderingen
- convectief warmtetransport
- conductief warmtetransport
- thermische dispersie

Vooraf de verandering van de doorlatendheidscoëfficiënt vanwege de temperatuurverandering heeft een groot effect op het hydraulisch effect. Daarom mogen ook de warmtetransportprocessen, convectie en conductie niet verwaarloosd worden.

Processen voor thermische effecten

Voor berekening van thermische effecten zijn andere processen van invloed.

De processen die verwaarloosbaar worden geschat voor de thermische effecten zijn:

- warmtestraling
- verandering van de doorlatendheid ten gevolge van temperatuurveranderingen, omdat slechts geringe temperatuursverschillen optreden bij KWO.
- warmteafbraak en warmteproductie

Processen die niet als verwaarloosbaar worden ingeschat:

- dichtheidsstroming door temperatuursverandering
- thermische dispersie
- convectief warmtetransport
- conductief warmtetransport

3.3. Vergelijkingen

Met de niet-verwaarloosbare processen kunnen vergelijkingen worden opgesteld voor het grondwatertransport en het warmtetransport (energietransport).

Het grondwatertransport wordt beschreven met de algemene grondwaterstromingsvergelijking. Deze bestaat uit de wet van Darcy en het beginsel van behoud van massa.

De warmtetransportvergelijking beschrijft het warmtetransport ten gevolge van convectie en het transport door geleiding eveneens gecombineerd met een behoudswet (behoud van warmte).

De warmtetransportvergelijking vertoont een grote gelijkheid met de stoftransportvergelijking.

Met behulp van deze vergelijkingen kunnen analyses worden gedaan van energieverliezen die door de verschillende processen zullen optreden (zie hoofdstuk 4). Ook kan de onderlinge invloed van bellen ingeschat worden.

4. ENERGIEVERLIES VS. ENERGIEBALANS

Bij een geïnstalleerd KWO-systeem zullen altijd energieverliezen optreden naar de bodem door natuurlijke processen als afstroming, conductie en dispersie. Met de beschreven relaties uit bijlage 4 is een inschatting gemaakt hoe groot deze verliezen zijn.

Wanneer een KWO-systeem in de nabije omgeving van een al bestaand KWO-systeem wordt geplaatst kan dit effect hebben op de energiebalans van het al bestaande systeem. Daarom worden nieuwe vergunningaanvragen voor KWO-systemen getoetst aan de hand van de belangen van de beheerders van de al bestaande systemen.

De mate van energieverlies die wordt geaccepteerd door de vergunningverlener, is een onderwerp van discussie bij veel provincies. Op de watertafel (zie paragraaf 2.1.3 en bijlage 15) kwam naar voren dat vergunningverleners worstelen met deze materie. Om het beleid vorm te geven is daarom inzicht nodig in de energieverliezen die kunnen optreden.

De meeste provincies stellen de eis dat een KWO-systeem energetisch in balans moet zijn. Hiermee wordt over het algemeen bedoeld dat alle opgeslagen warmte of koude ook weer dient te worden onttrokken. Warmtelozing wordt niet toegestaan. Met het oog op de toekomst rijst de vraag of een energiebalans wel nuttig en noodzakelijk is. Om hier antwoord op te kunnen geven dienen de effecten van een warmtelozing en in mindere mate ook een koudelozing in beeld te worden gebracht.

Energieverlies en energiebalans zullen in dit hoofdstuk naar voren komen. Achtergrondinformatie van dit hoofdstuk is te vinden in bijlage 5.

4.1. Energieverlies: Theoretische achtergrond

Verskillende processen bij KWO kunnen energieverlies veroorzaken. Convectie zorgt voor meevoering van thermische energie met de grondwaterstroming. Het conductieproces zorgt ervoor dat thermische energie uit het grondwater verdwijnt en opgeslagen wordt in de korrels van het pakket. Conductie kan ook plaatsvinden naar boven- en onderliggende lagen. Hierna is deze energie niet meer beschikbaar voor het convectieve proces. Dispersie zorgt voor menging van het geïnjecteerde grondwater.

4.1.1. Energieverlies door convectie

In grondwater is thermische energie opgeslagen. Bij een grondwaterverplaatsing zal de opgeslagen energie mee verplaatsen. Wanneer grondwater in een pakket wordt geïnjecteed waarin geen natuurlijke grondwaterstroming aanwezig is en geen energieverliesprocessen worden beschouwd, zal het geïnjecteerde grondwater een cirkelvormige 'bel' vormen om de injectieput. In deze bel is nog altijd dezelfde hoeveelheid energie opgeslagen. Wordt vervolgens uit deze bel grondwater onttrokken, dan zal in principe alle geïnjecteerde energie worden teruggewonnen.

Indien wél sprake is van een natuurlijke grondwaterstroming zal de bel zich vormen in de richting van de grondwaterstroming. Dit betekent dat ook de opgeslagen energie zich mee zal bewegen met de heersende grondwaterstroming. Wanneer vervolgens uit de put grondwater wordt onttrokken, betekent dit dat niet alle geïnjecteerde energie kan worden teruggewonnen. Er is dus sprake van energieverlies. De hoeveelheid energieverlies is afhankelijk van de grondwaterstromingsnelheid en de vorm en grootte van de bel.

Conclusie convectie

Het energieverlies door de natuurlijke grondwaterstroming vindt alleen plaats in het horizontale vlak rond het filter. In theorie treden de minste energieverliezen op als een bel wordt gevormd met een minimale filterlengte en een grote thermische straal. Echter bij een hele platte bel zullen de verliezen door conductie wel erg groot zijn (zie volgende paragraaf), zodat een optimum ge-

vonden moet worden tussen verschillende processen om het verlies zo klein mogelijk te houden. Dit optimum kan bepaald worden met een numeriek model.

4.1.2. Energieverlies door conductie

Het geïnjecteerde grondwater kan thermische energie uitwisselen met omringende grond en grondwater indien een temperatuurverschil bestaat tussen het geïnjecteerde grondwater en het ontvangende grondwater. Dit proces noemt men conductie. De conductie neemt toe bij grotere temperatuurverschillen. Indien het ontvangende grondwater een natuurlijke temperatuur heeft van 12°C, dan zal bij geïnjecteerd grondwater van 25°C meer conductie optreden dan bij geïnjecteerd grondwater van 17°C. Toch heeft het injecteren van grondwater met een hogere temperatuur voordelen. Bij eenzelfde warmtevraag hoeft bij hogere injectietemperaturen namelijk een kleinere bel te worden opgebouwd. Het volume van de bel is namelijk omgekeerd evenredig met het temperatuurverschil (zie bijlage 2, vergelijking 2.1). Hierdoor blijft het ondergronds ruimtegebruik beperkt.

Het conductieproces speelt met name een grotere rol als door ruimtegebrek de koude en warme bel van een KWO-systeem relatief dicht bij elkaar worden geplaatst. Hoe dichter de bellen bij elkaar liggen, hoe groter de temperatuurverschillen, hoe meer conductie, hoe groter het verlies aan thermische energie.

De vorm van de bel is in grote mate verantwoordelijk voor het energieverlies dat door conductie zal optreden. De vorm van de bel wordt bepaald door de hoeveelheid geïnjecteerde thermische energie en filterlengte. Bij een lang filterlente ontstaat een lange, smalle bel, bij een kort filterlente ontstaat een brede, platte bel.

Een theorie is ontwikkeld om het energieverlies door conductie te kunnen beperken door een optimale filterlengte te kiezen bij een gegeven hoeveelheid thermische energie die opgeslagen dient te worden (zie bijlage 5.1). In de volgende paragrafen zal kort de theorie worden uitgelegd.

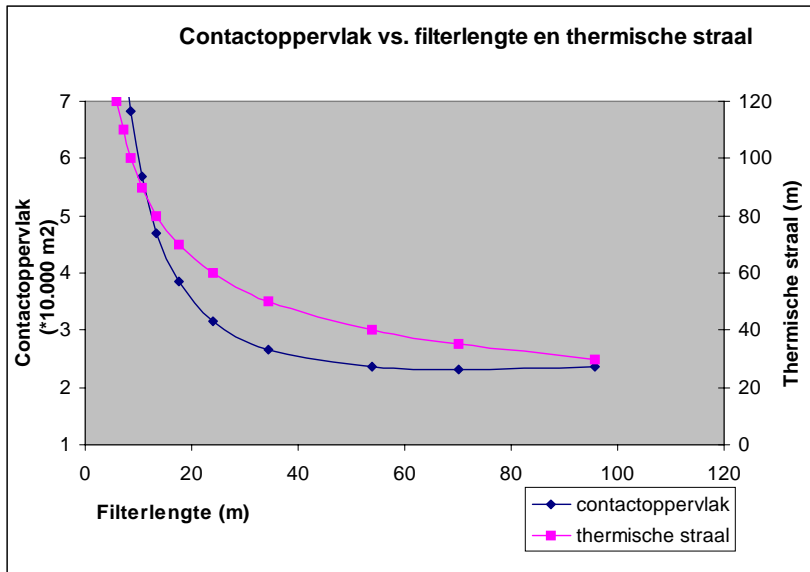
Wanneer grondwater wordt geïnjecteerd in de injectieput zal dit zich in de grond rondom het bronfilter verplaatsen als een steeds groter wordende cilinder, waarbij de as van de cilinder het bronfilter is. Het bronfilter heeft een constante lengte. De verplaatsing van het grensvlak van de thermische cilinder heeft een retardatie ten opzichte van de verplaatsing van het grensvlak van de cilinder van het geïnjecteerde grondwater. Op het grensvlak van de thermische cilinder is een temperatuurverschil aanwezig met het omringende water. Conductie zal daarom vooral optreden op het grensvlak van de thermische cilinder met het omringende grondwater. De minste energieverliezen zullen optreden wanneer het oppervlak van dit grensvlak, het contactoppervlak, het kleinst is. Het contactoppervlak wordt maatgevend gezien voor de energieverliezen die door conductie zullen optreden. Per injectievolume is een optimale filterlengte te bepalen waarbij het oppervlak van het grensvlak het kleinst is.

Conclusie conductie versus filterlengte en thermische straal

Bij een gegeven thermisch volume kan berekend worden bij welke constante filterlengte de oppervlakte van het grensvlak van de thermische cilinder het kleinst is. De energieverliezen door conductie zullen dan ook het kleinst zijn. Als de filterlengte bekend is, is ook de straal van de cilinder van geïnjecteerd grondwater bekend. Volgens de theorie zal de minste conductie optreden als de thermische straal zich tot de filterlengte verhoudt met 1:2.

$$\frac{\text{thermische straal}}{\text{filterlengte}} = \frac{r_{th,eind}}{H} = \frac{1}{2}$$

In figuur 4.1 is voor een voorbeeld KWO-systeem (met een thermisch volume van $V_{th}=200.000\text{m}^3$) het contactoppervlak tegen de filterlengte en de thermische straal uitgezet.



Figuur 4.1: Contactoppervlak versus filterlengte en thermische straal

Door een aantal aannames te doen om tot deze verhouding te komen, zijn fouten geïntroduceerd. Daarom zal de berekende verhouding in werkelijkheid niet geheel correct zijn. Echter het geeft wel een goede indicatie voor de orde van grootte van het energieverlies dat door conductie optreedt. Is een verhouding aanwezig die kleiner is dan 1:2 (een groter filterlengte en een kleinere thermische straal), dan zal het energieverlies door conductie nauwelijks toenemen, aangezien het contactoppervlak dan nauwelijks toeneemt. Komen verhoudingen voor die veel groter zijn dan 1:2 (een kleiner filterlengte en grotere thermische straal), dan bestaat wel de kans dat grote energieverliezen bij een KWO-systeem door conductie zullen optreden.

Meerdere koude of warme bronnen

Het voor een KWO beschikbare watervoerende pakket is niet altijd geschikt om het maximale debiet in één bron te injecteren of te onttrekken. Beperkingen ten aanzien van het injectiedebiet kunnen zijn:

- de maximale snelheid op de boorgatwand, zie bijlage 13;
- gevaar voor opbarsten van bovenliggende bodemlagen.

Wanneer dit het geval is zullen meerdere warme of koude bronnen geïnstalleerd moeten worden om hetzelfde debiet te kunnen onttrekken of te injecteren. Veelal worden de koude bronnen of warme bronnen dicht bij elkaar geplaatst. De koude bronnen onderling en de warme bronnen onderling kunnen elkaar beïnvloeden. Dit heeft gevolgen voor de belvorming en het energieverlies van alle bronnen bij elkaar opgeteld.

Bij een vervorming van een bel heeft dit geen gevolgen voor het oppervlak van de bovenkant van de bel (immers: het geïnjecteerde volume = oppervlak van bovenvlak * filterlengte, volume en filterlengte blijven gelijk). De vervorming van de bel heeft alleen gevolgen voor de verandering van de omtrek van de bel. Het contactoppervlak van een bel bestaat uit het oppervlak van de boven- en onderkant van de en het zijvlak. Zodoende heeft de vervorming van de bel alleen gevolgen voor de verandering van het zijvlak. De verandering van de omtrek van de bel kan gezien worden als maat voor de verandering van het contactoppervlak en het verlies van warmte of koude naar de omgeving toe.

Hoe dichter de putten bij elkaar worden geplaatst, hoe groter de onderlinge invloed en afwijking van de vorm van de bel als cilinder zal zijn, zie bijlage 5.

Tussen twee injectieputten zal een stagnante zone ontstaan. Als de putten relatief dicht bij elkaar worden geplaatst zal de stagnante zone tussen de putten ook relatief kleiner zijn. Het

grondwater stroomt in de stagnante zone niet of nauwelijks ten gevolge van het injectiedebiet van de bronnen. Advectief warmtetransport zal in deze zone praktisch niet plaatsvinden. Wel vindt nog steeds conductie plaats. Als de onderlinge afstand tussen injectieputten klein genoeg is, kunnen theoretisch gezien de thermische bellen van meerdere bronnen aan elkaar gekoppeld worden door verspreiding van het thermisch front door het conductieproces. Hierdoor zal de gezamenlijke omtrek van bellen afnemen en zo ook het verlies aan koude of warmte.

Een ontwerpgrafiek is gemaakt met dimensieloze parameters als basis. Op grond van de onderlinge afstand tussen bronnen en de thermische straal en de onderlinge afstand tussen de thermische invloedsgebieden kan bepaalde worden wat de relatieve omtrek van de bellen is. Hierdoor is een inschatting te maken van het verlies aan warmte of koude van een bel.

4.1.3. Energieverlies door dispersie

Door onregelmatigheden in het watervoerende pakket, zoals klei- en veenlenzen, wordt de grondwaterstroming verstoord. Hierdoor treden snelheidsverschillen op die zorgen voor menging van het grondwater (op macroniveau). Daarnaast treden snelheidsverschillen op tussen de poriën van een watervoerend pakket. Dit veroorzaakt ook menging van grondwater (op microniveau). Deze twee processen worden dispersie genoemd.

Door de dispersie wordt tevens de thermische energie in het grondwater vermengd met de omgeving. Dit betekent dat het geïnjecteerde grondwater thermische energie kan verliezen door dispersie. Dispersie zorgt ervoor dat het warmtefront zich niet als een 'scherp' front uitbreidt, maar dat een versmering optreedt van dit front. Omdat in dit onderzoek uitgegaan wordt van een homogene ondergrond, zal dispersie op macroniveau niet meegenomen worden.

De thermische dispersiecoëfficiënt D_{th} bestaand uit twee componenten: een longitudinale component (parallel aan de grondwaterstromingsrichting) en een transversale component (loodrecht op de grondwaterstromingsrichting). In bijlage 4.5.4 staat dit in meer detail beschreven. Het conductieproces wordt in de dispersieterm samengevoegd. In de bijlage staan deze ook vermeld en beschreven.

$$D_{th,L} = \alpha_L \cdot v_{eff} + D_m$$

$$D_{th,T} = \alpha_T \cdot v_{eff} + D_m$$

$$\text{met: } D_m = \frac{\lambda_m}{n_e \cdot C_f}$$

Tabel 4.1: Parameterbeschrijving bij dispersievergelijkingen

symbool	grootheid	eenheid	realistische waarden
D_{th}	Thermische dispersiecoëfficiënt	m^2/s	-
α_L, α_T	dispersiviteit	m	$\alpha_L = 5, \alpha_T = 0,6$ [NVOE, 2001]
v_{eff}	effectieve grondwaterstromingsnelheid	m/s	-
D_m	moleculaire conductiecoëfficiënt	m^2/s	-
λ_m	warmtegeleidingcoëfficiënt medium (conductie)	J/s/m/°C	3
n_e	effectieve porositeit	-	0,35
C_f	warmtecapaciteit grondwater	J/m ³ /°C	4,18*10 ⁶

Zoals blijkt uit de vergelijking hangt de mate van hydraulische dispersie onder andere af van de grootte van de grondwaterstroming (v_{eff}). Dit betekent, wanneer gekeken wordt naar een bepaald tijdsinterval, dat grondwater dat sneller stroomt onderhevig is aan meer hydraulische dispersie dan grondwater dat minder snel stroomt. Immers het grondwater dat sneller stroomt heeft een grotere afstand afgelegd dan het grondwater dat langzamer stroomt in dezelfde tijd en is daardoor meer onderhevig geweest aan snelheidsveranderingen tussen de poriën en dus aan hydrau-

liche dispersie. Hydraulische dispersie is dus eigenlijk een functie van de afgelegde weg en niet zondermeer van de grondwaterstroming.

Bij KWO is verwarring mogelijk door de grootte van de grondwaterstroming in de dispersieterm. Het lijkt dat dichtbij de bron, waar de grondwaterstroming het grootst is, de meeste hydraulische dispersie optreedt. Op grotere afstand van de bron is de grondwaterstroming lager en geconcludeerd zou kunnen worden dat de hydraulische dispersie minder is. Een korte platte bel (kort filterlengte) zou dan de voorkeur genieten boven een lange smalle bel (lang filterlengte), omdat energieverliezen door hydraulische dispersie dan minder groot zouden zijn. In dit geval moet wel opgelet worden dat de conductieterm niet gaat overheersen [NVOE, 2001].

Echter door deze conclusie te stellen wordt een aantal zaken over het hoofd gezien. Ten eerste is bij KWO het geïnjecteerde volume constant. Of nu een korte platte bel of juist een hoge smalle bel wordt gevormd, het volume blijft gelijk bij gelijkblijvende hoeveelheden geïnjecteerd grondwater. Dit houdt in dat op een zelfde afstand van de bron de grondwaterstroming bij een hoge smalle bel lager ligt dan bij een korte platte bel. Bij een korte platte bel is op dezelfde afstand van de bron het energieverlies door hydraulische dispersie dus groter. Ten tweede is hydraulische dispersie niet een functie van de grondwaterstroming, maar van de afgelegde weg. Bij een korte platte bel is de afgelegde weg vanaf de injectieput naar het thermisch front veel groter en is meer hydraulische dispersie opgetreden. Daarentegen is bij een hoge smalle vorm over een langere filterlengte hydraulische dispersie opgetreden.

Om het energieverlies door hydraulische dispersie te bepalen moet het totaal aan afgelegde weg van een bel bepaald worden. De afgelegde weg van een waterdeeltje is $v_{eff} \cdot \Delta t$ (Δt is gelijk aan een half jaar). Het waterdeeltje dat als eerste geïnjecteerd wordt, legt een weg af gelijk aan de straal van de bel die gevormd is door het geïnjecteerde grondwater in een half jaar tijd, r_{inj} , $r_{inj} = v_{eff} \cdot \Delta t$. De dispersie die optreedt is $\alpha_L \cdot r_{inj}$. Waterdeeltjes die later worden geïnjecteerd leggen een minder lange weg af. De totale dispersie die in een bel optreedt kan als volgt gegeven worden:

$$Totale \text{ dispersie} = \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{inj}} (\alpha \cdot r) dr d\phi dH = \alpha \cdot \pi \cdot r_{inj}^2 \cdot H = \alpha \cdot V_{inj}$$

Zoals te zien hangt de mate van dispersie af van de dispersiecoëfficiënt (wordt constant verondersteld) en het geïnjecteerde volume. Geconcludeerd kan worden dat de vorm van de bel niet van invloed is op de mate van dispersie.

Hydraulische dispersie versus moleculaire conductiecoëfficiënt

De relatie tussen de hydraulische dispersie versus de moleculaire conductiecoëfficiënt is weer gegeven met een voorbeeld:

Stel een KWO-systeem is geïnstalleerd met een filterlengte van 25 meter. Het totaal geïnjecteerde volume is 100.000 m³ per half jaar. Het gemiddelde injectiedebiet per dag is dan ongeveer 550 m³/d. De hydraulische dispersiecoëfficiënt op een bepaalde afstand van de put met $n_e=0,35$

als porositeit en $\alpha_L=5$ m, zie tabel 4.1, is $\alpha_L \cdot v_{eff} = 5 \cdot \left(\frac{550}{0,35 \cdot 25 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{th}} \right) = \frac{50}{r_{th}} \text{ m}^2 / \text{d}$. D_m is te

bepalen aan de hand van realistische waarden. Hieruit volgt dat $D_m=0,18$ m²/d. Voor grotere waarden van r_{th} speelt moleculaire conductie zeker een rol. Daarnaast is het transversale deel van de hydraulische dispersiecoëfficiënt veel kleiner dan de longitudinale. Hierdoor zal de moleculaire conductiecoëfficiënt voor energieverliezen naar boven en onderliggende lagen vrijwel altijd overheersen.

Conclusie theorie dispersie

Geconcludeerd kan worden dat de mate van hydraulische dispersie, voor het gedeelte dat afhankelijk is van de afgelegde weg, alleen afhangt van het thermisch volume. De vorm van de bel maakt niet uit. Welke bel dan ook gevormd wordt (hoog en smal of juist kort en plat) het energieverlies door dispersie blijft hetzelfde.

De grootte van het thermisch volume wordt bepaald door de thermische energie die per m³ grondwater wordt geïnjecteerd. Als een hogere injectietemperatuur wordt toegepast zal een kleiner bel gevormd worden en zal minder energieverlies door dispersie optreden. Wél zal het energieverlies door conductie toenemen vanwege een groter temperatuurverschil. Met een numeriek model kan het energieverlies door dispersie en conductie bepaald worden.

4.1.4. Conclusie theoretische achtergrond

De vorm en grootte van de bel is in belangrijke mate verantwoordelijk gebleken voor de grootte van energieverliezen die zouden kunnen optreden door convectie, conductie en dispersie.

Aangezien hogere natuurlijke grondwaterstroming leidt tot grotere energieverliezen verdient het de voorkeur een platte bel te vormen (kort filterlengte). Echter bij een platte bel zijn de energieverliezen door conductie groot. De vorm van de bel lijkt niet van invloed te zijn op de energieverliezen die door dispersie optreden. Bij kleinere bellen is er minder dispersie dan bij grote bellen.

Bij het ontwerp van de filters moet voornamelijk rekening worden gehouden met conductie en convectie.

Met een numeriek model is te bepalen wat de individuele energieverliezen door de verschillende processen op een bel zijn. Ook zijn energieverliezen van gecombineerde processen te bepalen. Bovendien kan ook de optimale vorm van de bel bepaald worden, waarbij de minste energieverliezen zullen optreden

4.2. Energieverlies versus rendement van een KWO-systeem

In deze paragraaf is beschreven hoe het energieverlies van een KWO gekwantificeerd kan worden.

Het thermisch rendement van een KWO wordt vaak gedefinieerd als het quotiënt van de aan het grondwater toegevoegde energie en de teruggewonnen energie [NVOE, 2001]. Gesproken kan worden over een koudeopslagrendement en een warmteopslagrendement. Een rendement van 100% wekt de suggestie dat geen energieverliezen optreden. Dit is echter niet het geval. Energieverliezen treden altijd op. Alleen wordt evenveel warmte of koude aan het grondwater onttrokken als er aan wordt toegevoegd (dit is een energiebalans, zie paragraaf 4.4). Energieverliezen treden vooral op door de grondwaterstroming, de geometrie of vorm van de opgeslagen koude of warme bellen en de afwijking van de temperatuur van de koude en warme bellen ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Het gebruik van deze definitie voor het thermisch rendement is dus geen maat voor de energieverliezen die optreden.

Theoretisch is het dus mogelijk om een rendement van 100% na te streven (100% in balans) ondanks energieverliezen. Echter door energieverlies zal de onttrekkingtemperatuur bij de koude of warme bronnen na verloop van de tijd stijgen of dalen richting de natuurlijke grondwatertemperatuur. Hierdoor is het grondwater niet meer optimaal bruikbaar voor respectievelijk koeling of verwarming. Daarom is het in de praktijk soms nodig extra koude of warmte te laden. Een rendement lager dan 100% is het gevolg (energieonbalans).

Om toch iets te kunnen zeggen over energieverliezen in relatie tot het rendement van een systeem, is een kleine aanpassing van deze definitie noodzakelijk. Het thermisch rendement wordt dan niet gedefinieerd als een behoud van energie, maar als een behoud van massa, oftewel als

het quotiënt van de aan het grondwater toegevoegde energie in een bepaald volume geïnjecteerd grondwater en de hoeveelheid teruggewonnen energie bij het onttrekken van hetzelfde volume.

Door energieverliezen zal bij het onttrekken van hetzelfde volume grondwater minder energie onttrokken worden dan in het grondwater aanvankelijk was gestopt. Het rendement van de koude respectievelijk de warme bron is als volgt:

$$\text{rendement}_{\text{koudebron}} = \frac{\text{onttrokken koude(MWH) zomer (bij constant volume)}}{\text{geïnjecteerde koude(MWH) winter (bij constant volume)}}$$

$$\text{rendement}_{\text{warmebron}} = \frac{\text{onttrokken warmte(MWH) winter (bij constant volume)}}{\text{geïnjecteerde warmte(MWH) zomer (bij constant volume)}}$$

Wanneer deze definities gebruikt worden kunnen energieverliezen door de optredende processen en onderlinge beïnvloeding wel gekwantificeerd worden. Dit kan onder andere worden gekwantificeerd met behulp van een numeriek model (zie paragraaf 4.3).

4.3. Modelleren van energieverliezen en rendement

De theoretische achtergrond bij energieverliezen uit de vorige paragrafen kan getoetst worden met een numeriek computerprogramma. Om de grondwaterstromingsvergelijking op te lossen zijn verschillende computercodes beschikbaar. Daarnaast zijn nog aanvullende codes te verkrijgen voor het oplossen van de stof- of warmtetransportvergelijking. De keuze van de computercode hangt af van de processen die men wil bekijken. Voor het toetsen van de theoretische achtergrond is gebruik gemaakt van de computercode HST3D met behulp van het pakket ArgusOne. De werking van HST3D staat beschreven in bijlage 12. Om de energieverliezen te bepalen is eerst inzicht nodig in het rendement van een KWO-systeem.

Door gebruik te maken van de nieuwe definitie van het thermisch rendement kan voor een bepaald KWO-systeem het energieverlies door de verschillende processen berekend worden. Omdat in een vergevorderd stadium van het onderzoek een 'bug' is ontdekt in de HST3D code (zie bijlage 10.5), zijn de gemaakte modelberekeningen onbruikbaar. Nieuwe berekeningen zijn slechts voor een paar scenario's gedaan.

In de bijlage 6 zijn kort andere computercodes besproken en is de keuze voor HST3D beargumenteerd. In bijlage 7 is een beschrijving gegeven van de modelopbouw en figuren die horen bij de verschillende modelleringen.

Resultaten

Voor een filterlengte van 26 m (thermische straal = 35) en 42 m (thermische straal = 28 m) zijn nieuwe modelberekeningen uitgevoerd om het energieverlies voor conductie en dispersie apart te berekenen. Bij alle modelberekeningen is de verhouding tussen filterlengte en thermische straal groter dan 1:2.

Conclusies

Door het conductieproces is een gedeelte van de geïnjecteerde energie buiten het onttrekkingsgebied verplaatst. Het gevolg is dat na een jaar onttrekken nog steeds een thermisch invloedsgebied is waar te nemen. De eerste jaren van een KWO-systeem zal de achterblijvende energie na een half jaar onttrekken toenemen. Op gegeven moment zal een evenwichtssituatie ontstaan.

Het verschil in rendement van de bronnen tussen de twee modelberekeningen, waarbij alleen conductie optreedt, is klein. Bij een grotere verhouding tussen de filterlengte en thermische straal is energieverlies door conductie slechts een fractie groter. Dit is conform de theorie.

Wordt gekeken naar de rendementen na een jaar, waarbij alleen dispersie plaatsvindt, dan zijn deze rendementen iets lager dan de berekeningen waarbij alleen conductie optreedt. De verschillen zijn echter gering.

De verschillen tussen de rendementen van de twee berekeningen met andere filterlengtes, waarbij alleen dispersie optreedt, is klein. Na vijf jaar is het rendement voor beide gevallen zelfs precies even groot. Dit is conform de theorie.

Omdat onvoldoende modelberekeningen met HST3D zijn gedaan, is niet te concluderen dat de ontwikkelde theorieën betrouwbaar zijn. De aanwijzingen zijn hier wel voor.

4.4. Energiebalans

Omdat veel van de effecten door temperatuursveranderingen in het grondwater onbekend zijn, wordt door provincies bij KWO een energiebalans geëist vanuit het duurzaamheidsbeginsel. Dit houdt in grove lijn in dat evenveel energie in de bodem moet worden teruggewonnen als is ingebracht. Dit staat echter los van de processen die leiden tot energieverlies, zoals in de vorige paragrafen is beschreven.

Volgens de richtlijnen van de NVOE kan een strikte energiebalans in theorie alleen bereikt worden als aan drie voorwaarden wordt voldaan:

- de temperatuur van de koude bel moet evenveel afwijken van de natuurlijke grondwatertemperatuur als de warme bel (bijv. koud: 6°C, natuurlijk: 12°C en warm: 18°C);
- de vorm van de koude en warme bel moeten aan elkaar gelijk zijn;
- de bronnen dienen precies haaks op de grondwaterstroming te staan [NVOE, 2001].

De terminologie voor de energiebalans en energieverlies, zoals deze in de vorige paragrafen is besproken, wordt door deze voorwaarden onjuist gehanteerd. De zojuist vermelde voorwaarden gaan uit van het principe dat evenveel verlies aan koude moet optreden als aan warmte, dit is niet de definitie van een energiebalans. Nogmaals, bij een energiebalans, zoals door de provincies geëist moet evenveel warmte als koude in de bodem worden gebracht, ongeacht het energieverlies. Bij een KWO wordt het grondwater gebruikt als opslagmedium van koude of warmte. De natuurlijke grondwatertemperatuur speelt hierbij geen rol. Als nu elk seizoen evenveel koude of warmte wordt onttrokken als wordt toegevoegd, is er nog steeds sprake van een energiebalans. In dat geval is voorwaarde één onzin.

Een voorbeeld: om een energiebalans te hebben kan ook volstaan worden met één bel van bijvoorbeeld 18°C en geen koude bel. Dit mag zolang alle ingebrachte energie ook weer wordt teruggewonnen.

Als niet per se een koude en warme bel gevormd dient te worden om aan de energiebalans te voldoen, zijn tevens voorwaarden twee en drie onzinnig.

Daarom is het zinvol de strikte definitie van de NVOE te herzien.

4.4.1. Voordelen van een energiebalanseis

Eind jaren tachtig nam de Nederlandse overheid het duurzaamheidsbeginsel over zoals opgesteld door de VN-commissie Brundtland: 'Duurzame ontwikkeling is een ontwikkeling die voorziet in de behoeften van huidige generaties zonder daarmee voor toekomstige generaties de mogelijkheden in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien.' Door het duurzaamheidsbeginsel op KWO toe te passen menen de provincies het grondwater niet in gevaar te brengen

voor de behoeften van toekomstige generaties. De provincies gaan uit dat onvoldoende kennis aanwezig is over de effecten op de lange en korte termijn van een energieonbalans bij KWO op het milieu en toekomstig gebruik van het grondwater.

4.4.2. Nadelen van een energiebalanseis

Voor een aantal zaken kan een strikte energiebalans nadelig zijn.

Kans op onnodige energievernietiging

De hoeveelheid koude en warmte die nodig is voor het koelen en verwarmen van kassen en gebouwen is niet altijd even groot. Het systeem zelf is niet in balans. Volgens de huidige regelgeving is het noodzakelijk additionele manieren te gebruiken om het water te koelen of te verwarmen om te voldoen aan de energiebalans. Extra energie is nodig, resulterend in onnodig CO₂-uitstoot en kapitaalvernietiging. Dit staat haaks op het principe van KWO om energie te besparen en de uitstoot van CO₂ te beperken tegen een zo laag mogelijke prijs. Bovendien wordt eigenlijk geen warmte vernietigd, maar wordt er alleen energie verplaatst, van het grondwater naar de lucht. Wanneer de energiebalans niet noodzakelijk wordt geacht is bovenstaand principe niet aan de orde.

4.4.3. Nadelen van een energieonbalans

Een energieonbalans kan ook negatieve effecten hebben.

Temperatuurveranderingen aan maaiveld

Bij een energieonbalans zal een gedeelte van het geïnjecteerde koude of warme grondwater niet meer terug worden gewonnen. Een grondwaterbel met een temperatuurverschil ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur zit gedurende lange tijd in de bodem. Veel energieverliezen treden op naar omliggende lagen. Hierdoor kan de temperatuur aan maaiveld veranderen. In stedelijke gebieden zal dit geen grote invloed hebben, aangezien hier de temperatuur aan maaiveld door andere processen al is verstoord [Buik, 2004].

Het is ook mogelijk dat door de natuurlijke grondwaterstroming het grondwater eerst afstroomt en elders aan het maaiveld komt.

Opwarming grondwater

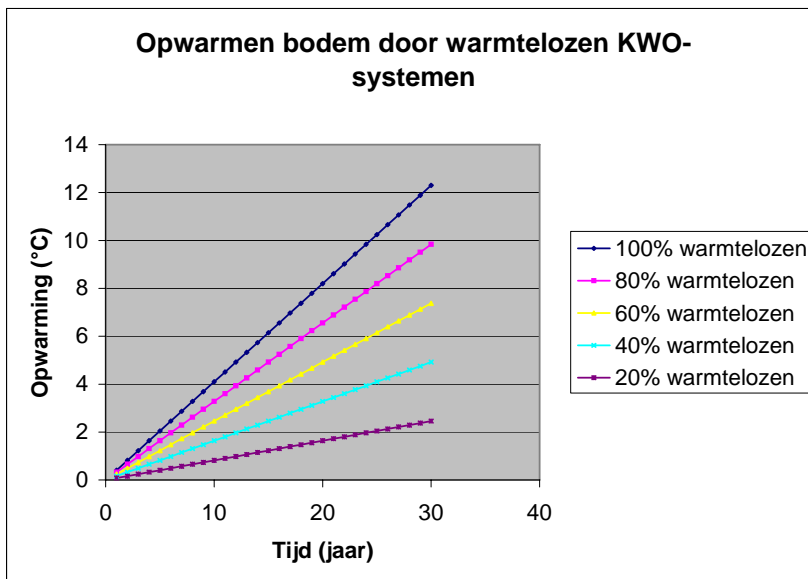
Een energieonbalans kan naast structureel koude lozen ook warmte lozen inhouden. Structureel warmte lozen kan/zal de bodem en het grondwater ter plaatse opwarmen. Hierdoor is het mogelijk/denkbaar dat dit grondwater in de toekomst niet meer te gebruiken is voor KWO-systemen of andere doeleinden (bijvoorbeeld de drinkwatervoorziening). Om de invloed van warmtelozingen van KWO-systemen op de bodem- en grondwatertemperatuur te bepalen is een eenvoudige schematische berekening gemaakt voor het centrum van Den Haag, deze kent de volgende aannames:

- warmte die geloosd wordt door KWO-systemen blijft geconcentreerd in het gebied in het watervoerend pakket waar de KWO-systemen en bronfilters zich bevinden, dit is een gebied van 1200 m bij 800 m en het watervoerend pakket heeft een dikte van circa 30 m;
- de warmte die geloosd wordt verspreidt zich gelijkmatig over het hele gebied;
- het aantal MWH dat jaarlijks geproduceerd wordt aan warmte door de KWO-systemen is geraamd op 10.300 MWH, dit is te herleiden uit de gegevens uit bijlage 14;
- de warmtecapaciteit van de bodem wordt geschat op circa $3,1 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\text{°C}$.

Indien geen koude wordt opgeslagen en dus alleen warmte wordt geloosd zal de bodem per jaar opwarmen. Dit is als volgt berekend:

$$\Delta T_{\text{perjaar}} = \frac{MWH_{\text{perjaar}}}{\text{Volume}_{\text{bodemiaag}} \cdot \text{Warmtecapaciteit}_{\text{bodem}}} = \frac{3,71 \cdot 10^{13} \text{ J / jaar}}{2,9 \cdot 10^7 \text{ m}^3 \cdot 3,1 \cdot 10^6 \text{ J / m}^3 / \text{°C}} = 0,41 \text{ °C / jaar}$$

In figuur 4.2 is de opwarming van de bodem na een aantal jaar uitgezet tegen het percentage structurele warmtelozing per jaar. Als alleen warmte wordt opgeslagen en geen koude zal de bodem na 30 jaar met circa 12°C stijgen. Is het percentage structureel warmtelozen 'slechts' 20% dan zal de bodem na 30 jaar ongeveer 2,5 °C opwarmen. Doordat ook warmte wordt afgevoerd naar aangrenzende pakketten en uiteindelijk naar het maaiveld zal de temperatuuroename gemiddeld wat minder zijn dan berekend, terwijl het lokaal, rond de warme bellen naar verwachting aanvankelijk meer zal zijn. De conclusie van deze simpele berekening is evenwel, dat in een gebied waar KWO systemen zijn geconcentreerd die gemiddeld warmte lozen op termijn van enkele decennia veranderingen van de bodemtemperatuur zijn te verwachten van enkele graden. Dit proces kan op zichzelf worden gemonitord via daadwerkelijke metingen van de bodemtemperatuur op representatieve locaties en via berekening op basis van een jaarlijks bijgehouden energiebalans.



Figuur 4.2.: Opwarmen bodem door warmtelozen KWO-systemen

Vervuilen eigen bron

Wanneer sprake is van een grote onbalans, al dan niet bewust, zal meer grondwater moeten worden onttrokken om aan de koude- of warmtevraag te voldoen. Immers het gemiddelde temperatuurverschil tussen de koude en warme bron is flink kleiner geworden dan vooraf berekend. Hierdoor neemt het invloedsgebied van één van de bronnen flink toe. Als dit groot wordt, is een mogelijkheid dat grondwater dat in de ene bron is geïnjecteerd uit de andere wordt onttrokken. Dit heeft weer tot gevolg dat nog meer grondwater nodig is. Een onomkeerbaar proces is in gang gezet. Het thermisch rendement is sterk afgenomen. Met name de grootte van de grondwaterstroming en de positionering van bronnen speelt bij dit proces een rol. Door afstroming is het ook mogelijk dat grote energieverliezen optreden in plaats dat het geïnjecteerde grondwater de andere bron bereikt.

4.4.4. Voordelen van een energieonbalans

Een energieonbalans kan ook voordelen hebben. Dit is gedemonstreerd met een voorbeeld. Bijvoorbeeld: een school wil alleen van KWO gebruik maken voor verwarmen in de winter en kan volstaan met grondwater met de natuurlijke grondwatertemperatuur. Door verwarming van de school wordt het onttrokken grondwater afgekoeld. Koelen in de zomer is niet nodig. Volgens de eis van de energiebalans moet het afgekoelde grondwater worden opgewarmd. Het zou beter zijn om koudelozing dan toe staan. Het kost immers weer extra investering en energie om dit grondwater af te koelen. In de zomer kan de installatie dan ook uit staan. Een aantal provincies staat om deze reden lozing van koude wel toe. Lozing van warmte wordt echter nooit toegestaan.

4.4.5. Nadelen structureel verplaatsen van grondwater

Eén van de eisen waaraan een KWO moet voldoen is dat de zoetwatervoorraad niet wordt aangetast. Door het onttrekken en retourneren van grondwater bij een KWO kan de zoet-zoutgrens worden beïnvloed. Wanneer grondwater uit de ene bron wordt onttrokken kan deze grens licht omhoog worden getrokken. Wanneer vervolgens het volgende seizoen grondwater wordt geïnjecteerd, wordt de grens omlaag geduwd. Wanneer de debieten in beide seizoenen ongeveer even groot zijn, zullen beide effecten op de zoet-zoutgrens ook ongeveer gelijk zijn. Van een structurele verplaatsing van de zoet-zoutgrens is dan waarschijnlijk geen sprake. Wel zal de dikte van de overgangszone tussen zoet en zout toenemen. Wanneer de onttrokken debieten uit een bron veel groter zijn dan een seizoen later weer wordt geïnjecteerd, is het wel mogelijk dat de zoet-zoutgrens structureel omhoog wordt getrokken. Bij een gescheiden systeem kan een grote energiebalans een structurele verplaatsing van grondwater tot gevolg hebben. Bij een recirculatie systeem wordt, ongeacht een energiebalans aanwezig is, structureel grondwater verplaatst. Bij elk KWO-systeem is echter altijd sprake van een balans in debieten. Een KWO is een gesloten systeem, waarbij al het onttrokken grondwater ook weer wordt geretourneerd.

4.4.6. Ontstaan van een energiebalans

De huidige KWO-systemen dienen volgens de provincies te voldoen aan de eis van een energiebalans. De koude- en warmtevraag van het bovengrondse systeem is dan gelijk aan elkaar of wordt door additionele koeling of verwarming gelijk gemaakt. Toch is het beeld ontstaan dat veel KWO-systemen energetisch in onbalans zijn. In deze paragraaf wordt een aantal mogelijkheden aangedragen die de oorzaken zouden kunnen zijn op welke manier een energiebalans kan ontstaan.

Verandering van gebruik

De gebruiksfuncties van een gebouw kunnen veranderd zijn of zijn in het begin verkeerd ingeschat. Bijvoorbeeld de bedrijfstijden en de soort werkzaamheden die plaats vinden.

Gebouwo ontwerp

Elke nieuwbouw is anders en zal anders reageren op interne belastingen en buitencondities. Een verkeerde inschatting van de energieverliezen die zullen optreden geven foutieve waarden voor de koude- en warmtevraag.

Onjuist functioneren gebouwinstallatie

In de praktijk is gebleken dat de gebouwinstallaties vaak niet goed functioneren of dat een goed beheer ervan ontbreekt. De belangrijkste oorzaken voor het niet goed functioneren zijn (bijkomst NVOE over de thermische balans, samenvatting in bijlage 16:

- de capaciteiten van warmtepompen wordt niet gehaald;
- de hydraulisch ontwerpen zijn onjuist ;
- de besturingssoftware werkt niet correct.

Klimaatverandering

Voor het berekenen van de koude- en warmte vraag wordt uitgegaan van een standaard klimatologisch jaar. Hierin zitten de effecten van hete zomerdagen gecombineerd met koude winterdagen. Wanneer het klimaat verandert, heeft dit gevolgen voor de koude- en warmtevraag en dus de energiebalans.

4.5. Conclusie

De vorm van de bel is in belangrijke mate verantwoordelijk voor de grootte van energieverliezen die zouden kunnen optreden door convectie, conductie en dispersie.

Aangezien een hogere natuurlijke grondwaterstroming leidt tot grotere energieverliezen verdient het de voorkeur een platte bel te vormen (kort filterlengte). Echter bij een platte bel zijn de ener-

gieverliezen door conductie groot. De vorm van de bel blijkt niet van invloed te zijn op de energieverliezen die door dispersie optreden.

Vanwege de onzekerheid over de effecten van een energieonbalans bij KWO op de lange termijn kan vooralsnog het beste worden uitgegaan van een energiebalans. Een energieonbalans kan leiden tot opwarmen van de bodem en grondwater ter plaatse van de KWO-systemen, waardoor dit wellicht niet meer bruikbaar is voor KWO of andere doeleinden.

Ook zijn goede argumenten te noemen waarom het nuttig is af te wijken van de energiebalans. Echter een andere inrichting van het bovengronds systeem behoort ook tot de mogelijkheden om met meer zekerheid een energiebalans te halen. Op de bijeenkomst van de NVOE over de thermische balans op 10 maart 2005 is gebleken dat het goed mogelijk is het bovengronds systeem aan te passen, zodat het flexibeler kan omgaan met de koude- en warmtevraag en zo ook met de energiebalans. Bovendien is een energieonbalans vaak te wijten aan verkeerde gebouwinstallatie of beheer.

Aanbevolen wordt om onderzoek te doen naar de lange termijn effecten van KWO en aanpassingen van het bovengronds systeem.

5. CASE STUDIE BINNENSTAD DEN HAAG

In de binnenstad van Den Haag worden steeds meer KWO-systemen aangelegd. Tot voor kort waren er geen problemen bij het behandelen van vergunningaanvragen van deze systemen. Echter door de verhoogde intensiteit van KWO-systemen rondom het stationsgebied van Den Haag Centraal wordt onderlinge beïnvloeding verwacht tussen diverse systemen. Deze onderlinge beïnvloeding zou kunnen leiden tot een rendementsverlies van een al eerder geïnstalleerd systeem. Dit bemoeilijkt de behandeling van de aanvraag van een vergunning, omdat voor onderlinge beïnvloeding van KWO-systemen nog geen duidelijke richtlijnen zijn opgesteld. Daarnaast blijkt uit diverse evaluatierapporten en handhavingsacties van de provincies dat vergunde debieten worden overschreden of dat warmte wordt geloosd.

5.1. Probleemsituatie binnenstad Den Haag

Vanwege het duurzame karakter van KWO en de snelle terugverdientijd groeit het aantal aanvragen voor vergunningen van KWO-systemen voor de binnenstad van Den Haag sterk. Met name rondom het stationsgebied van Den Haag CS is het aantal geïnstalleerde KWO-systemen de laatste vijf jaren sterk toegenomen. Diverse aanvragen voor hetzelfde gebied liggen ter behandeling bij de provincie en in de toekomst worden nog meer aanvragen verwacht. KWO-systemen nemen veel ondergrondse ruimte in beslag. Door het grote aantal geïnstalleerde systemen is de verwachting dat systemen elkaar onderling gaan beïnvloeden.

De volgende deelproblemen kunnen worden onderscheiden:

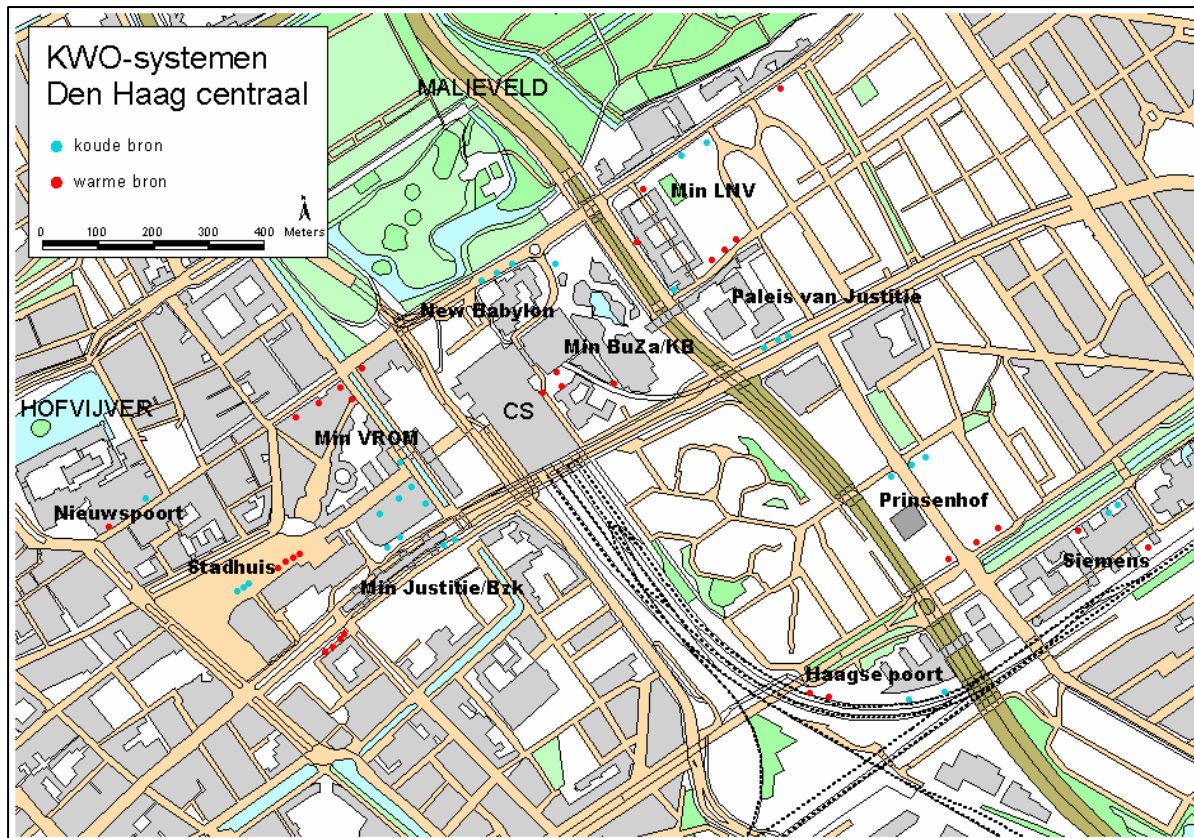
1. de effecten op de rendementen van KWO-systemen door onderlinge beïnvloeding is onbekend;
2. het is onbekend wat het gevolg is als een KWO-systeem structureel warmte loost;
3. het is onbekend waarom systemen warmte lozen en hoe dit in de toekomst opgelost kan worden.

5.2. Analyse KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag

Van de aanwezige KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag zijn de gegevens bij de provincie Zuid-Holland opgevraagd. Niet alle gewenste informatie van de KWO-systemen bleek aanwezig te zijn. In bijlage 14 staan alle gegevens die bekend zijn van de KWO-systemen.

5.2.1. Ligging KWO-systemen

De ligging van de bronnen van de verschillende KWO-systemen is weergegeven in figuur 5.1. Zoals te zien, is een hoge concentratie van KWO-systemen aanwezig rondom het stationsgebied van Den Haag Centraal.



Figuur 5.1: Ligging KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag

5.2.2. Vergunde debieten versus onttrokken debieten

Bij een vergunningaanvraag wordt uitgegaan van een maximaal te verwachten debiet dat zal worden onttrokken. In het algemeen wordt verondersteld dat dit debiet in werkelijkheid lager zal zijn.

Van de jaren 1999 tot 2003 zijn gegevens bekend van de werkelijke onttrekkingen. Deze gegevens staan ter vergelijking met de vergunde debieten vermeld in tabel 5.1.

Tabel 5.1: Werkelijke debieten versus vergunde debieten van KWO-systemen

KWO systeem	Vergund (m ³ /jaar)	Ontrokken 1999	Ontrokken 2000	Ontrokken 2001	Ontrokken 2002	Ontrokken 2003
Stadhuis	473.000	348.560	426.640	603.790	495.250	745.120
Min. van Buiten- landse Zaken	400.000	206.295	77.998	107.000		265.444
Paleis van Justitie	900.000	181.531	154.544	214.691	89.042	204.410
VRM	1.550.000	330.150	465.464	131.970	434.833	581.883
Siemens fase 1	110.000	38.681	68.570	60.854	70.531	96.544
Prinsenhof	1.200.000					
Nieuwspoor	27.300					
Haagse Poort	780.000					
Ministerie LNV ¹	1.230.000					
JuBi Complex	1.200.000					
Babylon ^{1,2}	984.000					

¹⁾ Nog niet geïnstalleerd ten tijde van dit onderzoek

²⁾ Nog niet vergund ten tijde van dit onderzoek

5.2.3. Laden en ontladen koude bronnen

Ook zijn gegevens opgevraagd over het laden en ontladen van de bronnen. In tabel 5.2 staat een samenvatting van relevante informatie over de vergunde debieten en totaal aan MWH laden en ontladen van de KWO-systemen die geïnstalleerd zijn in de binnenstad van Den Haag.

Tabel 5.2: Eigenschappen KWO-systemen Den Haag

KWO systeem (1994-2003)	Vergund (m ³ /jaar)	totaal laden ¹ koude bron (MWH)	totaal ontladen ¹ (MWH)	injectie- temp. koude bron	injectie- temp. warme bron
Stadhuis	473.000	-		8	16
Min. van Buiten- landse Zaken	400.000	248	593	6,5	23
Paleis van Justitie	900.000	1558	2742	6	18
VROM	1.550.000	3011	4332	8,5	15
Siemens 1+2	185.000			8	16
Prinsenhof	1.200.000			8	17
Nieuwspoot	27.300			8	16
Haagse Poort	780.000			7	13,5
Ministerie LNV ²	1.230.000			7	16
JuBi Complex	1.200.000	nvt	nvt	7	16
Babylon ^{2,3}	984.000	nvt	nvt	8	14,5

¹⁾ Bij het opslaan van koude en warmte wordt gekeken vanuit de koude bron. Koude wordt opgeslagen in de bron, wat betekent dat de koude bron wordt geladen. Omdat sprake is van een gesloten systeem betekent dit tevens dat warmte wordt onttrokken. De koude bron ontladen houdt in dat grondwater uit de koude bron wordt gebruikt voor koelingsdoeleinden en dat warmte wordt opgeslagen.

²⁾ Nog niet geïnstalleerd ten tijde van dit onderzoek

³⁾ Nog niet vergund ten tijde van dit onderzoek

5.2.4. Evaluatie functioneren KWO-systemen

In de eerste jaren van het actief zijn van een KWO-systeem wordt verwacht dat meer grondwater wordt onttrokken dan in latere jaren. De omringende grond en het grondwater worden per seizoen langzaam afgekoeld of opgewarmd door energieverliesprocessen. Hierdoor zal in de loop van de jaren de energieverliezen van de gevormde bellen afnemen. Bij gelijkblijvende omstandigheden mag wel verwacht worden dat de onttrekkingsdebieten dan per jaar zullen afnemen, totdat een thermisch evenwicht is ontstaan (thermisch invloedsgebied). Uit tabel 5.1 blijkt echter dat de grootte van de onttrokken debieten juist toeneemt met de jaren. De onttrokken debieten zijn veelal kleiner dan is vergund. Alleen het KWO-systeem van het Stadhuis onttrekt zo nu en dan grotere debieten dan is vergund.

Met betrekking tot de energiebalans is ook een aantal opmerkingen te maken. Alle geïnstalleerde KWO-systemen, behalve het systeem van Paleis van Justitie, dienen te voldoen aan de energiebalanseis. Echter, hoewel weinige gegevens bekend zijn, is te herleiden dat over het algemeen warmte wordt geloosd. Het systeem van Paleis van Justitie is ontworpen met een bewuste onbalans, waarbij koudelozing is toegestaan. Echter ook het systeem van Paleis van Justitie lost warmte.

5.2.5. Oorzaak van warmte lozen achterhalen

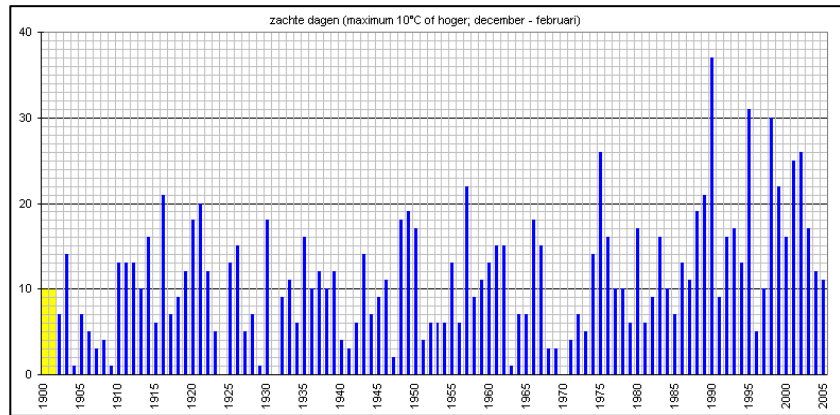
In paragraaf 4.4.5 is een aantal oorzaken beschreven hoe een energieonbalans en dus ook warmtelozen van een KWO-systeem kan ontstaan. Deze oorzaken zijn:

- verandering van gebruik van het gebouw;
- foutieve inschatting energieverliezen bovengronds systeem
- onjuist functioneren van gebouwinstallatie
- klimaatverandering

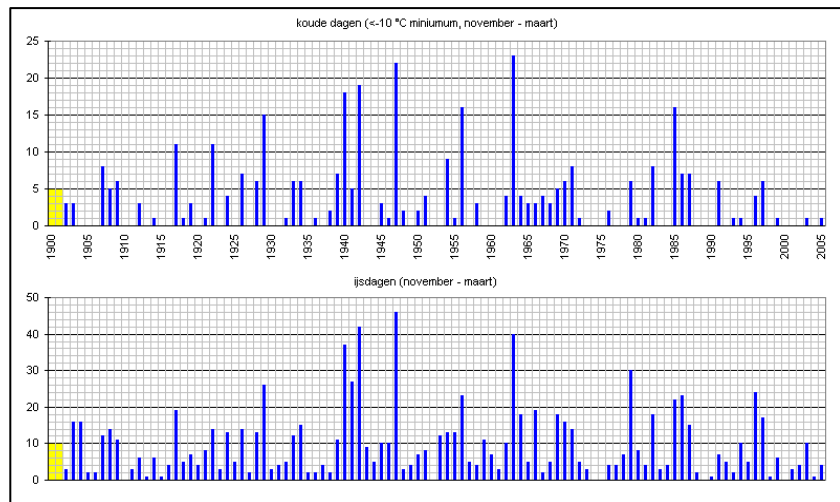
Het nagaan van de eerste drie oorzaken vallen buiten het kader van dit onderzoek. Een analyse van het klimaat van de afgelopen jaren is wel gedaan. In de figuren 5.2, 5.3, en 5.4 zijn respectievelijk het aantal zachte dagen, het aantal koude dagen en het aantal warme dagen van de afgelopen eeuw uitgezet [KNMI, 2005].

Uit de figuren is af te leiden dat in de afgelopen 10 jaar het aantal zachte dagen per winter sterk is toegenomen. Daarnaast is het aantal koude dagen de afgelopen 10 jaren sterk gedaald. Dit zou tot gevolg kunnen hebben dat koude laden in de winter niet goed mogelijk is geweest. Daarnaast is het aantal warme dagen de afgelopen 10 jaar flink toegenomen. De vraag naar koude kan daarom zijn toegenomen.

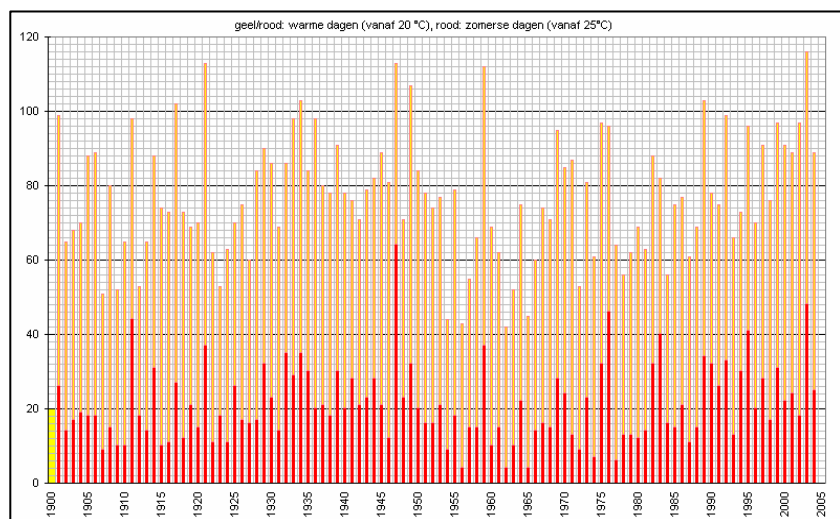
Omdat in de winter niet genoeg koude kan worden opgeslagen, zal in de zomer waarschijnlijk meer grondwater moeten worden onttrokken om aan de koudevraag te voldoen. Dit kan het toenemende onttrokken debieten en de energieonbalans van de afgelopen jaren verklaren. Als de klimaatverandering, zoals die in het algemeen geaccepteerd wordt, zich doorzet heeft dit gevolgen voor de efficiëntie van KWO-systemen. Wanneer de komende jaren wederom zachte winters en hete zomers optreden, zal koude opslaan in de winter moeilijk zijn (en dus ook opgeslagen warmte gebruiken en zodoende afkoelen) en is veel meer grondwater nodig (dat een hogere temperatuur heeft) voor koeling in de zomer. De onbalans zal toenemen. Deze kan weer leiden tot meer onderlinge beïnvloeding van KWO-systemen.



Figuur 5.2: Aantal zachte dagen per jaar



Figuur 5.3: Aantal koude en ijsdagen per jaar



Figuur 5.4: Aantal warme dagen per jaar

Geconcludeerd kan worden dat het is te beargumenteren om klimaatverandering en warmtelozen van een KWO-systeem in verband met elkaar te brengen.

5.3. Modelleren van effecten

Bij een vergunningaanvraag van een KWO wordt een effectrapportage aangeleverd, waarin de effecten bij een bepaald debiet en injectietemperaturen staan beschreven. Hierbij wordt uitgegaan van een energiebalans. In de praktijk blijkt echter dat:

- veelal een energiebalans optreedt;
- soms debieten worden overschreden.

Kortom, een aantal KWO-systeem voldoet niet aan de vergunning. De huidige effectberekeningen zijn niet conform de werkelijkheid. Acties die ondernomen kunnen worden door de beheerders van KWO-systemen zijn, of voldoen aan de afgegeven vergunning, of een nieuwe berekening doen en een nieuwe vergunning aanvragen. Indien dit akkoord is bij de Provincie wordt een nieuwe vergunning afgegeven.

Om inzicht te krijgen in onderlinge beïnvloeding door diverse manieren van functioneren (of niet functioneren) van KWO-systemen zijn nieuwe modelberekeningen gedaan in FLOP3N. In bijlage 12 is de werking van deze computercode opgenomen. In bijlage 9 zijn het model en de resultaten beschreven.

5.3.1. Probleemstelling voor het model

De gestelde probleemschets en evaluatie van het functioneren van de KWO-systemen leidt tot de volgende probleemstelling voor het model.

- De onderlinge effecten en gevolgen van onttrekkingen uit koude dan wel warme grondwaterbellen door diverse KWO-systemen en variatie in onttrekkingsgedrag in de binnenstad van Den Haag zijn niet bekend.

5.3.2. Doelstelling voor het model

De doelstelling kan als volgt geformuleerd worden. Nieuwe modelberekeningen moeten inzicht geven in:

- Korte en lange termijn van thermische effecten en onderlinge invloeden van diverse KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag. Met behulp van verschillende scenario's moet inzicht te verkrijgen zijn over deze onderlinge invloed. Hierin worden onder andere klimatologische veranderingen meegenomen.

5.4. Modelberekening met FLOP3N

Aanvankelijk is getracht modelberekeningen te doen met de computercode HST3D. HST3D is geschikt om hydraulische en thermische effecten te berekenen (zie bijlage 6 en 12). Echter de grootte van het grid en de benodigde verfijning rondom de bronnen om het warmtetransport door te rekenen, maakt het modelleren van effecten van het gehele modelgebied in HST3D te tijdsintensief. Daarom is gekozen een berekening te doen met een analytisch programma dat stroombanen kan doorrekenen, om zo het thermisch invloedsgebied en de onderlinge beïnvloeding te bepalen. Zoals in hoofdstuk 3 is geanalyseerd, is de verandering van de doorlatendheid vanwege temperatuursveranderingen vooral van invloed op de hydrologische effecten en zodoende op de grondwaterstroming. Indien temperatuurveranderingen niet worden meegenomen wordt hiermee een fout geïntroduceerd. Dit zou effect kunnen hebben op het warmtetransport. Onderzoek heeft echter uitgewezen dat verandering van de doorlatendheid ten gevolge van temperatuurveranderingen nauwelijks invloed heeft op het thermisch rendement en dus op de koude en warme belvorming [Peeters, 2001].

5.4.1. Scenario's

Omdat op het moment van het doen van dit onderzoek niet voldoende gegevens bekend waren om de werkelijke effecten te bepalen, zijn scenario's bedacht om effecten te bepalen voor diverse situaties. De modelberekeningen zijn gedaan door gebruik te maken van een maximaal weekde-

biet. Dit weekdebiet is het debiet wanneer 5 dagen lang 10 uur per dag het maximale debiet een half jaar lang wordt onttrokken. Het aangevraagde debiet in de vergunningen is gebaseerd op een jaar lang onttrekken van dit weekdebiet.

De onderlinge invloed is niet voor elk KWO-systeem bepaald. In eerste instantie is gekeken naar de onderlinge invloed van de systemen: Paleis van Justitie, Ministerie van Buitenlandse Zaken, LNV en Babylon. Daarna is ingezoomd op de koude bellen van Babylon en het Ministerie van Buitenlandse Zaken. De conclusies die aan deze resultaten zijn verbonden, staan in de volgende paragraaf.

5.5. Conclusie onderlinge beïnvloeding KWO-systemen; case studie Den Haag

In de praktijk blijkt dat in Den Haag de meeste systemen netto warmte lozen, oftewel in onbalans zijn. Het klimaat kan een mogelijke oorzaak hiervan zijn. De zomers van de afgelopen jaren waren relatief warm en de winters zacht. Hierdoor ontstaat de kans dat de opgeslagen warmte in de zomer onvoldoende kan worden afgekoeld in de winter.

Daarentegen wordt minder grondwater gebruikt dan van tevoren was verwacht. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de ruime marges in onttrekkingsdebieten die zijn aangehouden bij het ontwerp.

Voor de modelberekeningen is echter wel uitgegaan van het maximale weekdebiet. De berekende effecten zullen daardoor minder groot zijn.

Zelfs door gebruik te maken van maximale weekdebieten lijkt op basis van berekeningen de onbalans bij KWO-systemen geen onderlinge problemen op te leveren.

Thermische interactie tussen warme en koude bronnen van verschillende KWO-systemen treedt niet op door de relatief grote afstand tussen de afzonderlijke systemen, zelfs in het "drukke" centrum van Den Haag.

Tussen alleen koude of alleen warme bronnen van diverse KWO-systemen kan wel een thermische interactie optreden. Het rendement van beide systemen zal alleen licht toenemen als de temperaturen of boven (bij warme bellen) of onder (bij koude bellen) de natuurlijke grondwatertemperatuur liggen.

Echter blijkt wel dat de installatie van een nieuw KWO-systeem kortdurend (gedurende één seizoen) zal leiden tot een rendementsverlies bij bestaande systemen. Op de lange termijn worden geen problemen met naburige systemen verwacht, mits alle systemen continu en synchroon dezelfde debieten blijven onttrekken. Variërende onttrekkings- en retourneringsdebieten per seizoen zullen namelijk wel leiden tot onderlinge beïnvloeding.

5.6. Aanbevelingen onderlinge beïnvloeding KWO-systemen; case studie Den Haag

Om op basis van werkelijke onttrokken en geretoureerde debieten een uitspraak te doen over het functioneren van geïnstalleerde systemen, dienen de provincies meer gegevens hierover te achterhalen. Tezamen met deze gegevens dienen de hoeveelheden opgeslagen en verbruikte energie te worden aangeleverd door de vergunninghouders.

Het wordt aanbevolen voldoende afstand tussen koude en warme bronnen van verschillende KWO-systemen aan te houden. Onderzoek heeft uitgewezen dat bij een afstand van drie keer de thermische straal van een onderlinge beïnvloeding tussen de koude en warme bel nauwelijks sprake zal zijn [Zwart, 2002].

Onderlinge invloed van KWO-systemen kan negatief zijn. Dit is vooral mogelijk bij variaties in injecties en onttrekkingen van KWO-systemen per seizoen die niet synchroon lopen met die van

systemen in de buurt. Zeker in het eerste seizoen wordt een onderlinge beïnvloed verwacht die tot een rendementsverlies kan leiden. Bij twijfel over de invloed van een nieuw KWO-systeem bij een vergunningaanvraag wordt aanbevolen aan de hand van een checklist alle mogelijke vragen beantwoord te krijgen. Op deze checklist zouden de volgende punten vermeld kunnen staan:

- Is de onderlinge afstand tussen de koude en warme bronnen van de twee systemen groot genoeg om thermische interactie te voorkomen?
- Hoe groot is het rendementsverlies ten gevolge van het verplaatsen van de koude of warme bellen van het bestaande systeem door het aanzetten van het nieuwe systeem?
- Hoe flexibel is het nieuwe systeem, oftewel hoe gaat het systeem om met verschillende koude- en warmtevragen per seizoen, zijn grote verschillen in onttrekkings- en retourneringsdebieten te verwachten?
- Wat zijn de verwachte extra pompenergiekosten bij het al bestaande systeem ten gevolge van stijghoogteverlagingen of -verhogingen door het nieuwe KWO-systeem?

In verband met de energiebalans, is het van belang dat de overheid normen stelt ten aanzien van klimaatscenario's waarmee bij het ontwerp rekening moet worden gehouden. Het ligt voor de hand een verloop te kiezen dat mede op basis van klimaatsvoorspelling is te verwachten gedurende de levensduur van het systeem.

Aangezien op basis van de huidige geringe hoeveelheid gegevens al duidelijk is dat veel KWO-systemen per saldo warmte lozen, verdient wellicht de werking van met name het bovengronds systeem de aandacht. Wellicht is het mogelijk deze systemen zo te ontwikkelen dat middels goed beheer en flexibele processen een energiebalans is te realiseren, ongeacht de koude- en warmtevraag, waarbij per jaar de onttrokken debieten ongeveer gelijk zijn.

6. KOUDE-WARMTEOPSLAG ONTWERP ADVIES PROGRAMMA (KWO-OAP)

Dit hoofdstuk behandelt het programma KWO-OAP dat is ontwikkeld om het ontwerpproces van KWO-systemen te ondersteunen en te vereenvoudigen. Dit programma is op moment van schrijven nog in ontwikkeling. Een definitieve versie van het programma en uitgebreide onderbouwing en handleiding zal in een later stadium worden opgeleverd. In de volgende paragrafen is kort het probleem bij het ontwerpen van een KWO, het doel van KWO-OAP en de werking toegelicht.

6.1. Problemen ontwerpproces KWO-systeem

In hoofdstuk 2 is een groot aantal ontwerpaspecten bij KWO aan bod gekomen. Deze ontwerpaspecten zijn onder te verdelen in geohydrologische randvoorwaarden en klimaatsysteemrandvoorwaarden. Daarnaast zijn er randvoorwaarden die voortvloeien uit wat technisch mogelijk of technisch gewenst is. Al deze randvoorwaarden maken het ontwerpen van een zo rendabel KWO-systeem een ingewikkelde procedure. Om het ontwerpproces enigszins te vereenvoudigen, is KWO-OAP ontwikkeld. KWO-OAP draait in het spreadsheetprogramma MSExcel.

6.2. Doel van KWO-OAP

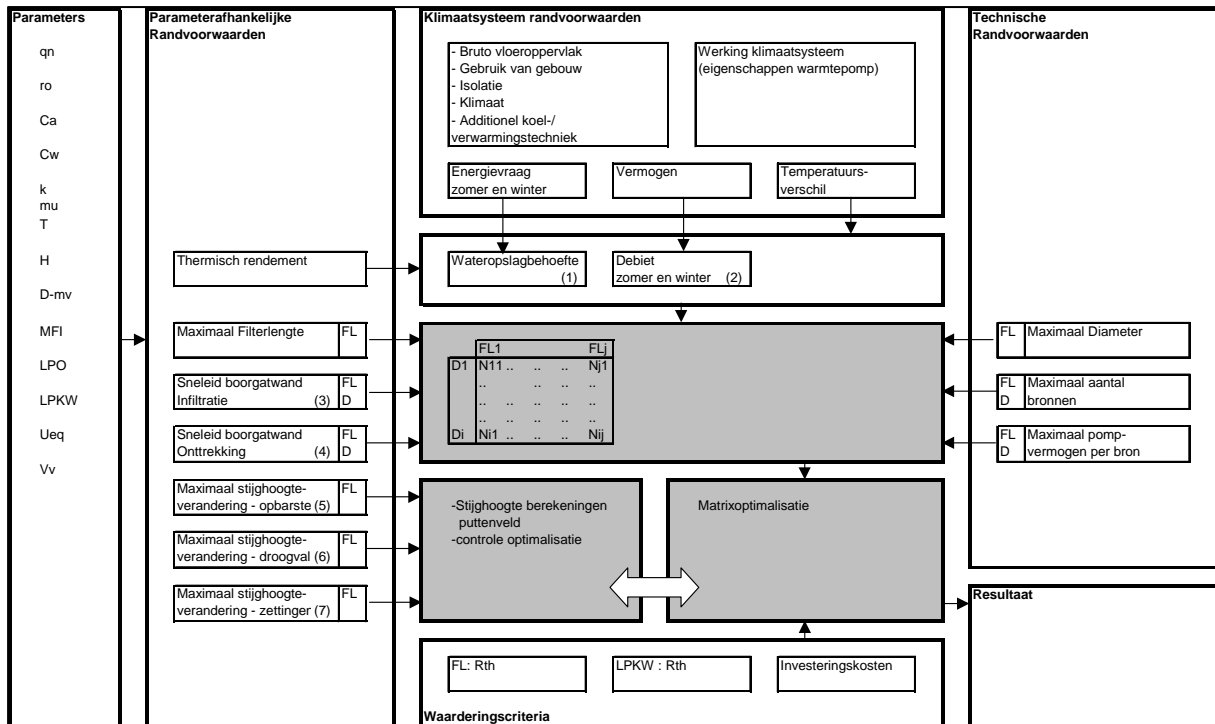
KWO-OAP is voor een aantal doelen ontwikkeld:

- vereenvoudigen en ondersteunen van het ontwerpproces;
- gebaseerd op vuistregels van de NVOE en theoretische achtergrond uit hoofdstuk 2, 3 en 4;
- gebruiksvriendelijk;
- mogelijkheden tot uitbreiding;
- controleerbaar

6.3. Werking KWO-OAP

Het programma werkt aan de hand van de volgende gegevens:

- er wordt gebruik gemaakt van vuistregels (Deze vuistregels zijn gebaseerd op de richtlijnen van de NVOE voor eenvoudige KWO-systemen (onttrekkingen tot 80 m³/h) of een uitbreiding ervan.);
- ontwikkelde theorie die beschreven staat in hoofdstuk 3 en 4 (De onderlinge samenhang van vuistregels en theorie is in figuur 6.1 weergegeven.);
- invoer van de geohydrologie-, klimaatsysteem- en gebruikersrandvoorwaarden;
- bewerking van gegevens (KWO-OAP genereert een matrix waarin vele mogelijkheden voor KWO-systemen worden gegenereerd, de matrix wordt geoptimaliseerd aan de hand van criteria die bij de invoer is bepaald.);
- uitvoer van resultaten (KWO-OAP genereert informatie van een aantal KWO-systemen die het beste voldoen volgens de gegeven randvoorwaarden)



Figuur 6.1: schematisatie samenhang vuistregels en processen

6.4. Conclusie

Wanneer KWO-OAP volledig ontwikkeld is, kan het een geschikte ondersteuning zijn bij het ontwerpproces van KWO-systemen. Op het moment is het programma nog niet volledig operationeel, maar kan wel een goede inschatting van een mogelijk ontwerp voor een KWO-systeem worden gemaakt.

7. CONCLUSIES

In dit hoofdstuk zijn conclusies gegeven naar aanleiding van het gedane het onderzoek.

7.1. Ontwerptraject

Het ontwerp van een KWO-systeem is met name afhankelijk van de lokale geohydrologie en de randvoorwaarden die opgelegd worden door het bovengrondse systeem. Dit gecombineerd levert een pakket aan ontwerpaspecten die door middel van een (nog uit te ontwikkelen) ontwerpshoofd integraal kunnen worden meegenomen. Een eerste aanzet gemaakt tot het ontwikkelen van een softwareprogramma dat het ontwerpproces van KWO kan ondersteunen en vereenvoudigen.

Witteveen+Bos heeft momenteel de benodigde kennis in huis om geohydrologische haalbaarheidsstudies te doen van KWO-systemen.

7.2. Energiebalans

De energiebalans is dat er evenveel warmte of koude in de bodem wordt gebracht als er ook weer uit wordt gehaald. De NVOE hanteert weliswaar een andere definitie, maar gebleken is dat de energiebalans los staat van processen die leiden tot energieverliezen. Een goed ontwerp van een KWO-systeem kan energieverlies beperken. Het uiteindelijke beheer van een KWO-systeem moet de energiebalans garanderen, voor zover vereist in de vergunning.

7.2.1. Energieonbalans

Hoewel KWO-systemen voor wat de vergunning betreft dienen te voldoen aan de energiebalanseis is uit de verzamelde gegevens gebleken dat KWO-systemen per saldo veelal niet voldoen aan deze balans. Een energieonbalans kan ontstaan door de volgende oorzaken:

- verandering van gebruiksfuncties van een gebouw;
- verkeerde inschatting van de energieverliezen van bovengrondse energieverliezen;
- onjuist functioneren gebouwinstallatie;
- klimaatverandering (het temperatuurverloop dat bij het ontwerp is gehanteerd komt niet overeen met de werkelijkheid, door zachtere winters en warmere zomers).

7.2.2. Effecten energieonbalans

Het effect van een energieonbalans kan bodemopwarming zijn, waardoor de grond en het grondwater op termijn wellicht niet meer te gebruiken zijn voor KWO of andere toepassingen (bijvoorbeeld de drinkwatervoorziening). In het uiterste geval dat alle KWO-systemen alleen warmte-lozen kan de bodem enkele °C in 30 jaar opwarmen.

7.3. Functioneren KWO-systemen binnenstad Den Haag

In de praktijk blijkt dat in Den Haag de meeste systemen netto warmte lozen, oftewel in onbalans zijn. Daarentegen wordt minder grondwater gebruikt dan van tevoren was verwacht. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de ruime marges in onttrekkingsgebieden die zijn aangehouden bij het ontwerp.

7.4. Onderlinge beïnvloeding van bellen

Toch lijkt op basis van berekeningen de onbalans bij KWO-systemen geen onderlinge problemen op te leveren.

Thermische interactie treedt niet op door de relatief grote afstand tussen de afzonderlijke systemen, zelfs in het "drukte" centrum van Den Haag.

Wel blijkt dat de installatie van een nieuw KWO-systeem kortdurend (gedurende één seizoen) zal leiden tot een rendementsverlies bij bestaande systemen. Op de lange termijn worden geen problemen met naburige systemen verwacht, mits alle systemen continu en synchroon dezelfde debieten blijven onttrekken. Variërende onttrekkings- en retourneringsdebieten per seizoen zullen namelijk wel leiden tot onderlinge beïnvloeding.

8. AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk zijn aanbevelingen gedaan die voortkomen naar aanleiding van dit onderzoek.

8.1. Nader onderzoek naar aanleiding van deze onderzoekstudie

Om op basis van werkelijke onttrokken en geretourneerde debieten een uitspraak te doen over het functioneren van geïnstalleerde systemen, dienen de provincies meer gegevens hierover te achterhalen. Tezamen met deze gegevens dienen de hoeveelheden opgeslagen en verbruikte energie te worden aangeleverd door de vergunninghouders.

Ten tijde van voorliggend onderzoek is een hiaat geconstateerd in het simulatieprogramma HST3D, waardoor het programma de ingebrachte energie in en uitgehaalde energie uit de grond en grondwater door de onttrekkings- en retourneringsdebieten van putten verkeerd berekende. De opgestelde theorieën van energieverliesprocessen die bij KWO belangrijk zijn, zijn hierdoor onvoldoende getoetst. Aanbevolen wordt de theorieën met een verbeterde versie van HST3D te toetsen. (Het probleem met dit bijna twintig jaar oude rekenprogramma is inmiddels door de maker erkend en opgelost en verbeterde versie is nu beschikbaar).

Vanwege hetzelfde probleem met HST3D zijn geen rendementsberekeningen uitgevoerd. Met een verbeterde versie van HST3D in combinatie met uitgebreide meetgegevens kunnen rendementsberekeningen worden uitgevoerd.

8.2. Witteveen+Bos

Een aanzet is gegeven voor de ontwikkeling van een softwareprogramma, waarmee het ontwerptraject van een KWO-systeem vereenvoudigd wordt. Aanbevolen wordt om dit programma verder te ontwikkelen.

Daarnaast wordt aanbevolen ervaring op te doen door het maken van haalbaarheidstudies van KWO-systemen.

8.3. Provincie Zuid-Holland

Onderlinge invloed van KWO-systemen kan negatief zijn. Dit is vooral mogelijk bij variaties in injecties en onttrekkingen van KWO-systemen per seizoen die niet synchroon lopen met die van systemen in de buurt. Zeker in het eerste seizoen wordt een onderlinge beïnvloed verwacht die tot een rendementsverlies kan leiden. Bij twijfel over de invloed van een nieuw KWO-systeem bij een vergunningaanvraag wordt aanbevolen aan de hand van een checklist alle mogelijke vragen beantwoord te krijgen. Op deze checklist zouden de volgende punten vermeld kunnen staan:

- Is de onderlinge afstand tussen de koude en warme bronnen van de twee systemen groot genoeg om thermische interactie te voorkomen?
- Hoe groot is het rendementsverlies ten gevolge van het verplaatsen van de koude of warme bellen van het bestaande systeem door het aanzetten van het nieuwe systeem?
- Hoe flexibel is het nieuwe systeem, oftewel hoe gaat het systeem om met verschillende koude- en warmtevragen per seizoen, zijn grote verschillen in onttrekkings- en retourneringsdebieten te verwachten?
- Wat zijn de verwachte extra pompenergiekosten bij het al bestaande systeem ten gevolge van stijghoogteverlagingen of -verhogingen door het nieuwe KWO-systeem?

In verband met de energiebalans, is het van belang dat de overheid normen stelt ten aanzien van klimaatscenario's waarmee bij het ontwerp rekening moet worden gehouden. Het ligt voor de hand een verloop te kiezen dat mede op basis van klimaatsvoorspelling is te verwachten gedurende de levensduur van het systeem.

8.4. Algemeen

In het kader van de energiebalanseis lijkt een discussie aangaande het nut hiervan van belang. De provincies dienen hiertoe één beleid te vormen en de voor- en nadelen van een energiebalans duidelijk uiteen te zetten. De watertafel wordt als een geschikt middel hiervoor gezien.

Aangezien op basis van de huidige geringe hoeveelheid gegevens al duidelijk is dat veel KWO-systemen per saldo warmte lozen, verdient wellicht de werking van met name het bovengronds systeem de aandacht. Wellicht is het mogelijk deze systemen zo te ontwikkelen dat middels goed beheer en flexibele processen een energiebalans is te realiseren, ongeacht de koude- en warmtevraag, waarbij per jaar de onttrokken debieten ongeveer gelijk zijn.

9. LITERATUURLIJST

- Aarssen, van M.M., 2002. *“Kansen voor lage temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen”*, deelrapport ondergrondse energieopslag, Kema, Arnhem. rapport nr.: 50060657-KPS/SEN/IF 02-3058.
- Barends, F.B.J. en Uffink, G.J.M., 2002. *Groundwater mechanics, flow and transport*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TUDelft, Delft, Nederland.
- Boekelman, R.H., Bolier, G, Van Dijk, M.J. en Van Genuchten, C.C.A., 2002, *Geohydrologie 1*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TUDelft, Delft, Nederland.
- Boekelman, R.H., Maas, C., Bolier, G., Kop, J. en Gehrels, J.C., 2003, *Geohydrological survey*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TUDelft, Delft, Nederland.
- Braak, van den N.J., Kempkes, F.L.K., 2001. *“Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor warmtewinning en –opslag”*, IMAG, Wageningen. IMAG rapport 2001-120.
- Brons, H.J. 1992. *Biochemical aspects of aquifer thermal energy storage*. WAU, Wageningen. Dissertatienr.: 1523.
- Buik, N, Stolk, P. en Willemsen, G., 2004. *“Analyse van temperatuurmetingen in de Nederlandse ondergrond.”*, Stromingen 10, (2004) 4, p13-21.
- Caneta Research INV., 1995. *Commercial/institutional ground-source heat pump engineering manual*. ASHRAE, Atlanta, USA.
- Chapelle, F.H., 2001, *Ground-water microbiology and geochemistry*. Wiley, New York, USA.
- Hooghart, J.C. en Posthumus C.W.S., 1990. *Hydrochemistry and energy storage in aquifers*. TNO Committee on Hydrological Research, Den Haag, Nederland.
- IF Technology, 1996. *Verstopping Zuiderziekenhuis*, IF Technology BV., Arnhem, Nederland.
- IF Technology, 2000. *“Wet- en regelgeving bij duurzame energiesystemen in de bodem (opslag, zon, warmtepomp en asfalt) en analyse knelpunten vergunningverlening kleine warmtepompprojecten.”* IF Technology BV., Arnhem, Nederland.
- IF Technology, 2001. *“Ontwerpnormen voor bronnen koude-/warmteopslag”*. IF Technology BV., Arnhem, Nederland. Rapport nr.: 1/9805/GW.
- Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K. 1997. *Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for commercial and Institutional Buildings*. American society of heating, refrigerating and Air conditioning engineers, Inc, Atlanta, Georgia, USA.
- Kipp, K, 1987. *HST3D: A computercode for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow systems*. Water resources investigations report 86-4095, U.S., Geological survey, Denver, Colorado, U.S.A.
- Kipp, K, 1997. *Guide to the revisited heat and solute transport simulator: HST3D-version 2*. Water resources investigations report 97-4157, U.S., Geological survey, Denver, Colorado, U.S.A.
- Kipp, K, 2005. *USGS HST Welcome Page – 01-04-2005*
http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GW_Solute/hst/

- KNMI, 2005. *Warm weer, winter weer en nattigheid vanaf 1900 (De Bilt)* – 01-06-2005 http://www.euronet.nl/users/e_wesker/weer/weer.html
- Lee, Tien-Chang, 1999. *Applied Mathematics in Hydrogeology*. Lewis, Boca Raton, Florida, USA.
- Nield D.A., Bejan, a., 1999. *Convection in porous media*, second edition. Springer, New York, USA.
- NOVEM, 1991. “Referentie investeringsraming koude-opslag bij utiliteitsbouw “ NOVEM, Sittard, Nederland.
- NOVEM, 2003. “Definitiestudie Milieu effecten en –afweging energieopslag en warmtepomp-systemen.” NOVEM, Sittard. Rapport nr.: 2DEN03-031
- NVOE, 2001. *NVOE-richtlijnen ondergrondse energieopslag*. NVOE, Maarn, Nederland.
- Marsily, G. de, 1981. *Quantitative hydrogeology – groundwater hydrology for engineers*, Masson, Editeur, Parijs, Frankrijk.
- Peeters, M.J.J. , 2001. “Studie naar de rol van de temperatuur in de ondergrond bij warmte koude opslag systemen. Kwantificering beïnvloeding op hydraulische effecten en inzicht in thermische effecten. “Royal Haskoning, Rotterdam.
- Provincie Drenthe, 1998. *Provinciaal omgevingsplan*.
- Provincie Flevoland, 2000. *Waterhuishoudingsplan*.
- Provinsju Fryslân, 2000. *Tweede Waterhuishoudingsplan Fryslân 2000-2008*.
- Provincie Gelderland, 2003. *Waterhuishoudingsplan 3*.
- Provincie Groningen, 2000. *Stroomgebiedsvisie Groningen*.
- Provincie Limburg, 2001. *Provinciaal Omgevingsplan Limburg*.
- Provincie Noord-Brabant, 2002. *Waterhuishoudingsplan*.
- Provincie Noord-Holland, 1998. *Tweede Waterhuishoudingsplan*.
- Provincie Overijssel, 2000. *Waterhuishoudingsplan*.
- Provincie Utrecht, 2004. *Waterhuishoudingsplan 3*.
- Provincie Zeeland, 2002. *Grondwaterbeheersplan*.
- Provincie Zuid-Holland, 2001. *Grondwaterbeheersplan*.
- Rientjes, T.H.M. en Boekelman, R.H., 2001. *Hydrological Models*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TUDelft, Delft, Nederland.
- RIVM, 2004. “Productie van duurzame energie, 1990-2003”, *Milieu en natuurcompendium – 10-06-2005* <http://www.rivm.nl/milieuenatuurcompendium/nl/i-nl-0385-06.html>

- Royal Haskoning Nederland BV. en IF Technology, 2003. *“Definitie studie milieueffecten en -afweging, energieopslag en warmtepompsystemen.”* NOVEM, Sittard. Rapport nr.: 2DEN03-031.
- Stelling, G.S., 1999. *Computational modelling of flow and transport*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TUDelft, Delft, Nederland.
- Veling, E.J.M., 1992. *FLOP3N-Pathlines in Three-Dimensional Groundwater Flow in a System o Homogeneous Anisotropic Layers*. Ntional Institutue of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven. Rapport nr.: 719106001.
- Willemsen, A. en Harlingen, S.M. van, 2002. *“De bodemtechnische principes van energieopslag.”* TVVL Magazine 10/2002.
- Winston, R.B., 1998. *HST3D GUI* – 01-02-2005
http://www.mindspring.com/~rbwinston/hst3dgui/HST3D_GUI.htm#Cost
- Zwart, de H.F. en Elswijk, R.C., 2002. *“Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen”*, IMAG, Wageningen, Nederland. Rapport nr.: 2002-64.
- Zwart, de H.F. en Knies, P, 2002. *“Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudepslag-systemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw.”* IMAG, Wageningen, Nederland. Rapport nr.: 2002-65.

BIJLAGEN