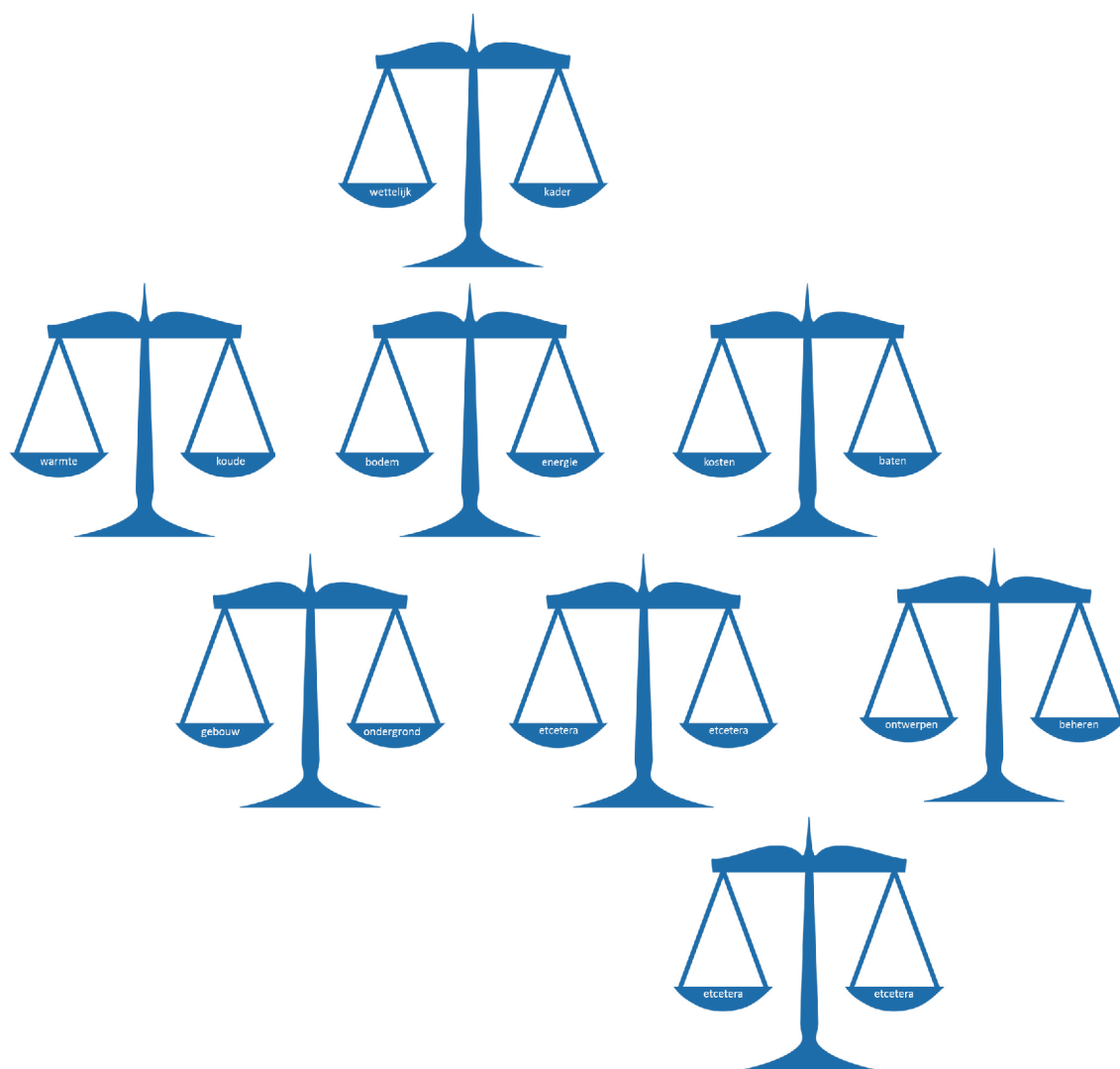

Onderzoek criteria energiebalans WKO

Eindrapportage (definitief)

3 mei 2012



Onderzoek criteria energiebalans WKO

Datum: 3 mei 2012
Projectnummer: 09600
Status: Eindrapportage (definitief)

Opdrachtgever: SKB
Contactpersoon: de heer A.F. Peekel
Postbus 420
2800 AK GOUDA

Uitgevoerd door: DWA installatie- en energieadvies
Duitslandweg 4
Postbus 274
2410 AG BODEGRAVEN
Telefoonnummer 088 - 163 53 00
E-mailadres dwa@dwa.nl

IF Technology
Velperweg 37
6824 BE ARNHEM
Telefoonnummer 026 - 353 55 55
E-mailadres info@iftechnology.nl

Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd door DWA installatie- en energieadvies en IF Technology in opdracht van de Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB). Het onderzoek is mede mogelijk gemaakt door financiële ondersteuning van IPO en de NVOE.

Het onderzoek is begeleid door een klankbordgroep en een expertgroep.

De klankbordgroep bestond uit de vertegenwoordigers van de volgende organisaties:

- SKB
- IPO
- Agentschap NL
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu
- NVOE

De expertgroep had de volgende samenstelling:

- Dr. Ir. T.J. Heimovaara, TU Delft
- Dr. Dipl.-Ing. M. Trcka, TU Eindhoven

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	4
2	Conclusies	8
2.1	WKO en de bovengrondse installatie	8
2.2	WKO en ondergronds ruimtegebruik	8
2.3	Autonome opwarming.....	9
2.4	Alternatieve criteria	9
3	Inleiding	10
3.1	Warmte-koudeopslag en energiebalans.....	10
3.2	Praktijkgegevens energiebalans uit het verleden	11
3.3	Contouren toekomstige regelgeving	12
3.4	Kader voor criteria rond WKO	13
3.5	Vraagstelling onderzoek	15
3.6	Leeswijzer	16
4	WKO op gebouwniveau: energievraag en (on)balans	17
4.1	Casus.....	17
4.2	Van casus naar generieke resultaten	28
5	WKO op gebouwniveau: ondergronds ruimtebeslag	33
5.1	Ondergronds ruimtebeslag: footprint en thermische straal	33
5.2	Resultaten footprint	37
5.3	Samenvatting invloed grondwaterstroming	41
6	Toepassing WKO in dichtbebouwde gebieden	44
6.1	Algemene Inleiding	44
6.2	Onbalans, footprints en bebouingsdichtheid.....	45
6.3	Detailstudie en effecten grondwaterstroming op gebiedsniveau.....	57
7	Autonome opwarming	61
7.1	Inleiding	61
7.2	Omvang opwarming	61
7.3	Gevolgen voor de bodemtemperatuur.....	65
7.4	Vergelijking met WKO	66
7.5	Toepassingsgraad WKO	68
7.6	Literatuur autonome opwarming.....	69
8	Evaluatie en opties (alternatieve) criteria voor WKO	70
8.1	Evaluatie criteria 'AmvB 2013'	70
8.2	Zijn er beperkende criteria noodzakelijk?	73
8.3	Groslijst alternatieve criteria	73
8.4	Stappen voor verdere uitwerking.....	79
9	Referenties	80

Bijlagen

I	Toelichting bij invloedsfactoren ondergronds ruimtegebruik	81
I.i	Invloedsfactoren en vereenvoudigingen	81
I.ii	Definitie ondergronds ruimtebeslag en footprints	81
I.ii.a	Ondergronds ruimtegebruik bij energiebalans	81
I.ii.b	Vereenvoudigde benadering ondergronds ruimtegebruik bij energieonbalans	84
I.ii.c	Energiehoeveelheid en thermische straal in de vereenvoudigde benadering	85
I.iii	Vereenvoudigingen in bepaling footprint op basis van thermische straal	86
I.iv	Modellering in 2D	86
I.v	Onderbouwing thermische berekeningen in 2D	87
I.vi	Invloed van heterogeniteit	89
I.vii	Vergelijking footprints HST-2D met de vereenvoudigde benadering	90
II	Toelichting bij invloedsfactoren bovengrondse installatie op ondergronds ruimtegebruik	92
III	Simulatiemodel van het bovengrondse gedeelte	94
III.i.a	Referentiekantoor	94
III.i.b	Dimensionering installatie energiecentrale	94
III.i.c	Simulatie omgeving	95
III.i.d	Vergelijk met referentiewaarden	101
III.i.e	Energiebalans	104
III.i.f	Jaarbelastingsduurkrommes gebouwvraag	105
III.i.g	Kosten onbalanscorrectie	106
IV	Opties voor het regenereren van warmte of koude	109

1 Samenvatting

Warmte-/koudeopslag in de bodem (WKO) speelt een belangrijke rol in het realiseren van energiebesparingsdoelstellingen in de gebouwde omgeving. Vanuit het oogpunt van bodembescherming worden eisen gesteld aan de zogenoemde energiebalans.

Deze rapportage presenteert de resultaten van een onderzoek naar de criteria rond de energiebalans bij toepassing van WKO voor open systemen. Het betreft de criteria die naar verwachting worden opgenomen in de AmvB Bodemenergie met ingangsdatum 1 januari 2013 (hierna afgekort tot 'AmvB 2013'). De resultaten worden hier samengevat als antwoorden op de gestelde onderzoeksvragen.

Wat zijn belangrijke invloedsfactoren op de energiebalans?

De energiebalans wordt bepaald door de warmte- en koudevraag aan de ondergrond. Deze worden bepaald door de warmte- en koudevraag in het gebouw en de energiestromen in de energiecentrale met (bijvoorbeeld) een warmtepomp (zie Figuur 1).

Bij ontwerpen van gebouwen met warmte-/koudeopslag zijn de invloedsfactoren met de grootste onzekerheidsmarge degene die de meeste impact hebben op het wel of niet behalen van de energiebalans.

Het gebouwgebruik is hierbij de dominante factor in de onzekerheid, naast de invloed van het klimaat. Is een installatie eenmaal in gebruik, dan komt hier het functioneren van de installatie bij als belangrijke invloedsfactor (goed onderhoud en beheer).

Om een onbalans in de bodem te voorkomen, is correctie van de warmte- en koudevraag aan de bodem noodzakelijk. Dit kan plaatsvinden door inzet van regeneratie of door het aandeel van de WKO aan de energielevering te variëren.

Wat zijn te verwachten gevolgen van de formulering van de criteria volgens 'AmvB 2013?'

De eis is minstens éénmaal in een periode van vijf jaar de warmte en koude met elkaar in evenwicht te brengen ('door nul te gaan'). De genoemde eis is verder zodanig geformuleerd dat alle warmte en koude wordt meegenomen, die sinds de datum van ingebruikneming in de bodem is gebracht (cumulatieve formulering).

WKO-installaties kunnen door gebruik van regeneratievoorzieningen extra warmte of koude in de bodem brengen en zo, technisch gezien, voldoen aan de eis voor energiebalans. Een alternatief is het aandeel van de warmte en/of koude dat wordt geleverd vanuit de ondergrond te variëren. Bij verlaging van het aandeel energielevering door de ondergrond wordt het resterende deel van de energievraag doorgaans geleverd met ketels en/of koelmachines (piekvoorziening).

Vanuit het oogpunt van energiebesparing is het toepassen van regeneratievoorzieningen te prefereren boven het verlagen van het aandeel levering door WKO. De cumulatief geformuleerde eisen met betrekking tot de energiebalans in combinatie met de grote onzekerheidsmarges in het gebouwgebruik vergen omvangrijke en flexibele regeneratievoorzieningen. Dit kan leiden tot complexe installaties met hoge investeringskosten. Het financieel rendement van een investering in WKO zal hierdoor afnemen.

Het is daarom te verwachten dat de invloedsfactor 'aandeel levering door WKO' in toenemende mate gebruikt zal worden om de energiebalans te sturen, dit in plaats van regeneratie van de bodem. Het aandeel van de WKO in de totale energielevering neemt hierbij af en daarvoor in de plaats neemt het aandeel levering met ketels en koelmachines toe. Dit is meer flexibel en leidt tot minder complexe installaties. De energiebesparing door toepassing van WKO komt hiermee echter onder druk te staan.

Hier komt bij dat het 'mikken op de nullijn' (te) hoge eisen stelt aan het beheer van installaties. Het is niet vanzelfsprekend dat er redelijkerwijs voldaan kan worden aan de geformuleerde criteria volgens 'AmvB 2013'.

Wat zijn belangrijke invloedsfactoren op het ondergrondse ruimtegebruik van WKO?

Uit de analyse van de ondergrondse aspecten is gebleken dat de energiebalans slechts één van de factoren is die het ondergronds ruimtegebruik domineren. De grootte van het thermisch invloedsgebied wordt zowel door de mate van energie(on)balans als door de snelheid van de grondwaterstroming bepaald (bij gelijke aquiferdikte en gelijke energievraag). Dit is met name het geval bij hogere stroomsnelheden van het grondwater. Ook de grootte van de energievraag is een belangrijke factor. Zo kan een klein systeem met een structurele onbalans een kleiner thermisch invloedsgebied hebben dan een groot systeem met een thermische balans. Energiebalans is daarom slechts in een deel van de gevallen een sturingsmiddel voor het ondergronds ruimtegebruik.

Wat zijn de gevolgen van het toelaten van onbalans?

Bij lage stroomsnelheden van het grondwater zal het thermisch invloedsgebied in de loop van de tijd toenemen, evenals de uitdovingstijd. Dit betekent dat na de exploitatieperiode van het systeem de warme of koude bellen langer aanwezig zijn in de bodem. Bij hogere stroomsnelheden wordt het verschil steeds kleiner tussen het thermisch invloedsgebied van een systeem met onbalans en een systeem dat in balans is.

Een groter wordend thermisch ruimtebeslag kan leiden tot ongewenste interferentie tussen WKO-systemen of interferentie met andere bodemfuncties.

In dichtbebouwde gebieden is gebleken dat bij onbalans het ondergrondse ruimtebeslag zodanig kan toenemen dat er ongewenste interferentie optreedt tussen WKO-systemen.

De factoren die hier aan bijdragen zijn:

1. beperkte aquiferdiktes;
2. toepassing van WKO bij 100% van de gebouwen;
3. eenzijdige samenstelling van de warmte en koudevraag aan de ondergrond (hetzelfde type onbalans: bijvoorbeeld vooral warmteoverschotten).
4. de mate van onbalans.

Is opwarming van de bodem als gevolg van klimaatverandering te vergelijken met eventuele netto afkoeling bij een WKO-systeem met onbalans?

De gemiddelde temperatuur aan de oppervlakte neemt toe door verstedelijking (stedelijk warmte eiland effect) en door klimaatverandering. De netto invloed van WKO op gebiedsniveau wordt bepaald door de netto onbalans op gebiedsniveau, de toepassingsgraad van WKO in het betreffende gebied en de aquiferdikte.

Bij de huidige toepassingsgraad van WKO is in stedelijke gebieden (uitgaande van woningbouw en/of utiliteitsbouw) het effect van opwarming door het Urban Heat Island en klimaatverandering in de bovenste 50 à 100 m van de ondergrond veel sterker dan eventuele netto afkoeling bij warmtelevering met WKO.

Op grotere dieptes zal de invloed van WKO veelal sterker zijn, doordat de invloed van de autonome opwarming hier minimaal is. De effecten van autonome opwarming door klimaatverandering en verstedelijking relativeren het belang van het strikt vermijden van netto afkoeling, met name in de bovenste 50 à 100 m van de ondergrond.

Zijn er criteria noodzakelijk rond toepassing van WKO?

In dichtbebouwde gebieden is het noodzakelijk het ondergronds ruimtebeslag in specifieke gevallen te beperken of af te stemmen om ongewenste interferentie tussen WKO-systemen te voorkomen. Bij een lage bebouwingsdichtheid wordt beperking van het ondergronds ruimtegebruik ingegeven door het voorkomen van interferentie met andere bodemfuncties.

Zijn er alternatieve criteria mogelijk rond toepassing van WKO?

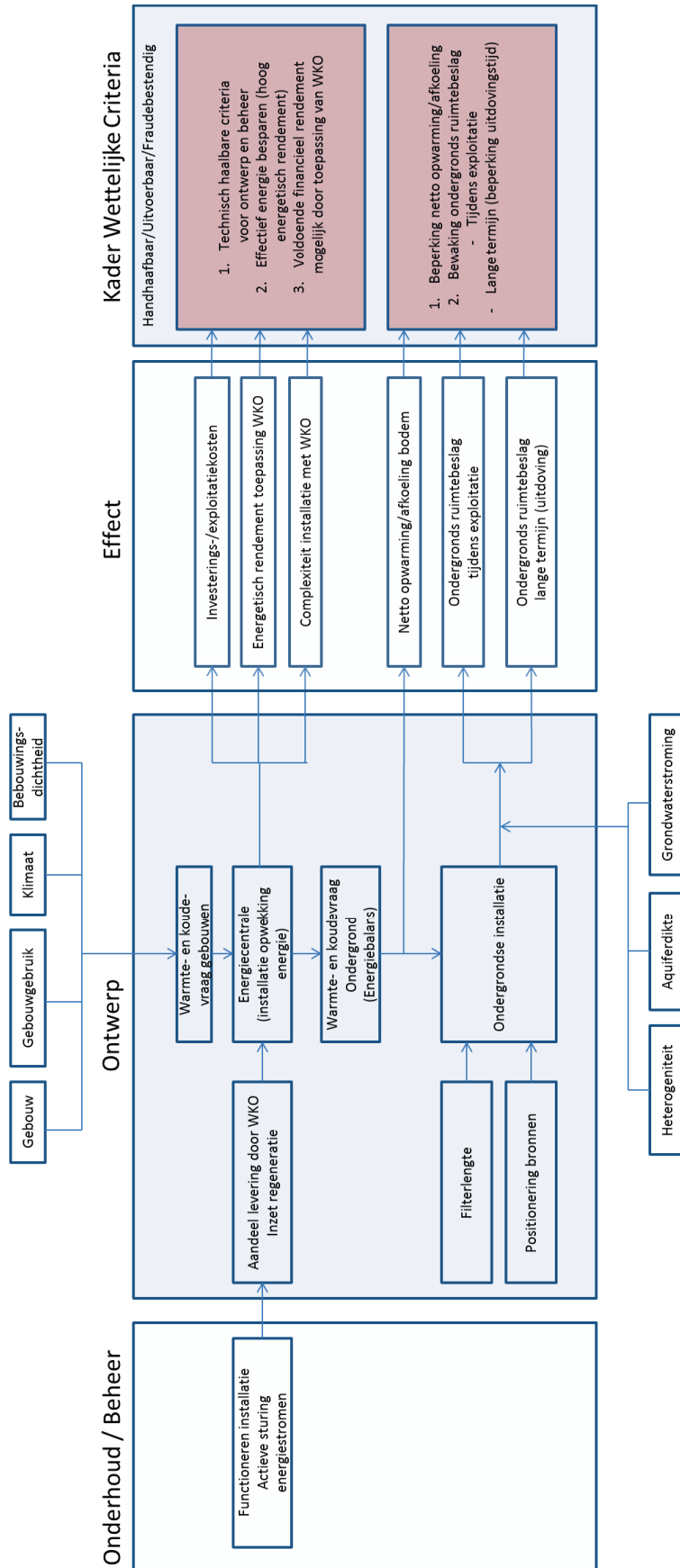
Als men het vermijden van netto opwarming of afkoeling als autonome waarde waardeert, dan is een eis met betrekking tot de energiebalans zeer vanzelfsprekend. Als men zich meer richt op het voorkomen van interferentie, dan zijn er ook alternatieven mogelijk.

Er is een groslijst opgesteld met opties met drie hoofdlijnen voor alternatieve criteria:

1. energiebalans als sturingsmiddel;
2. ondergronds ruimtegebruik als sturingsmiddel;
3. waterhoeveelheden met aanvullende eisen als sturingsmiddel.

Het verdient aanbeveling een beperkt aantal kansrijke opties te selecteren en uit te werken.

De opties onder 2 en 3 kunnen uitgewerkt worden als zelfstandig criterium, maar zijn tevens kansrijk om de toegestane afwijkingen van de energiebalans te reguleren. Een maximaal onbalanspercentage gekoppeld aan een tijdsduur is hiervoor niet geschikt.



Figuur 1 Samenvatting WKO: invloedsfactoren, effecten en kader wettelijke criteria

2 Conclusies

2.1 WKO en de bovengrondse installatie

1. Gebouwszijdig is bij een goed functionerende installatie het gebouwgebruik de invloedsfactor met de grootste impact op de omvang van de energievraag en de energiebalans, gevolgd door de klimaatinvloed.
 - a. Het gebouwgebruik is echter de minst voorspelbare invloedsfactor voor ontwerpers van WKO-installaties.
 - b. Meestentijds zijn de jaarlijkse warmte- en koudevraag van een gebouw niet gelijk in omvang.
2. Een cumulatieve formulering van het energiebalanscriterium zorgt enerzijds voor een robuust criterium. Gebruikelijke jaarlijkse fluctuaties worden uitgedempt. Anderzijds is het systeem weinig 'vergevingsgezind', een eenmaal opgetreden onbalans blijft steeds meetellen.
3. Voor het corrigeren van onbalans zijn meerdere strategieën mogelijk. Naast het extra inbrengen van warmte of koude in de bodem (regeneratie), is het ook mogelijk dat men de inzet van het WKO-systeem vermindert en een groter aandeel levert met een conventioneel back-up systeem (ketels, koelmachines).
4. WKO-systemen zijn moeilijker modulair aanpasbaar in vergelijking met conventionele back-up technologie (ketels en koelmachines). Moeilijk haalbare criteria met betrekking tot de energiebalans kunnen snel aanpasbare installaties vereisen. Dit kan leiden tot een 'vlucht naar conventioneel'.
5. Het gebruik van regeneratievoorzieningen om extra warmte of koude de bodem in te brengen leidt tot een significant hoger energiegebruik en kostenniveau. De extra kosten kunnen oplopen tot enkele €/jaar per m² (utiliteitsbouw). Dit betekent qua orde van grootte 10% extra kosten ten opzichte van de energiekosten.

2.2 WKO en ondergronds ruimtegebruik

1. Als sprake is van energiebalans, dan zijn de hoeveelheden warmte en koude die in de ondergrond worden opgeslagen aan elkaar gelijk. Een energiebalans betekent niet dat er geen temperatuurinvloeden zijn. Er is bij WKO altijd sprake van lokale warme en/of koude bellen en daarmee van een mogelijke lokale wijziging van de grondwaterkwaliteit.
2. Bij het toestaan van onbalans worden bij open systemen de warme of koude bellen steeds groter in omvang. Zolang geen sprake is van (significante) thermische kortsluiting, worden de temperaturen in de bellen echter niet steeds hoger respectievelijk lager.
 - a. Een ontwerper kan hier in het ontwerptraject rekening mee houden door de bronafstand groot genoeg te kiezen.
3. Bij significante thermische kortsluiting wordt de hoogst optredende temperatuur gelimiteerd door maximaal toegestane injectietemperatuur in de warme bron (25°C). In veel gevallen dicteert het afgiftesysteem voor koude de maximum temperatuur van de warme bron. In verband met de gewenste temperatuur in het gebouw zal deze waarde niet veel hoger dan 20 °C zijn.
4. De energiebalans is slechts één van de factoren die het ondergrondse ruimtegebruik bepalen.
 - b. De omvang van de energievraag en de grondwaterstroming zijn andere belangrijke factoren.
5. Alleen als er geen grondwaterstroming is, blijft de door onbalans toegevoerde energie zeer langdurig rondom de locatie van de WKO aanwezig. Bij een significante grondwaterstroming is het uitdovingseffect in de putten vergelijkbaar met een systeem met energiebalans. Wel zal er stroomafwaarts langere tijd sprake zijn van een warme of koude bel.
6. Bij het toestaan van een onbalans neemt het ondergrondse ruimtebeslag toe. Afhankelijk van de duur van de onbalans en omvang van de energievraag zal er in dichtbebouwde gebieden eerder een noodzaak zijn tot het opstellen van een Masterplan met clustering van bronnen.

7. Het extra ruimtebeslag bij onbalans kan gecompenseerd worden door een slimmer gebouwoontwerp (reductie omvang energievraag, eerste stap Trias Energetica).
8. Bij toepassing op gebiedsniveau kunnen bronnen optimaal geplaatst worden ten opzichte van de grondwaterstroming. Bij een sterke onbalans kan een kleine afwijking in de richting van de grondwaterstroming de 'tegenpolen' (warme of koude bellen) verstoren. Bij een groot warmteoverschot kunnen bijvoorbeeld de koude bellen last krijgen van een toestromende warmtepluim.
9. De kans op een grote onbalans op gebiedsniveau wordt sterk verkleind door het uitmiddelen van de 'plussen' en de 'minnen' in de energiebalans van de verschillende WKO-systemen. Dit effect is sterker naarmate er meer sprake is van een diversiteit in het type bebouwing.

2.3 Autonome opwarming

1. Bij de huidige toepassingsgraad van WKO is de opwarming van de bodem door de klimaatverandering en het Urban Heat Island significant groter dan de afkoeling door onbalans bij warmtelevering met WKO. Doordat de opwarming van de ondergrond door klimaatverandering geconcentreerd is in de bovenste 50 à 100 m en WKO-systemen ook op grotere dieptes worden toegepast, kunnen de dieptes waarop deze effecten optreden verschillen.

2.4 Alternatieve criteria

1. Sturing op basis van de energiebalans is toetsbaar op basis van gemeten grootheden (energiestromen). De normhoeveelheid voor de afwijking van de energiebalans is het meest eenvoudig wanneer deze op nul gesteld wordt, gekoppeld aan een tijdstermijn wanneer de energiebalans van teken wisselt (van warmteoverschot naar koudeoverschot en vice versa). Men kan dit toepassen op de cumulatieve energiebalans of op basis van een jaarlijkse energiebalans. De cumulatieve optie is opgenomen in de huidige (concept) regelgeving, maar levert te veel knelpunten op (zie boven). De optie met een jaarlijkse balans biedt meer ruimte voor de fluctuaties in klimaat en gebouwgebruik. De inzet van piekvoorzieningen om 'de nul te halen' zal echter ook bij een jaarlijkse balans de energiebesparing onder druk zetten.
2. Sturing op basis van de energiebalans waarbij een afwijking is toegestaan, is niet goed mogelijk op basis van een percentage en een tijdsduur. De absolute omvang van de energievraag is te groot als invloedsfactor voor een eenduidige formulering enkel op basis van percentage en tijdsduur.
3. Beoordeling van de toegestane afwijking van de energiebalans op basis van een absolute energiehoeveelheid lijkt het meest kansrijk. Voor beoordeling van deze toegestane hoeveelheid ligt een beoordeling op ruimtegebruik of waterhoeveelheid voor de hand.
4. Bij sturing op basis van het ondergrondse ruimtegebruik is de regulering van WKO direct gekoppeld met het ruimtelijk ordeningsvraagstuk van de ondergrond. De ontwerper van WKO-systemen is in beginsel vrij om te kiezen welke technieken toegepast worden om het toegekende ruimtegebruik te benutten. Het is hierbij van belang een goede norm te vinden voor de omvang van het ruimtegebruik. Anders gezegd: wat is een redelijke maat voor het toegestane ruimtegebruik gezien de locatie en het betreffende gebouw? Verder zal toetsing en handhaving impliciet moeten plaatsvinden, omdat het ondergronds ruimtegebruik niet direct meetbaar is. Een normberekening op basis van meetbare grootheden kan hier uitkomst bieden.
5. Bij sturing op waterhoeveelheden is het mogelijk door middel van aanvullende eisen meerdere doelen uit het gestelde wettelijk kader te bereiken. De relatie met ondergronds ruimtegebruik en netto opwarming/afkoeling zijn impliciet. Ook hier geldt: wat is een redelijke maat voor waterhoeveelheden gezien de locatie en het betreffende gebouw? Toetsing en handhaving is mogelijk op basis van gemeten grootheden.

3 Inleiding

3.1 Warmte-koudeopslag en energiebalans

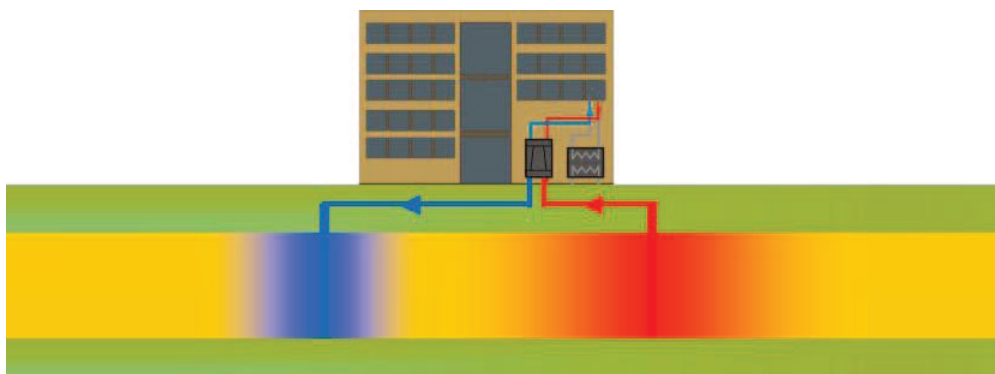
Warmte-koudeopslag (WKO) speelt een belangrijke rol in het realiseren van energiebesparing in de gebouwde omgeving. In de concept AmvB uit 2010 wordt aangegeven dat als de huidige ontwikkeling zich voortzetten er in 2020 11 PJ duurzame energie wordt geleverd door bodemenergiesystemen, met de potentie tot verdubbeling [1]. Soortgelijke getallen voor de omvang van WKO-systemen zijn weergegeven in de Referentieramingen voor de Gebouwde omgeving [16]. Hieruit blijkt tevens dat WKO een cruciale rol vervult in verduurzaming van de warmtehuishouding als geheel.

Tabel 1 *Herkomst duurzame warmte in 2020 bij voorgenomen beleid in 2010 volgens referentieramingen energie en emissies 2010-2020 Gebouwde Omgeving [data ontleend aan 16]*

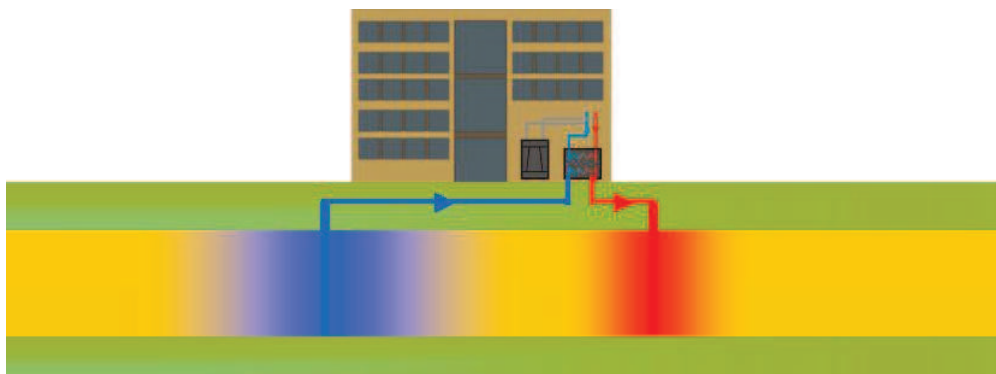
	Huishoudens	Utiliteitsbouw	Landbouw	Industrie	Overig	Totaal
Vermeden Primair (PJ)						
Zonneboilers	1	0,4	0	0	0	1,4
Warmtepompen + WKO	1,2	15,5	2,6	0	0	19,3
Geothermie	0	0	10,7	0	0	10,7
Vuilverbranding	0	0	0	0	5,7	5,7
Bij- en meestook	0	0	0	0	1,6	1,6
Biomassa verbranding kleinschalig	0	0	0	0	2	2
Houtkachels	6,8	0	0	0,6	0	7,4
Vergisting	0	0,4	26,5	0,6	0	27,5
Groen gas uit vergassing					0	0
Totaal	9	16,3	39,8	1,2	9,3	75,6

WKO-systemen maken hierbij gebruik van energie uit het grondwater. Vanuit zorg voor het ondergrondse bodemmilieu en de waarde 'an sich' van de beschikbaarheid van (koel) grondwater worden er eisen gesteld aan de energiebalans bij WKO. Het is gangbaar te stellen dat de hoeveelheid onttrokken koude en warmte met elkaar in evenwicht moeten zijn (Figuur 2 en Figuur 3).

In het verleden is gebleken dat het in de praktijk niet eenvoudig is om aan deze eisen te voldoen. Vragen bij de oude regelgeving en de nieuwe regelgeving die in concept is uitgebracht, geven reden de criteria voor de energiebalans te evalueren. Dat is het onderwerp van dit onderzoeksrapport. Dit rapport behandelt de zogenoemde open systemen met een maximum temperatuur van 25°C.



Figuur 2 *Warmte-onttrekking in de winter (= koude toevoegen aan de bodem)*



Figuur 3 Koude-onttrekking in de zomer (= warmte toevoegen aan de bodem)

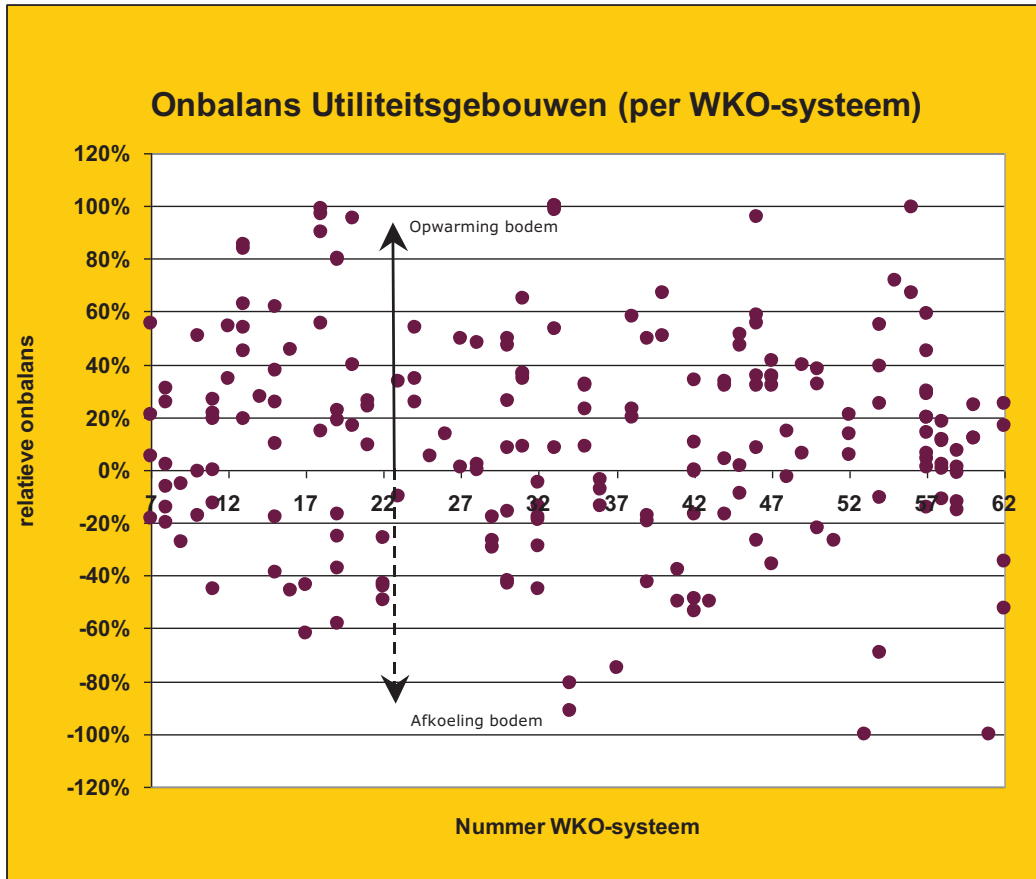
3.2 Praktijkgegevens energiebalans uit het verleden

In de praktijk blijkt dat heel veel WKO-systemen op individueel niveau niet voldoen aan de criteria voor de energiebalans. Figuur 4 geeft de relatieve onbalans weer van 55 WKO-systemen van utiliteitsgebouwen (monitoringsdata uit de periode 1994-2005, ontleend aan [9]).

De relatieve balans is hierbij als volgt gedefinieerd:

$$\text{Relatieve Balans} = \frac{E_{\text{warmte}} - E_{\text{koude}}}{E_{\text{koude}} + E_{\text{warmte}}}$$

Waarbij E_{koude} = de hoeveelheid koude die aan de bodem wordt toegevoegd en E_{warmte} = de hoeveelheid warmte die aan de bodem wordt toegevoegd. Een positieve balans betekent dus dat er meer warmte aan de bodem wordt toegevoegd dan koude. Dit betekent opwarming van de bodem. Een negatieve balans betekent afkoeling van de bodem, doordat er meer koude aan de bodem wordt toegevoerd dan warmte. Zoals blijkt uit Figuur 4 zijn er maar weinig systemen in balans op het niveau van het individuele systeem. Als men alle systemen bij elkaar neemt, dan blijkt dat de onbalans 5% is (zie ook [9]).



Figuur 4 Relatieve onbalans op jaarbasis van WKO-systemen Utiliteitsbouw. Data ontleend aan [9].

3.3 Contouren toekomstige regelgeving

Dit rapport gaat uit van de toekomstige regelgeving die naar verwachting op 1 januari 2013 van toepassing wordt. Tijdens het onderzoekstraject was de definitieve uitwerking en formulering nog niet beschikbaar. Uitgangspunt voor dit onderzoeksrapport is de formulering zoals weergegeven in de concept-versie van de AmvB uit april 2010 [1] en daarbij behorende uitwerking in de concept-ontwerpen van de Besluituitvoeringsmethode (BUM) en de Handhavingsuitvoeringsmethode (HUM) [14,15]. Op basis van mondelinge informatie uit de klankbordgroep zijn beoogde wijzigingen naar aanleiding van moties in de Tweede Kamer hierin verwerkt [20]. De wijzigingen zijn met voetnoten aangegeven. In deze rapportage wordt als verwijzingstitel 'AmvB 2013' gebruikt. Hiermee wordt het totaal van AmvB 2010, BUM, HUM + wijzigingen naar aanleiding van de Tweede Kamermoties bedoeld, dit in de omschrijving zoals hieronder gegeven.

Eis met betrekking tot energiebalans

De totale hoeveelheden warmte en koude, uitgedrukt in J, die door een open bodemenergiesysteem vanaf de datum van ingebruikneming van het systeem in totaal aan de bodem zijn toegevoegd, zijn op enig moment gedurende de periode van vijf jaar na die datum en na het verstrijken van die periode op enig moment gedurende elke volgende periode van vijf jaar¹, aan elkaar gelijk.

Afwijkingen van de standaardvoorschriften

Indien uit de aanvraag blijkt dat niet aan het standaardvoorschrift zal worden voldaan:

- Is de beoogde opwarming of afkoeling toelaatbaar gelet op de doelstellingen en belangen van de Waterwet?

¹ In [1, 14 en 15] betrof dit een periode van 3 jaar.

Het opnemen van een voorschrift dat afwijkt van het standaardvoorschrift is toegestaan op grond van artikel 6.11g Waterbesluit, mits dat niet conflicteert met de doelstellingen en belangen van de Waterwet.

Te denken valt aan:

- Als op gebiedsniveau aan het standaardvoorschrift wordt voldaan door sommatie van de energiebalansen van de individuele systemen in dat gebied.

Aantonen robuustheid

Is het aannemelijk dat het systeem kan voldoen aan het standaardvoorschrift?

- In de aanvraag wordt aangegeven wat de verwachte warmte- en koudevraag van het bouwwerk is (bij normale temperaturen en afwijkingen daarin), welk deel daarvan door het bodemenergiesysteem zal worden geleverd en welke andere installaties ingezet zullen of kunnen worden om aan de warmte- en/of koudevraag te voldoen en om aan het voorschrift met betrekking tot de energiebalans te voldoen. Op basis hiervan beoordeelt de vergunningverlener of het geheel aan verwarmings- en koelingssystemen en uitbreidingsmogelijkheden daarvoor, robuust genoeg is om schommelingen in weersomstandigheden op te vangen en daarmee tevens aan het voorschrift met betrekking tot de energiebalans te voldoen.

Mogelijkheid tot een plan van aanpak na 2 jaar

Indien op de datum waarop de warmte- en koudevoorziening twee volledige jaren in bedrijf is, de hoeveelheid koude meer dan 40% afwijkt van de hoeveelheid warmte, dan kan het bevoegd gezag eisen dat de vergunninghouder binnen drie maanden na die datum een plan van aanpak indient, waarin de vergunninghouder aangeeft welke maatregelen hij zal treffen om de energiebalans van de warmte- en koudevoorziening zodanig bij te stellen dat aannemelijk is dat daarmee zal worden voldaan aan het voorschrift met betrekking tot de energiebalans.

NB: Dit is een mogelijke optie waarvan het bevoegd gezag gebruik kan maken en geen standaard voor alle systemen.

Eis voor rendement van het bodemsysteem

In de beoogde regelgeving wordt een eis opgenomen voor het rendement van het bodemenergiesysteem [20]. Tijdens het schrijven van dit rapport was de uitwerking hiervan nog niet beschikbaar. Deze eis voor rendement is daarom nog niet meegenomen in de evaluatie van de criteria.

3.4 Kader voor criteria rond WKO

De criteria rond de energiebalans bij toepassing van WKO dienen een aantal doelen. De doelen zijn de volgende:

1. Beperking netto opwarming/afkoeling door toepassing van WKO
 - a. Er is hier sprake van WKO met temperaturen tussen de circa 6°C en de 25°C. Er zijn geen negatieve effecten bekend op het ondergrondse milieu bij deze temperatuurranges. Netto opwarming of afkoeling kan toepassing van grondwater voor andere functies echter hinderen. Verder wordt in deze context vooral de koelende kwaliteit van grondwater gewaardeerd zodat er meer belang wordt gehecht aan beperking van netto opwarming dan aan beperking van netto afkoeling.
2. Bewaking ondergronds ruimtebeslag
 - a. Ruimtebeslag tijdens exploitatie. Als het ondergronds ruimtebeslag niet bewaakt wordt kan er sprake zijn van interferentie met andere WKO-systemen. Dit kan leiden tot verlies van het energetisch rendement. Dit kan op twee manieren:
 - i. Interferentie met een naastgelegen WKO-systeem;
 - ii. Interne kortsluiting tussen de warme en de koude bronnen.
Van deze twee is de eerste het meest van belang, op het tweede effect kan men anticiperen in het ontwerp.
 - b. Ruimtebeslag op de lange termijn (beperking uitdovingstijd). Bij WKO is er altijd sprake van een lokale opwarming of afkoeling van de bodem ter plaatse van de

- warme of koude bron. Voor toekomstig gebruik van de bodem is het van belang dat dit effect na beperkte tijd uitgedoofd is.
3. Technisch haalbare criteria voor ontwerp en beheer
 - a. De warmte- en koudevraag van gebouwen kunnen sterk variëren. De energiebalans is daarmee geen statisch, maar een dynamisch verschijnsel. Vermeden moet worden dat de criteria zodanig zijn of worden opgesteld dat er zeer complexe installaties ontworpen moeten worden om hier aan te voldoen.
 - b. De haalbaarheid van criteria heeft ook betrekking op de beheerfase. Het moet naar stand van de techniek en het gemiddelde kennisniveau uitvoerbaar blijven om in de exploitatiefase te voldoen aan de criteria voor de energiebalans.
 4. Effectief energie besparen met WKO (hoog energetisch rendement)
 - a. WKO is een belangrijke techniek in de gebouwde omgeving om de energiebesparingsdoelstellingen te behalen. Om te voldoen aan de geformuleerde criteria zijn extra voorzieningen noodzakelijk die extra energie vragen. Deze extra energie mag er niet toe leiden dat de energiebesparing door toepassing van WKO teniet gedaan wordt.
 5. Voldoende financieel rendement mogelijk door toepassing van WKO
 - a. De criteria voor de energiebalans kunnen leiden tot extra investerings- en exploitatiekosten. Hierdoor kan het financieel rendement van toepassing van WKO onder druk komen te staan en bestaat het risico dat er gekozen wordt voor conventionele technologie (ketels en koelmachines).

Om tot een kritische reflectie te komen op de criteria zoals geformuleerd in 'AmvB 2013', wordt als werkhypothese van dit onderzoek onbalans toegestaan (zowel opwarming als afkoeling).

3.5 Vraagstelling onderzoek

Vraagstelling

- Wat zijn belangrijke invloedsfactoren op de energiebalans?
- Is de eis van 'door de nul' binnen vijf jaar en daarna ook elke vijf jaar haalbaar?
 - Technisch. Kan een ontwerper die gebruikmaakt van de huidige stand van de techniek hier redelijkerwijs gezien aan voldoen? Ook met medeneming van de vraag om robuustheid?
 - Financieel. Leidt dit niet tot zodanige investeringen om de balans te handhaven dat WKO-systemen uit de markt geprijsd worden? Wat is het effect van de vraag om robuustheid?
 - Milieutechnisch. De systemen om de bodem weer in balans te brengen, vragen ook energie. Wordt de besparing ten opzichte van een conventioneel systeem hierdoor niet teniet gedaan?
- Hoe dient de vraag om een plan van aanpak na twee jaar bij een afwijking van 40% in de energiebalans in dit licht beoordeeld te worden?
- Wat zijn op systeemniveau de gevolgen voor het ondergronds ruimtegebruik bij een afwijkend voorschrift met betrekking tot de energiebalans?
- Wat zijn de kaders met betrekking tot het gebiedsniveau? Welke eisen aan de omvang en duur van de onbalans zijn noodzakelijk om ernstige knelpunten in dichtbebouwde gebieden te voorkomen?
- Hoe staan de gevolgen van afwijkingen in de energiebalans in verhouding tot de autonome opwarming als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking?
- In hoeverre dragen de geformuleerde criteria in 'AmvB 2013' bij aan te bereiken doelen met criteria rondom WKO?
- Wat zijn mogelijke alternatieve criteria voor WKO-systemen die het belang van de bodembescherming borgen alsmede het doelmatig gebruik van bodemenergie?

3.6 Leeswijzer

De rapportage start met een analyse van de energievraag en de (on)balans (hoofdstuk 4). Dit hoofdstuk heeft als doel input te leveren voor de tweede helft van het beoordelingskader van de criteria uit paragraaf 3.4 (extra energiegebruik en extra kosten). Vervolgens wordt het ondergrondse ruimtebeslag geanalyseerd bij toepassing van WKO op gebouwniveau (hoofdstuk 5). De volgende stap die gemaakt wordt in de analyse is toepassing van WKO in dichtbebouwde gebieden (hoofdstuk 6). Dit heeft als doel de problematiek van mogelijk interferentie te kwantificeren. Hoofdstuk 7 behandelt de effecten van zogenoemde autonome opwarming en geeft een vergelijking met de opwarming als gevolg van onbalans bij toepassing van WKO. Hoofdstuk 8 geeft een samenvattende evaluatie van de criteria zoals geformuleerd in het concept van de nieuwe regelgeving uit paragraaf 3.3. Verder wordt er een groslijst gepresenteerd van alternatieve criteria rond toepassing van WKO.

Dit rapport betreft een onderzoeksrapportage met een sterk technisch-inhoudelijke focus. Bij de criteria voor de energiebalans bij WKO zijn zowel ondergrondse als bovengrondse aspecten van belang. Het unieke van deze rapportage is dat beide vakgebieden geïntegreerd behandeld worden. Er is sprake van een multidisciplinaire probleemstelling. Enerzijds is er sprake van installatietechnische aspecten van warmtepomp- en gebouwinstallaties met WKO, anderzijds van geohydrologische aspecten.

Voor een goede en eerlijke vergelijking tussen de verschillende opties voor de energiebalans is het soms noodzakelijk op beide vakgebieden afwegingen op expertniveau te maken. Deze afwegingen worden beknopt toegelicht in bijlagen. De hoofdttekst concentreert zich op eindresultaten.

Door middel van tekstvakken met vraagstellingen en tussenconclusies wordt de lezer in staat gesteld de hoofdlijn van de analyse te volgen.

De technisch-inhoudelijke benadering van de rapportage, met deels analyses op expertniveau, vraagt een doorvertaling naar een managementsummary indien sprake is van een onderlegger voor politieke besluitvorming.

4 WKO op gebouwniveau: energievraag en (on)balans

In dit hoofdstuk wordt de mogelijke bandbreedte van de energievraag van het gebouw en de bijbehorende energiebalans behandeld. Hierbij wordt tevens aandacht gegeven aan de invloed van het klimaat. Vervolgens wordt de correctie van energetische onbalans behandeld. Er wordt gestart met casus, vervolgens volgt een meer generieke analyse.

Vraagstelling

1. Wat zijn de fluctuaties in de energievraag van een gebouw als gevolg van de dynamiek van het buitenklimaat?
2. Is de trend van de toenemende buitentemperaturen terug te zien in de warmte- en koudevraag van gebouwen?
3. Wat is de mogelijke bandbreedte in de energievraag van een gebouw als gevolg van het gebouwgebruik?
4. Wat hebben deze invloedsfactoren voor gevolgen voor de ontwikkeling van de energiebalans (zonder extra correctie)?
5. Wat is de omvang van de voorzieningen die nodig zijn om onbalans te voorkomen?
6. Wat zijn de extra kosten voor correctie van de onbalans en wat is de impact op de energiebesparing die met WKO behaald kan worden?
7. Is de eis van 'door de nul' binnen vijf jaar en daarna ook elke vijf jaar haalbaar?
8. Hoe dient de vraag om een plan van aanpak na twee jaar bij een afwijking van 40% in de energiebalans in dit licht beoordeeld te worden?

4.1 Casus

Voor de analyse van het gedrag van warmte- en koudeopslag op gebouwniveau is gebruikgemaakt van een standaard kantoorgebouw met warmte- en koudeopslag en bijpassende energieopwekkings- en afgifte-installaties. In bijlage III is het gebruikte simulatiemodel uitgebreid beschreven.

4.1.1 Analyse bandbreedte energievraag

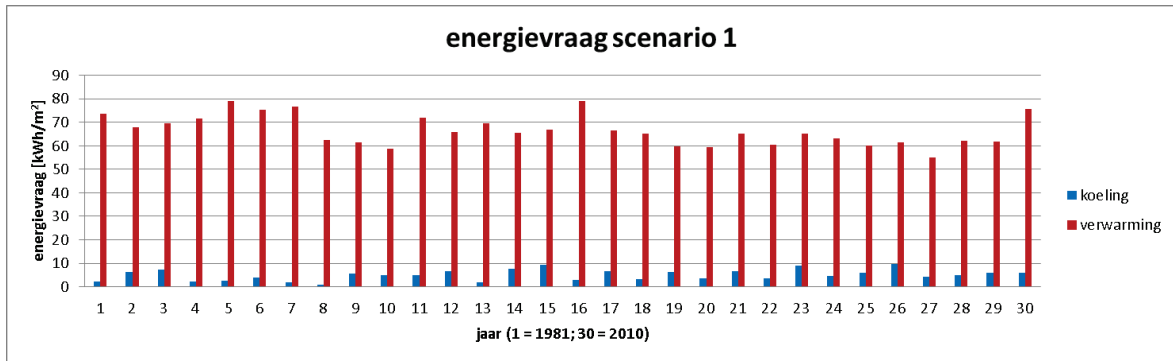
4.1.1.1 Huidige klimaat

In deze paragraaf wordt inzicht gegeven in de invloed van het gebruik en de kwaliteit van een gebouw op de energievraag. In Figuur 5, Figuur 6 en Figuur 7 is het energiegebruik voor verwarming en koeling weergegeven voor een kantoorgebouw van 20.000 m² met:

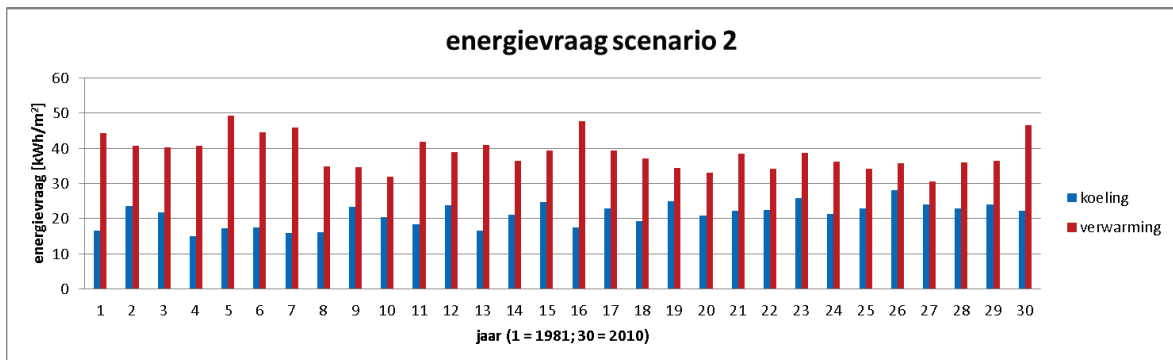
- 1 lage kwaliteit van de gebouwschil, goede zonwering, geen interne warmteproductie²;
- 2 gemiddelde kwaliteit van de gebouwschil en de zonwering, normaal gebruik;
- 3 gemiddelde kwaliteit van de gebouwschil, slechte zonwering, intensief gebruik (veel mensen en bijbehorende apparatuur).

Deze drie scenario's zijn met het in bijlage III beschreven simulatiemodel doorgerekend. Als invoer voor deze simulaties is dertig jaar (1981- 2010) aan klimaatdata van het KNMI gebruikt. Op deze manier is de invloed van het klimaat op de energievraag voor verwarming en koeling inzichtelijk gemaakt. Een periode van 30 jaar wordt in het algemeen aangehouden om een representatief beeld te krijgen van het huidige buitenklimaat.

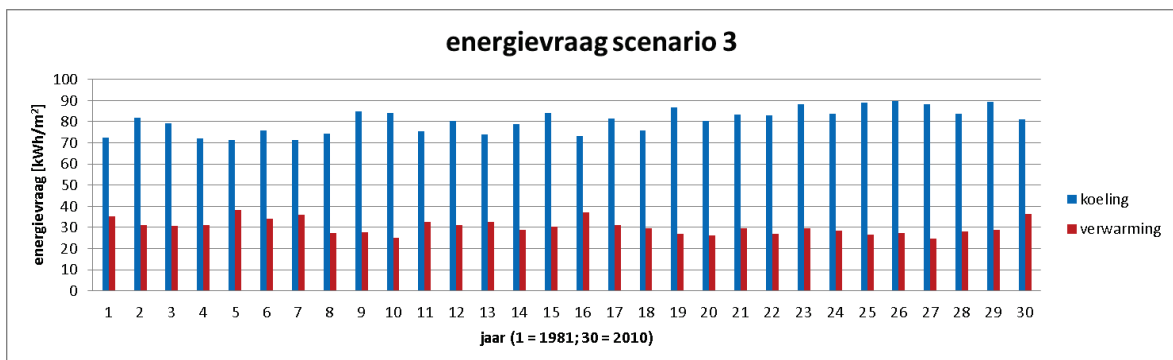
² Dit is representatief voor een situatie van (tijdelijke) leegstand, waar wel geklimatiseerd wordt.



Figuur 5 Berekende energievraag bij scenario 1



Figuur 6 Berekende energievraag bij scenario 2



Figuur 7 Berekende energievraag bij scenario 3

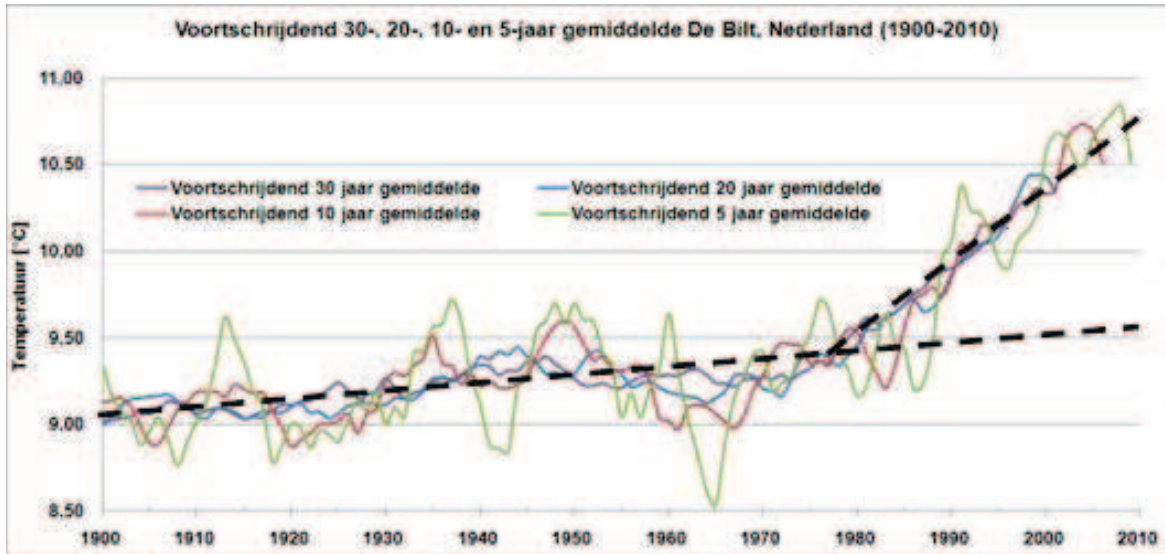
Elk scenario heeft een eigen type warmte- en koudevraag. Scenario 1 heeft veel verwarming nodig en nauwelijks koeling, omdat er geen mensen aanwezig zijn en apparaten uit staan. Tevens is er goede zonwering aanwezig, zodat er minder zonnewarmte behoeft te worden weggekoeld. Scenario 3 heeft veel koeling nodig en minder verwarming, omdat er veel mensen aanwezig zijn die apparaten aan hebben staan (en als verwarming fungeren). Door de slechte zonwering komt er veel zonnewarmte binnen, waardoor de vraag naar koeling extra toeneemt. Scenario 2 zit tussen scenario 1 en 3 in.

In de bandbreedte van de energievraag voor verwarming en koeling is duidelijk de invloed van het klimaat zichtbaar. Er zijn een aantal zaken die opvallen:

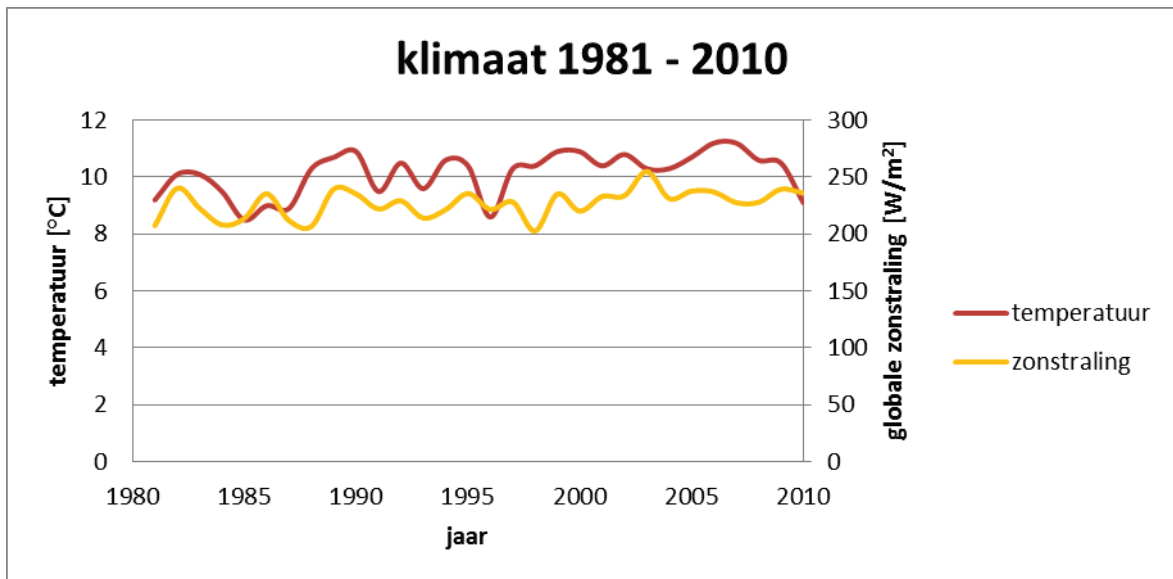
- 1 het energiegebruik voor koeling neemt toe in de laatste tien jaar van de simulatie;
- 2 het energiegebruik voor verwarming neemt af in de laatste tien jaar van de simulatie.

In Figuur 8 is de jaargemiddelde temperatuur weergegeven van 1901-2010. In deze grafiek is een stijging in de gemiddelde temperatuur zichtbaar. Dit is terug te zien in de simulatieresultaten in een afnemende warmtevraag en toenemende koudevraag.

In Figuur 9 is de jaargemiddelde temperatuur en zonstraling weergegeven voor de periode 1981-2010. Deze gegevens volgen uit de voor de simulatie gebruikte klimaatdata. In 2010 is de gemiddelde temperatuur beduidend lager dan in de jaren ervoor. Dit is ook duidelijk terug te zien in de warmte- en koudevraag in Figuur 5, Figuur 6 en Figuur 7.



Figuur 8 Gemiddelde temperaturen in De Bilt in de periode 1901-2010. Zie ook paragraaf 7.2.1.



Figuur 9 Jaargemiddelde temperatuur en globale zonstraling in De Bilt in de periode 1981-2010

4.1.1.2 Bandbreedte in de energievraag en toekomstige klimaatverandering

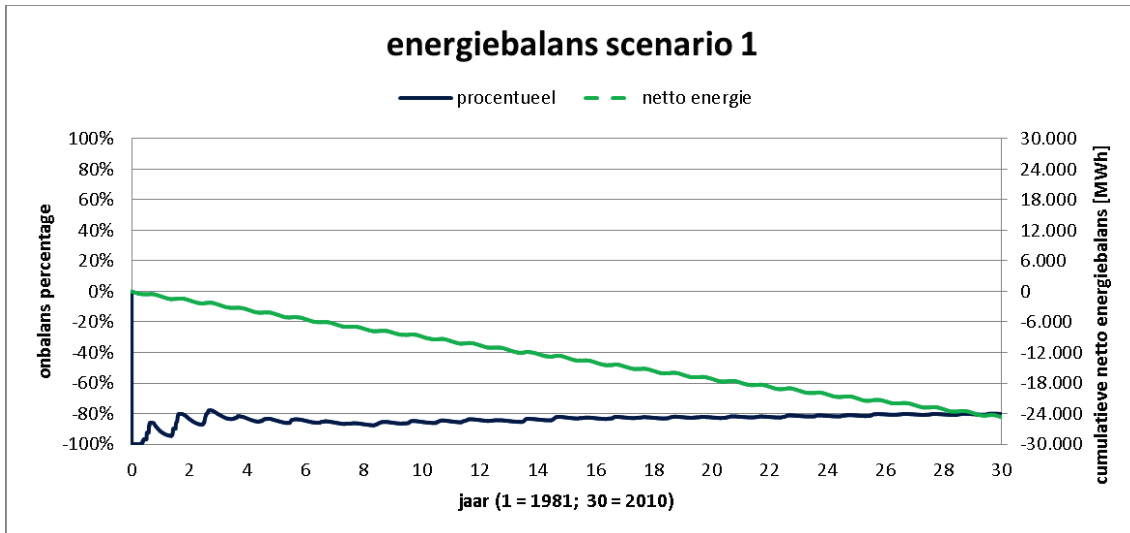
De vraag kan naar boven komen wat er gebeurt met de energievraag als de huidige trend van temperatuurstijging verder doorzet. In het kader van deze rapportage kan alleen worden opgemerkt dat de trend van de afgelopen 10 jaar dan zal doorzetten: een geleidelijke vermindering van de warmtevraag en een stijging van de koudevraag.

Voor een verdere kwantificering zijn aanvullende simulaties benodigd met data voor het (toekomstige) buitenklimaat. De ontwikkelde KNMI-scenario's geven echter enkel input met betrekking tot temperaturen, en niet voor de benodigde zinstralingsgegevens [17,18].

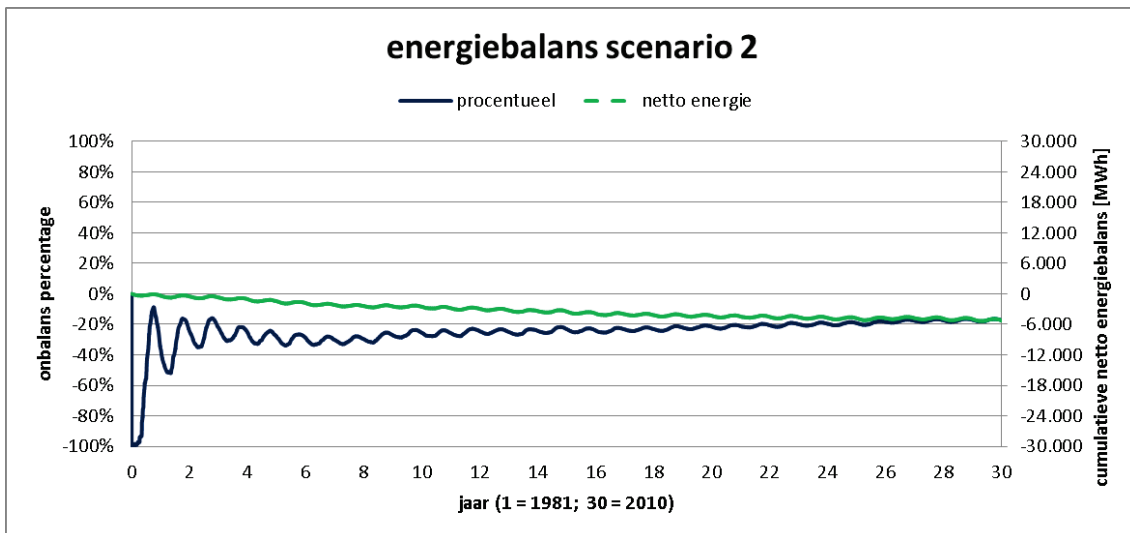
4.1.2 Analyse bandbreedte energiebalans

In paragraaf 4.1.1 is inzicht gegeven in de invloed van het gebouwgebruik, de gebouwkwaliteit en het klimaat op de energievraag voor verwarming en koeling. In Figuur 10, Figuur 11 en Figuur 12 is voor dezelfde drie scenario's de invloed op de energiebalans weergegeven. Voor de procentuele energiebalans die in deze figuren gebruikt wordt, is conform paragraaf 3.3 de volgende definitie gebruikt:

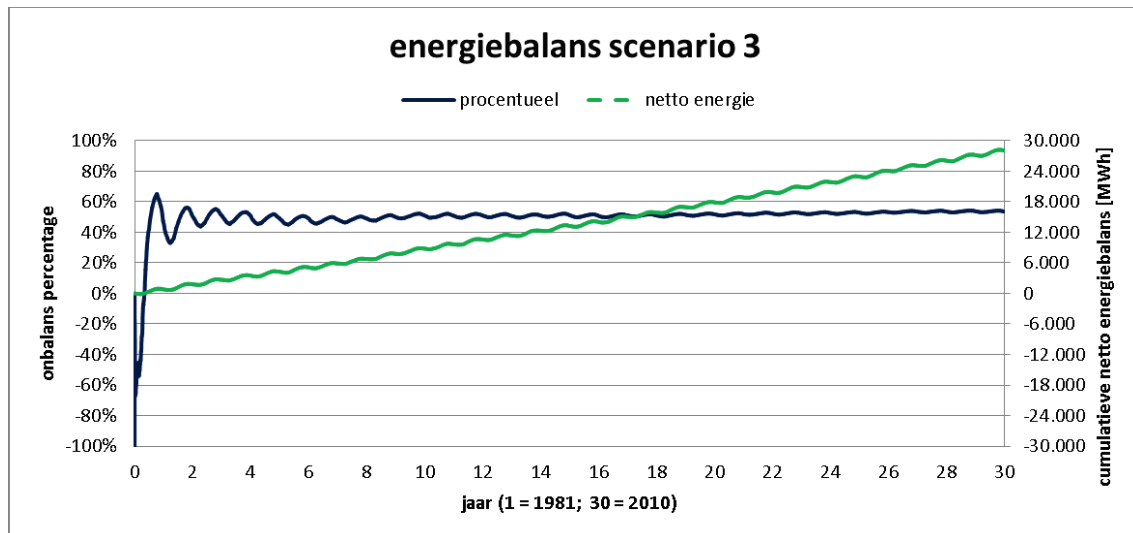
De procentuele energiebalans is het verschil tussen de totale hoeveelheid warmte en koude, die door een bodemenergiesysteem vanaf de datum van ingebruikneming van het systeem aan de bodem is toegevoegd, gedeeld door de som van de totale hoeveelheid toegevoegde warmte en koude (zie ook paragraaf 3.3).



Figuur 10 Berekende energiebalans bij scenario 1



Figuur 11 Berekende energiebalans bij scenario 2



Figuur 12 Berekende energiebalans bij scenario 3

In scenario 1 is sprake van een hoge warmtevraag. Dit betekent dat de warmtepomp veel aanstaat. De warmtepomp haalt warmte uit de bodem en zorgt diensgevolge voor afkoeling van de bodem. Tegelijkertijd is er een lage koudevraag. Er wordt dus maar weinig koude uit de bodem gehaald om te koelen, diensgevolge wordt de bodem maar weinig opgewarmd. Er zal dus sprake zijn van negatieve onbalans, in Figuur 10 is dit duidelijk terug te zien. Voor scenario 3 geldt het omgekeerde als voor scenario 1. Voor scenario 2 geldt in mindere mate hetzelfde als voor scenario 1. In Figuur 11 is het effect van een warmer klimaat zichtbaar. In Figuur 6 is te zien dat het verschil tussen de warmte- en koudevraag afneemt. In Figuur 11 komt dit tot uitdrukking doordat de procentuele energiebalans langzaam richting nul gaat.

Uit de hier getoonde resultaten blijkt duidelijk dat als er eenmaal een aantal jaar sprake is van een negatieve onbalans, deze zich moeilijk laat corrigeren. Er moet dan namelijk een inhaalslag gemaakt worden in het laden van warmte of koude.

In de in paragraaf 4.1.1 getoonde energievragen zijn duidelijke fluctuaties te zien. In de corresponderende energiebalansen hierboven zijn deze fluctuaties niet terug te zien. Dit komt doordat er sprake is van een cumulatieve energiebalans; fluctuaties in het energiegebruik (en daarmee in de hoeveelheid onttrokken en geïnjecteerde warmte en koude) worden ten opzichte van de grote hoop in het verleden verplaatste energie steeds minder belangrijk.

De regelgeving conform paragraaf 3.3 ('AmvB 2013') stelt als eis aan de energiebalans dat het verschil tussen de cumulatieve hoeveelheid aan de bodem toegevoegde warmte en koude na een inlooperperiode van vijf jaar elke vijf jaar een keer door nul gaat. Dit betekent dat gemiddeld gezien er een procentuele energiebalans van 0% moet zijn.

4.1.3 Onbalanscorrectie

In deze paragraaf wordt inzichtelijk gemaakt wat de extra kosten en de extra CO₂-uitstoot zijn bij het creëren van een sluitende energiebalans.

Uitgangspunt voor deze analyse is opwarming van de bodem (scenario 3). Het voorkomen van opwarming van de bodem heeft de hoogste prioriteit als het gaat om de bescherming van de bodem.

Uit paragraaf 4.1.1.2 blijkt dat scenario 3 een positieve energetische onbalans heeft. Door met behulp van een droge koeler (zie Figuur 13 voor een voorbeeld) extra koude aan de bodem toe te voegen, kan de energetische onbalans worden gereduceerd. In bijlage IV zijn de verschillende mogelijkheden opgesomd om extra koude of warmte aan de bodem te kunnen toevoegen.



Figuur 13 Voorbeeld van droge koelers op het dak van een gebouw

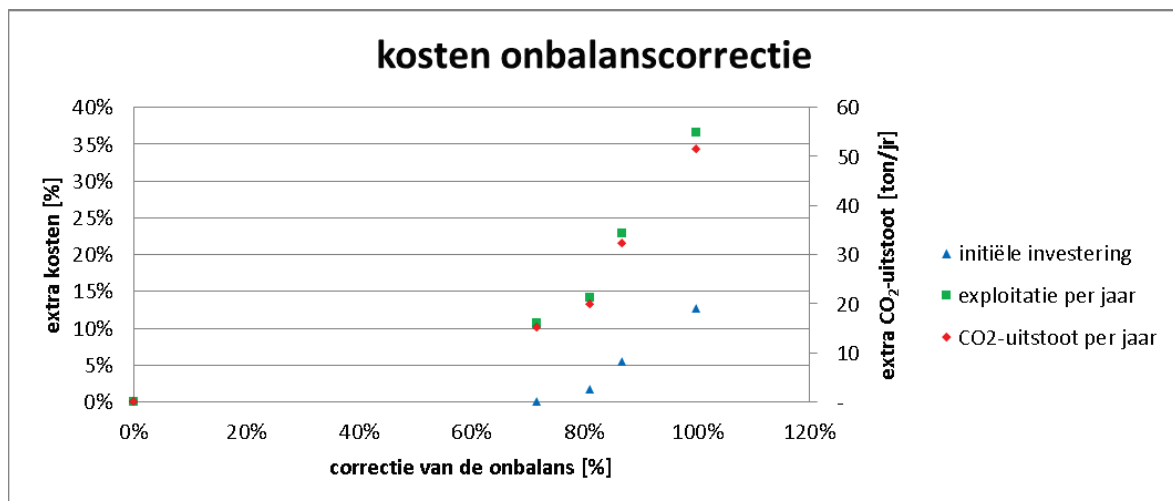
Voor scenario 3 geven Tabel 2 en Figuur 14 de kosten weer voor het reduceren van onbalans op basis van een droge koeler. Dit is een van de meest kosteneffectieve technieken voor het laden van koude. Door de grootte van de droge koeler te variëren, varieert de hoeveelheid koude die aan de bodem kan worden toegevoegd.

Om de hoeveelheid extra CO₂-uitstoot ten gevolge van het laden van koude in het juiste perspectief te plaatsen, is in Figuur 15 is de CO₂-uitstoot weergegeven van een conventionele installatie waarbij de warmte en koude wordt opgewekt met een ketel en koelmachine³.

Tabel 2 Matrix onbalanscorrectie. De exploitatiekosten en CO₂-uitstoot zijn jaargemiddelden (exclusief voorziening voor robuustheid).

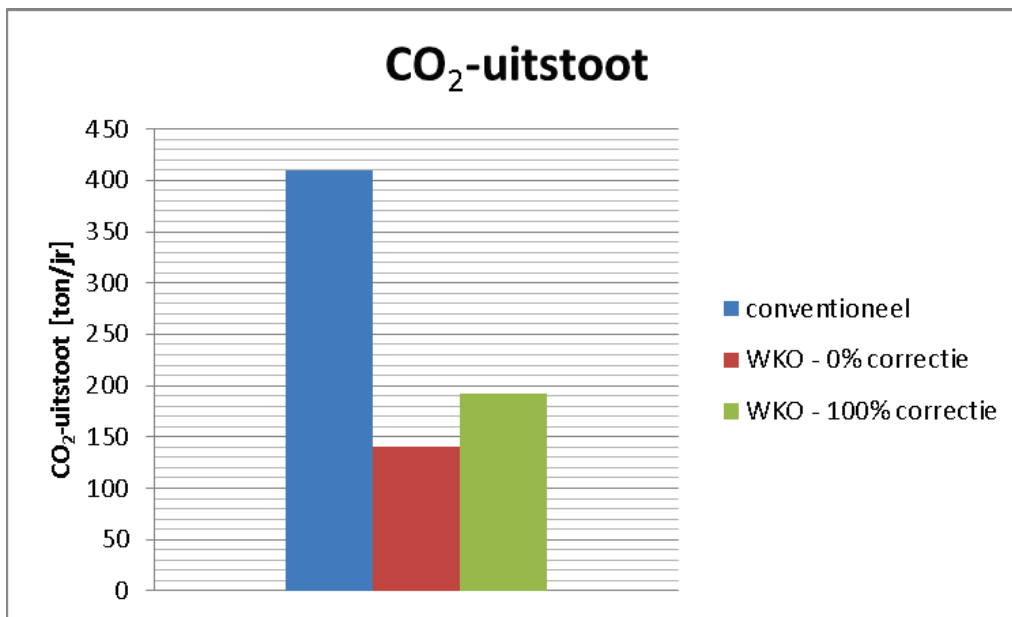
Onbalanscorrectie (%)*	Extra investering (%)	Extra exploitatie (%)	Extra CO ₂ (ton/jr)
0	0	0	0
72	0	11	6
81	2	14	8
87	5	23	12
100	13	37	20

*: Het betreft het percentage van de energie die gemiddeld conform het referentieklimaatjaar toegevoerd moet worden aan de bodem om exact op 0% onbalans in de bodem te komen.



Figuur 14 Extra kosten voor het corrigeren van de onbalans (exclusief voorziening voor robuustheid)

³ De CO₂-besparing in Scenario 3 is aanzienlijk door de grote koudevraag ten opzichte van de warmtevraag. Bij de verhouding van de warmte- en koudevraag van de scenario's 1 en 2 is de CO₂-besparing door toepassing van WKO kleiner.



Figuur 15 Hoeveelheid extra CO₂-uitstoot ten gevolge van het laden van koude in het perspectief van een conventionele installatie voor het opwekken van warmte en koude

Tabel 2 en Figuur 14 laten zien dat voor dit referentiegebouw zonder extra investeringskosten de onbalans met zo'n 70% kan worden gereduceerd. Dit is mogelijk doordat gebruikgemaakt wordt van een droge koeler die nodig is voor afvoer van de condensorwarmte van de warmtepomp. Dit wordt verder uitgewerkt in III.i.g en is specifiek geldig voor deze casus (!).

Door de droge koeler uit te breiden en andere aanvullende investeringen is theoretisch een energiebalans van 0% mogelijk (onbalanscorrectie van 100%). Dit vraagt echter wel een actief monitoringsbeleid van de beheerder om op tijd in te kunnen spelen op het ontstaan van eventuele onbalans. Zonder actief in te spelen op de actuele energiebalans is de kans groot dat er óf te veel óf te weinig koude aan de bodem wordt toegevoegd.

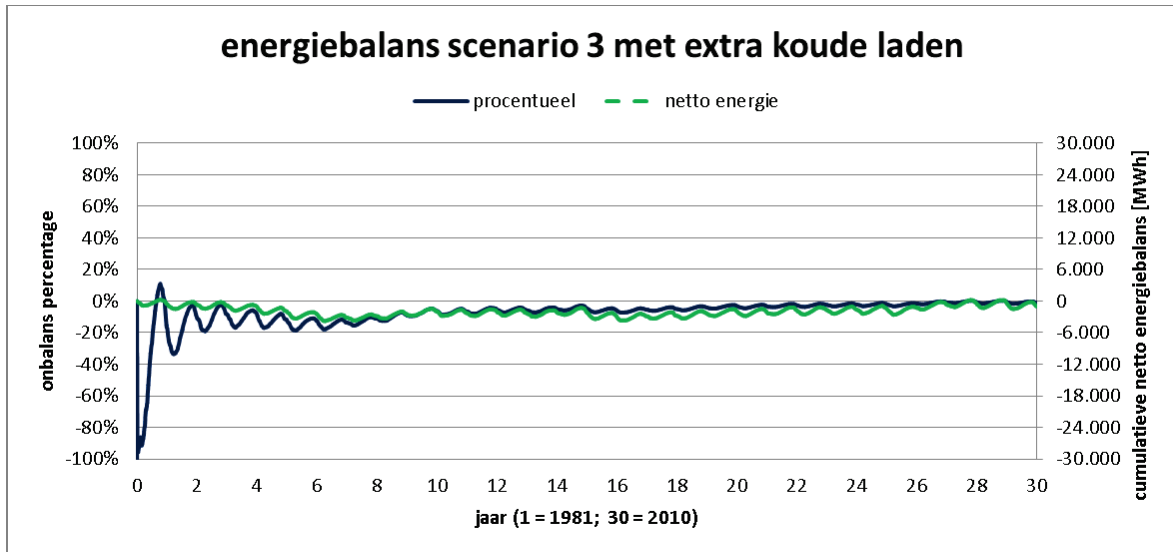
In onderstaande Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18 is het verloop van de verschillende energiebalansen weergegeven. In Figuur 16 is het resultaat weergegeven van een omvang van de droge koeler die gemiddeld over dertig jaar de vereiste energiehoeveelheid kan realiseren.

In dit geval is er gebruikgemaakt van een eenvoudige regelstrategie, waarbij er koude wordt toegevoegd aan de bodem als het buiten koud genoeg is en er brondebiet beschikbaar is. Het is opvallend dat dit ontwerp erin resulteert dat er in de eerste jaren van de simulatie een negatieve onbalans heerst, terwijl in de laatste jaren inderdaad een energiebalans van 0% bereikt wordt. Dit is in overeenstemming met de lagere gemiddelde jaartemperatuur die in Figuur 9 te zien is.

Opgemerkt wordt dat deze volgens goed vakmanschap gedimensioneerde installatie naar oordeel van de criteria uit paragraaf 3.3 van jaar 5 tot en met 25 niet voldoet.

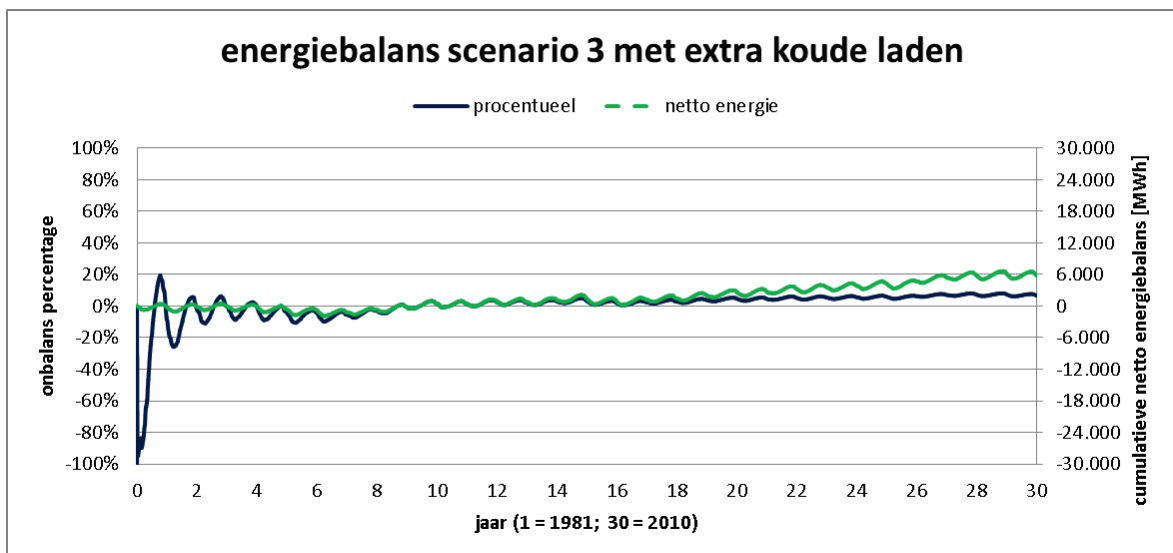
Door een geavanceerdere regelstrategie of door handmatig ingrijpen van de gebouwbeheerder zou ervoor gezorgd moeten worden dat er minder koude geladen wordt, zodat de energiebalans elk jaar door nul gaat. De droge koelers zijn op het moment dat bijsturing van de balans noodzakelijk is afhankelijk van het buitenklimaat. Het is de vraag of redelijkerwijs verwacht kan worden dat hiermee een pro-actieve wijze van balanscorrectie bereikt kan worden.

Een extra kanttekening hierbij is dat in deze simulaties het gebouwgebruik constant verondersteld wordt over dertig jaar, terwijl dat in werkelijkheid niet het geval is.



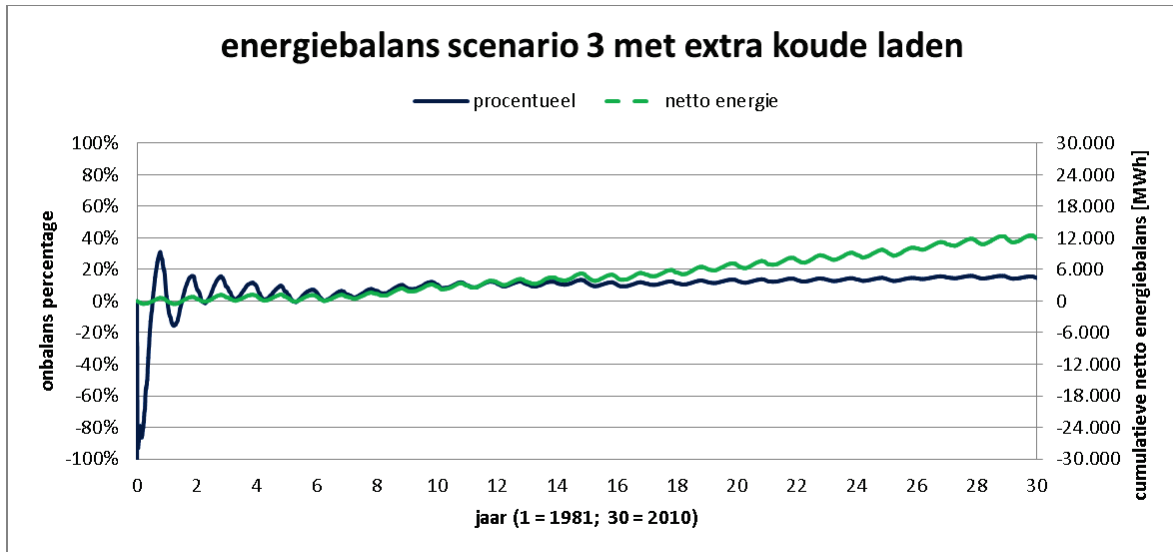
Figuur 16 Resultaat energiebalans bij een ontwerp voor 100% onbalanscorrectie

In Figuur 17 is te zien wat er met de energiebalans gebeurt als de droge koeler te klein gedimensioneerd wordt (onbalanscorrectie = 80%). Opgemerkt wordt dat dit balansscenario aan de criteria voldoet conform paragraaf 3.3 voor de eerste vijftien jaar.



Figuur 17 Resultaat energiebalans bij een te klein gedimensioneerde droge koeler

In Figuur 18 is het resultaat te zien van een ontwerp dat enkel gebruikmaakt van de droge koeler die in de zomer nodig is om overtollige warmte uit de koelmachine af te voeren (onbalanscorrectie = 70%, geen extra meerkosten voor deze casus.). In de winter kan deze gebruikt worden om koude te laden. Dit balansscenario voldoet de eerste tien jaar aan de criteria uit paragraaf 3.3.



Figuur 18 Resultaat energiebalans met droge koeler zonder extra voorzieningen voor onbalanscorrectie (= omvang droge koeler gedimensioneerd op warmte condensorafvoer)

Met betrekking tot het criterium om na twee jaar bij een afwijking van meer dan 40% een plan van aanpak te formuleren, is Tabel 3 opgesteld. De waarden kunnen afgelezen worden uit Figuur 10 en Figuur 12, Figuur 16 en Figuur 18. Geconcludeerd kan worden dat 'de ergste gevallen' er uit gefilterd worden door de eis van een plan van aanpak bij meer dan 40% afwijking na twee jaar. De termijn van twee jaar kan men eventueel verlengen omdat de eerste twee jaar ook inregeling van de installatie plaats vindt

Tabel 3 Evaluatie welke onbalanssituaties het plan van aanpak na twee jaar er uit kan filteren

Scenario	Relatieve onbalans na dertig jaar	Gesignaleerd door plan van aanpak na twee jaar?
Scenario 1 zonder onbalanscorrectie	-80%	Ja
Scenario 2 zonder onbalanscorrectie	-19%	Nee
Scenario 3 zonder onbalanscorrectie	+52%	Ja
Scenario 3 met 70% onbalanscorrectie	15%	Nee
Scenario 3 met 80% onbalanscorrectie	5%	Nee
Scenario 3 met 100% onbalanscorrectie	0%	Nee

Tussentijdse conclusies analyse op gebouwniveau

1. De trend van toenemende buitentemperaturen is terug te zien in de warmte- en koudevraag.
2. In de energiebalans van de cases is dit te zien in het verschil tussen de eerste en tweede periode van vijftien jaar. Dit effect zorgt ongeveer voor 10% meer of minder relatieve onbalans.
3. De bandbreedte in de energiebalans als gevolg van het gebouwgebruik is significant groter dan de bandbreedte als gevolg van fluctuaties in het buitenklimaat en de opwarming van het klimaat.
4. Bij een cumulatieve definitie van de energiebalans zijn de fluctuaties in de energievraag als gevolg van klimaatfluctuaties tussen de verschillende jaren niet meer te zien.
5. De combinatie van een cumulatief geformuleerde energiebalans en een eis van elke vijf jaar door de nul leidt ertoe dat systemen die eenmaal een afwijking hebben gehad grote voorzieningen moeten treffen om weer 'door de nul te kunnen'.
6. De cumulatieve definitie gecombineerd met 'elke vijf jaar door de nul' kan als een aanscherping beschouwd worden ten opzichte van eisen uit het verleden met een toegelaten bandbreedte van 5% of 10% procent.
7. Als de energiebalans niet pro-actief in de gaten gehouden wordt met behulp van monitoring en er geen geavanceerde regelstrategieën gebruikt worden, dan heeft dit tot gevolg dat de energiebalans niet elke vijf jaar door de nul gaat. Regeneratievoorzieningen zijn op het moment van bijsturing afhankelijk van het buitenklimaat. Het is de vraag of redelijkerwijs verwacht kan worden dat hiermee een pro-actieve wijze van balanscorrectie bereikt kan worden.
8. In de uitgewerkte casus leidt de eis van 0% onbalans tot **35% meerkosten en 35% meer CO₂-uitstoot**. Zonder de correctie zou de **onbalans 50%** bedragen. Voor meer generiek resultaten, zie paragraaf 4.2
9. De meerkosten van voorzieningen voor onbalanscorrectie kunnen verder oplopen als het bronnensysteem groter gemaakt moet worden om de extra warmte of koude in de bodem te kunnen brengen.
10. Een plan van aanpak bij meer dan 40% onbalans na twee jaar signaleert systemen met een grote onbalans. Een plan van aanpak na twee jaar is dus zinvol. De termijn van twee jaar kan men eventueel verlengen omdat de eerste twee jaar ook inregeling van de installatie plaats vindt

4.1.4 Robuustheid van het ontwerp

In de bovenstaande analyse is sprake van een ideaalplaatje. De ontwerper analyseert dertig jaar van het klimaat en een scenario met een gebouwgebruik dat dertig jaar lang gelijk blijft en is dan vervolgens in staat om met een geavanceerde regelstrategie en een goed opgeleide en gemotiveerde gebouwbeheerder de balans elke vijf jaar door de nul te laten gaan. Dit leidt bij een compensatie van een onbalans van 50% tot 35% meerkosten.

De achterliggende veronderstelling is dat het gebouw zich inderdaad volgens de theorie gedraagt. De verschillende scenario's laten zien dat afwijkingen in het gebouwgebruik significant grotere afwijkingen geven in de energiebalans dan de fluctuaties in het buitenklimaat.

Ontworpen op corrigeren opwarming van de bodem, maar...

Het gebouw zoals geanalyseerd voor het corrigeren van de onbalans gaat uit van scenario 3 van het gebouwgebruik (hoge interne warmteproductie en hoge zonbelasting). Stel dat de installatie daarop ontworpen wordt. Wat gebeurt er als het gebouw in scenario 1 terecht komt: grote warmtevraag en weinig koudevraag? Er is dan juist sprake van afkoeling van de bodem (Figuur 10).

De volgende opties zijn er dan beschikbaar:

- De warmtepomp een kleiner aandeel geven in de verwarming van het gebouw. Er wordt dan 's winters minder koude de bodem in gebracht. De keerzijde hiervan is: een grotere inzet van de conventionele gasketel met als gevolg: meer CO₂-uitstoot en hogere energiekosten.
- De installatie zo ontwerpen dat de droge koeler ook in staat is om warmte te laden. Dit vergt extra leidingwerk, extra regel- en schakelkleppen en een meer complexe regelstrategie. De vraag hierbij is nog of de droge koeler dan groot genoeg is om de benodigde hoeveelheid warmte in de bodem te brengen.

Men dient zich verder te realiseren dat een installatie die voorbereid is op alle scenario's van de gebouwvraag niet altijd de best functionerende installatie is. Als de installatie voor een groot deel van de tijd op 10% van de maximum capaciteit draait, is dit niet optimaal. Men kan dit vergelijken met het voortdurend met 30 km/h rijden in een coureur auto.

4.2 Van casus naar generieke resultaten

In deze paragraaf worden meer generieke resultaten afgeleid voor de gevolgen van het corrigeren van de onbalans.

Ten opzichte van de bandbreedte in de energievraag die volgt uit Figuur 5 tot en met Figuur 7, wordt hier een meer generieke analyse gebruikt die ook rekening houdt met varianten in het ontwerp van de gebouwschil, glaspercentages et cetera.

De range van de warmte- en koudevraag wordt gebaseerd op praktijkervaring. De gehanteerde ranges zijn vermeld in Tabel 4. Vertaald naar een kantoor met een conventioneel systeem met een ketel leidt de range in de warmtevraag tot een gasverbruik van 2 tot 17 m³ gas/m² vloeroppervlak. Een nieuwbouwkantoor met een ketel kan technisch gezien een gasverbruik < 10 m³/m² bereiken.

Door selectie van deze range wordt er rekening gehouden met mogelijke afwijking van het ideaalplaatje of toepassing in gerenoveerde bestaande bouw. Ter vergelijking wordt hier opgemerkt dat het gemiddelde kantoor in Nederland een gasverbruik heeft van 20 m³/m² (gemiddelde 2007, inclusief bestaande bouw, bron: Databank Agentschap NL).

Afhankelijk van het gebouwontwerp geeft dit bij WKO verplaatste waterhoeveelheden in de range van 72.000 - 285.000 m³ per jaar (warme of koude bron) en een brondebiet in de range van 72 - 285 m³/h (warme of koude bron). Ter vergelijking van de schaalgrootte: de gemiddelde verplaatste waterhoeveelheid per systeem in de omgeving Amsterdam bedraagt 150.000 m³/jaar en de gemiddelde capaciteit 153 m³/h [8].

Tabel 4 geeft de resultaten van de relatieve onbalans zoals die volgt uit de definitie uit paragraaf 3.2.

Tabel 4 Relatieve onbalans in de bodem, afhankelijk van de warmte- en koudevraag van het gebouw (op basis van 85% warmtelevering door warmtepomp met jaarlijkse COP gelijk aan 4)

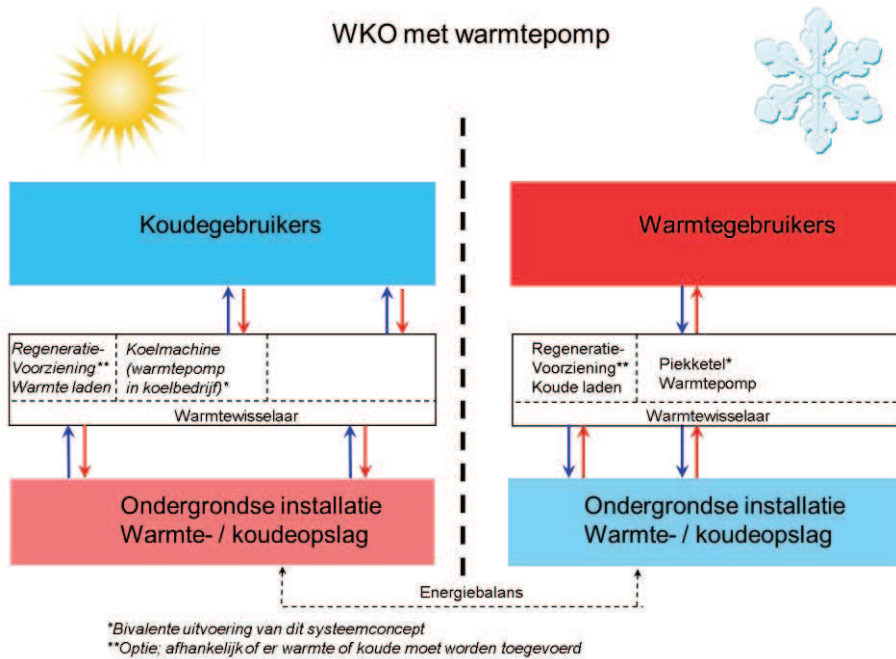
Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	-44%	-12%	32%	59%	73%
40	-67%	-44%	-1%	32%	52%
60	-77%	-59%	-21%	13%	35%
80	-82%	-67%	-34%	-1%	22%
100	-85%	-73%	-44%	-12%	11%
120	-88%	-77%	-51%	-21%	2%
140	-89%	-80%	-56%	-28%	-5%

4.2.1 Impact regenereren of vermindering aandeel levering op energiebesparing

Er zijn twee strategieën om de energiebalans in de ondergrond weer in evenwicht te brengen.

1. Strategie 1: extra koude of warmte in de bodem brengen met een regeneratievoorziening (Figuur 19). Dit is de strategie die in de casus is uitgewerkt.
2. Strategie 2: minder inzet van de WKO voor warmte- of koudelevering. Een groter deel van de warmte of koude wordt geleverd door conventionele technologie (inzet van een ketel of een koelmachine).

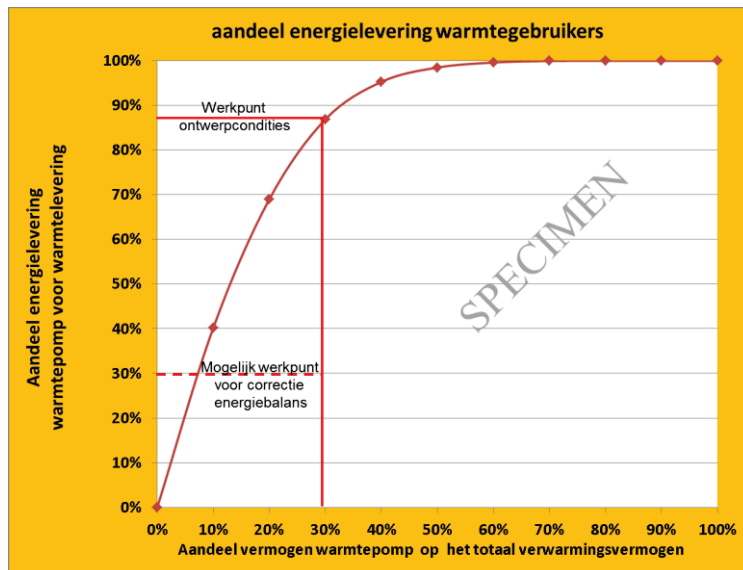
De tweede strategie is mogelijk in systeemconcepten waarin de WKO de zogenoemde basislast levert. Voor verwarming kan een piekketel de piekvermogens leveren (winter). Voor koeling kan een koelmachine aanvullende koeling leveren (zomer). Dit kan een extra koelmachine zijn of de reeds aanwezige warmtepomp die als koelmachine fungeert.



Figuur 19 Systeemconcept WKO met warmtepomp met opties voor een piekkoelmachine en een piekkel (zogenoemde bivalente uitvoering)

Het aandeel vermogen van de warmtepomp bepaalt ook het aandeel energielevering door de WKO. Uit economische overwegingen wordt een warmtepomp vaak zodanig gedimensioneerd dat onder ontwerpcndities de warmtepomp zo'n 80-90% van de energie levert (zie Figuur 20). Om de energiebalans te sturen kan men:

- Het aandeel energielevering dat de warmtepomp levert veel kleiner maken (Figuur 20). De piekkel levert dan meer warmte. Er wordt dan minder koude in de bodem gebracht in de winterperiode.
- Het aandeel dat de ondergrondse installatie aan koude levert veel kleiner maken. Er wordt dan minder warmte in de bodem gebracht. De koelmachine levert dan meer koude.



Figuur 20 Door inzet van de piekkel kan men de inzet van de warmtepomp reguleren om de energiebalans te sturen. (N.B.: voorbeeldgetallen, niet geschikt voor dimensionering in specifieke situaties)

De twee strategieën hebben verschillende gevolgen voor de energiebesparing die gerealiseerd wordt met behulp van WKO. Tabel 5 geeft de energiebesparing als er geen sprake is van onbalanscorrectie, dit ten opzichte van een referentie-installatie met ketels en koelmachine. Er is sprake van een meer globale rekenmethode dan in de casus (zie referentie [19]).

Tabel 6 en Tabel 7 geven de energiebesparing als de twee genoemde strategieën voor onbalanscorrectie worden toegepast. De energiebesparing neemt snel af als de onbalans gecorrigeerd wordt door het aandeel van de WKO kleiner te maken. Dit effect is sterker naarmate de onbalans groter is.

Tabel 5 *Energiebesparing in % ten opzichte van referentie met ketel en koelmachines. **Geen correctie van onbalans.** 85% levering van warmte met warmtepomp; 100% koudelevering door ondergrondse installatie.*

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	47%	52%	61%	70%	76%
40	44%	47%	54%	61%	68%
60	43%	45%	50%	57%	62%
80	42%	44%	48%	54%	59%
100	42%	43%	47%	52%	56%
120	41%	43%	46%	50%	54%
140	41%	42%	45%	49%	53%

Tabel 6 *Energiebesparing in % ten opzichte van referentie met ketel en koelmachines. **Correctie van onbalans door regeneratie.** 85% levering van warmte met warmtepomp; 100% koudelevering door ondergrondse installatie.*

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	36%	48%	53%	52%	51%
40	29%	36%	54%	53%	52%
60	26%	31%	44%	53%	53%
80	25%	29%	39%	54%	53%
100	24%	27%	36%	48%	54%
120	23%	26%	34%	44%	54%
140	23%	25%	32%	41%	51%

Tabel 7 *Energiebesparing in % ten opzichte van referentie met ketel en koelmachines. **Correctie van onbalans door variabel aandeel levering van warmte met warmtepomp en variabel deel koudelevering door ondergrondse installatie.***

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	25%	45%	51%	36%	27%
40	13%	25%	53%	51%	41%
60	9%	17%	39%	59%	50%
80	7%	13%	31%	53%	55%
100	6%	11%	25%	45%	60%
120	5%	9%	21%	39%	56%
140	4%	8%	19%	34%	50%

4.2.2 Meerkosten

Van de twee strategieën zijn ook de meerkosten bepaald om 1 kWh onbalans te corrigeren. Dit zal mede bepalend zijn welke strategie de voorkeursstrategie zal worden.

De meerkosten betreffen:

- investeringen, omgerekend met de afschrijving over vijftien jaar naar jaarlijkse kosten;
- energiekosten;
- onderhoudskosten.

Voor de investeringen worden er verschillende niveaus weergegeven. De investeringen hangen sterk af van het feit of de onbalans met de bestaande installatie of het bestaande ontwerp gerealiseerd kan worden.

Dit laat zich als volgt toelichten:

- Als er extra broncapaciteit nodig is, leidt dit tot extra investeringen.
 - N.B.: inpassingskosten in bestaande installaties zijn in de navolgende resultaten niet meegenomen.
- Als de back-up en piekvoorziening in de vorm van ketels en koelmachines ontoereikend zijn om de balans te sturen, vergt dit extra investeringen.

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 21 en Figuur 22. Uit de resultaten blijkt dat de strategie 'minder inzet van WKO' concurrerend is met regeneratie, tenzij er genoeg mogelijkheden binnen de installatie al aanwezig zijn of dat er sprake is van voldoende schaalgrootte⁴. Een effect dat hier bij komt, is dat regeneratievoorzieningen minder eenvoudig modulair uitbreidbaar zijn. Ontwerpers zullen dus eerder kiezen voor de strategie 'vermindering aandeel WKO' dan voor 'regeneratie', met als gevolg dat het energetisch rendement van WKO onder druk komt te staan.

De relatieve onbalans, zoals weergegeven in Tabel 4, is omgerekend naar een onbalans in kWh per m² vloeroppervlak. In combinatie met de maximum kostenniveaus uit Figuur 21 en Figuur 22 volgen hieruit de meerkosten per m² gebouwoppervlak. Deze zijn weergegeven in Tabel 8. Men kan deze rekenresultaten als een indicatie van de orde van grootte beschouwen, dit in verband met gevoeligheid voor energietarieven en de investeringsniveaus. Samenvattend kan gesteld worden dat het corrigeren van onbalans jaarlijkse meerkosten van enkele euro's per m² vloeroppervlak op kan leveren.

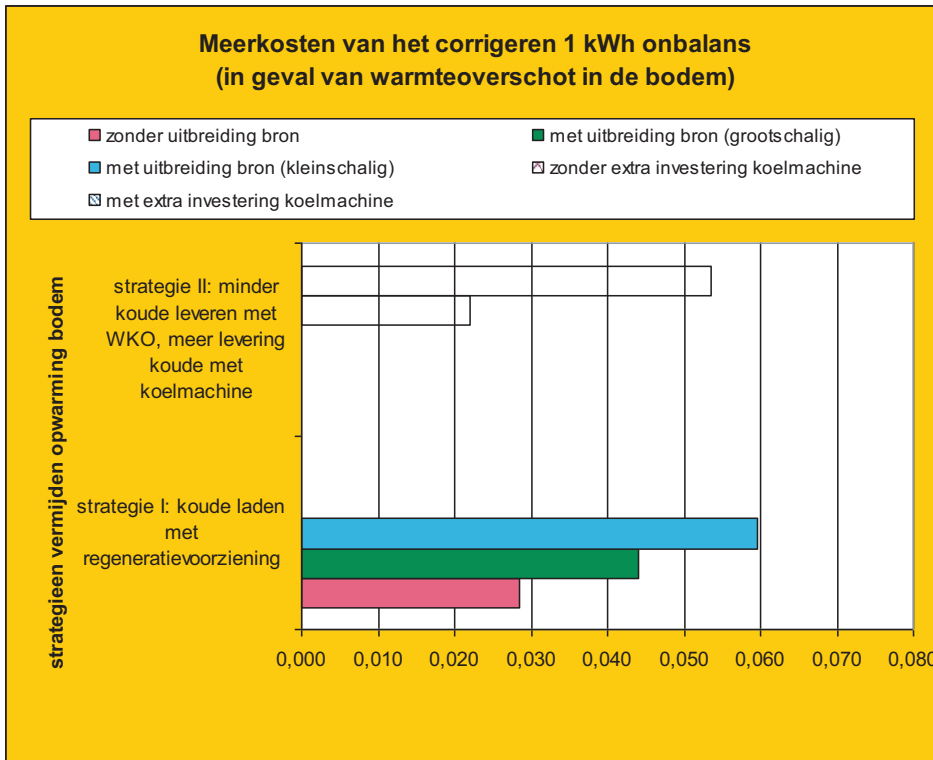
Tabel 8 Indicatie (jaarlijkse) meerkosten per m² vloeroppervlak voor onbalanscorrectie

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	0,6	0,2	0,7	2,2	4,0
40	1,5	1,1	0,0	1,5	3,2
60	2,4	2,0	1,0	0,7	2,5
80	3,3	3,0	1,9	0,1	1,7
100	4,3	3,9	2,8	1,0	1,0
120	5,2	4,8	3,7	1,9	0,2
140	6,1	5,7	4,6	2,8	0,7

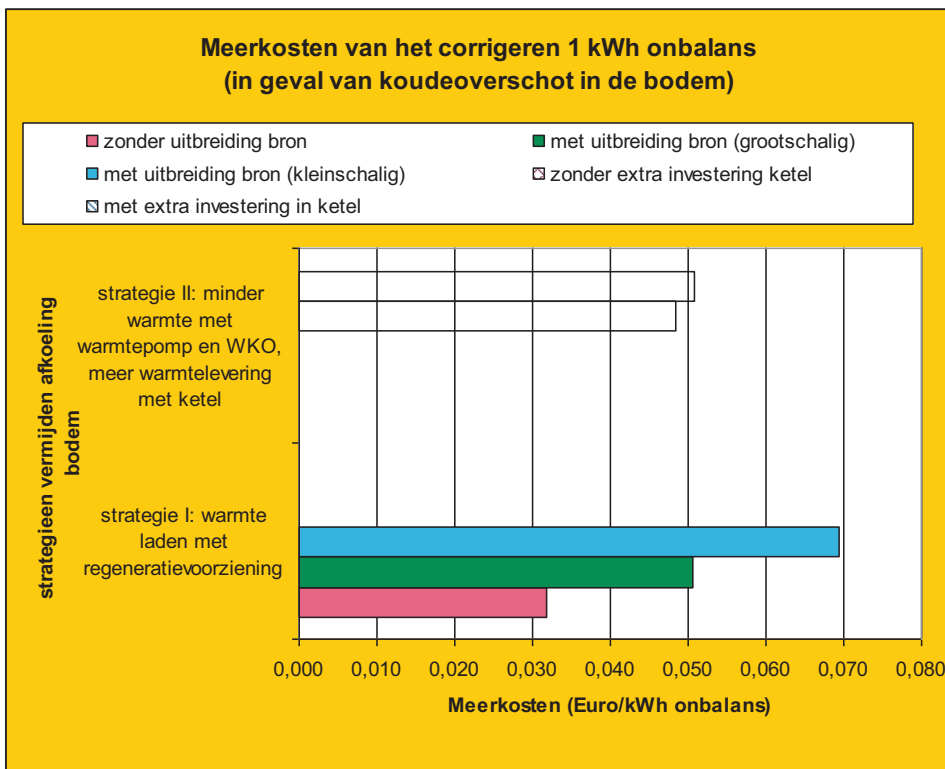
Meer inzet fossiel door onbalanscorrectie?

1. Voor het corrigeren van onbalans zijn meerdere strategieën mogelijk. Naast het extra inbrengen van warmte of koude in de bodem is het ook mogelijk dat men de inzet van het WKO-systeem vermindert en een groter aandeel levert met een back-up- of pieksysteem. Dit betreft conventionele technologie met ketels en koelmachines.
2. Welke strategie het gaat winnen op kosteneffectiviteit wordt bepaald door het feit of de mogelijkheden binnen de bestaande installatie aanwezig zijn. De strategie 'minder inzet van WKO' is al snel concurrerend met 'regeneratie'.
3. Om te voldoen aan de eisen van het corrigeren van de onbalans zullen ontwerpers eerder de toevlucht nemen tot grotere back-up voorzieningen met ketels en koelmachines. Deze zijn eenvoudiger modulair uit te breiden, dan een bronnensysteem dat uitgebreid moet worden.
4. De strategie 'minder inzet WKO' zet de energiebesparing die bereikt wordt met WKO onder druk, dit effect is het sterkst bij gebouwen waarbij de warmte- en koudevraag sterk van elkaar verschillen.

⁴ Dit is van toepassing bij de huidige energietarieven. De jaarlijkse kosten van meer inzet van ketels en koelmachines worden gedomineerd door de energiekosten. De opties voor regeneratie worden gedomineerd door de investeringskosten. Als de energiekosten sterker stijgen dan de inflatie kunnen de opties met meer inzet van ketels en koelmachines in verhouding hogere jaarlijkse kosten opleveren.



Figuur 21 Jaarlijkse meerkosten verschillende strategieën onbalanscorrectie in geval van warmteoverschot in de bodem.



Figuur 22 Jaarlijkse meerkosten verschillende strategieën onbalanscorrectie in geval van koudeoverschot in de bodem.

5 WKO op gebouwniveau: ondergronds ruimtebeslag

In dit hoofdstuk wordt het ondergronds ruimtebeslag geanalyseerd van toepassing van WKO op gebouwniveau.

Voordat de daadwerkelijke vraagstelling wordt geanalyseerd, wordt eerst uiteengezet hoe dit gekwantificeerd wordt.

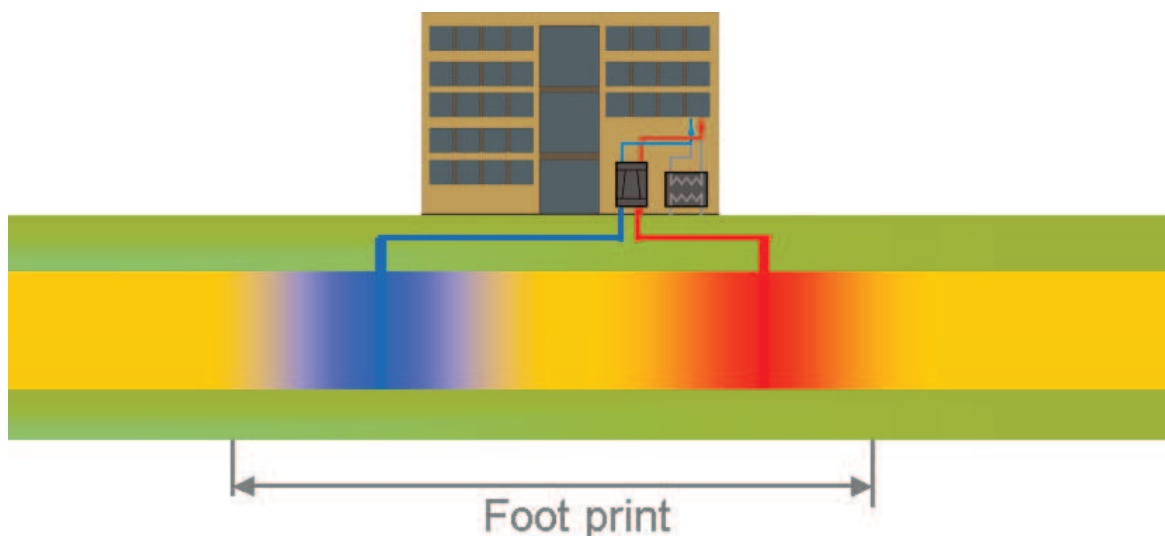
Vraagstelling ondergronds ruimtebeslag

1. Welke invloedsfactoren zijn bepalend voor het ondergrondse ruimtebeslag:
 - a. bovengronds (gebouw met de installatie);
 - b. ondergronds.
2. Wat is het effect van een energetische onbalans op de omvang van het ondergrondse ruimtebeslag?
3. Wat is het effect van een energetische onbalans op de zogenoemde uitdovingstijd?
4. Wat is de invloed van de grondwaterstroming op de omvang van het ondergrondse ruimtebeslag? Wat is de samenhang met:
 - a. de omvang van de onbalans?
 - b. de uitdovingstijd van de WKO-systemen met en zonder onbalans?
5. In hoeverre is een vereenvoudigde benadering van het ondergronds ruimtebeslag bruikbaar?
 - a. In gevallen met en zonder grondwaterstroming?

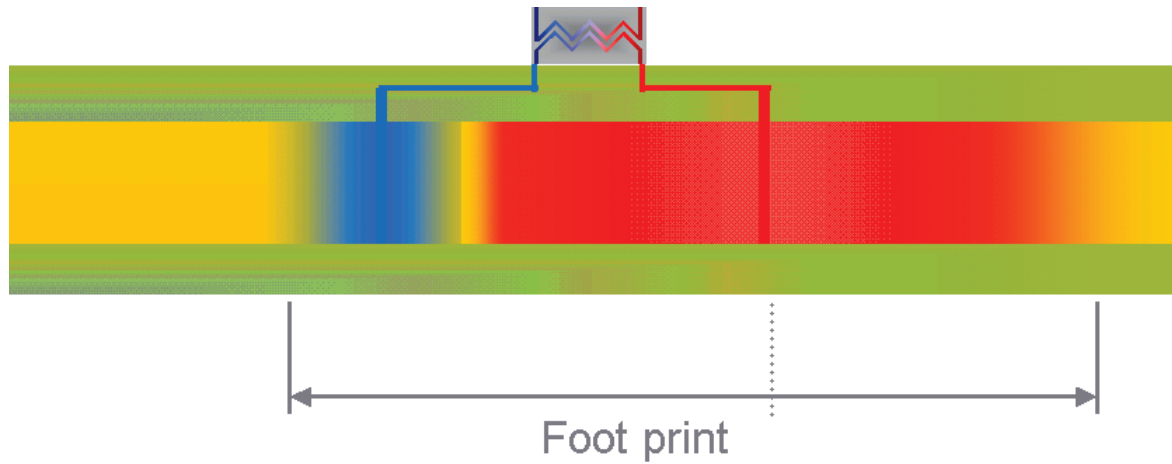
5.1 Ondergronds ruimtebeslag: footprint en thermische straal

5.1.1 Footprint als maat voor ondergronds ruimtebeslag

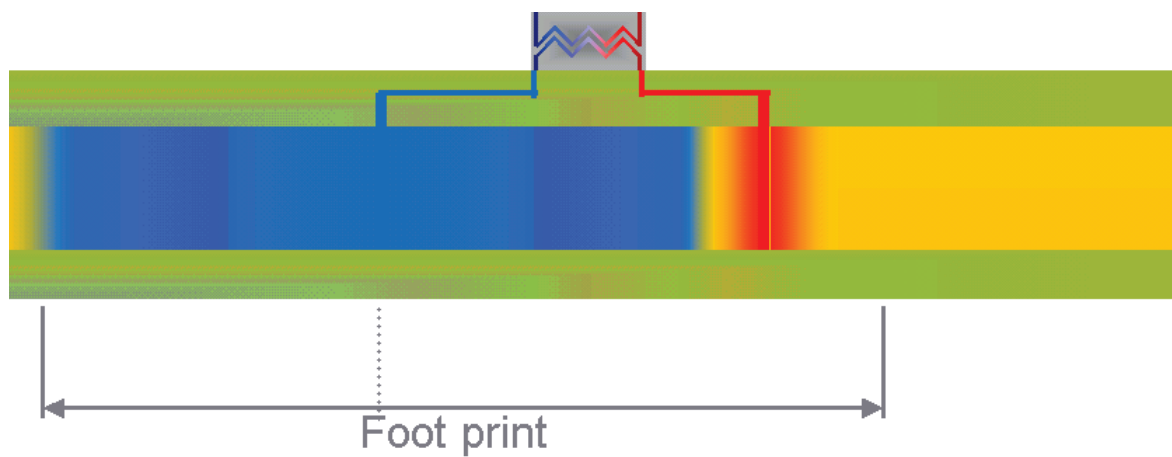
Het ondergronds ruimtebeslag wordt uitgedrukt door middel van de zogenoemde 'footprint'. Dit is het oppervlak van het ruimtebeslag in het horizontale vlak (zie Figuur 23, Figuur 24 en Figuur 25). Hoeveel 'footprints' er in een gebied passen, bepaalt de maximale bebouwingsdichtheid bij 100% toepassing van WKO (Figuur 26).



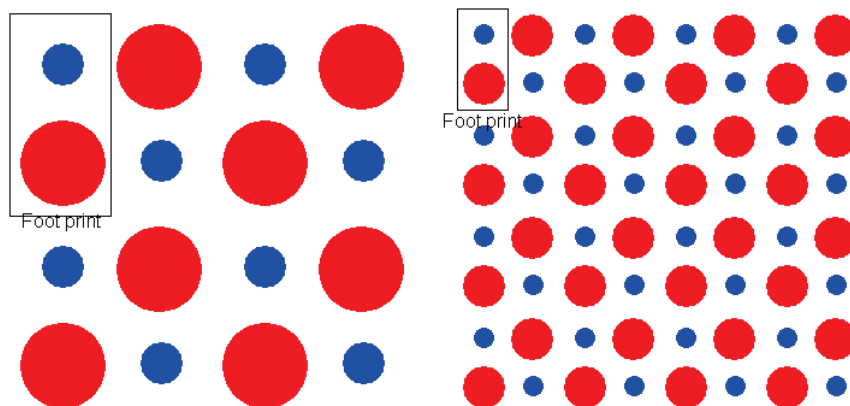
Figuur 23 Footprint bij structurele balans van het WKO-systeem



Figuur 24 Footprint bij warmteoverschot in de bodem
(= meer koude onttrekken aan de bodem dan warmte)



Figuur 25 Footprint bij koudeoverschot in de bodem
(= meer warmte onttrekken aan de bodem dan koude)



Figuur 26 Grote footprint: lagere bebouwingsdichtheid mogelijk (links); kleine footprints en hoge bebouwingsdichtheid (rechts).

5.1.2 Invloedsfactoren footprint

De volgende invloedsfactoren bepalen het ondergrondse ruimtebeslag. Hierbij is sprake van zowel bovengrondse als ondergrondse aspecten.

Bovengronds

- 1) Omvang van de warmte- en de koudevraag van het gebouw.
- 2) Verhouding van de warmte- en de koudevraag van het gebouw:
 - a) met de corresponderende onbalans;
 - b) en de duur hiervan.
- 3) Aandeel levering van warmte en koude door de ondergrond.
- 4) Functioneren van de gebouwinstallatie:
 - a) temperatuurniveaus van de warmte en de koude.

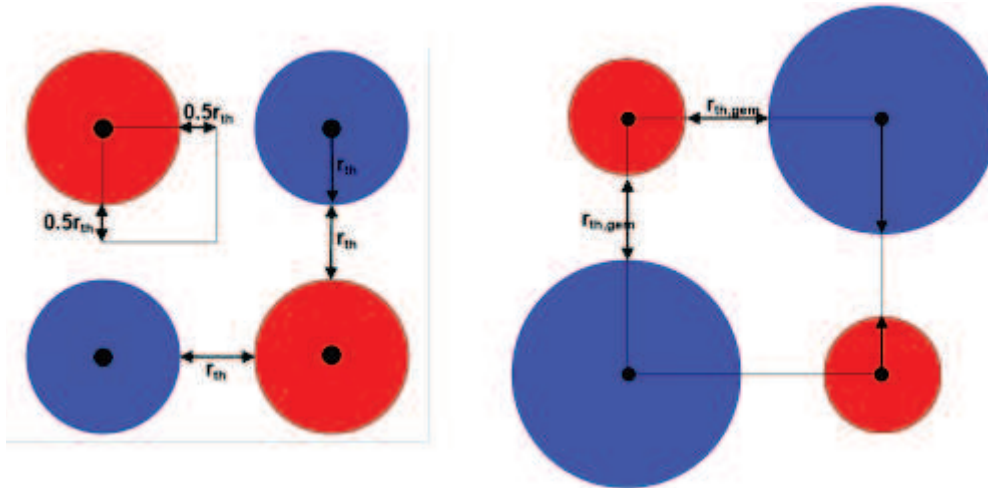
De punten 1) en 2) zijn geanalyseerd in het vorige hoofdstuk voor de casus met verschillende mates van onbalans. In dit hoofdstuk wordt het corresponderende ondergrondse ruimtebeslag in detail doorgerekend van de genoemde casus. Een meer generieke analyse volgt in hoofdstuk 6.2.1 en bijlage II. De aspecten 3) en 4) worden toegelicht in bijlage II. Voor dit hoofdstuk zijn de resultaten van de casus uit hoofdstuk 4 het uitgangspunt (zie bijlage III).

Ondergronds:

- Aquiferdikte en filterlengte.
 - Zie hiervoor bijlage I.iii. In dit hoofdstuk wordt voor de casus gerekend met één aquiferdikte.
- Gebruik van filters op verschillende dieptes.
 - Dit is het geval bij toepassing van een zogenoemde monobron. Dit wordt verder niet meegenomen in dit onderzoek.
- Heterogeniteit van de bodem.
 - Dit wordt niet meegenomen in de analyse van dit hoofdstuk. Zie bijlage I.vi voor een toelichting.
- Grondwaterstroming.
 - Dit wordt in dit hoofdstuk in detail geanalyseerd voor de verschillende waarden van de grondwaterstroming.
- Afstand tussen de bronnen. Zie volgende paragraaf.

5.1.3 Afstand tussen bronnen, thermische straal en de footprint

Bij een energiebalans en een gelijkwaardig temperatuurverschil (gelijke ΔT) is de thermische straal van de warme bel gelijk aan de thermische straal van de koude bel. Op basis van de normen van de NVOE is de afstand tussen de warme en de koude bron gelijk aan driemaal de thermische straal. De afstand tussen de warme en de koude bel is dan gelijk aan eenmaal de thermische straal. Als sprake is van een energieonbalans zullen de warme en koude bel meestal niet even groot zijn en is geen sprake van één thermische straal. De afstand tussen de koude en de warme bron dient in dit geval gelijk te zijn aan 1,5 maal de thermische straal van de koude bron plus 1,5 maal de thermische straal van de warme bron. Op basis hiervan kan de footprint bepaald worden (zie bijlage I.ii).



Figuur 27 Schematische weergave van de thermische stralen van de warme en de koude bel in een situatie met energiebalans (links) en een situatie met een energieonbalans (rechts)

Bij een langjarige periode met elk jaar eenzelfde onbalans, zal (b.v.) de koude bel elk jaar groter worden terwijl de grootte van de warme bel (situatie aan het einde van de zomer) gelijk blijft. Als vooraf bekend is dat sprake zal zijn van een structureel koudeoverschot, dan moet rekening worden gehouden met het elk jaar groter worden van de thermische straal van (in dit voorbeeld) de koude bron. Dit betekent dat de afstand tussen de warme en de koude bron groter moet worden gekozen dan bij een project van dezelfde omvang met een energiebalans. Het ruimtebeslag van het systeem neemt daardoor ook toe: de benodigde afstand tussen de koude bron en een eventuele warme bron van het buursysteem wordt immers ook groter.

In een vereenvoudigde benadering kan de footprint bepaald worden met behulp van de thermische straal:

$$\text{Footprint} = \text{Ruimtebeslag van één doublet} = (3 * (r_{th,W} + r_{th,K}))^2 / 2$$

In deze formule zijn $r_{th,W}$ en $r_{th,K}$ de thermische straal van de warme en de koude bel. De thermische straal wordt in de vereenvoudigde benadering bepaald op basis van de verplaatste waterhoeveelheid. Voor een verdere toelichting, zie bijlage I.ii.b.

5.1.4 Aanpak bepaling ondergronds ruimtebeslag

De vraagpatronen zoals die volgen uit de gebouwsimulaties voor scenario 3 met onbalans en met een 100% gecorrigeerde onbalans zijn vertaald naar input voor 2D-simulaties van de ondergrond. Het betreft de achterliggende uurlijkse energievraagdata van Figuur 12 en Figuur 16.

Deze gegevens zijn bewerkt tot een waterverplaatsing per maand voor beide pomprichtingen met een bijbehorende gemiddelde 'delta T' (temperatuurverschil tussen het onttrokken en geïnfiltreerde water). Deze gegevens zijn gebruikt als invoer voor HST-2D, waarbij in het model steeds twee weken de ene kant op en vervolgens twee weken de andere kant op gepompt wordt met de voor die maand bepaalde waterverplaatsingen en delta T's. Aan het einde van deze dertig jaar is het systeem stopgezet en is voor de daaropvolgende periode van honderd jaar berekend hoe de bodemtemperaturen zich ontwikkelen (uitdoving temperaturen). Uitdoven van de temperaturen betekent dat de temperatuur richting de achtergrondtemperatuur gaat. De warmte of koude verdwijnt daarbij niet, maar wordt verspreid over een groter bodemvolume.

Ter controle van de vereenvoudigde benadering van de footprint is één scenario doorgerekend met een grondwaterstromingssnelheid van 0 m per jaar. Daarnaast zijn drie scenario's doorgerekend met stroomsnelheden van 10, 30 en 50 m per jaar (lage tot hoge

stroomsnelheid) voor zowel een balans- als een onbalanssituatie. De berekende scenario's zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 9 Doorgerekende varianten (voor alle varianten: dertig jaar in bedrijf + honderd jaar 'uitdoving')

Balanssituatie	Onbalanssituatie
Stroomsnelheid 0 m/jr	Stroomsnelheid 0 m/jr
Stroomsnelheid 10 m/jr	Stroomsnelheid 10 m/jr
Stroomsnelheid 30 m/jr	Stroomsnelheid 30 m/jr
Stroomsnelheid 50 m/jr	Stroomsnelheid 50 m/jr

*De stroomsnelheid is gedefinieerd als de werkelijke stroomsnelheid in de poriën. Hiermee kan berekend worden hoelang het water er over doet om 'van A naar B' te komen.

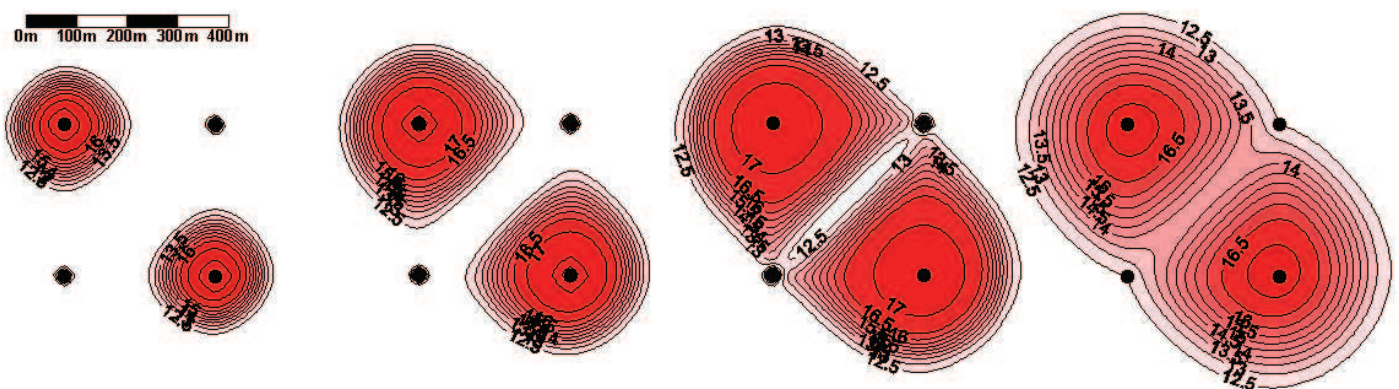
In het model is uitgegaan van twee naast elkaar gelegen doubletsystemen die zijn geplaatst, zoals aangegeven in Figuur 27. Op deze manier wordt een blok gemodelleerd dat eindeloos herhaald kan worden. Afhankelijk van de grootte van het gebied kan dit 'blokkenmodel' modulair worden uitgebouwd naar gebiedsniveau. Voor de grondwaterstroming is aangenomen dat deze met een hoek van 45 graden op deze blokken gericht is, zodat de warme bronnen stroomafwaarts liggen van andere warme bronnen en de koude bronnen stroomafwaarts van andere koude bronnen.

5.2 Resultaten footprint

De resultaten van de berekeningen zijn per scenario weergegeven in onderstaande figuren. Gepresenteerd zijn de berekende temperaturen na dertig jaar gebruik van het WKO-systeem, zowel voor de situatie aan het einde van de winter als voor het einde van de zomer. Voor de situatie met een onbalans zonder grondwaterstroming zijn ook de berekende temperaturen voor de situatie na vijf, tien en twintig jaar weergegeven, om de groei van het invloedsgebied inzichtelijk te maken. Daarnaast is het temperatuurverloop in de bronnen gedurende de eerste dertig jaar en gedurende de eerste honderd jaar na stopzetting (uitdoving) gepresenteerd in grafieken.

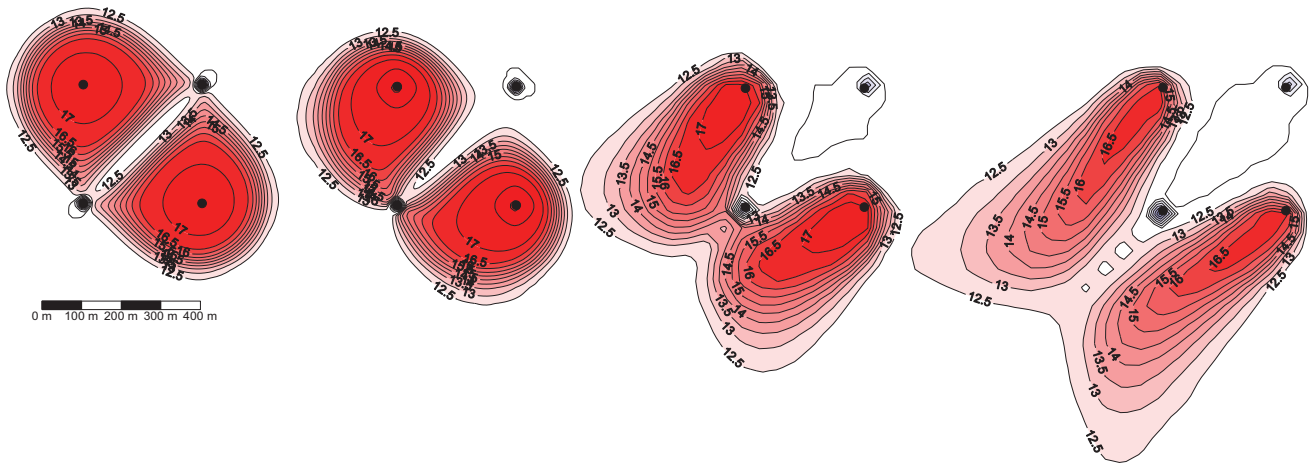
5.2.1 Gebouwsenario 3 met onbalans

De volgende figuren tonen de resultaten van gebouwscenario 3 zonder onbalanscorrectie (ruimtebeslag behorend bij Figuur 12). In Figuur 28 is te zien hoe de warme bel in de loop van de jaren steeds groter wordt, door de toename van de achtergebleven hoeveelheid warmte in de ondergrond. In de modelberekeningen is het systeem in de eerste 30 jaar actief en vervolgens 100 jaar buiten bedrijf. Door het ontbreken van grondwaterstroming in dit scenario, blijft de warmte op zijn plaats en is de achtergebleven warmte 100 jaar na het stopzetten van de WKO nog steeds duidelijk aanwezig.

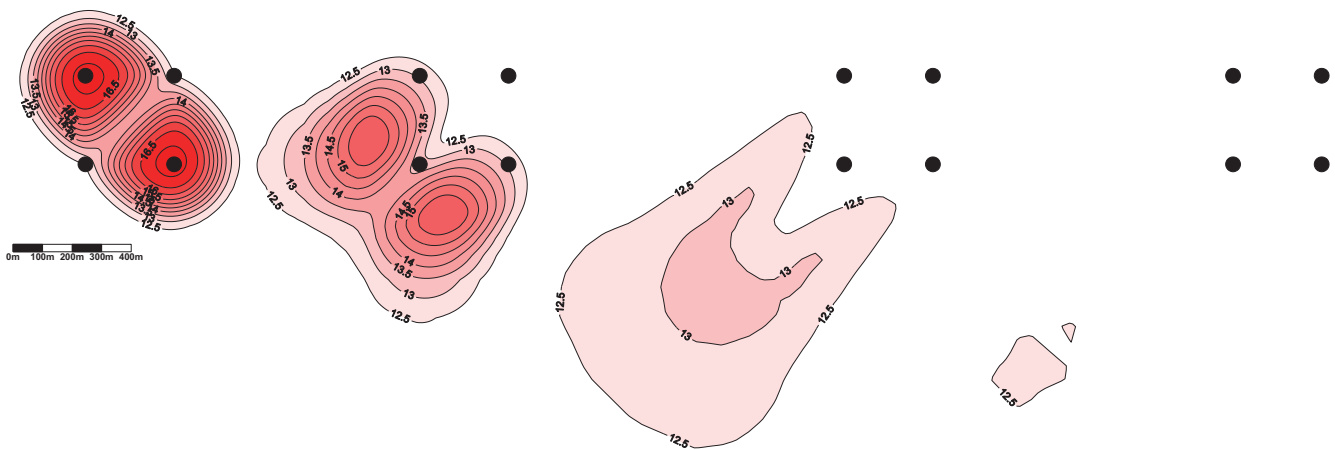


Figuur 28 Ontwikkeling van het thermisch invloedsgebied (aan het einde van de winter) in de tijd bij een grondwaterstroming van 0 m/j en een onbalans (warmteoverschot). Van links naar rechts de

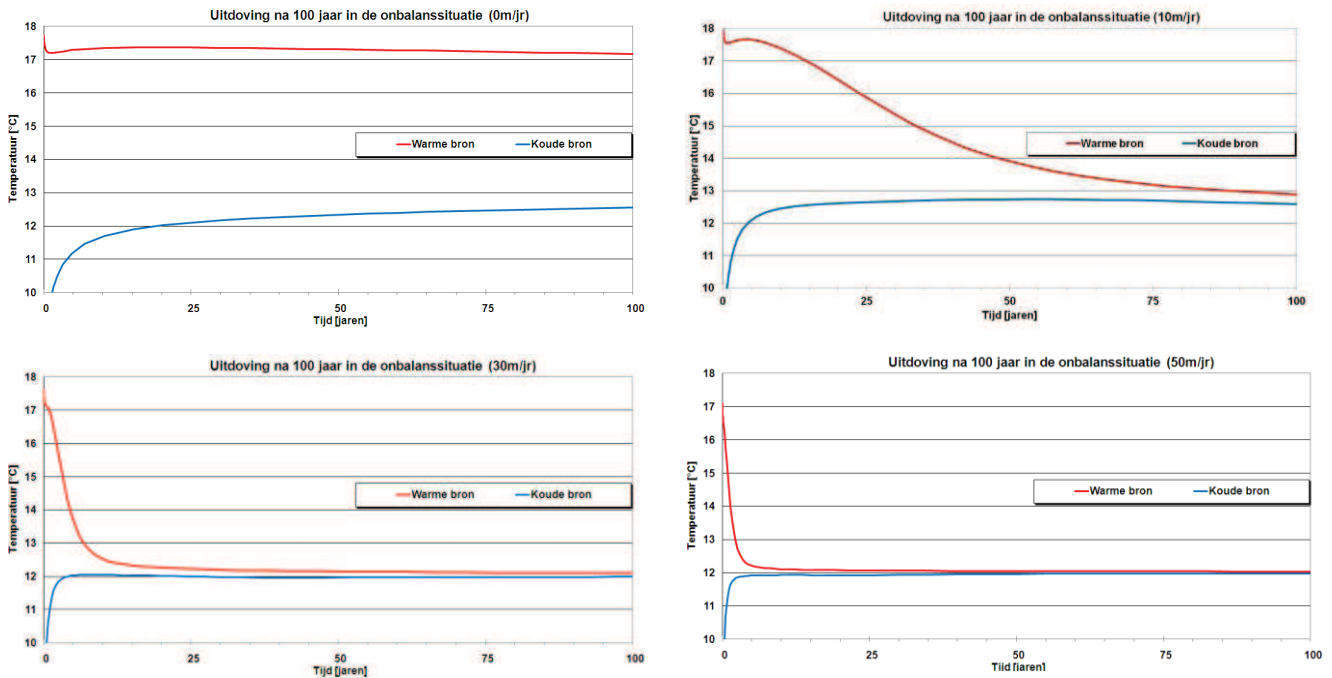
situatie na 10, 20 en 30 jaar en uiterst rechts de situatie na 130 jaar (30 jaar in bedrijf en vervolgens 100 jaar buiten bedrijf).



Figuur 29 Thermisch invloedsgebied aan het einde van de winter na 30 jaar WKO bij een onbalans (warmteoverschot) en verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Van links naar rechts de situatie bij een grondwaterstroming van 0, 10, 30 en 50 meter per jaar.



Figuur 30 Thermisch invloedsgebied na 130 jaar, waarvan de WKO de eerste 30 jaar in bedrijf was, bij verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Van links naar rechts de situatie bij een grondwaterstroming van 0, 10, 30 en 50 meter per jaar.



Figuur 31 Berekende temperaturen in de warme bron (rood) en koude bron (blauw) in de eerste 100 jaar na stopzetting van de WKO bij een onbalans en verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Linksboven een stroomsnelheid van 0 meter per jaar, rechtsboven 10 m/j, linksonder 30 m/j en rechtsonder 50 m/j.

Figuur 29 toont de situatie na 30 jaar WKO bij verschillende snelheden van de natuurlijke grondwaterstroming. De afstroming van de warmte is duidelijk te zien in de vorm van de 'warme pluim'. De oppervlakte van de warme bellen neemt toe bij een toename van de stroomsnelheid. Dit is te verklaren doordat de gemiddelde temperatuur binnen de warme bel duidelijk lager is (te zien aan de kleur in Figuur 29 die duidelijk 'minder rood' is), waardoor met dezelfde hoeveelheid warmte een groter volume wordt beïnvloed.

De berekeningen laten ook zien (Figuur 28 en Figuur 29) dat aan het einde van de winter nauwelijks een koude bel te zien is. Dit is te verklaren uit het feit dat de temperatuur in de koude bronnen aan het einde van het zomerseizoen in alle scenario's de natuurlijke grondwatertemperatuur bereikt. Alle opgeslagen koude wordt dus telkens volledig onttrokken, waardoor geen koude bel kan worden opgebouwd. De koude bel blijft dus beperkt tot de hoeveelheid die in de betreffende winter is opgeslagen.

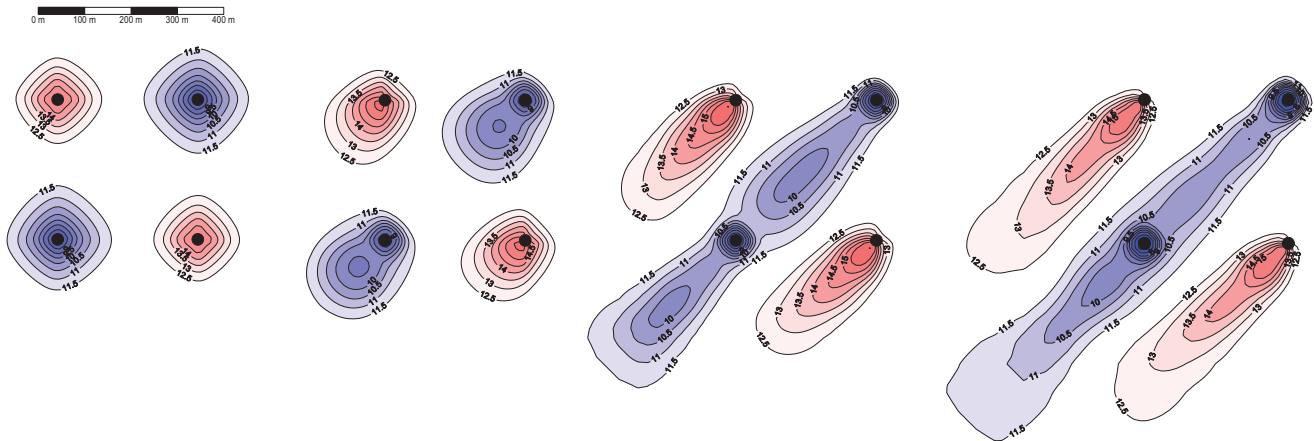
Figuur 30 en Figuur 31 tonen de berekende temperaturen in de ondergrond na stopzetting van de WKO. In Figuur 30 zijn de berekende temperaturen na 100 jaar weergegeven bij verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Hieruit blijkt duidelijk dat de temperatuur in de ondergrond veel sneller afneemt als de stroomsnelheid van het grondwater hoger is. Ook bij hoge stroomsnelheden blijft de warmte in de ondergrond achter, maar wordt het sneller verdeeld over een groter volume met een daling van de gemiddelde temperatuur als gevolg. De warmte wordt bij hogere stroomsnelheden dus sneller 'verspreid' dan bij lage stroomsnelheden. De belangrijkste processen die verantwoordelijk zijn voor deze 'verspreiding' zijn dispersie en warmtegeleiding. Dispersie treedt op onder invloed van de stroming en zorgt voor menging tussen het warme water en het omringende koudere grondwater. De warmteoverdracht door geleiding wordt bij hogere stroomsnelheden bevorderd doordat de afstroming ervoor zorgt dat de warme bel steeds in contact komt met delen van de afsluitende lagen die nog de oorspronkelijke temperatuur hebben. De temperatuurgradiënt is daardoor groter en daarmee ook de warmteoverdracht door warmtegeleiding.

In de temperatuurgrafieken (Figuur 31) is de invloed van de stroomsnelheid van het grondwater ook duidelijk te zien. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat het gaat in de temperatuur in de bronnen. Een daling naar de natuurlijke grondwatertemperatuur in de

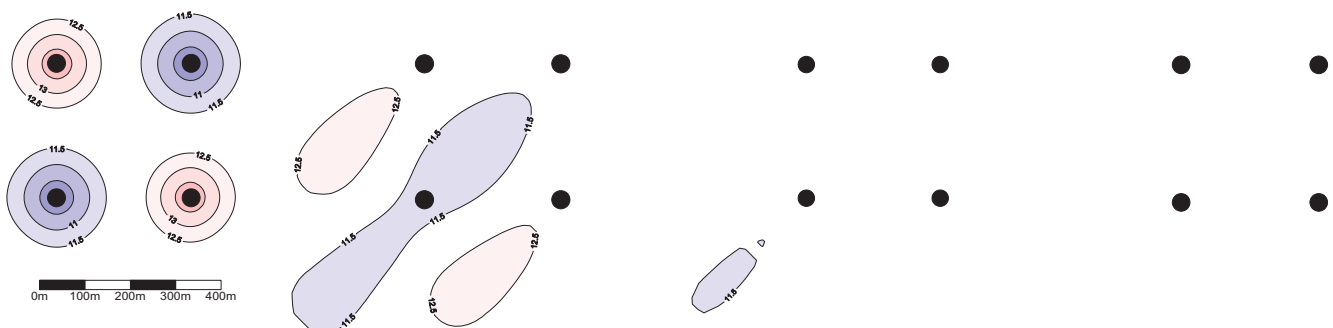
bronnen betekent nog niet dat alle warmte is verdwenen: de warmte kan immers nog stroomafwaarts van de bronnen aanwezig zijn.

5.2.2 Resultaten voor gebouwscenario 3 met 100% balanscorrectie

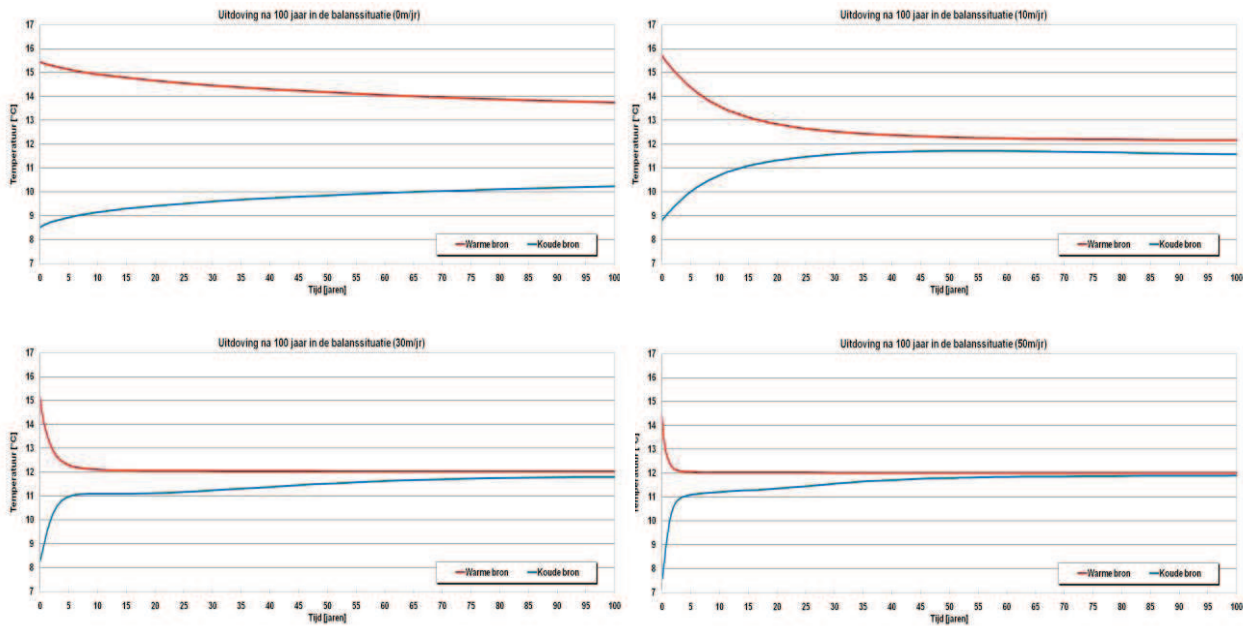
Ook voor de situatie met een energiebalans (100% balanscorrectie) zijn dezelfde berekeningen uitgevoerd. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 32, Figuur 33 en Figuur 34.



Figuur 32 Thermisch invloedsgebied aan het einde van de winter na 30 jaar WKO bij een energiebalans en verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Van links naar rechts de situatie bij een grondwaterstroming van 0, 10, 30 en 50 meter per jaar.



Figuur 33 Thermisch invloedsgebied bij een energiebalans na 130 jaar, waarvan de WKO de eerste 30 jaar in bedrijf was, bij verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Van links naar rechts de situatie bij een grondwaterstroming van 0, 10, 30 en 50 meter per jaar.



Figuur 34 Berekende temperaturen in de warme bron (rood) en koude bron (blauw) in de eerste 100 jaar na stopzetting van de WKO bij een energiebalans en verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Linksboven een stroomsnelheid van 0 meter per jaar, rechtsboven 10 m/j, linksonder 30 m/j en rechtsonder 50 m/j.

Ook hier is duidelijk de invloed van de grondwaterstroming op de vorm en grootte van de warme en koude bellen te zien (Figuur 32).

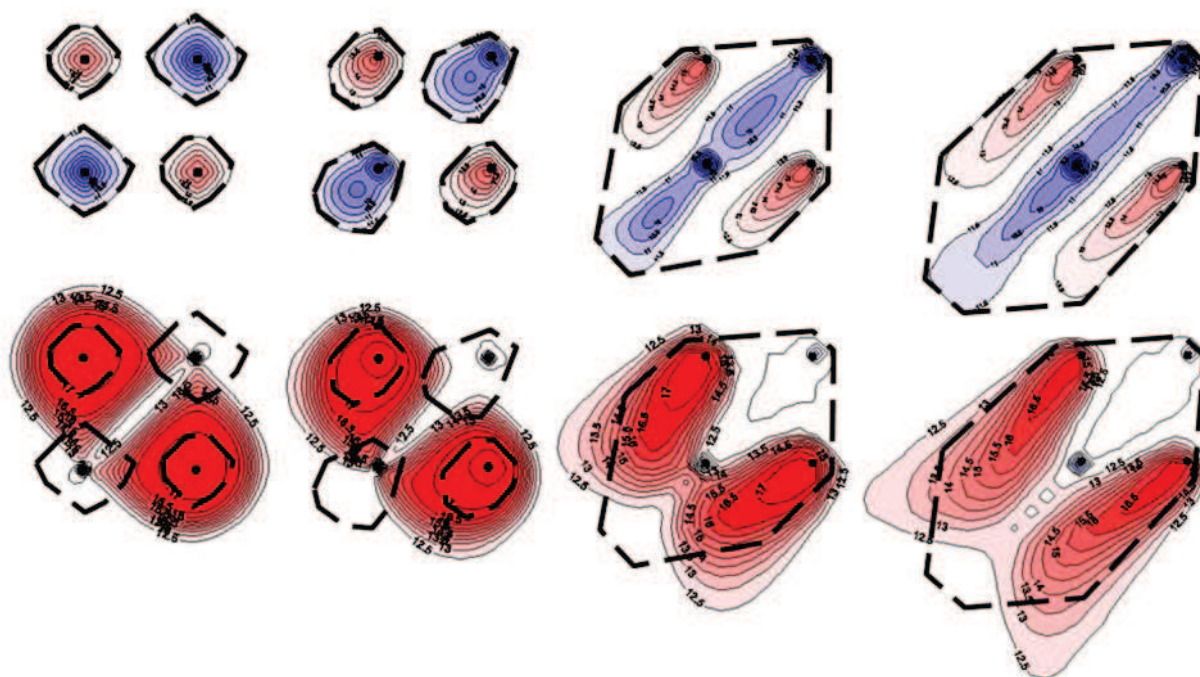
Het beeld bij de uitdoving komt ook overeen: zonder grondwaterstroming blijft de warmte en koude lang behouden en bij hogere stroomsnelheden wordt de warmte en koude sneller verspreid. Bij een energiebalans vindt echter niet alleen verspreiding van de warmte en koude plaats, maar 'verdwijnt' ook warmte en koude doordat het met elkaar in contact komt. Gevolg is dat de thermische effecten sneller 'uitdoven' dan bij een onbalans.

5.3 Samenvatting invloed grondwaterstroming

5.3.1 Verschil footprint balans/onbalans

In Figuur 35 zijn de contourplaatjes voor de balans en de onbalans situatie naast elkaar gezet. De vergelijking maakt duidelijk dat de grootte van het thermisch invloedsgebied zowel door de mate van energie(on)balans als door de snelheid van de grondwaterstroming wordt bepaald. Bij lage stroomsnelheden is de mate van energie(on)balans de meest bepalende factor: bij een sterke onbalans is het thermisch invloedsgebied duidelijk groter dan bij een energiebalans, zeker als ook rekening wordt gehouden met de 'open ruimtes' die tussen de bellen te zien zijn (de bronnen kunnen in feite dichter bij elkaar worden geplaatst, waardoor de buitenste contour van het thermisch invloedsgebied kleiner wordt). Bij hoge stroomsnelheden is de grondwaterstroming bepalend voor de grootte van de footprint: bij 30 en bij 50 meter per jaar is het verschil in oppervlakte tussen de footprint beperkt (de open ruimte tussen de bellen is ook veel kleiner).

Stroomsnelheden van het grondwater in de bovenste watervoerende pakketten liggen in Nederland meestal tussen 10 en 30 meter per jaar. In West-Nederland is de stroomsnelheid meestal < 20 m/jaar en in Oost Nederland vaak > 20 meter per jaar. Diepe bodemlagen hebben vaak duidelijk lagere stroomsnelheden doordat de stijghoogtegradiënten daar kleiner zijn en de doorlatendheid vaak ook lager is.



Figuur 35 Thermisch invloedsgebied aan het einde van de winter na 30 jaar WKO bij een energiebalans (boven) en een energieonbalans (onder) en verschillende snelheden van de grondwaterstroming. Van links naar rechts de situatie bij een grondwaterstroming van 0, 10, 30 en 50 meter per jaar. De stippellijnen geven de contouren van de footprint aan voor de situatie met een energiebalans en zijn ter vergelijking ook geplot over de contouren van de scenario's met een onbalans.

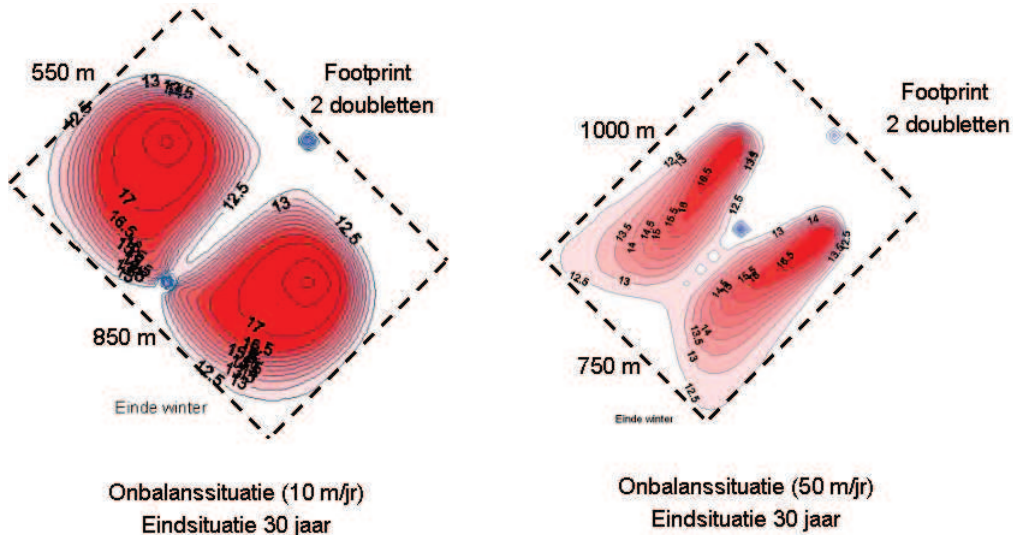
Tussentijdse conclusies ondergronds ruimtebeslag

1. Bij afwezigheid van grondwaterstroming zorgt een energetische onbalans voor een lange uitdovingstijd. De geaccumuleerde energie blijft voor lange tijd aanwezig in de bodem.
2. Als er grondwaterstroming aanwezig is, dan zijn de volgende trends te zien:
 - a. Een sterke verandering van de vorm van de footprint.
 - b. Een mogelijke toename van de footprint met een factor 2 (bij waarden tot 50 m/jaar). Bij een beperkte grondwaterstroming is de toename van footprint beperkt.
 - c. Een sterke reductie van de uitdovingstijd bij onbalans.
 Als er geen grondwaterstroming is, leidt dit tot een lange uitdovingstijd.
3. De grootte van het thermisch invloedsgebied wordt zowel door de mate van energie(on)balans als door de snelheid van de grondwaterstroming bepaald. Bij lage stroomsnelheden is de mate van energie(on)balans de meest bepalende factor. Bij hoge stroomsnelheden is de grondwaterstroming bepalend voor de grootte van de footprint.
4. De vereenvoudigde benadering valt binnen de ranges van de footprint conform de 2D-benadering. De vereenvoudigde methode is een redelijke benadering voor een eerste inschatting voor een grondwaterstroming tot 30 m/jaar.

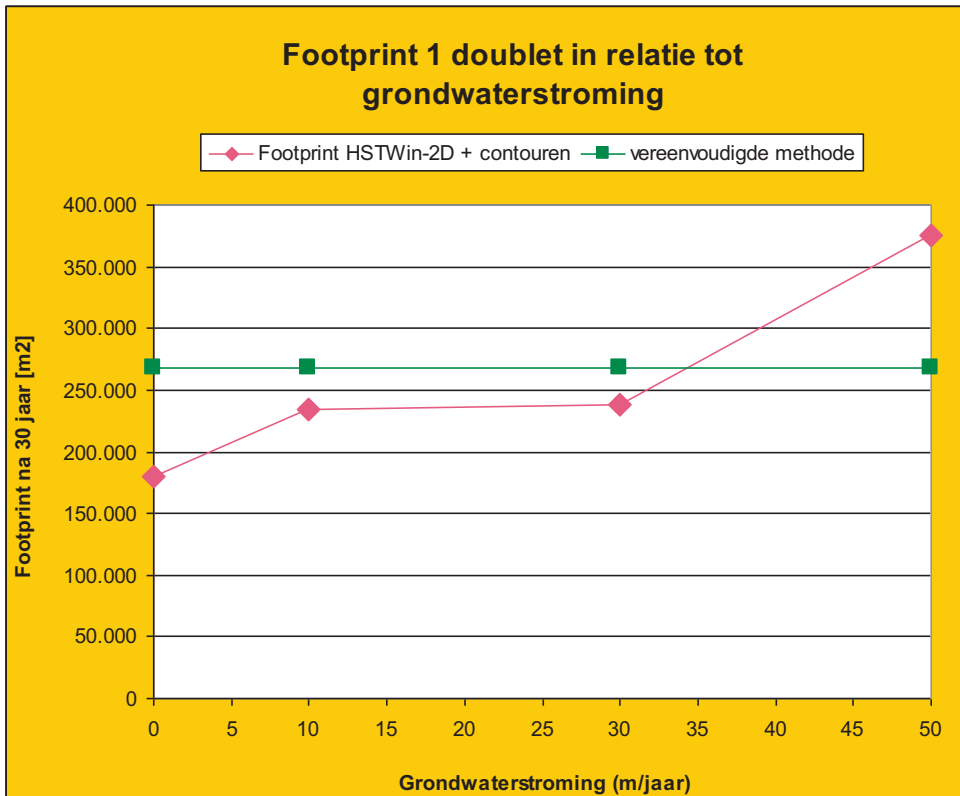
5.3.2 Footprints: Toepassingsgebied eenvoudige benadering

Een deel van de analyses uit het volgende hoofdstuk is gebaseerd op een vereenvoudigde benadering van de footprint zoals uitgewerkt in bijlage I.ii.b. Om het toepassingsgebied van de vereenvoudigde benadering te bepalen is een vergelijking gemaakt tussen de vereenvoudigde benadering en de resultaten op basis van HST-2D.

De HST-2D resultaten zijn vertaald naar footprints door gebruik te maken van een rechthoekige contour. De vorm van de footprint verandert sterk van vorm door de grondwaterstroming. De verandering van de omvang is samengevat in Figuur 37. Tevens is hier een vergelijking gemaakt met de vereenvoudigde benadering. Dit is verder uitgewerkt in bijlage I.vii.



Figuur 36 Vorm en omvang van de footprint zijn afhankelijk van de grondwaterstroming (N.B.: niet op schaal getekend).



Figuur 37 Footprint als functie van de grondwaterstroming; situatie na dertig jaar. Gebouw met onbalans (gebouwsценario 3 met onbalans conform Figuur 12).

6 Toepassing WKO in dichtbebouwde gebieden

6.1 Algemene Inleiding

Een belangrijke overweging in de eisen rond de energiebalans van WKO-projecten is dat bij het optreden van onbalans er ongewenste interferentie optreedt tussen verschillende WKO-projecten. Dit is in het bijzonder het geval in dichtbebouwde gebieden. Caljé [8] heeft in dit verband onderzoek gedaan naar de noodzaak van een gecoördineerde plaatsing van bronnen versus de 'laissez-faire' situatie. Uit dat onderzoek bleek dat enkel bij de hoogst voorkomende bebouwingsdichtheid er gecoördineerde plaatsing van bronnen nodig is om ongewenste interactie te voorkomen. Hierbij werd echter uitgegaan van:

- WKO-systemen die evenveel warmte leveren als koude (balans);
- één waarde van de energielevering aan de gebouwen (50 kWh/m² warmte en koude);
- aquifers in Amsterdam (relatief dikke aquifers).

De interessante vraag in het kader van onderzoek naar criteria voor de energiebalans is of deze conclusie sterk wijzigt als er onbalans wordt toegestaan.

Vraagstelling

1. Bij welke bebouwingsdichtheid treedt er bij het toelaten van onbalans een knelpunt op voor grootschalige toepassing van WKO?
2. Welke eisen aan de omvang en duur van de onbalans zijn noodzakelijk om ernstige knelpunten in dichtbebouwde gebieden te voorkomen?

Aanpak analyse ondergronds ruimtegebruik gebiedsniveau

- Analyse van de invloed van de omvang en verhouding van de warmte- en koudevraag van het gebouw en het functioneren van de installatie op het ondergrondse ruimtebeslag. Dit in combinatie met de duur van de onbalans en de dikte van de aquifer. Dit vindt plaats voor een casus, gevolgd door een vertaalslag naar generieke resultaten voor de bebouwingsdichtheid.
 - Aannames:
 - Bovengronds: de warmte- en koudevraag op basis van kengetallen die rekening houden met de spreiding in de energievraag zoals die in de praktijk voorkomt. Functioneren van de installatie: idem.
 - Ondergronds: het ruimtebeslag op basis van verplaatste waterhoeveelheden, zie bijlage I. Uitgangspunt is hierbij een worst case benadering voor plaatsing van de bronnen. De worst case benadering van de plaatsing van de bronnen houdt hierbij een marge aan voor de effecten van grondwaterstroming, heterogeniteit van de bodem.
- Detailanalyse van het effect van de grondwaterstroming op het ondergronds ruimtebeslag.
 - Aannames:
 - Bovengronds: hierbij worden twee varianten voor de warmte- en koudevraag aan de bodem doorgerekend. Vraagprofielen en gebouwzijdige temperatuurniveaus: op basis van gedetailleerde simulaties (aanpak zie paragraaf III).
 - Ondergronds: bij de maximale grondwaterstroming wordt het ruimtebeslag op gebiedsniveau geanalyseerd (exclusief heterogeniteit).

6.2 Onbalans, footprints en bebouwingsdichtheid

Aan de hand van een casus voor zowel utiliteits- als woningbouw wordt het ondergronds ruimtebeslag en de maximaal haalbare bebouwingsdichtheid uitgewerkt.

Er wordt hierbij uitgegaan van de worst case plaatsing van de bronnen bij onbalans (zie hiervoor Figuur 65).

6.2.1 Resultaten Utiliteitsbouw

6.2.1.1 Casus kantoorgebouw

Uitgangspunten

In deze casus wordt uitgegaan van een kantoorgebouw van 20.000 m² (zie paragraaf 4.1.1. en III.i.a).

Footprint in relatie tot warmte- en koudevraag en onbalans

Tabel 10 geeft voor een brede range van de warmte- en koudevraag het ondergrondse ruimtebeslag weer door middel van de bijbehorende footprint. Deze is afgeleid met de benadering conform paragraaf II.ii.b. Ter informatie geeft Tabel 11 de afstand tussen de bronnen weer en Tabel 12 de relatieve onbalans in de bodem. Een verdere gevoeligheidsanalyse van bovengrondse invloedsfactoren is gegeven in bijlage II.

Opvallend in Tabel 10 is dat combinaties van de warmte- en de koudevraag die een gelijke footprint geven een verschillende onbalanspercentage kunnen hebben (zie geel gearceerde vlakken in Tabel 10 en Tabel 12).

De energievraag voor warmte en koude bepaalt sterk de resultaten van de footprint, niet alleen de verhouding tussen warmte en koude, maar ook de absolute hoeveelheid van de energievraag.

Tabel 10 Footprint van de WKO behorend bij een gebouw van 20.000 m², als functie van de warmte- en koudevraag. Uitgangspunten conform tabel 12 en 13.

Koudevraag (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	2.763	3.772	6.240	9.762	13.623
40	4.287	5.525	8.447	12.480	16.804
60	5.682	7.096	10.366	14.792	19.471
80	7.011	8.573	12.137	16.894	21.872
100	8.298	9.990	13.813	18.861	24.103
120	9.555	11.365	15.421	20.733	26.213
140	10.788	12.707	16.978	22.532	28.231

Tabel 11 Afstand tussen de bronnen voor een gebouw van 20.000 m², als functie van de warmte- en koudevraag. Uitgangspunten conform Tabel 3 en Tabel 13. Duur van de onbalans: één jaar.

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	37	43	56	70	83
40	46	53	65	79	92
60	53	60	72	86	99
80	59	65	78	92	105
100	64	71	83	97	110
120	69	75	88	102	114
140	73	80	92	106	119

Tabel 12 Relatieve onbalans in de bodem, afhankelijk van de warmte- en koudevraag van het gebouw (op basis van 85% warmtelevering door warmtepomp met jaarlijkse COP gelijk aan 4).

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	-44%	-12%	32%	59%	73%
40	-67%	-44%	-1%	32%	52%
60	-77%	-59%	-21%	13%	35%
80	-82%	-67%	-34%	-1%	22%
100	-85%	-73%	-44%	-12%	11%
120	-88%	-77%	-51%	-21%	2%
140	-89%	-80%	-56%	-28%	-5%

Tabel 13 Overige uitgangspunten

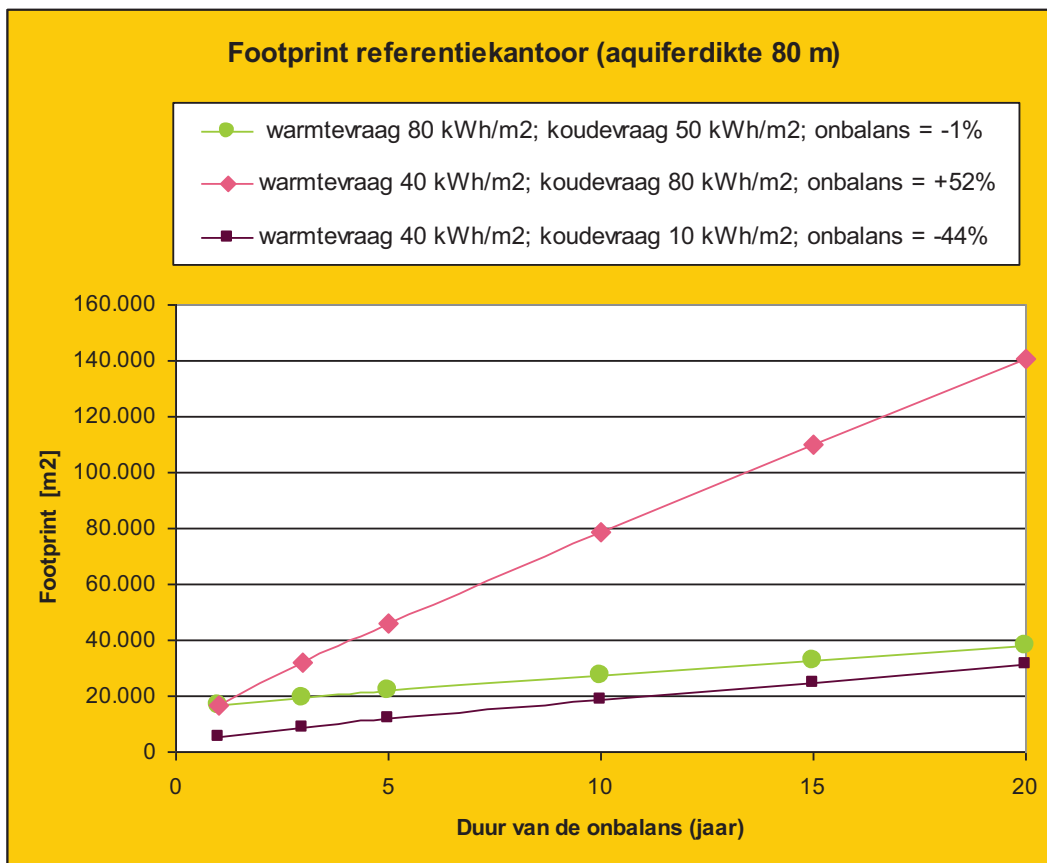
Temperatuurverschil warmte leveren door ondergrond	°C	6
Temperatuurverschil koude leveren door ondergrond	°C	5
Filterlengte/Effectieve dikte van de aquifer	M	80
Porositeit	-	0,35
Warmtecapaciteit water	MJ/m ³ .K	4,2
Warmtecapaciteit droog zand	MJ/m ³ .K	2,1
Warmtecapaciteit waterverzadigd zand	MJ/m ³ .K	2,84
Retardatiefactor voor warmte/koude	-	1,93
Bronafstand, aantal maal gemiddelde thermische straal	-	3

Footprint in relatie tot duur onbalans

Een belangrijke factor in de resultaten van Tabel 10 en Tabel 11 is de duur van de onbalans. Als gevolg van de onbalans wordt of de warme of de koude bel steeds groter naarmate de tijd toeneemt. Voor een drietal combinaties van de warmte- en de koudevraag wordt in Figuur 38 de footprint van de WKO weergegeven als functie van de duur van de onbalans.

De footprint van een WKO-systeem dat in onbalans is, maar een beperkte energievraag heeft, kan een kleinere footprint nodig hebben dan een systeem dat in balans is, maar een grotere absolute energievraag heeft. Een procentuele afwijking in combinatie met een maximum toelaatbare duur van de afwijking geeft geen eenduidige relatie met het beperken van het ondergrondse ruimtebeslag.

Opgemerkt wordt dat bij een groter wordende footprint er rekening wordt gehouden met een grotere afstand tussen de warme en de koude bron. Dit om te zorgen dat binnen de footprint geen kortsluiting optreedt tussen de warme en de koude bron. Door het verder uit elkaar plaatsen van de bronnen neemt het ondergronds ruimtebeslag echter toe.



Figuur 38 Footprint van de WKO als functie van de duur van de onbalans; combinaties voor de warmte- en koudevraag zoals gearceerd in Tabel 10 tot en met Tabel 12

6.2.1.2 Van casus naar generieke resultaten

De resultaten van de casus zijn generiek te maken door het bruto vloeroppervlak van het gebouw te delen door de benodigde footprint voor de WKO.

Tabel 14 Ratio bruto vloeroppervlak en footprint (20.000 m²/footprint).
Duur onbalans één jaar, aquiferdikte = 80 m.

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	7,2	5,3	3,2	2,0	1,5
40	4,7	3,6	2,4	1,6	1,2
60	3,5	2,8	1,9	1,4	1,0
80	2,9	2,3	1,6	1,2	0,9
100	2,4	2,0	1,4	1,1	0,8
120	2,1	1,8	1,3	1,0	0,8
140	1,9	1,6	1,2	0,9	0,7

Deze verhouding is in de benadering conform bijlage I niet afhankelijk van de omvang van het gebouw. De footprint van de WKO schaalt lineair met de omvang van het gebouw en deze verhouding valt dus weg in de ratio conform Tabel 14.

De footprint schaalt ook lineair met de aquiferdikte in de benadering conform bijlage I. Tabel 15 geeft de ratio voor een aquiferdikte van 20 m. Duidelijk wordt dat bij dikke aquifers een grotere warmte en koudevraag kan worden geleverd vanuit de ondergrond.

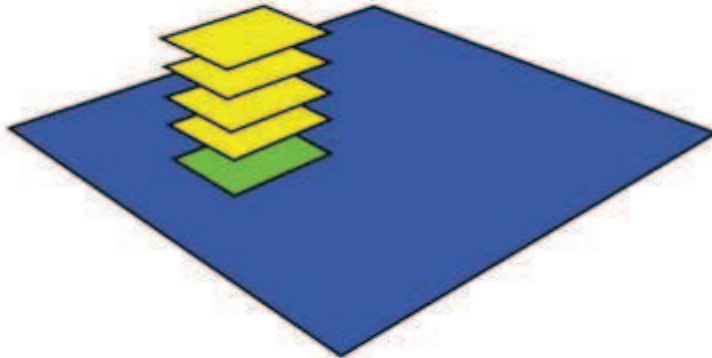
Tabel 15 Ratio bruto vloeroppervlak en footprint (20.000 m²/footprint).
Duur onbalans één jaar, aquiferdikte = 20 m.

Koudevraag gebouw (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag gebouw (kWh/m ²)					
20	1,8	1,3	0,8	0,5	0,4
40	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3
60	0,9	0,7	0,5	0,3	0,3
80	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2
100	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
120	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
140	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2

6.2.1.3 Maximaal haalbare bebouwingdichtheid

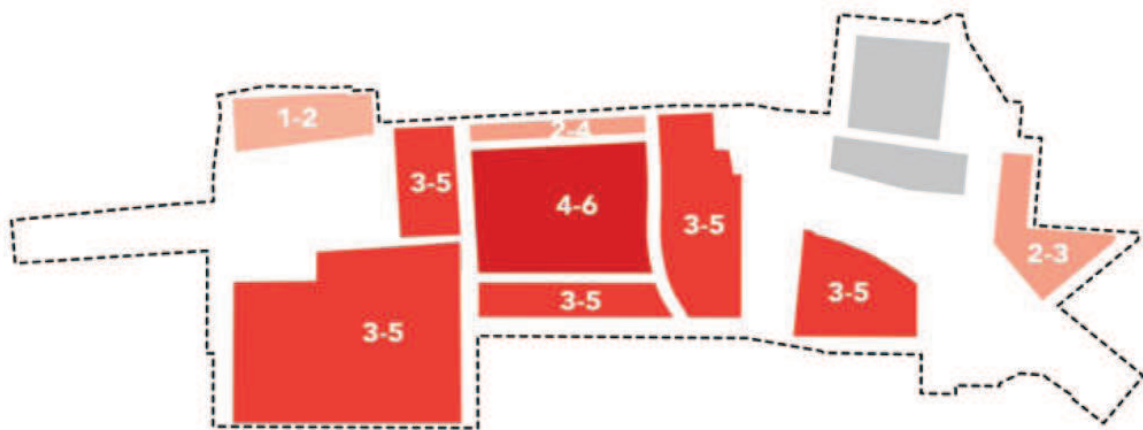
Om te analyseren bij welke bebouwingdichtheid er knelpunten optreden voor grootschalige toepassing van WKO, wordt er in deze paragraaf een relatie gelegd met de bebouwingdichtheid. Voor utiliteitsbouw is het gebruikelijk de bebouwingdichtheid uit te drukken door middel van de Floor Space Index (FSI). Dit is de verhouding tussen het totale vloeroppervlak van de bebouwing en de benodigde grondoppervlak (Zie Figuur 39 en [8]). De volgende referentiewaarden zijn ontleend aan [8 en 12]:

- Amsterdam Zuidas: FSI = 4-6;
- Amsterdam regio Damplein: FSI = 1,3;
- Amsterdam Centrum: FSI = 0,8.



$$FSI = \frac{\text{Green} + \text{Yellow}}{\text{Green} + \text{Blue}}$$

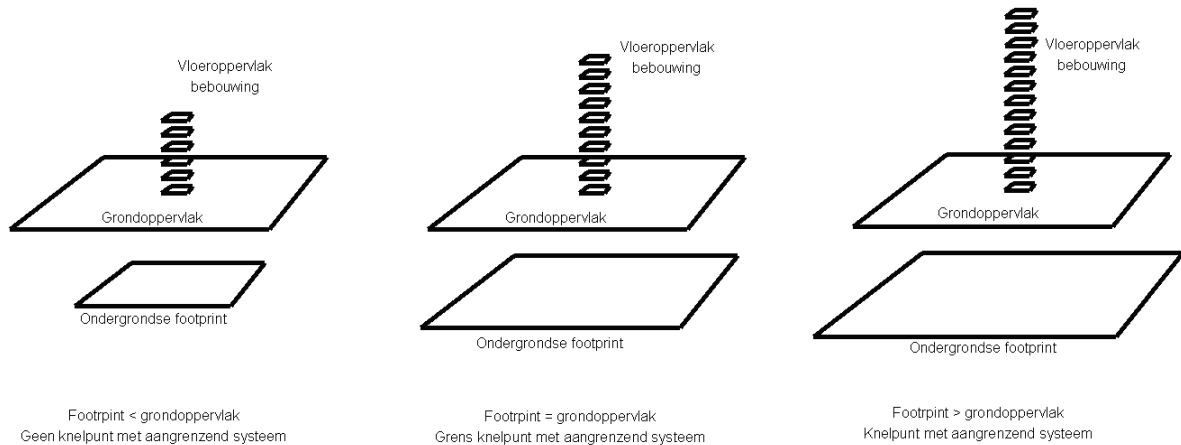
Figuur 39 Floor Space Index: een gangbare maat voor de bebouwingsdichtheid in utiliteitsbouw (bron en © : Architectenweb)



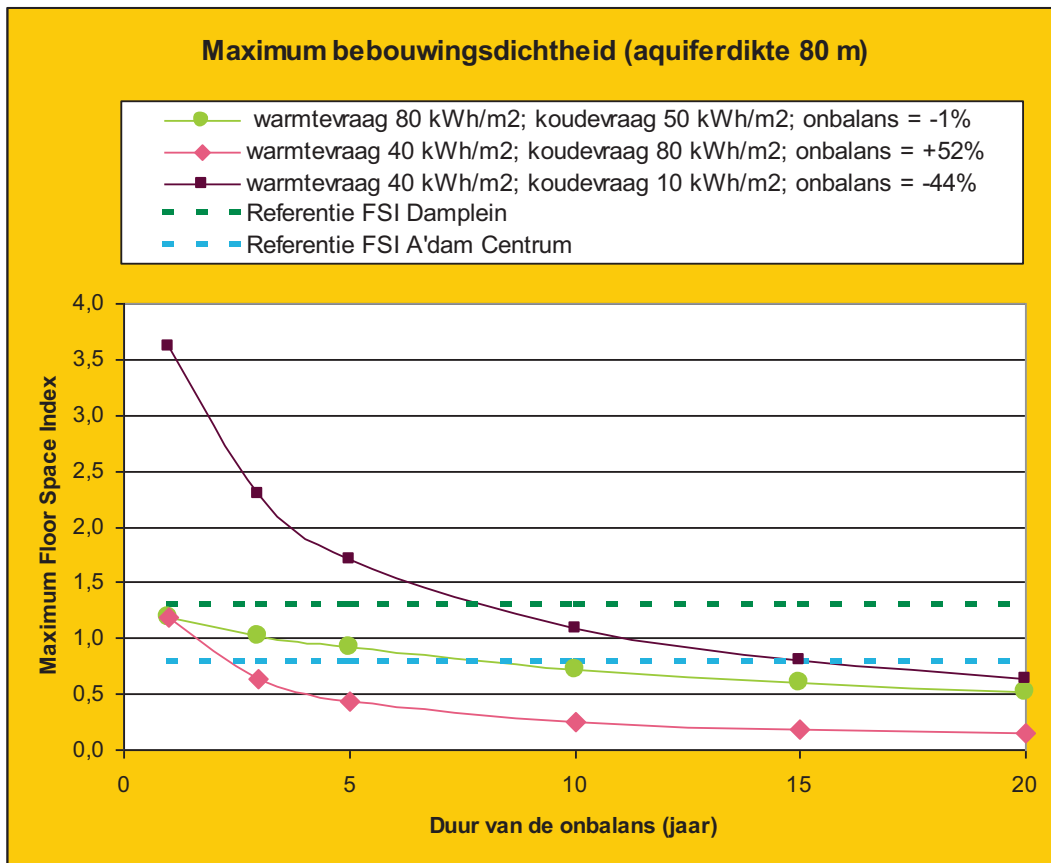
Figuur 40 Floor space index als instrument voor ruimtelijke ordening. Voorbeeld uit Visie Zuidas [12].

Op het moment dat het grondoppervlak groter is dan de benodigde ondergrondse footprint zullen er geen knelpunten optreden voor grootschalige toepassing van WKO. Dat is wel het geval als de WKO-footprints groter zijn dan het grondoppervlak van de gebouwen. De maximale bebouwingsdichtheid wordt dus bereikt op het moment dat de footprint gelijk is aan het grondoppervlak. Met andere woorden: de ratio tussen het vloeroppervlak en de footprint is gelijk aan de maximale FSI die haalbaar is bij grootschalige toepassing van WKO.

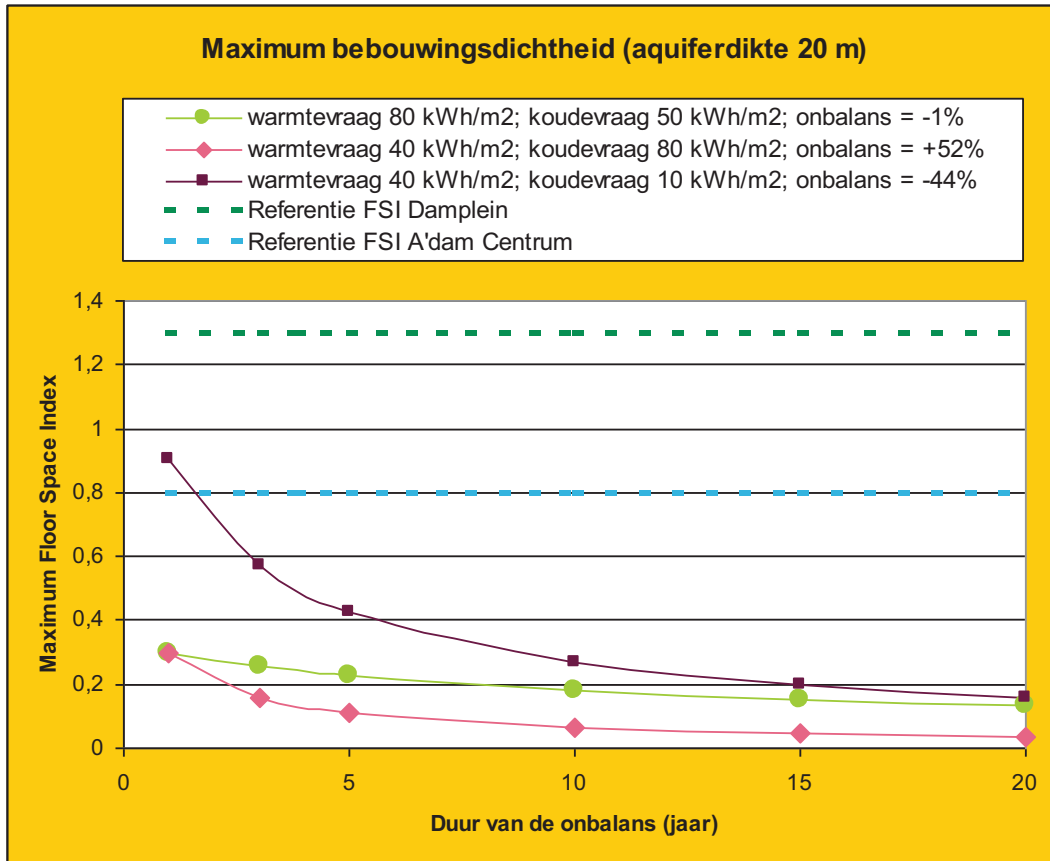
De waarden uit Tabel 14 zijn van toepassing voor een duur van de onbalans van één jaar. Om verder inzicht te geven, zijn de resultaten uit Figuur 38 vertaald naar de maximum haalbare FSI, afhankelijk van de duur van de onbalans en de dikte van de aquifer (zie Figuur 42 en Figuur 43).



Figuur 41 Footprints, grondoppervlak en vloeroppervlak bebouwing



Figuur 42 Maximum FSI als functie van de duur van de onbalans, aquiferdikte 80 m



Figuur 43 Maximum FSI als functie van de duur van de onbalans, aquiferdikte 20 m

6.2.1.4 Vergelijk met resultaten met ander onderzoek

Bij onbalans neemt het ruimtebeslag toe. De maximaal toelaatbare bebouingsdichtheid bij 'laissez faire' is aanzienlijk lager dan in geval van een ideale balans. De grens voor ongewenste interferentie ligt in het onderzoek van Caljé bij een FSI gelijk aan 3 [8]. De configuratie uit Figuur 42 met een warmtevraag van 80 kWh/m² en een koudevraag van 50 kWh/m² is vergelijkbaar met het uitgangspunt van Caljé [8]. Bij een onbalans gedurende één jaar ligt de grens voor interferentie conform Figuur 42 op 1,3.

Een belangrijk verschil met de aanpak van Caljé is dat er hier sprake is van een 'worst case' plaatsing van de bronnen in verband met de onbalans. De bronafstand is hier afhankelijk van de omvang en de duur van de onbalans (zie Tabel 11). Uitgangspunt bij Caljé is dat de warme bronnen onderling op een afstand van 33 m staan en koude onderling ook, met een afstand tussen de warme en de koude bron van 100 m.

Van de Weerdenhof [11] geeft resultaten van een studie voor het gebied in Den Haag rond het Ministerie van Buitenlandse Zaken met een viertal WKO-systemen. Daar is sprake van een beperkte onbalans. Bij één jaar onbalans treedt er geen ongewenste interactie op tussen de verschillende systemen. Ook hier geldt dat de warme bronnen onderling en de koude bronnen onderling op kortere afstand staan dan de warme en de koude bronnen onderling. De filterlengte bedraagt 26 m. De vloeroppervlakken van de bebouwing zijn niet vermeld, zodat FSI's niet bepaald kunnen worden.

Tussentijdse conclusies verkenning utiliteitsbouw

- De onbalans is één van de factoren die de grens van interferentie tussen systemen bepaalt. De absolute hoeveelheid van de energievraag is ook een sterk bepalende factor alsmede de beschikbare aquiferdikte in de ondergrond.
- Bij het toelaten van onbalans over een langere periode zal er bij veel lagere bebouingsdichtheden coördinatie van het ondergrondse ruimtegebruik moeten plaats vinden. Dit in vergelijking met een situatie zonder onbalans.
- Het stellen van uniforme eisen aan de duur en omvang van de onbalans om ongewenste interferentie te voorkomen is complex. Er is een breed scala aan significante invloedsfactoren, waardoor er nauwelijks sprake is van een robuust criterium. Het is de moeite waard om te onderzoeken of het ondergrondse ruimtebeslag zelf niet tot een robuust criterium kan leiden voor doelmatig gebruik van de ondergrond, dit in relatie tot het vloeroppervlak van het gebouw. De ontwerper en beheerder hebben dan zelf de vrijheid om dit via de energievraagreductie of via de onbalansbeperking te realiseren.

Overige opmerkingen:

- De analyse gaat er vanuit dat de footprints van de verschillende systemen niet mogen overlappen. Overlap in de footprints kan rendementsverlies opleveren, maar zorgt tegelijkertijd voor een intensievere benutting van de ondergrondse ruimte. Hoewel mag worden verwacht dat het intensiever benutten van de ondergrondse ruimte meer verliezen door interferentie zal opleveren, kan de totale energiebesparing die in een bepaald gebied kan worden behaald toch toenemen. Dit aspect kan in de toekomst nader worden onderzocht en is met name relevant voor gebieden waar de ondergrondse ruimte beperkt is (dunne aquifers) en/of sprake is van een hoge energievraag aan de oppervlakte.
- De analyse voor de maximale FSI gaat er nu van uit dat alle gebouwen een gelijke energievraag hebben. In werkelijkheid kan het dus voorkomen dat 'de buurman' een veel kleinere footprint nodig heeft die het overschrijden van het eigen grondgebied relativeert. De aangegeven maximum grenzen in Figuur 42 en Figuur 43 zijn daarom vooral van belang als trendanalyse, de kwantitatieve waarden zijn bepaald door deze 'worst case' van een heel gebied met gelijke energievraag per m² gebouw.
- In de waarden van de FSI dient men op te letten of er ook woningbouw in versleuteld zit. In de referentiewaarde van de Zuidas [12], zit bijvoorbeeld een verondersteld aandeel woningbouw. De resultaten van de U-bouw en de W-bouw uit paragraaf 6.2.2 kunnen niet zomaar gestapeld worden.
- In werkelijkheid kan door combinatie van verschillende gebouwen de totale onbalans beperkt zijn (zie ook Tabel 20).
 - Dit kan enkel rekenkundig het geval zijn, de onderlinge interferentie tussen de bronnensystemen kan dan echter nog steeds een knelpunt zijn.
 - Het uitmiddelen kan ook fysiek benut worden door middel van een collectief systeem met een ringleiding waarbij de verschillende balansverschillen worden uitgemiddeld.
- De analyse gaat uit van 100% toepassing van WKO voor alle gebouwen. De maximaal toelaatbare bebouingsdichtheid zou ook vertaald kunnen worden naar een maximale toepassingsgraad van WKO bij een gegeven bebouingsdichtheid.

6.2.2 Resultaten woningbouw

6.2.2.1 Casus met woningbouwproject van 200 woningen

De energievraag voor woningen wordt sterk bepaald door het type woning. De weergegeven range in warmtevraag correspondeert met de vraag die varieert van een appartement en een vrijstaande woning. Het uitgangspunt is daarbij:

- nieuwbouw met een woningkwaliteit die correspondeert met een EPC = 0,8;
- bestaande bouw uit de periode 1998 – 2000.

Ter vergelijk wordt hier de range gasverbruik gegeven als een woning uitgerust zou worden met een conventionele HR-ketel: 660 – 1.750 m³ aardgas per jaar.

De koudevraag is gebaseerd op ervaringscijfers en rekenstudies van DWA en TNO [10].

De warmtevraag betreft het totaal voor ruimteverwarming en tapwater. Voor de energievraag aan de ondergrond wordt uitgegaan van individuele combiwarmtepompen.

Voor de casus nemen we een omvang van 200 woningen. Deze schaalgrootte geeft, afhankelijk van het woningtype, een verplaatste waterhoeveelheid tot 215.000 m³ per jaar (warme of koude bron).

Voor een systeemomvang van 200 woningen geeft Tabel 16 de bijbehorende footprint voor een duur van de onbalans van 1 jaar en een aquiferdikte van 80 m. Ter informatie geeft Tabel 17 de relatieve onbalans in de bodem.

Tabel 16 Footprint voor 200 woningen, afhankelijk van de warmte- en de koudevraag. Duur onbalans: 1 jaar. Aquiferdikte = 80 m.

Koudevraag (kWh/woning)	800	1350	1900	2450	3000
Warmtevraag (kWh/woning)					
4.500	6.163	7.912	9.487	10.962	12.368
6.000	7.267	9.157	10.846	12.419	13.913
7.500	8.315	10.329	12.119	13.778	15.349
9.000	9.323	11.449	13.330	15.068	16.709
10.500	10.302	12.531	14.495	16.304	18.010
12.000	11.256	13.581	15.622	17.499	19.265
13.500	12.190	14.606	16.720	18.660	20.482

Tabel 17 Relatieve onbalans als functie van de warmte- en koudevraag van de woningen.

Koudevraag (kWh/woning)	800	1350	1900	2450	3000
Warmtevraag (kWh/woning)					
4.500	-51%	-30%	-13%	-1%	9%
6.000	-61%	-42%	-27%	-15%	-5%
7.500	-68%	-51%	-37%	-26%	-16%
9.000	-72%	-57%	-45%	-34%	-25%
10.500	-76%	-62%	-51%	-41%	-32%
12.000	-79%	-66%	-56%	-46%	-38%
13.500	-81%	-69%	-59%	-51%	-43%

6.2.2.2 Van casus naar generieke resultaten

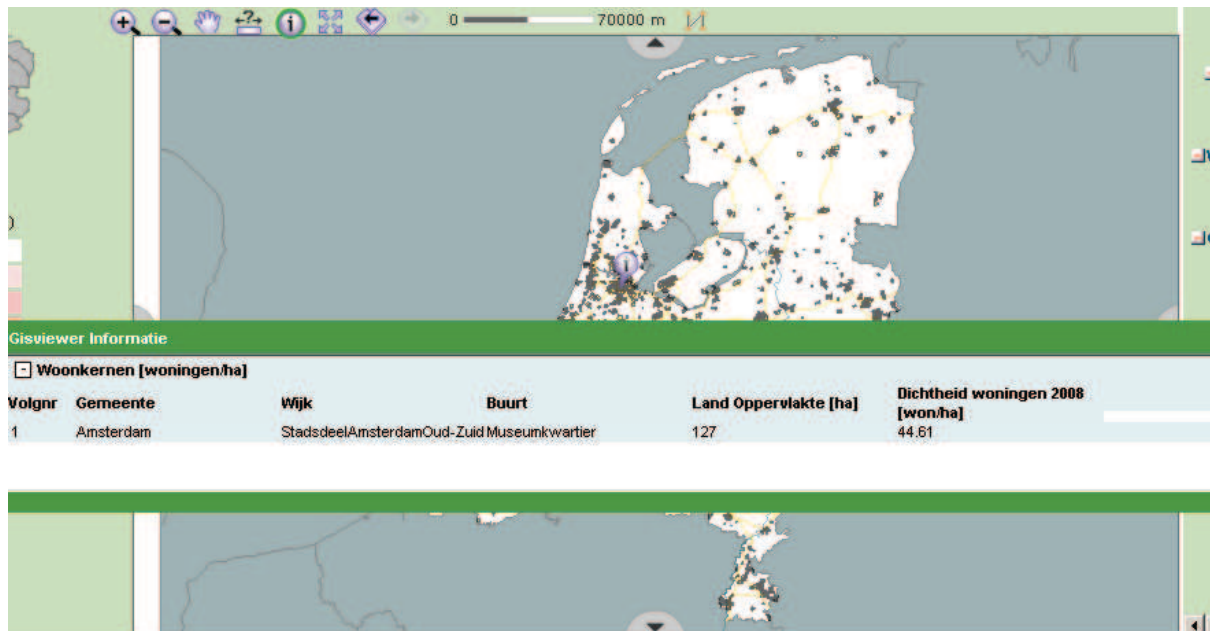
Vergelijkbaar met de aanpak voor utiliteitsbouw kunnen de resultaten meer generiek gemaakt worden door het aantal woningen door de footprint te delen. Tabel 18 en Tabel 19 geven de resultaten voor een duur van de onbalans van 1 jaar en een aquiferdikte van de respectievelijk 80 en 20 m. In het vereenvoudigde model conform bijlage I schaalt de footprint omgekeerd evenredig met de aquiferdikte. Dit geeft een constante factor tussen het aantal toelaatbare woningen voor de twee waarden van de aquiferdikte.

Tabel 18 Aantal woningen per hectare footprint. Duur van de onbalans: 1 jaar; aquiferdikte = 80 m.

Koudevraag (kWh/woning)	800	1.350	1.900	2.450	3.000
Warmtevraag (kWh/woning)					
4.500	325	253	211	182	162
6.000	275	218	184	161	144
7.500	241	194	165	145	130
9.000	215	175	150	133	120
10.500	194	160	138	123	111
12.000	178	147	128	114	104
13.500	164	137	120	107	98

Tabel 19 Aantal woningen per hectare footprint. Duur van de onbalans: 1 jaar; aquiferdikte = 20 m.

Koudevraag (kWh/woning)	800	1.350	1.900	2.450	3.000
Warmtevraag (kWh/woning)					
4.500	81	63	53	46	40
6.000	69	55	46	40	36
7.500	60	48	41	36	33
9.000	54	44	38	33	30
10.500	49	40	34	31	28
12.000	44	37	32	29	26
13.500	41	34	30	27	24



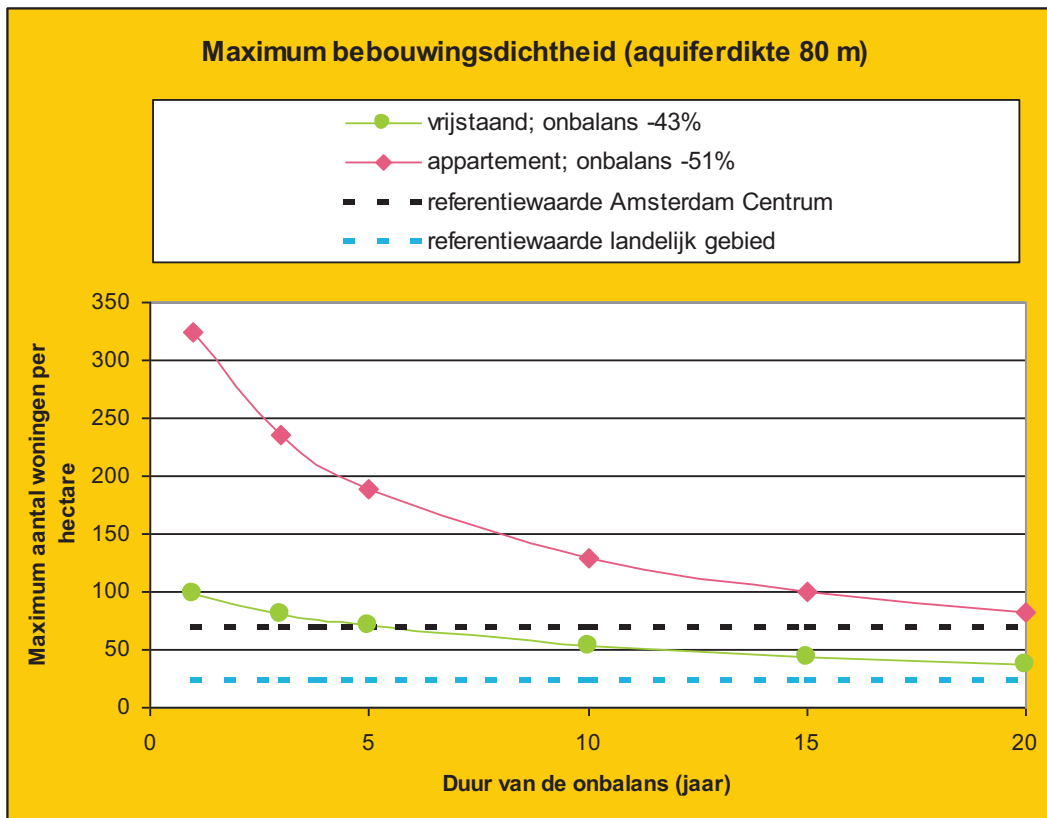
Figuur 44 Bebouwingsdichtheden woningen uit Warmtekaart AgentschapNL [13]

6.2.2.3 Maximale haalbare bebouwingsdichtheid bij WKO

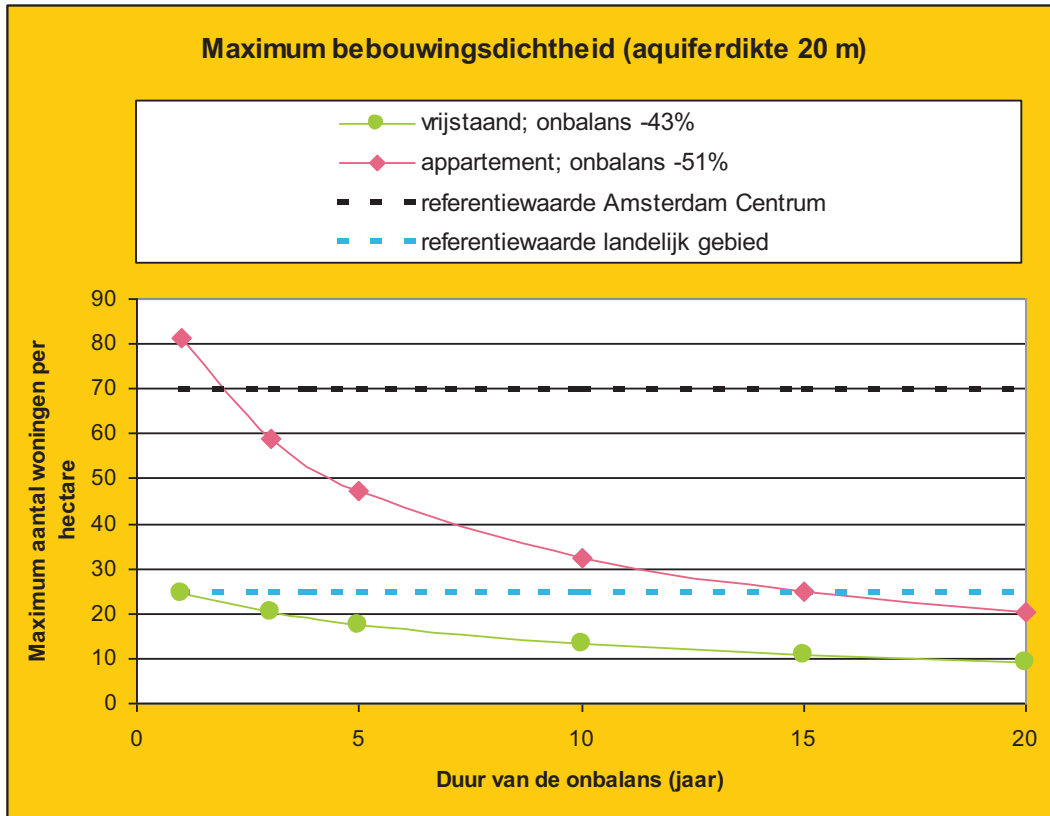
Bij woningen is het gangbaar om de bebouwingsdichtheid uit te drukken door middel van het aantal woningen per hectare (zie Figuur 44). Parallel aan de analyse in Figuur 41 wordt de maximaal haalbare bebouwingsdichtheid door de footprint gelijk te stellen aan het grondoppervlakte van de bebouwing. Figuur 45 en Figuur 46 geven de maximale bebouwingsdichtheid als functie van de duur van de onbalans voor de twee gearceerde varianten uit Tabel 18 en Tabel 19. De variant met de laagste energievraag staat model voor het appartement, de variant voor de hoogste energievraag staat model voor een vrijstaande woning. Voor vrijstaande woningen is voor de bebouwingsdichtheid de referentiewaarde voor landelijke gebieden van toepassing. Voor appartementen de referentiewaarde van Amsterdam Centrum [13].

Tussentijdse conclusies verkenning woningbouw

- Bij woningbouw treden er bij voldoende dikke aquifers (> 80 m) geen problemen op door interferentie bij het toelaten van onbalans.
- Bij minder dikke aquifers (bijvoorbeeld 20 m) kunnen er wel interferentieproblemen optreden en is coördinatie van de bronnenplaatsing of het toepassen van collectieve installaties noodzakelijk om de interferentie tussen WKO-systemen onderling te beperken.
- Voor overige kanttekeningen en conclusies: zie U-bouw.



Figuur 45 Maximaal toelaatbare bebouwingsdichtheid als functie van de duur van de onbalans. Aquiferdikte = 80 m.



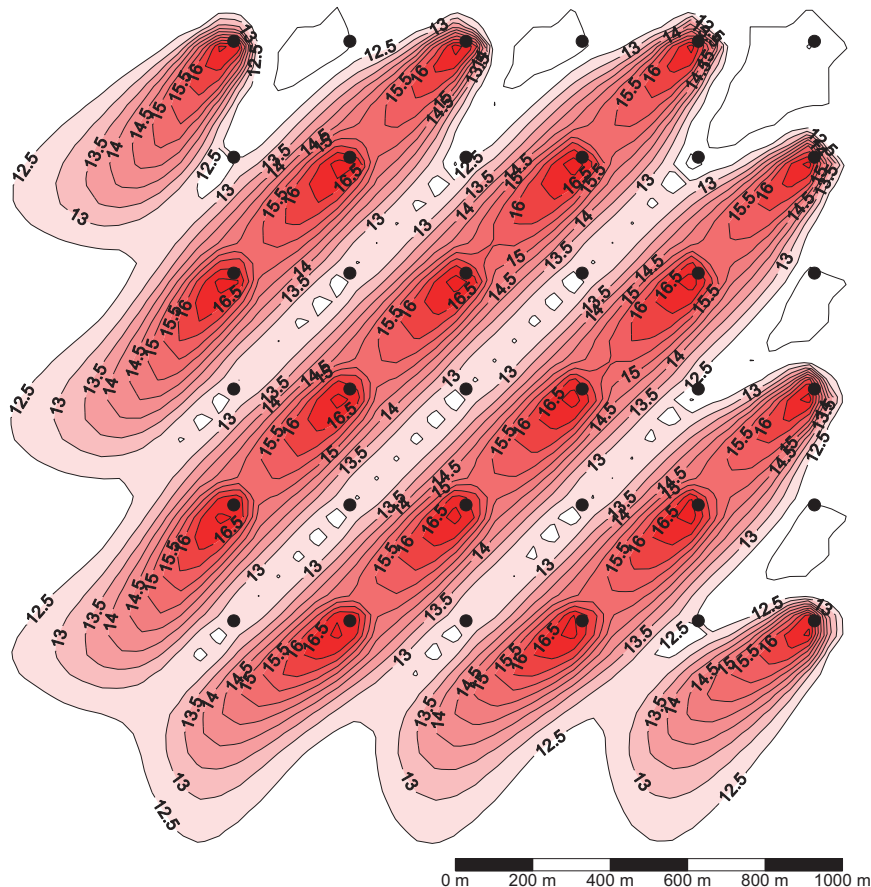
Figuur 46 Maximaal toelaatbare bebouingsdichtheid als functie van de duur van de onbalans. Aquiferdikte = 20 m.

6.3 Detailstudie en effecten grondwaterstroming op gebiedsniveau

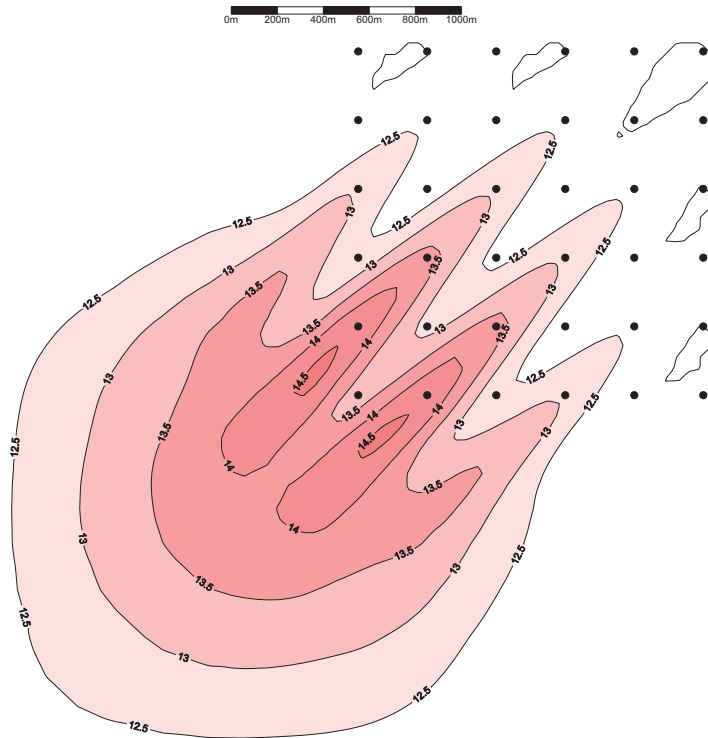
6.3.1 Analyse

In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van de thermische berekeningen weergegeven voor situaties met twee doubletten. Vooral bij grote stroomsnelheden van het grondwater ontstaan op de lange termijn aanzienlijke pluimen met warm grondwater (in geval van een warmteoverschot). De vraag is nu wat er gebeurt als in een gebied een groot aantal systemen gerealiseerd wordt. Krijgen de stroomafwaarts gelegen systemen dan last van de stroomopwaarts gelegen systemen? Figuur 47 en Figuur 48 tonen de berekende temperaturen na 30 jaar en na 130 jaar.

Uit de berekeningen blijkt dat de temperatuur in de koude bronnen in de doorgerekende situatie niet of nauwelijks wordt beïnvloed door de afstromende warmte. Dit opvallende resultaat kan worden verklaard door de stromingsrichting van het grondwater in combinatie met de positionering van de putten, waardoor de warme (en de koude) pluimen exact in elkaars verlengde liggen en de koude bronnen precies tussen deze warme pluimen liggen. Als de stromingsrichting in de praktijk afwijkt en/of de bronposities niet zo ideaal zijn als hier verondersteld, dan is de verwachting dat er meer beïnvloeding zal zijn. Dit zou dan betekenen dat de temperatuur in de koude bronnen oploopt, waardoor minder koelvermogen geleverd kan worden bij hetzelfde debiet (aangenomen dat de infiltratietemperatuur gelijk blijft).

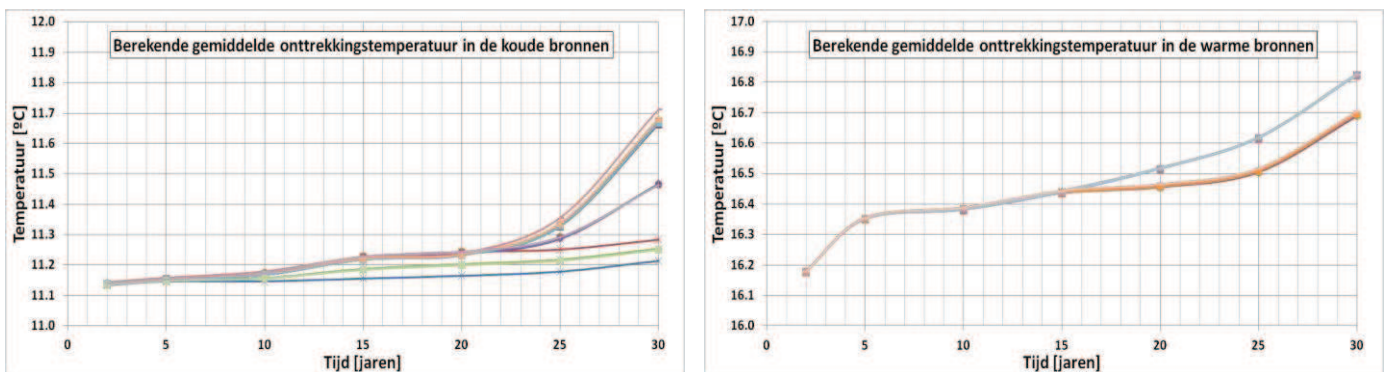


Figuur 47 Thermisch invloedsgebied aan het einde van de zomer na 30 jaar WKO bij een onbalans (warmteoverschot) en een stroomsnelheid van het grondwater van 50 m/jaar.



Figuur 48 Situatie 100 jaar na stopzetting van de WKO (moment van stopzetting is de situatie in Figuur 47).

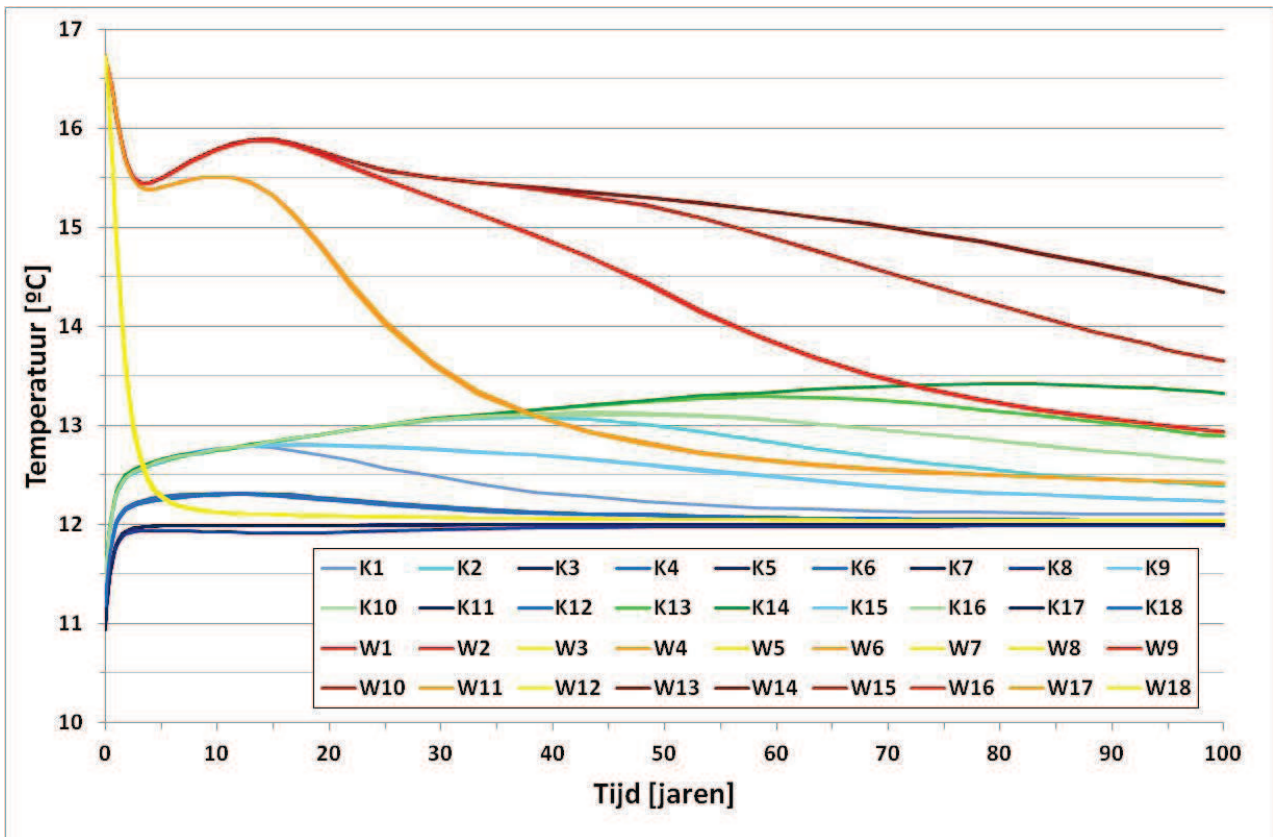
Ook in dit geval bereikt de temperatuur in de koude bronnen aan het einde van de zomer steeds de natuurlijke grondwatertemperatuur van 12 °C, doordat de koude telkens wordt uitgeput. Over de doorgerekende periode van 30 jaar is op het eerste gezicht geen duidelijke oplopende trend in de brontemperaturen te zien. In Figuur 49 is de gemiddelde temperatuur van het onttrokken water per put weergegeven voor zowel de koude bronnen als de warme bronnen. In de eerste 20 jaar is er nauwelijks invloed op de gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de koude bronnen (maximaal 0,1 °C verhoogd), maar na 25 jaar begint de gemiddelde onttrekkingstemperatuur in de meest stroomafwaarts gelegen koude bronnen duidelijk toe te nemen: ruim 0,3 °C in 5 jaar tijd. Ook bij de warme bronnen is na 25 jaar in alle putten een dergelijke trend te zien en in de meest stroomafwaarts gelegen putten is dat al duidelijk eerder het geval. Hoewel het hier gaat om enkele tienden van graden kan dit effect op de nog langere termijn verder toenemen.



Figuur 49 Berekening gemiddelde onttrekkingstemperatuur in alle 18 koude bronnen (links) en de 18 warme bronnen (rechts) gedurende 30 jaar WKO bij een energie onbalans en een stroomsnelheid van het grondwater van 50 meter per jaar.

Voor het temperatuurverloop geldt dezelfde kanttekening als voor de contouren, namelijk dat de conclusie waarschijnlijk verandert als de stromingsrichting in de praktijk afwijkt en/of de bronposities niet zo ideaal zijn als hier verondersteld.

Na 30 jaar worden de WKO-systemen stopgezet. In Figuur 48 zijn de berekende temperaturen in de ondergrond 100 jaar na stopzetting weergegeven. Figuur 50 toont het temperatuurverloop in de bronnen in de 100 jaar lange periode na stopzetting van het systeem. Uit de figuren blijkt dat de warmte na 100 jaar, ondanks de hoge stroomsnelheid van het grondwater, nog duidelijk zichtbaar is. De warmte wordt door de hoge stroomsnelheid weliswaar relatief snel verspreid over een groter bodemvolume, maar door de grote hoeveelheid warmte duurt het zeer lang voordat de effecten verdwijnen. Geconcludeerd wordt dat de temperatuur in de ondergrond zeer lang verhoogd zal blijven als in een groot gebied langdurig sprake is van een duidelijk warmteoverschot.



Figuur 50 Berekende temperaturen in alle koude en warme bronnen in de eerste 100 jaar na stopzetting van de WKO bij een onbalans en een stroomsnelheid van het grondwater van 50 meter per jaar.

6.3.2 Evaluatie

De gebiedsberekeningen tonen aan dat de temperatuur in een gebied steeds verder zal oplopen als sprake is van een langdurig en structureel warmteoverschot. Dit is logisch te verklaren uit het feit dat er steeds meer warmte wordt toegevoegd aan een beperkt bodemvolume. Zolang de jaarlijks toegevoegde hoeveelheid warmte groter is dan de hoeveelheid warmte die verdwijnt door warmtegeleiding naar boven- en onderliggende lagen en afstroming, zal de gemiddelde temperatuur in het gebied in de gebruikte bodemlaag oplopen. Als sprake is van een aanzienlijke grondwaterstroming zal de temperatuur vooral in de stroomafwaarts gelegen delen van het gebied worden beïnvloed.

De vraag is echter of een structureel warmteoverschot in een groot gebied realistisch is. In een gebied is namelijk meestal sprake van een variatie aan bebouwing en daardoor ook een variatie in de koude- en warmtevraag. Op basis van een analyse van 67 WKO-projecten (IF Technology, 2007) is een gemiddelde onbalans berekend van 10%, waarbij sprake is van een warmteoverschot (zie Tabel 20). De verschillen per gebruiksdoel zijn

echter groot. Bij de industrie is sprake van een groot warmteoverschot (+65%: gemiddelde van 5 systemen), terwijl in de woningbouw sprake is van een koudeoverschot (-34%: gemiddelde van 5 systemen). In stedelijk gebied zal utiliteit (+5%: gemiddelde van 56 systemen) en woningbouw (-34%) overheersen, waardoor in een gebied in veel gevallen sprake zal zijn van een netto koudeoverschot. Het hier doorgerekende gebiedsscenario gaat uit van een relatief groot warmteoverschot (+54%), wat op basis van de praktijkgegevens niet realistisch lijkt. In werkelijkheid mag worden verwacht dat de effecten daarom kleiner zullen zijn dan voor het hier doorgerekende gebiedsscenario.

Tabel 20 Gegevens over energiebalans op basis van analyse 67 WKO projecten (IF Technology, 2007 [9]).
 NB: Bij de functies agrarisch / industrie / woningbouw is het aantal projecten beperkt. Deze data geven een eerste indicatie.

gebruiksdoel	aantal projecten	warmtelevering (koude in de bodem) [MWh _t]	koudelevering (warmte in de bodem) [MWh _t]	energiebalans [%]
agrarisch	1	2.176	1.637	-14%
industrie	5	5.424	25.604	+65%
utiliteit	56	122.530	135.372	+5%
woningbouw	5	5.090	2.514	-34%
totaal	67	135.219	165.127	+10%

7 Autonome opwarming

7.1 Inleiding

De temperatuur in de ondergrond is afhankelijk van vele factoren. De meeste van deze factoren zijn stabiel in de tijd. Dit geldt bijvoorbeeld voor de warmteflux vanuit de kern van de aarde en de warmtecapaciteit van de bodemlagen. Veranderingen van de bodemtemperatuur treden vooral op door wijzigingen aan de oppervlakte, zoals veranderingen in de waterhuishouding (bijvoorbeeld inpoldering, waardoor zowel de oppervlaktetemperatuur als de grondwaterstroming verandert) en veranderingen in de oppervlaktetemperatuur (bijvoorbeeld door klimaatverandering of verstedelijking).

De temperatuur aan het aardoppervlak is een belangrijke randvoorwaarde voor de temperatuur in de ondergrond. Doordat voor de opwarming van de ondergrond veel warmte nodig is, reageert de ondergrond traag op temperatuurveranderingen. De dagelijkse temperatuurcyclus is daardoor alleen in de bovenste meter van de ondergrond merkbaar en de jaarlijkse temperatuurcyclus tot ongeveer 15 m diepte. Dieper dan 20 m (waar WKO plaatsvindt) zijn alleen de invloeden van langjarige temperatuurveranderingen merkbaar. Aangezien WKO-systemen vooral in stedelijk gebied worden gerealiseerd, concentreert dit onderzoek zich op de effecten die in stedelijke gebieden van belang zijn. Het gaat hierbij om de opwarming als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking (stedelijk warmte-eiland). In deze notitie is de opwarming van de ondergrond gekwantificeerd, die het gevolg is van deze processen. Hierbij is gebruikgemaakt van de voorlopige resultaten van het onderzoek dat is uitgevoerd in het kader van het onderzoeksproject Meer Met Bodemenergie (Floris en Drijver, 2011).

Vraagstelling energiebalans en autonome opwarming

- Hoe staan de gevolgen van afwijkingen in de energiebalans in verhouding tot de autonome opwarming als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking?
- Is de autonome opwarming zodanig dat de afwijking van de ondergrondse energiebalans bij WKO in een ander licht komen te staan?

7.2 Omvang opwarming

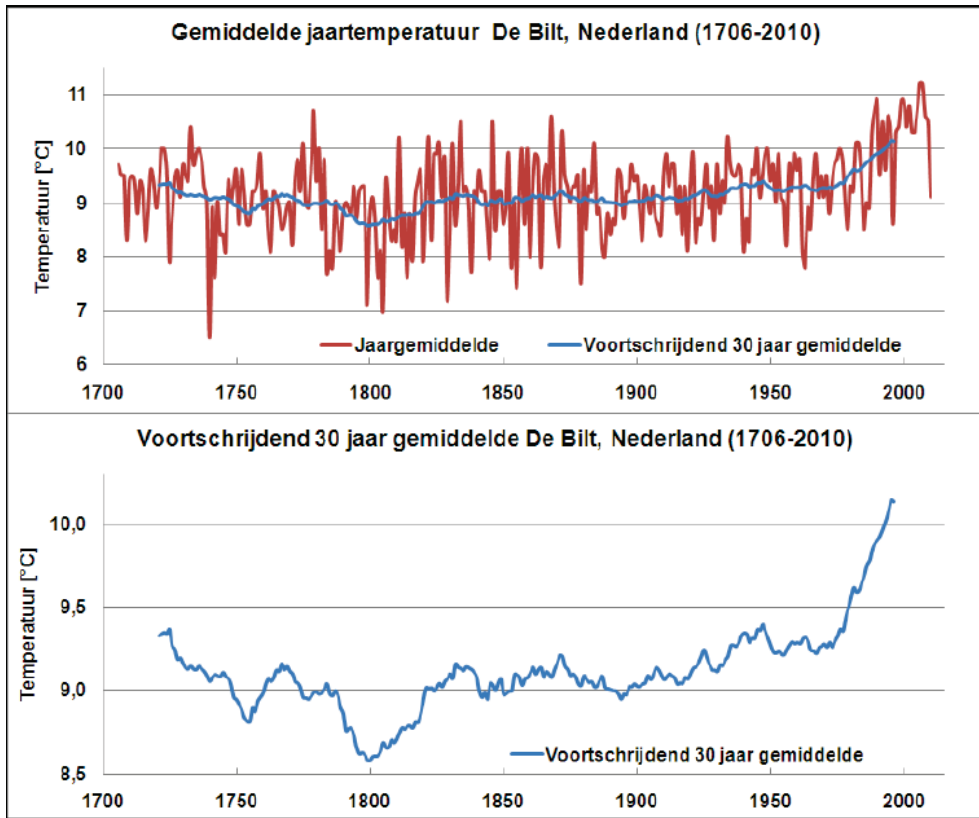
Om de opwarming van de ondergrond te kunnen kwantificeren, is allereerst informatie nodig over de omvang van de opwarming.

7.2.1 Klimaatverandering

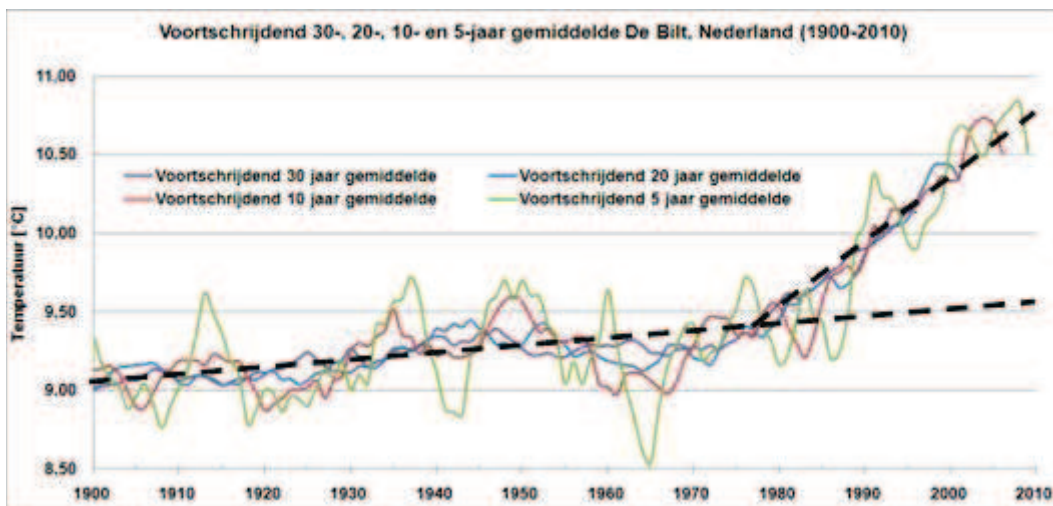
Van de klimaatveranderingen die in het verleden zijn opgetreden, zijn metingen beschikbaar. Figuur 51 toont de jaargemiddelde temperaturen voor De Bilt over de periode 1706 tot en met 2010 en het voortschrijdend dertigjaar gemiddelde daarvan. Globaal gezien is de langjarige gemiddelde temperatuur tot 1900 redelijk stabiel rond 9°C. De opwarming verloopt vanaf 1900 in eerste instantie relatief langzaam en versnelt vervolgens sterk in de laatste dertig à veertig jaar.

In Figuur 52 is ingezoomd op de periode vanaf 1900 en zijn naast het dertigjaar voortschrijdend gemiddelde ook voortschrijdende gemiddelden gepresenteerd voor kortere perioden (met als doel ook de trend in de laatste vijftien jaar in beeld te krijgen). In de figuur is met stippellijnen aangegeven hoe de temperatuurstijging is geschematiseerd in de berekeningen: één lineaire stijging van 1900-2010 (stijging van 0,5°C) en één van 1976-2010 (stijging van 1,2°C bovenop deze 0,5°C), waarmee de totale temperatuurstijging in de periode 1900-2010 uitkomt op 1,7°C. De totale opwarming door

klimaatverandering vanaf 1976 is dan 1,3 à 1,4°C, wat overeen komt met ongeveer 0,39°C per tien jaar.



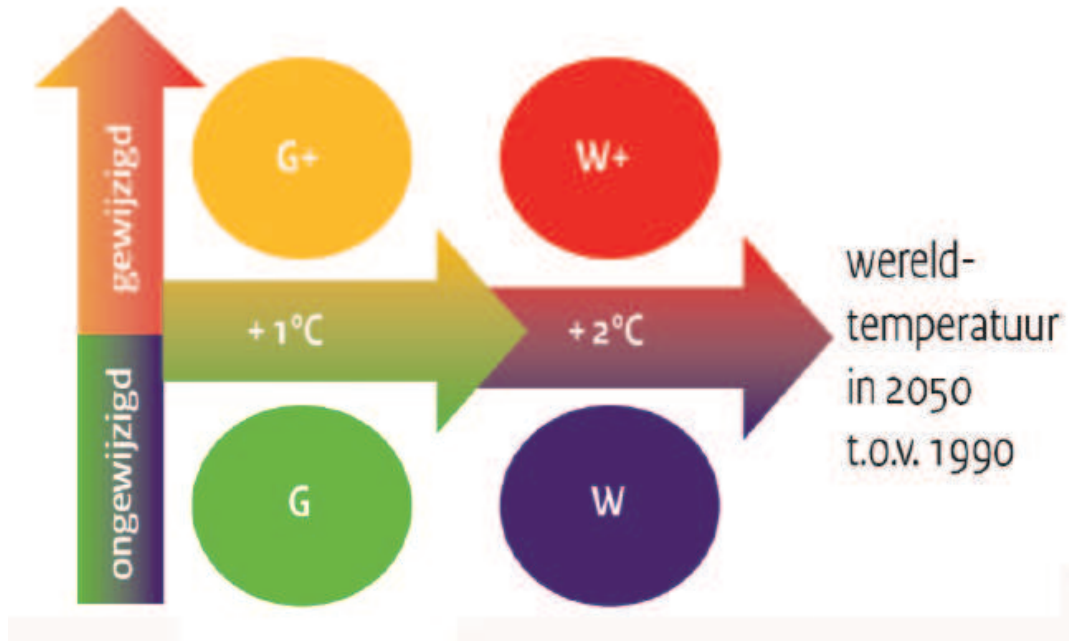
Figuur 51 Verloop van de gemiddelde jaartemperatuur in De Bilt en het voortschrijdend dertigjaar gemiddelde over de vijftien jaar voor en de vijftien jaar na het jaar waarvoor de gemiddelde temperatuur is bepaald (bron temperatuurdata: www.KNMI.nl; Labrijn, 1945).



Figuur 52 Voortschrijdende dertig-, twintig-, tien- en vijfjaar gemiddelden van de oppervlaktetemperatuur voor 1900-2010 (bron temperatuurdata: www.KNMI.nl; Labrijn, 1945). De stippellijnen geven de schematisatie weer die is gebruikt voor de berekeningen.

Voor de opwarming van de ondergrond is niet alleen van belang hoe de temperatuurstijging in het verleden is verlopen, maar ook of – en in welke mate – deze trend zich in de toekomst zal voortzetten. Hiervoor is gebruikgemaakt van de klimaatscenario's van het KNMI uit 2006, die voor 2050 uitgaan van een temperatuurstijging van 1 of 2°C (zie Figuur 53).

De prognose in 2006 was dat de gemiddelde temperatuur in 2050 (gemeten als gemiddelde over 2036-2065) 1 à 2°C hoger zou zijn dan in 2006. Dit komt overeen met een gemiddelde temperatuurstijging van 0,22 à 0,44°C per tien jaar. Aangezien de trendlijn over de periode 1976-2010 (0,39°C per tien jaar) binnen deze bandbreedte valt, is deze trend in dit onderzoek doorgetrokken naar 2040. De totale temperatuurstijging door klimaatverandering in 2040 ten opzichte van 1900 komt dan uit op 2,9°C.

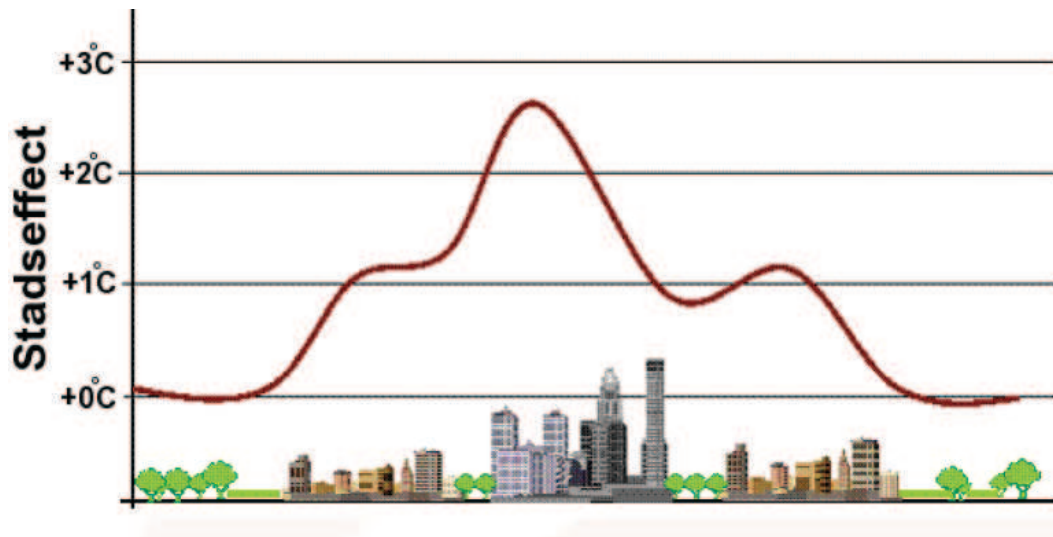


Figuur 53 Indeling van de vier KNMI'06 klimaatscenario's. De G-scenario's gaan uit van een temperatuurstijging van 1°C en de W-scenario's gaan uit van een temperatuurstijging van 2°C. In de G+/W+-scenario's veranderen ook de luchtstromingspatronen (KNMI, 2009; KNMI, 2006).

7.2.2 Verstedelijking

Verstedelijking treedt op door een toename van de bevolkingsdichtheid waardoor een stedelijk warmte-eiland of 'Urban Heat Island-effect' (UHI-effect) ontstaat. Dit fenomeen veroorzaakt gemiddeld een hogere temperatuur in stedelijk gebied dan in het omliggende niet-stedelijk gebied, zoals weergegeven in Figuur 54.

De grootte van het UHI-effect wordt op verschillende manieren gedefinieerd, waardoor de getallen niet 1 op 1 te vergelijken zijn. Het overgrote deel van het beschikbare onderzoek gaat uit van gemeten luchttemperaturen, waarbij vaak is gekeken naar het maximale verschil tussen de temperatuur in het stedelijke gebied en het omringende landelijke gebied. Dit maximale verschil is onder meer van belang voor aspecten die met de gezondheidszorg samenhangen. Zo is bijvoorbeeld bekend dat bij hoge temperaturen het aantal sterfgevallen ook stijgt (zie bijvoorbeeld Schwartz en Seppelt, 2009). Andere onderzoeken gaan uit van mobiele temperatuurmetingen die steeds op een bepaald tijdstip gedaan zijn. Daarnaast wordt niet alleen onderzoek gedaan naar de temperatuurverschillen nabij de grond (Canopy Layer Heat Island), maar ook op grotere hoogte in de atmosfeer (Boundary Layer Heat Island).



Figuur 54 Schematische weergave van het temperatuurverschil tussen de stad en het buitengebied (Bron: www.knmi.nl).

Voor dit onderzoek is de gemiddelde temperatuur van de oppervlakte van belang, omdat die doorwerkt in de temperatuur van de ondergrond. Hoewel een sterke correlatie wordt verwacht tussen de luchttemperatuur en de oppervlaktetemperatuur zijn deze waarschijnlijk niet overal gelijk. Oppervlaktetemperaturen kunnen in beeld worden gebracht met infraroodbeelden vanuit vliegtuigen of satellieten, maar dit zijn momentopnamen die niet of nauwelijks iets zeggen over jaargemiddelde waarden.

Over de jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur in stedelijk en niet-stedelijk gebied is geen informatie gevonden. Daarom is gebruikgemaakt van de bodemtemperatuurmetingen die door IF Technology zijn uitgevoerd om het UHI-effect in de oppervlaktetemperatuur in te schatten. Veel van deze metingen bevinden zich in stedelijk gebied of in gebieden waar nieuwbouw gepland is (tot dan toe onbebouwd). Het bepalen van het UHI-effect is daarbij gebaseerd op de verschillen op ongeveer 25 m diepte in de bodemtemperatuurmetingen: op deze diepte is namelijk zeker dat de seizoensfluctuaties geen rol meer spelen en is de demping van het effect (door de vertraagde doorwerking van de oppervlaktetemperatuur in de ondergrond) zo klein mogelijk. Voor een aantal steden was informatie beschikbaar, waarmee een inschatting van het UHI-effect kon worden gemaakt:

- Arnhem: maximaal 2°C ;
- Breda: maximaal 2°C;
- Den Haag: maximaal 3°C;
- Eindhoven: maximaal 2°C;
- Gouda: maximaal 1°C
- Groningen (buiten het centrum): maximaal 2°C;
- Lelystad: maximaal 1°C;
- Tilburg: maximaal 2°C;
- Utrecht: maximaal 3°C.

Uit deze inventarisatie volgt een UHI-effect in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 1 tot 3°C. In de grote steden is het UHI-effect groter dan in de kleinere steden. Ook voor het UHI-effect is een aanname nodig voor het verloop in de tijd (zowel voor het verleden als voor de toekomst), maar daarover is geen informatie beschikbaar.

Wel is informatie beschikbaar over de oorzaken: afname van het aandeel groen op de totale oppervlakte, toename van het aandeel verhard oppervlak (beide ook van invloed op de verdamping), warmteproductie door de mens en invloed van bebouwing op de ingaande en uitgaande straling. Toename van het effect heeft bovendien te maken met de groei van de omvang van de stad.

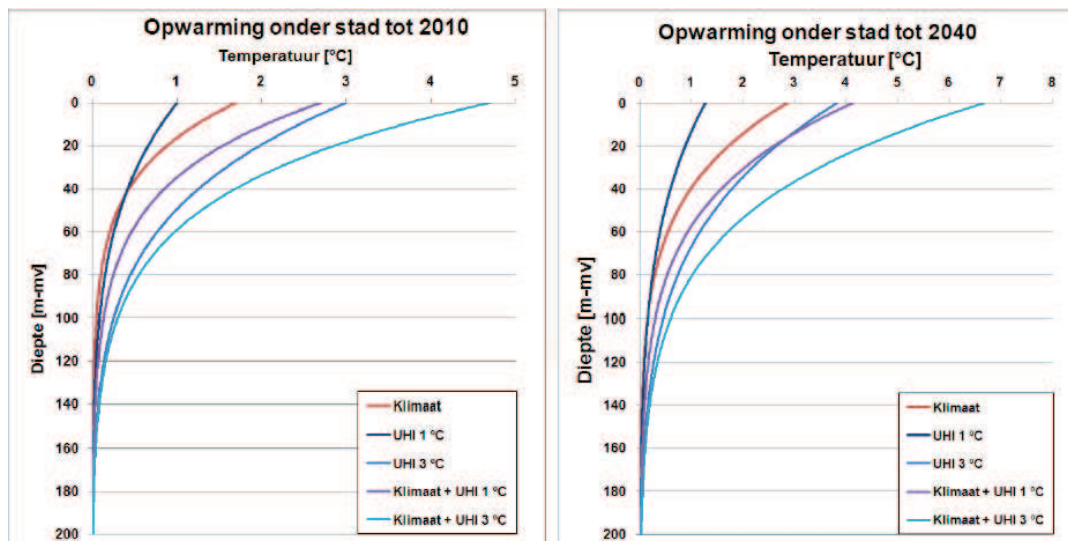
Veel van deze invloeden zijn niet of nauwelijks tijdsafhankelijk. Het energieverbruik door de mens en de groei van de omvang van de stad zijn in de loop van de tijd wel duidelijk veranderd. Het lijkt daarom niet logisch om hetzelfde verloop te kiezen als de klimaatverandering, met een sterke toename van het effect vanaf halverwege de jaren '70. Daarom is ervoor gekozen uit te gaan van een lineaire groei vanaf nul in 1900 tot 1 à 3°C in 2010. Naar de toekomst is aangenomen dat deze lineaire stijging zich voortzet. Tabel 21 toont de gekozen uitgangspunten voor de berekeningen.

Tabel 21 *Uitgangspunten berekeningen autonome opwarming*

Periode	Opwarming door klimaatverandering [°C/jaar]	UHI 1°C in 2010 [°C/jaar]	UHI 3°C in 2010 [°C/jaar]	Klimaatv. + UHI 1°C [°C/jaar]	Klimaatv. + UHI 3°C [°C/jaar]
1900-1975	0,0045	0,0091	0,0273	0,0136	0,0318
1976-2010	0,035	0,0091	0,0273	0,0479	0,0661
2010-2040	0,035	0,0091	0,0273	0,0479	0,0661
Totaal 1900-2010	1,7 °C	1,0 °C	3,0 °C	2,7 °C	4,7 °C
Totaal 1900-2040	2,86 °C	1,27 °C	3,82 °C	4,13 °C	6,68 °C

7.3 Gevolgen voor de bodemtemperatuur

Voor de berekeningen is gebruikgemaakt van de analytische vergelijking voor een lineair stijgende temperatuur aan de oppervlakte van Carslaw en Jaeger uit 1959 (Stolk, 2000). De berekening gaat uit van een oneindig dikke plaat waarvan de temperatuur aan de bovenzijde stijgt. Voor de bodemeigenschappen zijn in alle berekeningen vaste waarden gebruikt die representatief zijn voor de Nederlandse situatie. Voor de warmtecapaciteit is 2,4 MJ/(m³ °C) aangehouden en voor de warmtegeleidingscoëfficiënt 2,2 W/(m °C). Uitgangspunt voor de berekeningen zijn de kentallen uit Tabel 21, waarbij twee scenario's zijn doorgerekend voor het UHI-effect: één met een UHI-effect van 1°C in 2010 en één met een UHI-effect van 3°C in 2010.



Figuur 55 a (links) en b (rechts) Berekende toename van de bodemtemperatuur in stedelijk gebied van 1900-2010 (a) en 1900-2040 (b).

Daarnaast is onderscheid gemaakt in de opwarming die in het verleden is opgetreden (1900-2010: Figuur 55a) en die tot aan 2040 nog mag worden verwacht (1900-2040: Figuur 55b). In de figuren zijn de afzonderlijke effecten van klimaatverandering, de afzonderlijke effecten van het stedelijk warmte-eiland effect en de gezamenlijke effecten in beeld gebracht.

7.4 Vergelijking met WKO

7.4.1 Temperatuur

Afhankelijk van het gekozen scenario varieert de stijging van de oppervlaktetemperatuur tussen 1 en 7°C. De temperatuurstijging neemt snel af in de diepte en is op 150 m diepte te verwaarlozen. Bij WKO-systemen ligt het temperatuurverschil tussen het onttrokken en het geïnfilterde water in de praktijk op gemiddeld 4,3°C (IF Technology, 2009). Rekening houdend met enige temperatuurverliezen in de ondergrond zal het verschil tussen de gemiddelde infiltratietemperaturen in de warme en de koude bron ongeveer 5°C zijn.⁵ De temperatuur van de warme bron ligt dus ongeveer 2,5°C hoger dan de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Volgens de berekeningen is een autonome opwarming met 2,5°C mogelijk tot maximaal 40 m diepte (scenario voor 2040 met grootste opwarming). In veel gevallen bevinden WKO-systemen zich dieper dan deze 40 m en zullen de effecten van WKO groter zijn dan die van de autonome opwarming.

7.4.2 Energie

Voor de in Figuur 55 (a) en (b) getoonde opwarming van de ondergrond is door de hoge warmtecapaciteit van de ondergrond een grote hoeveelheid energie nodig. De hoeveelheid energie die aan de bodem is toegevoegd en in de toekomst nog wordt toegevoegd door de stijgende temperatuur aan de oppervlakte kan eenvoudig worden berekend (resultaten in Tabel 22) en vervolgens worden vergeleken met de energievraag van bebouwing aan de oppervlakte. Deze vergelijking is relevant voor WKO-systemen, aangezien die niet alleen kunnen worden gebruikt om energie in de bodem op te slaan, maar ook om energie aan de bodem te onttrekken. In het huidige beleid geldt voor open WKO-systemen een eis van energiebalans. Dat wil zeggen dat de hoeveelheid warmte die in een bepaalde (langjarige) periode aan de bodem wordt toegevoegd binnen bepaalde marges gelijk moet zijn aan de hoeveelheid warmte die in diezelfde periode aan de bodem wordt onttrokken.

Deze energiebalanseis heeft consequenties voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van WKO-systemen en staat daarom ter discussie. Het gegeven dat autonome opwarming van de ondergrond plaatsvindt, geeft aan dat ook bij een WKO met een perfecte energiebalans toch geen sprake is van een overall energiebalans (de bodem warmt immers op door klimaatverandering en verstedelijking). Dit suggereert dat WKO-systemen wellicht zelfs bewust in onbalans geopereerd zou kunnen worden om door netto warmte aan de bodem te onttrekken het effect van de autonome opwarming te compenseren. Het is dan wel van belang om inzicht te hebben in de verhoudingen tussen de warmte- en koudevraag van de gebouwen aan de oppervlakte (die met WKO kan worden geleverd) en de energie die de bodem opneemt als gevolg van de autonome opwarming.

Tabel 22 *Berekende hoeveelheid energie die aan de bodem is toegevoegd als gevolg van de opwarming door klimaatverandering en verstedelijking.*

Opwarming (klimaat+UHI)	1900-2010 kWh/m ²	2010-2040 kWh/m ²	1900-2040 kWh/m ²	1900-2010 kWh/m ² /jr	2010-2040 kWh/m ² /jr	1900-2040 kWh/m ² /jr
Klimaat	33	35	68	0,3	1,2	0,5
Klimaat +1°C	61	47	108	0,6	1,6	0,8
Klimaat +2°C	89,5	59,5	149	0,8	2,0	1,1
Klimaat +3°C	118	72	190	1,1	2,4	1,4

⁵ Bij een goed ontwerp dat ook na realisatie en adequaat beheer en onderhoud goed functioneert, kunnen grotere temperatuurverschillen bereikt worden. Voor dit hoofdstuk wordt uitgegaan van de gemiddelde huidige praktijk.

Tussenresultaten energiebalans en autonome opwarming

- Voor dikke aquifers (> 80 m) is de energievraag per m² footprint bijna een orde groter dan de opwarming door het klimaat en het UHI. Voor minder dikke aquifers (< 20 m) is de footprint groter en de energievraag aan de bodem is van dezelfde orde van grootte als de opwarming door het klimaat en het UHI. Dit is uiteraard alleen het gevolg bij een positieve netto energievraag. Bij opwarming van de bodem door afwijking in de energiebalans zullen beide effecten elkaar versterken.
- Bij een lage bebouwingsdichtheid (weinig footprints per hectare), dan zal de netto energievraag per m² bodem verder afnemen. Dit is van toepassing voor niet-stedelijke gebieden. De opwarming is dan enkel het gevolg van het klimaat (1,2 kWh/m² bodem).
- Afhankelijk van de plaatselijke bodemgesteldheid is het mogelijk dat de opwarming door het klimaat op een andere diepte plaats vindt dan de afkoeling/opwarming door afwijking in de energiebalans voor WKO.

7.4.3 Utiliteitsbouw

Tabel 23 Netto energievraag aan de bodem als gevolg van onbalans (vraag in kWh/m² footprint). Duur onbalans: twintig jaar. Aquiferdikte 80 m. Utiliteitsbouw.

Koudevraag (kWh/m ²)		5	10	25	50	80
Warmtevraag (kWh/m ²)						
	20	9,9	9,6	-6,4	-8,2	-8,9
	40	10,8	9,9	0,5	-6,4	-7,8
	60	11,2	10,4	9,2	-3,9	-6,6
	80	11,4	10,8	9,6	0,5	-5,3
	100	11,6	11,0	9,9	9,6	-3,6
	120	11,7	11,2	10,2	9,2	-1,0
	140	11,8	11,3	10,4	9,4	4,1

Tabel 24 Netto energievraag aan de bodem als gevolg van onbalans (vraag in kWh/m² footprint). Duur onbalans: twintig jaar. Aquiferdikte 20 m. Utiliteitsbouw

Koudevraag (kWh/m ²)		5	10	25	50	80
Warmtevraag (kWh/m ²)						
	20	2,5	2,4	-1,6	-2,1	-2,2
	40	2,7	2,5	0,1	-1,6	-1,9
	60	2,8	2,6	2,3	-1,0	-1,7
	80	2,8	2,7	2,4	0,1	-1,3
	100	2,9	2,7	2,5	2,4	-0,9
	120	2,9	2,8	2,5	2,3	-0,2
	140	2,9	2,8	2,6	2,3	1,0

In Tabel 23 en Tabel 24 is de analyse uit de gebiedsstudie vertaald naar een netto energievraag per m² footprint. Met netto wordt hier de onbalans bedoeld (warmte – koude). Door de grote footprint na twintig jaar blijft de netto energievraag per footprint beperkt.

In het kader van de vraagstelling van dit hoofdstuk wordt de netto energievraag vergeleken met het effect van de autonome opwarming (klimaat + UHI, maximaal 2,4 kWh/m² jaar vergeleken met de waarden uit Tabel 23 en Tabel 24). Voor dikke aquifers (> 80 m) is de energievraag per m² footprint bijna een orde groter dan de opwarming door het klimaat en het UHI. Voor minder dikke aquifers (< 20 m) is de footprint groter en de energievraag aan de bodem is van dezelfde orde van grootte als de opwarming door het klimaat en het UHI.

7.4.4 Woningbouw

Tabel 25 en Tabel 26 geven de energievraag per m² footprint voor de woningbouw, analoog aan de resultaten voor de utiliteitsbouw. De conclusies zijn vergelijkbaar met die voor utiliteitsbouw.

Tabel 25 Netto energievraag aan de bodem als gevolg van onbalans (vraag in kWh/m² footprint). Duur onbalans: twintig jaar. Aquiferdikte 80 m. Woningbouw.

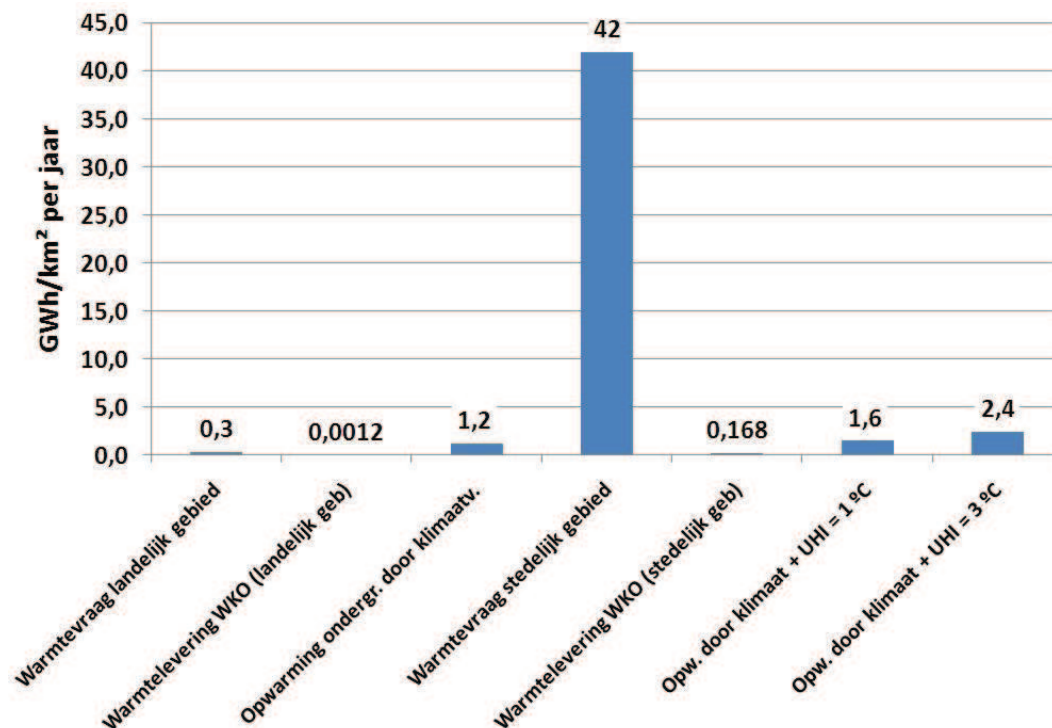
Koudevraag (kWh/woning)	800	1.350	1.900	2.450	3.000
Warmtevraag (kWh/woning)					
4.500	13,8	17,3	3,2	0,1	-1,3
6.000	12,5	16,9	12,8	3,8	1,0
7.500	12,1	13,9	21,5	10,9	4,2
9.000	11,9	12,9	15,6	29,1	9,9
10.500	11,9	12,4	13,9	17,9	24,4
12.000	11,8	12,2	13,1	15,2	20,7
13.500	11,8	12,0	12,7	13,9	16,6

Tabel 26 Netto energievraag aan de bodem als gevolg van onbalans (vraag in kWh/m² footprint). Duur onbalans: twintig jaar. Aquiferdikte 20 m. Woningbouw

Koudevraag (kWh/woning)	800	1.350	1.900	2.450	3.000
Warmtevraag (kWh/woning)					
4.500	3,4	4,3	0,8	0,0	-0,3
6.000	3,1	4,2	3,2	1,0	0,2
7.500	3,0	3,5	5,4	2,7	1,1
9.000	3,0	3,2	3,9	7,3	2,5
10.500	3,0	3,1	3,5	4,5	6,1
12.000	3,0	3,0	3,3	3,8	5,2
13.500	3,0	3,0	3,2	3,5	4,2

7.5 Toepassingsgraad WKO

Bovenstaande analyse geeft de netto energievraag per m² footprint en deze wordt vergeleken met het effect van autonome opwarming. Impliciete vooronderstelling daarbij is dat er sprake is van toepassing van WKO bij 100% van de gebouwen. Dit is in de huidige situatie niet het geval. Momenteel wordt in ongeveer 0,4 % van de warmtelevering in gebouwen ingevuld door WKO (CBS 2010). Figuur 56 geeft een vergelijking van de orde van groottes van opwarming en warmtelevering door WKO bij de huidige toepassingsgraad.



Figuur 56 Vergelijking opwarming door klimaat, Urban Heat Island en de warmtelevering door WKO

7.6 Literatuur autonome opwarming

Floris, A. en Drijver, B.C., 2011. Meer Met Bodemenergie, Rapport 8 - Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur. In voorbereiding.

IF Technology, 2009. Besparingskentallen koude- en warmteopslag - Herziening factsheet koude- en warmteopslag 2009. Onderzoek in opdracht van SenterNovem, kenmerk 3/56280/MaK.

KNMI. (2006). *Klimaat in de 21e eeuw, vier scenario's voor Nederland*. De Bilt.

KNMI. (2009). *Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's*. De Bilt: Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink.

Schwartz, N. en Seppelt, R., 2009. Analyzing vulnerability of european cities resulting from Urban Heat Island. Fifth Urban Research Symposium 2009.

Stolk, P., 2000. Analyse van temperatuurmetingen in de Nederlandse ondergrond (20-300 m beneden maaiveld) in relatie tot hydrologische en meteorologische omstandigheden in heden en verleden. IF Technology/Vrije Universiteit. Arnhem en Amsterdam.

8 Evaluatie en opties (alternatieve) criteria voor WKO

Dit hoofdstuk geeft een samenvattende evaluatie van de energiebalanscriteria zoals geformuleerd in het concept van de nieuwe regelgeving uit paragraaf 3.3 ('AmvB 2013').

Er wordt geëvalueerd of de formulering van de criteria in 'AmvB 2013' voldoet aan de doelen die bereikt dienen te worden (kader criteria WKO uit paragraaf 3.4). Daarna volgt een groslijst met alternatieve criteria. Tot slot volgt een aanbeveling in de vorm van een stappenplan om tot verdere uitwerking te komen.

8.1 Evaluatie criteria 'AmvB 2013'

Figuur 57 geeft de samenvatting en samenhang van de invloedsfactoren en effecten die geanalyseerd zijn in de vorige hoofdstukken. Ze worden tevens in verband gebracht met de doelen waaraan de criteria rondom de energiebalans dienen bij te dragen (kader criteria WKO uit paragraaf 3.4). Per deelaspect volgt hier een samenvatting van de conclusies uit de hoofdstukken 4, 5, 6.

8.1.1 Energievraag, (on)balans en correctie hiervan

De warmte- en koudevraag van gebouwen varieert sterk en is zelden op natuurlijke wijze in balans. Het gebouwgebruik is hierbij een dominante factor in de onzekerheid in de werkelijk optredende energiestromen, naast de invloed van het klimaat. Hierbij is dan het uitgangspunt al dat de installatie goed functioneert.

Er is correctie van de warmte- en koudevraag aan de bodem noodzakelijk. Dit kan plaatsvinden door inzet van regeneratie of door het aandeel van de WKO aan de energielevering te variëren. Dit vergt zogenoemde bivalente systemen met een piekvoorziening. Door inzet van de piekvoorziening neemt de energiebesparing door toepassing van WKO sterk af, sterker dan bij inzet van regeneratievoorzieningen. Tegelijkertijd is dit een flexibele en modulair uitbreidbare oplossing voor correctie van de energiebalans, dit in tegenstelling tot de inzet van regeneratievoorzieningen.

Door de huidige cumulatieve formulering van het energiebalanscriterium worden er (te) hoge eisen gesteld aan de correctie van de (on)balans. Hierdoor is het te verwachten dat piekvoorzieningen vaker worden ingezet en de energiebesparing onder druk komt te staan. Doordat piekvoorzieningen groter gedimensioneerd dienen te worden, komt ook het financieel rendement onder druk te staan.

Hier komt bij dat het 'mikken op de nullijn' (te) hoge eisen stelt aan het beheer van installatie.

8.1.2 Energiebalans en ondergronds ruimtebeslag

8.1.2.1 Ruimtebeslag tijdens exploitatiefase

Uit de vergelijking van een balans en een onbalanssituatie is gebleken dat de energiebalans slechts één van de factoren is die bijdraagt aan het beperken van het ondergronds ruimtebeslag (tijdens exploitatie).

De vergelijking maakt duidelijk dat de grootte van het thermisch invloedsgebied zowel door de mate van energie(on)balans als door de snelheid van de grondwaterstroming wordt bepaald. Bij lage stroomsnelheden is de mate van energie(on)balans de meest bepalende factor. Bij hoge stroomsnelheden is de grondwaterstroming bepalend voor de grootte van de footprint: bij 30 en bij 50 meter per jaar is het verschil in oppervlakte tussen de footprint beperkt.

De energiebalans is daarom een beperkt middel om het ondergrondse ruimtebeslag te sturen.

8.1.2.2 Ruimtebeslag op lange termijn

Voor de lange termijn geldt dat bij grote onbalans de warmte of koude langer in de bodem aanwezig blijft. Ook hier is het zo dat bij hogere waarden van de grondwaterstroming de verschillen in 'overblijvende footprint' minder worden tussen 'balans' en 'onbalans'.

8.1.3 Energiebalans en dichtbebouwde gebieden

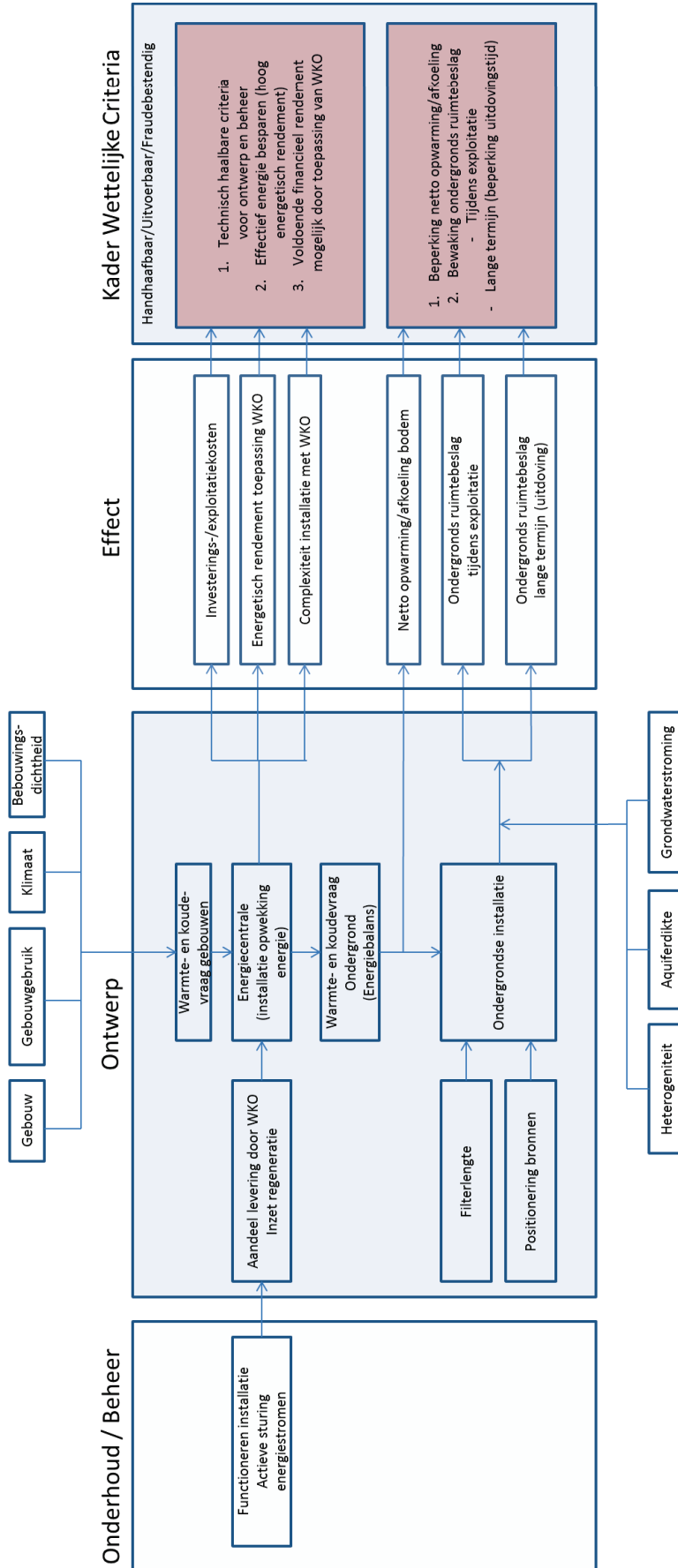
In dichtbebouwde gebieden is gebleken dat het ondergrondse ruimtebeslag een knelpunt kan vormen voor het voorkomen van interferentie. De factoren die hier aan bijdragen zijn:

1. beperkte aquiferdiktes;
2. toepassing van WKO bij 100% van de gebouwen;
3. eenzijdige samenstelling van het bebouwingstype (hetzelfde type onbalans).

Het kan zinvol zijn om in dichtbebouwde gebieden met een Masterplan te werken, waarin afwijkingen van het standaardvoorschrift worden toegestaan (zie paragraaf 3.3).

Als door sommatie van alle energiestromen aan het voorschrift voor de balans wordt voldaan, dan zal het bezwaar van een lange uitdovingstijd niet meer van toepassing zijn. De mogelijke onderlinge interferentie van de WKO-systemen is hiermee nog niet in beeld. Op dit punt dient de regelgeving verder ontwikkeld te worden.

Er is geen eenduidig verband gevonden tussen de duur van de onbalans, de omvang van de onbalans in % en de optredende grens van de bebouwingsdichtheid. De omvang van warmte- en koudevraag in absolute zin is hier te sterk als bepalende factor voor het ondergrondse ruimtegebruik.



Figuur 57 Samenhang invloedsfactoren, uitgangspunten en criteria rondom WKO

8.2 Zijn er beperkende criteria noodzakelijk?

Uit de analyse is gebleken dat beoogde formulering met betrekking tot de energiebalans conform 'AmvB 2013' een aantal zaken van de gestelde doelen onder druk zetten (energiebesparing, financieel rendement, technische haalbaarheid). Men zou zich dan kunnen afvragen of beperkende criteria voor de ondergrondse aspecten eigenlijk wel noodzakelijk zijn. Dat is zeker het geval.

Er is aangegeven dat er in dichtbebouwde gebieden onder bepaalde condities noodzaak is het ondergrondse ruimtegebruik te beperken of in elk geval af te stemmen in een Masterplan. De noodzaak van criteria rond WKO blijkt verder uit de lange uitdovingstijd bij onbalans in combinatie met lage grondwatersnelheden (ruimtebeslag lange termijn).

Voor gebieden met een lage bebouwingsdichtheid wordt de noodzaak voor beperking van het ondergronds ruimtegebruik niet zozeer ingegeven door interferentie tussen WKO-systemen, als wel door interferentie met andere functies van bodemgebruik (bijvoorbeeld drinkwater).

Vervolgens kan men zich afvragen of het zinvol is om één uniform criterium te ontwikkelen. De resultaten blijken sterk afhankelijk te zijn van de lokale situatie (grondwatersnelheid, aquiferdikte). Differentiatie van criteria lijkt daarom op z'n plaats.

De energiebalans blijkt als sturingsmiddel te beperkt te zijn om alle gestelde doelen te bereiken. Er is daarom een groslijst opgesteld met alternatieve criteria.

8.3 Groslijst alternatieve criteria

De groslijst is verder geordend naar de doelen die bereikt dienen te worden. Er zijn drie groepen van oplossingen opgesteld.

1. Balans als sturingsmiddel.
 - a. De focus ligt hierbij op het beperken van netto opwarming/afkoeling.
2. Ruimtegebruik als sturingsmiddel.
 - a. De focus ligt hierbij op het beperken van het ondergronds ruimtegebruik.
3. Watervolumes met aanvullende eisen als sturingsmiddel.
 - a. Het ondergronds ruimtegebruik wordt hiermee impliciet gereguleerd, door aanvullende eisen te stellen kan onder andere ook het effectief energie besparen met WKO bevorderd worden.

Per optie volgt een korte toelichting plus enkele evaluerende opmerkingen. De opties vragen verdere uitwerking om tot Handhaafbare, Uitvoerbare en Fraudebestendige criteria te komen (HUF-proof).

8.3.1 Balans als sturingsmiddel

Ondanks de beperkingen in de huidige formulering is de energiebalans geschikt als maat voor beperking van de netto opwarming of afkoeling. Er zijn daarom alternatieven voor de huidige formulering opgesteld. Er worden hier verschillende opties gepresenteerd voor de norm waarop de toelaatbare energiebalans zou kunnen worden beoordeeld.

8.3.1.1 Norm op basis van maximum onbalans in % + beperking duur

Er wordt hier een maximum aan de onbalans gesteld door het percentage onbalans te beperken, in combinatie met de duur van de onbalans.

Deze vorm van regulering is jarenlang toegepast, zij het niet op de cumulatieve energiebalans, maar op de jaarlijkse energiebalans. Zoals geconcludeerd in het voorgaande is het percentage geen goede (uniforme) maat voor beperking van het ondergronds ruimtegebruik (zie Figuur 38). De absolute energievraag is te sterk van invloed op de footprint. Zeker in combinatie met de tijdsduur dat deze onbalans optreedt, is er geen goede uniforme formulering mogelijk.

8.3.1.2 Norm op basis van maximum onbalans in GJ

De onbalans kan ook geformuleerd worden in absolute hoeveelheden energie (zie ook Figuur 10 tot en met Figuur 12). De absolute hoeveelheid is ook beter te relateren aan het

ondergrondse ruimtegebruik via de verplaatste waterhoeveelheden en het temperatuurverschil (zie bijlage I.ii). Dit is echter alleen het geval bij lage grondwatersnelheden.

De vraag bij dit criterium is: wat is een goede maat voor de toelaatbare hoeveelheid onbalans in GJ? Dit vraagt nadere uitwerking, mogelijk met gebruikmaking van het ondergrondse ruimtegebruik of verplaatste waterhoeveelheden (zie paragraaf 8.3.2 en 8.3.3).

8.3.1.3 Norm: geen onbalans, laagste vraag leidend, fossiel aanvullen

In dit geval wordt er geen onbalans toegestaan, maar gesteld dat de laagste vraag leidend is. Onder de laagste vraag wordt dan de warmte- of de koudevraag verstaan. De hoogste vraag zou dan deels geleverd moeten worden met WKO (gelijk aan de laagste vraag) en aangevuld door een ketel of een koelmachine (fossiel aanvullen).

Inzet van ketels en koelmachines is één van de strategieën om te voldoen aan de energiebalans (zie paragraaf 4.2.1). Door één van de strategieën uit te sluiten, heeft de ontwerper nog minder vrijheid om aan het criterium te voldoen dan in de huidige regelgeving het geval is. Omdat er geen eenduidig criterium is voor wat maatgevend is voor 'de laagste vraag', zal dit criterium bovendien leiden tot een grote inzet van fossiel (minimalisering aandeel WKO Figuur 57). Dit zet de energiebesparing verder onder druk dan in 'AmvB 2013'.

8.3.1.4 Norm: geen onbalans, hoogste vraag leidend (regenereren)

Hierbij is de hoogste vraag leidend (maximalisering aandeel WKO Figuur 57). Er is geen onbalans toegestaan. De balans wordt dan gereguleerd met extra regeneratie. Deze strategie zet de energiebesparing minder onder druk dan fossiel aanvullen (zie Tabel 5 en Tabel 6). Wat maatgevend is voor de hoogste vraag is moeilijk eenduidig te definiëren. Dit plaatst ontwerpers voor een complex vraagstuk met betrekking tot (over)dimensionering van de regeneratievoorziening.

8.3.1.5 Norm: de jaarlijkse balans 'door nul' in plaats van de cumulatieve balans

Het energiebalanscriterium in 'AmvB 2013' is cumulatief geformuleerd (energie toegevoerd aan bodem vanaf datum van ingebruikneming). Eens in de drie of vijf jaar dient de balans 'door nul' te gaan.

Het is echter ook mogelijk te kiezen voor een energiebalans per kalenderjaar. Daarvan kan men eisen dat deze eens in de vijf jaar van teken wisselt (van warmteoverschot naar koudeoverschot of vice versa, zie Tabel 27).

Tabel 27 Wijze van evaluatie van de energiebalans

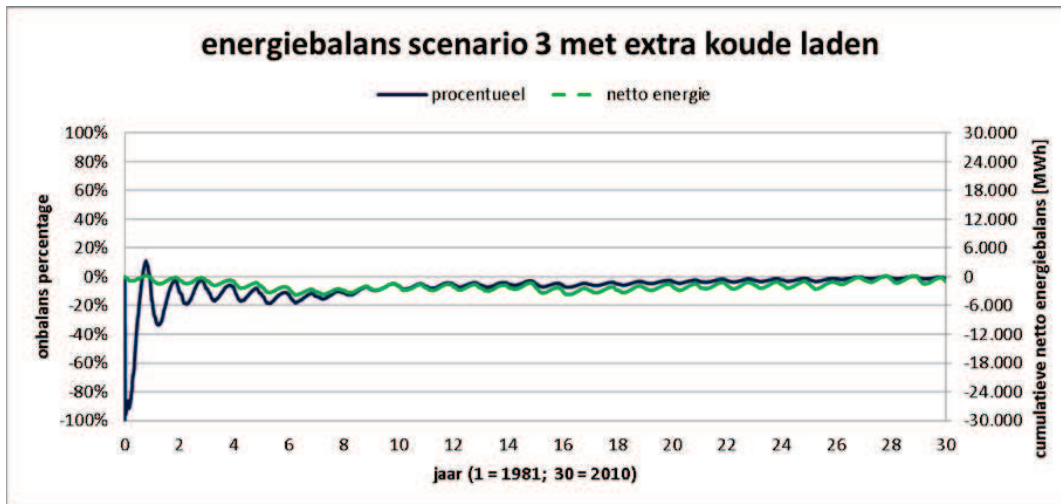
Wijze van formuleren	Definitie balans	Criterium
Cumulatieve balans	$E_{\text{warmte}} - E_{\text{koude}}$ waarbij E_{koude} is de totale hoeveelheid koude die aan de bodem wordt toegevoerd sinds de datum van ingebruikneming. E_{warmte} is de totale hoeveelheid warmte die aan de bodem wordt toegevoerd sinds de datum van ingebruikneming.	Eenmaal in een periode van 5 jaar is $E_{\text{warmte}} = E_{\text{koude}}$
Energiebalans per kalenderjaar	$E_{\text{warmte, jaar 1}} - E_{\text{koude, jaar 1}}$ $E_{\text{warmte, jaar 2}} - E_{\text{koude, jaar 2}}$ $E_{\text{warmte, jaar 3}} - E_{\text{koude, jaar 3}}$ $E_{\text{warmte, jaar 4}} - E_{\text{koude, jaar 4}}$ $E_{\text{warmte, jaar 5}} - E_{\text{koude, jaar 5}}$	Eens in de 5 jaar wisselt de balans van positief naar negatief of andersom.

Dit biedt meer flexibiliteit voor de ontwerper en beheerder. Ter vergelijking zijn in Figuur 58 en Figuur 59 de resultaten van scenario 3 met 100% onbalanscorrectie opgenomen voor respectievelijk de cumulatieve formulering en de formulering van de balans op jaarbasis. Zoals geanalyseerd gaat bij de cumulatieve formulering de balans een tijd lang 'net-niet-

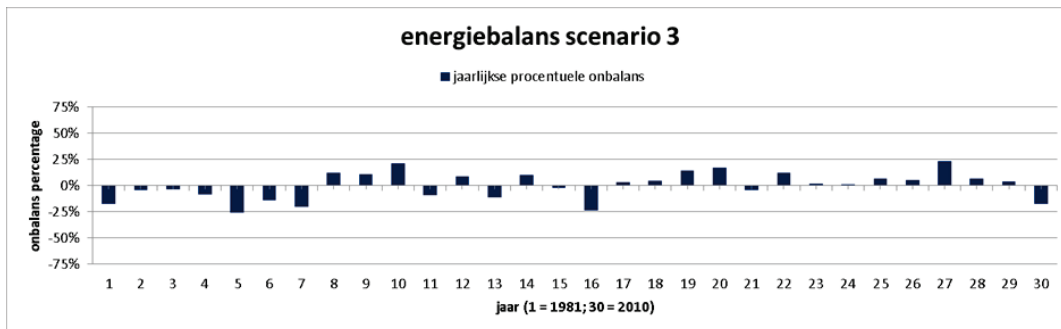
door-nul' terwijl er over dertig jaar geen sprake is van onbalans. De jaarlijkse balans wisselt vaker van een koudeoverschot naar een warmteoverschot en biedt daarom wel een beperking van de netto afkoeling (of opwarming). De eisen aan de ontwerper en beheerder zijn minder hoog dan bij de cumulatieve formulering van de balans. De vraag 'hoe vaak van teken wisselen' voor een 'HUF-proof criterium' vraagt nadere uitwerking.

De energiebesparing kan blijvend onder druk staan, ook bij een beoordeling op jaarlijkse balans. Het is denkbaar dat men tijdelijk de bijdrage van de WKO op nul zet om te voldoen aan het criterium.

Ook bij dit criterium is de beperking van het ondergrondse ruimtegebruik beperkt stuurbaar.



Figuur 58 Cumulatieve formulering energiebalans (scenario 3 met 100% onbalanscorrectie)



Figuur 59 Verloop procentuele en absolute onbalans per kalenderjaar

8.3.2 Ruimtegebruik als sturingsmiddel

In deze opties wordt het ondergronds ruimtegebruik zelf als sturingsmiddel gebruikt. De vergunninghouder krijgt een concessie voor een aantal m^2 ondergrond dat gebruikt kan worden voor toepassing van WKO. Het is dan aan de ontwerper en beheerder om te zorgen dat het ondergronds ruimtebeslag van de WKO binnen de toegekende grenzen valt. De ontwerpers hebben dan meerdere opties om te komen tot één doel, namelijk het beperken van het ondergronds ruimtegebruik. Energiebalans is hierbij één van de middelen die de ontwerper kan inzetten, naast andere opties zoals reductie van de warmte- en de koudevraag.

De vraag bij dit criterium is wat een norm is voor het aantal toegestane m^2 ondergronds ruimtegebruik.

8.3.2.1 Norm op basis van m^2 gebouw en gebouwfunctie

In dit geval wordt het aantal toegestane aantal m^2 gerelateerd aan het gebouwoppervlak en de gebouwfunctie, naast de parameters aquiferdikte en grondwaterstroming.

8.3.2.2 Norm op basis van de m² beschikbare ruimte

Hierbij wordt uitgegaan van de beschikbare m² meters. In gebieden met een lage bebouwingsdichtheid kan men, rekening houdend met andere bodemfuncties, veel m² ter beschikking stellen. In dichtbebouwde gebieden zal de WKO-ontwerper genoeg moeten nemen met de ruimte die beschikbaar is. Bij 100% toepassing van WKO voor alle gebouwen zal de beschikbare ruimte snel afnemen, bij een lagere toepassingsgraad komt er automatisch meer ruimte ter beschikking, ook al is er sprake van een hoge bebouwingsdichtheid.

8.3.2.3 Norm op basis van geogste energiehoeveelheden

In deze optie wordt het aantal toegestane m² gerelateerd aan de energiehoeveelheid die 'geogst' wordt. De totale onttrokken hoeveelheid energie gedeeld door het aantal m² ruimtegebruik moet dan voldoen aan een bepaald minimum. Dit stimuleert het doelmatig gebruik van de m² ondergrond die in beslag genomen worden. De behaalde energiebesparing in een zeker gebied kan zodoende gemaximaliseerd worden. Nadeel kan wel zijn dat de ondergrondse ruimte vol is voordat alle gebouwen zijn aangesloten. Ook hier geldt dus (net als in het huidige beleid) "wie het eerst komt, die het eerst pompt". Als de energiebesparing het doel is, dan hoeft dat niet erg te zijn: het belangrijkste is dan dat de potentiële energiebesparing, die met de ondergrondse ruimte kan worden behaald, ook daadwerkelijk wordt gerealiseerd.

8.3.2.4 Opties voor toetsing

De vraag bij deze opties is verder hoe het ruimtegebruik getoetst kan worden. Het ruimtegebruik is niet direct meetbaar en is van diverse bodemparameters afhankelijk, naast de energiestromen. Het gaat bijvoorbeeld om grondwaterstroming, aquiferdikte, heterogeniteit.

Een optie voor toetsing en handhaving is een toepassing van een normberekening in gestandaardiseerde software. Men kan dit vergelijken met de Energieprestatieberekening voor gebouwen, waar ook sprake is van een complexe samenhang van invloedsfactoren. De rekenmethode wordt daar ook genormeerd en uitgerekend met gestandaardiseerde software.

De genormeerde berekening zou gepaard kunnen gaan met genormeerde input. Deze kan bestaan uit meetbare grootheden (waterhoeveelheden en temperatuurverschillen), aangevuld met locatie-specifieke gegevens met betrekking tot de bodemparameters grondwaterstroming en aquiferdikte.

8.3.3 Watervolumes en met aanvullende eisen als sturingsmiddel

Deze opties zijn gebaseerd op een maximaal toelaatbaar volume waterverplaatsing. Waterverplaatsing is een goede indicatie voor het ondergronds ruimtebeslag, in elk geval bij lage grondwatersnelheden. Om ook andere doelen van criteria rond WKO te bereiken, worden aanvullende eisen gesteld.

8.3.3.1 Norm voor waterverplaatsing

De vraag bij de watervolumes is ook hier: wat is een objectieve maat voor de toelaatbare waterverplaatsing? Analoog aan het ruimtebeslag kan hier gedacht worden aan een normberekening op basis van:

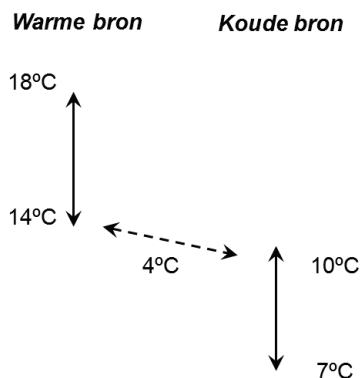
- 1 de gebouwfunctie en het aantal m² vloeroppervlak;
- 2 de aquiferdikte en de grondwaterstroming.

Deze norm draagt dus vooral bij aan het beperken van het ruimtegebruik. Door extra eisen te stellen, kan men ook andere aspecten reguleren.

8.3.3.2 Aanvullende eisen

- 1 Eis injectietemperaturen.
 - a Met deze eis kan men de efficiency van de toepassing van WKO mede reguleren. Er kan voorkomen worden dat er nodeloos water rondgepompt wordt met onnodig ruimtebeslag als gevolg. Het ondergronds ruimtebeslag wordt hiermee gekoppeld

- aan effectief (energetisch) gebruik van het grondwater. Door regulering van de injectietemperaturen reguleert men impliciet ook de netto opwarming/afkoeling.
- 2 Eis temperatuurverschil.
 - a Dit lijkt sterk op de vorige variant, met dien verstande dat er geen absolute niveaus worden vastgelegd. De eis van een temperatuurverschil gekoppeld aan een m³ waterverplaatsing is een vorm van een rendementseis (GJ onttrokken aan 1 m³ water). Fysisch gezien is het product van een waterverplaatsing en een temperatuurverschil gelijk aan een energiehoeveelheid. Door de energiehoeveelheden voor beide pomprichtingen aan elkaar te relateren, ontstaat er weer een criterium voor energiebalans.
 - 3 Eis rendement.
 - a De eis voor een rendement kan uitgebreid worden door ook de bovengrondse installatie (energiecentrale) bij het rendement te betrekken.
 - 4 Eis temperatuurrange.
 - a Deze eis combineert de opties uit 1 en 2 door voor de injectietemperaturen een bandbreedte te eisen. Impliciet ontstaat hier ook een bandbreedte voor het temperatuurverschil (zie Figuur 60). Door de eisen voor de temperatuurrange ontstaat ook een stimulans voor het voorkomen van interne kortsluiting tussen bronnen.



Figuur 60 Regulering van de bandbreedte van toegestane brontemperaturen (N.B.: voorbeeldgetallen)

- 5 Eis maximale bronafstand
 - a Door de bronafstand te reguleren naast de verplaatste waterhoeveelheid dwingt men ontwerpers impliciet ook de netto opwarming/afkoeling te beperken. In verband met het voorkomen van interne kortsluiting tussen de bronnen zal men de energieonbalans moeten beperken. De ontwerper heeft in deze optie meer vrijheid om dat te realiseren dan bij een expliciete eis aan de energiebalans.

8.3.3.3 Opties voor toetsing bij waterverplaatsing met aanvullende eisen

De bovengenoemde eisen zijn relatief eenvoudig te toetsen, omdat ze op meetbare grootheden zijn gebaseerd (waterverplaatsingen, temperaturen en bronafstanden). Bij een uitgebreidere rendementseis kan de complexiteit van de toetsbaarheid snel toenemen.

8.3.4 Samenvatting eerste beoordeling van de alternatieve criteria

Tabel 28 Globale beoordeling opties voor criteria toepassing WKO

		Beperking netto	Beperking ondergronds	Beperking Uitdovings- tijd	Bevorderen Effectief
		opwarming	ruimtebeslag		energiebesparen
		afkoeling	(exploitatie)	Ruimtebeslag LT	(hoog rendement)
HOOFDLIJN					
Balans					
	max. % onbalans + periode	+	-	+/-	+/-
	max. GJ onbalans	+	+/-	+/-	+/-
	laagste vraag leidend (fossiel aanvullen)	++	+	++	--
	hoogste vraag leidend (regenereren)	++	-	+	-
	Jaarlijkse balans i.p.v. cumulatief + elke 5 jaar 0	+	-	+/-	-
Ruimtegebruik					
	Concessie o.b.v. m2 gebouw en gebouwfunctie	-	++	+/-	-
	Concessie o.b.v. m2 beschikbare ruimte	-	++	+/-	-
	Concessie o.b.v. energie geoogst	-	++	+/-	+
Waterverplaatsing					
	Eis injectietemperatuur	+/-	+/-	-	+/-
	Eis temperatuurverschil	+/-	+/-	+/-	++
	Eis rendement	-	+/-	-	++
	Eis temperatuurrange	+/-	+/-	+/-	++
	Eis maximale bronafstand	+	+	-	-

Tabel 28 geeft een overzicht van de gepresenteerde opties voor criteria rond toepassing van WKO. Tevens wordt er een eerste kwalitatieve beoordeling gegeven op de criteria die betrekking hebben op de ondergrond en de effectiviteit van energiebesparing. De scores op overige criteria uit Figuur 57 hangen sterk af van de verdere uitwerking (technisch haalbaar, voldoende financieel rendement). Ditzelfde is van toepassing op de scores op de aspecten handhaafbaarheid, uitvoerbaarheid en fraudebestendigheid (HUF).

Per hoofdlijn volgt hier een korte toelichting bij de scores.

8.3.4.1 Balans als sturingsmiddel

De balans als sturingsmiddel scoort vooral goed op het beperken van netto opwarming/afkoeling. De relatie met beperking van het ondergrondse ruimtebeslag is minder eenduidig, dit zoals aangetoond in de voorgaande hoofdstukken. Voor beperking van de uitdovingstijd kan de balans een sturingsmiddel zijn (vooral bij lage grondwatersnelheden). Op het bevorderen van energiebesparing scoren deze opties relatief laag.

8.3.4.2 Ruimtegebruik als sturingsmiddel

Ruimtegebruik als sturingsmiddel scoort per definitie goed op dit punt. Beperking van de netto opwarming/afkoeling wordt in principe niet gereguleerd. Door de beperking van het ruimtegebruik tijdens de exploitatie kunnen de gevolgen op de lange termijn beperkt blijven tot één locatie. Als er eisen gesteld worden aan de energieopbrengst dan draagt deze optie ook bij aan de effectiviteit van energie besparen met WKO. Als dat niet het geval is, kan een eenzijdige focus op het ruimtegebruik de energiebesparing onder druk zetten.

8.3.4.3 Waterverplaatsing en aanvullende eisen als sturingsmiddel

De scores van deze opties kunnen behoorlijk afhangen van de uitwerking.

In combinatie met temperatuurverschillen geven waterhoeveelheden al snel een (impliciete) energetische rendementseis voor toepassing van WKO. Bij een geavanceerde uitwerking kan de combinatie van waterhoeveelheden en temperatuurverschillen leiden tot een regulering van netto opwarming/afkoeling.

8.4 Stappen voor verdere uitwerking

Voor het vervolg wordt aanbevolen uit de groslijst een twee- tot drietal opties uit te werken en uiteindelijk te komen tot een set van criteria dat concreet kan worden toegepast.

Voor een effectieve selectie van uit te werken opties, is het van belang te weten welk belang er gehecht dient te worden aan het beperken van zowel de netto opwarming/afkoeling als het ondergronds ruimtegebruik op korte en langere termijn. De effecten van autonome opwarming kunnen in dezen worden meegenomen.

Onderdeel van de uitwerking zijn tevens de volgende differentiaties:

- kleine systemen anders dan grote;
- dichtbebouwd anders dan 'vrije veld';
- ondiep anders dan diep.

9 Referenties

- [1] Besluit Bodemenergie, Staatscourant nr. 4830, 5 april 2010.
- [2] C.J. Wisse, D.O. Rijkse, H. Stijnen, T. van Woudenberg, P. Pieper, Piekvermogens voor verwarming bij toepassing van betonkernactivering, IBPSA-NVL 2010 Event, 14 oktober 2010, Eindhoven, Nederland - Paper ID: 06.
- [3] D.O. Rijkse, C.J. Wisse, A.W.M. van Schijndel, Reducing peak requirements for cooling by using thermally activated building systems, Energy and buildings 42 (2010) 298-304.
- [4] ISSO, Uitgangspunten temperatuursimulatieberekeningen, vol. 32, ISSO Publicatie, 2010, ISBN: 978-90-5044-210-7
- [5] ISSO, Kengetallen en vuistregels, in: Hulpmiddel bij het ontwerp van gebouwinstallaties, vol. 33, ISSO Publicatie, 1996, ISBN: 90-5044-054-1.
- [6] ISSO, Handboek integral ontwerpen van warmtepompinstallaties voor utiliteitsgebouwen, vol. 81, ISSO Publicatie, 2007, ISBN: 978-90-5044-135-3.
- [7] TRNSYS 16.1, Transient system simulation program, SEL, University of Wisconsin, USA, TRANSSOLAR, Stuttgart, Germany, 2006.
- [8] Future use of Aquifer Thermal Energy Storage below the historic centre of Amsterdam. R.J. Caljé, MSc-thesis TU-Delft, 2009.
- [9] Koude/warmteopslag in de praktijk. Meetgegevens van 67 projecten. IF Technology, 2007.
- [10] Koelbehoefte tussenwoningen, Verwarming & Ventilatie oktober 2003.
- [11] Meervoudige ontwerp- en effectenstudie van koude- en warmteopslagsystemen. v/d Weerdenhof, TU-Delft, 2005.
- [12] Visie Zuidas, 2009, Gemeente Amsterdam, Dienst Ruimtelijke ordening, 2009.
- [13] Warmtekaart Nederland. Agentschap NL, <http://agentschapnl.kaartenbalie.nl>
- [14] BesluitvormingsUitvoeringsMethoden Bodemenergiesystemen provinciale taken (BUM BE, deel 1). Concept-ontwerp, versie 0.5.
- [15] Handhavingsuitvoeringsmethode Bodemenergiesystemen provinciale taken (HUM BE, deel 1), Concept-ontwerp, versie 0.3.
- [16] Referentieraming Energie en Emissies 2010-2020 Gebouwde Omgeving, ECN, 2010, rapportnummer ECN-E-10-108.
- [17] KNMI. (2006). *Klimaat in de 21e eeuw, vier scenario's voor Nederland*. De Bilt.
- [18] KNMI. (2009). *Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's*. De Bilt: Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink.
- [19] ISSO 39 Ontwerp, realisatie en beheer van een energiecentrale met warmte/koudeopslag (WKO) (verschijnt in de loop van 2012).
- [20] Mondelinge informatie van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu in klankbordgroepvergadering 'onderzoek criteria energiebalans WKO' d.d. 2 april 2012.

I Toelichting bij invloedsfactoren ondergronds ruimtegebruik

I.i Invloedsfactoren en vereenvoudigingen

In de verkenning op hoofdlijnen in hoofdstuk 5 wordt gebruikgemaakt van cilindervormige vormen voor de warme en de koude bel. Dit is een vereenvoudiging. Onderstaande opsomming behandelt het effect van de verschillende vereenvoudigingen.

De volgende ondergrondse invloedsfactoren bepalen het ondergrondse ruimtegebruik.

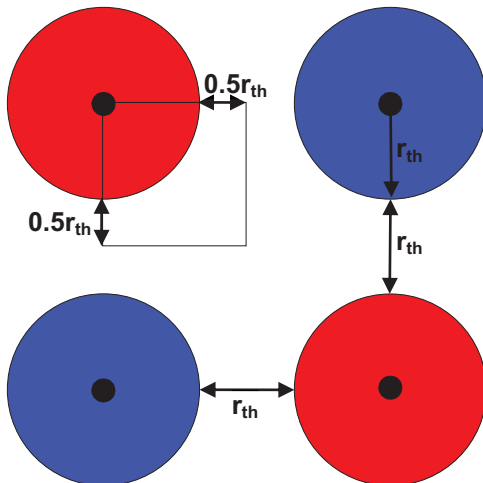
- Aquiferdikte en filterlengte.
 - Het ruimtebeslag zal toenemen als de aquiferdikte afneemt. In eerste benadering is dit effect lineair: het opslagvolume wordt dan als lineair afhankelijk gesteld van de aquiferdikte. Dit is een vereenvoudiging. De filterlengte beslaat niet altijd de gehele aquifer. Zie voor de invloed hiervan paragraaf I.iii en paragraaf I.vi.
- Gebruik van filters op verschillende dieptes.
 - Bij toepassing van een zogenoemde monobron, dit wordt verder niet meegenomen in dit onderzoek.
- Grondwaterstroming.
 - Door de grondwaterstroming zal de vorm van de warme en koude bellen sterk kunnen afwijken. Dit effect is zodanig groot dat in dit onderzoek diverse varianten voor de grondwaterstroming worden doorgerekend.
- Heterogeniteit van de bodem. Zie hiervoor paragraaf I.vi.
- Afstand tussen de bronnen en plaatsing van de bronnen bij grootschalige systemen met meerdere warme en koude bronnen
 - Dit wordt hieronder nader uitgewerkt.

I.ii Definitie ondergronds ruimtebeslag en footprints

I.ii.a Ondergronds ruimtegebruik bij energiebalans

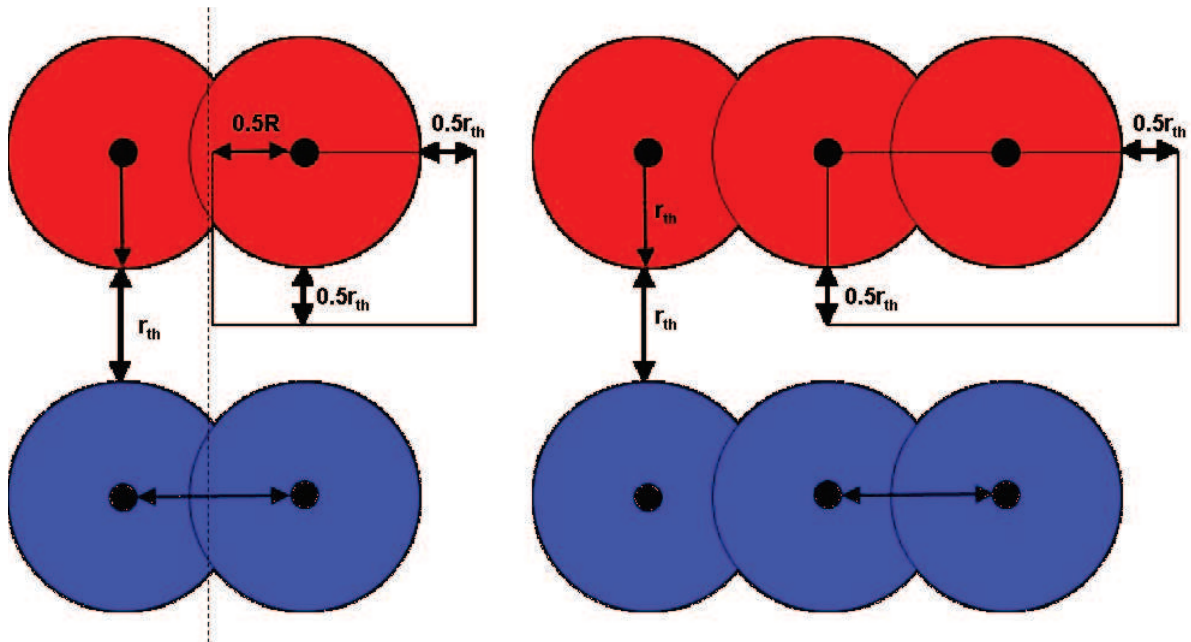
Bij een energiebalans en een gelijkwaardig temperatuurverschil (gelijke ΔT) is de straal van de warme bel gelijk aan de straal van de koude bel. Op basis van de normen van de NVOE is de afstand tussen de warme en de koude bron gelijk aan driemaal de thermische straal. De afstand tussen de warme en de koude bel is dan gelijk aan eenmaal de thermische straal. Afhankelijk van de positionering van de bronnen wordt een zeker deel van de ondergrond gebruikt/benut voor de opslag van warmte en koude. Dit kan worden uitgedrukt in de benuttingsgraad van de ondergrond: het deel van de ondergrond waarin zich warmte of koude bevindt.

Om de benuttingsgraad te berekenen, zijn drie bronconfiguraties beschouwd, waarbij de bronafstanden zijn gebaseerd op normen van de NVOE. Figuur 61 toont een configuratie waarin de warme en koude bronnen elkaar afwisselen. De benuttingsgraad is in dit geval gelijk aan de verhouding tussen de oppervlakte van een kwart van de (warme) bel en de oppervlakte van het vierkant (zie Figuur 61).



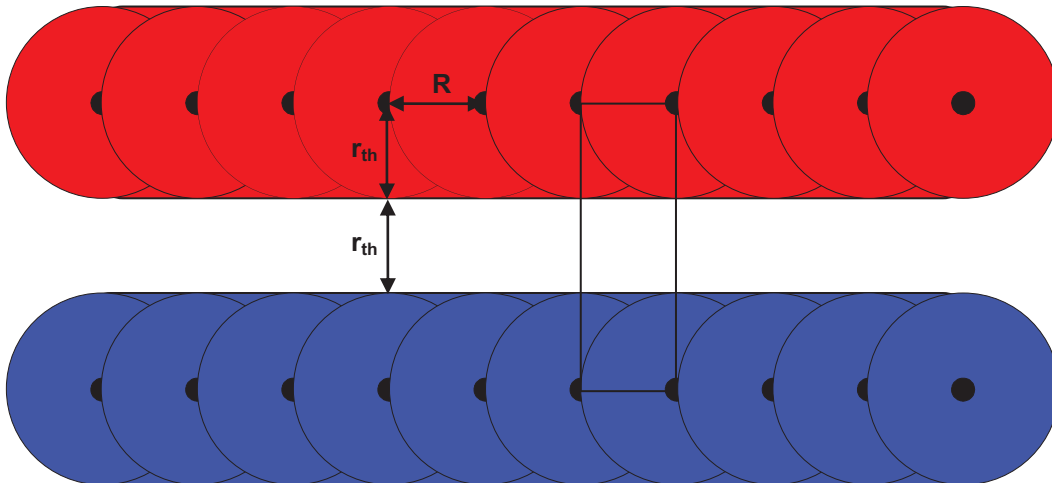
Figuur 61 Situatie 1

In situatie 2 worden meerdere warme en meerdere koude bellen bij elkaar geplaatst. De afstand tussen twee warme bronnen (R) bedraagt 25 m en dat geldt ook voor de afstand tussen twee koude bronnen. Ook hier kan de benuttingsgraad worden berekend uit de verhouding tussen de oppervlakte van het gedeelte van de (warme) bel binnen de rechthoek en de oppervlakte van de rechthoek zelf (zie Figuur 62). Voor de berekening van de thermische straal moet rekening worden gehouden met het feit dat de bellen elkaar niet kunnen overlappen. Het warme (of koude) water kan zich richting de naastgelegen bron niet verder dan halverwege verspreiden (in dit geval niet verder dan 12,5 m), waardoor er meer water in de andere richtingen zal stromen en de thermische straal groter zal zijn dan in situatie 1.



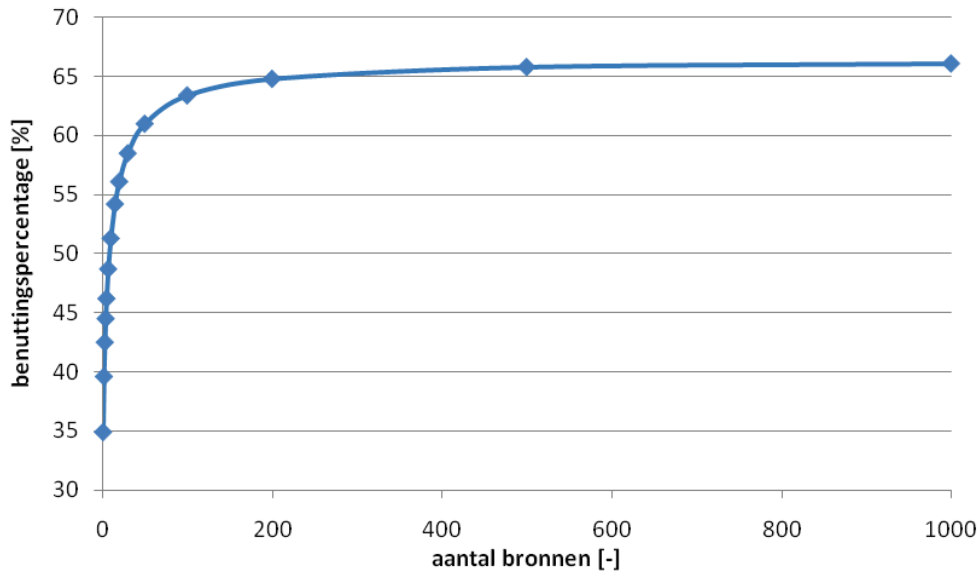
Figuur 62 Situatie 2: links een variant met twee doubletten, rechts een variant met drie doubletten

In situatie 3 worden oneindig veel bronnen naast elkaar geplaatst, zodat een warme en een koude strook ontstaat. De afstand R tussen twee warme of twee koude bronnen is 25 m. De afstand tussen de warme en koude strook is gelijk aan de thermische straal (Figuur 63).



Figuur 63 Situatie 3

Voor de verschillende situaties in de benuttingsgraad berekend. In Figuur 64 zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven. Uit Figuur 64 blijkt dat wanneer het aantal bronnen toeneemt, het benuttingspercentage ook toeneemt tot een maximale waarde van 66%.

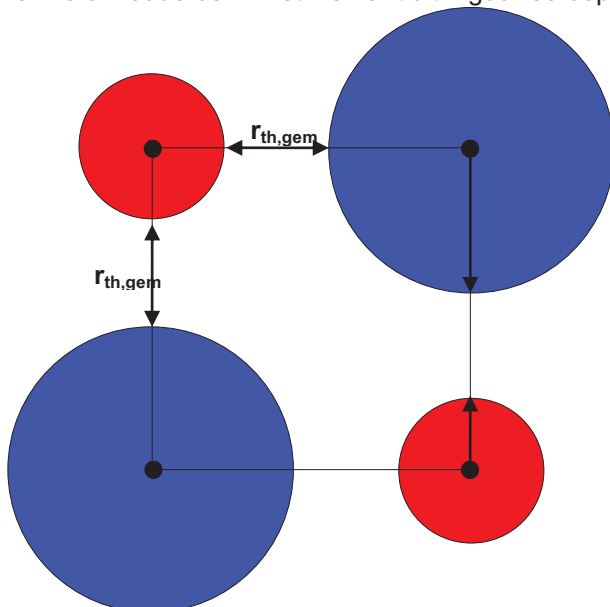


Figuur 64 Aantal bronnen versus benuttingspercentage

I.ii.b Vereenvoudigde benadering ondergronds ruimtegebruik bij energiebalans

Bij een energieonbalans, bijvoorbeeld als meer koude wordt opgeslagen dan onttrokken, dan zal de koude bel elk jaar groeien terwijl de straal van de warme bel gelijk blijft. De mate waarin de koude bel groeit, is afhankelijk van de mate van onbalans en het aantal jaren dat de energieonbalans optreedt. Voor deze berekeningen is uitgegaan van vijf jaar.

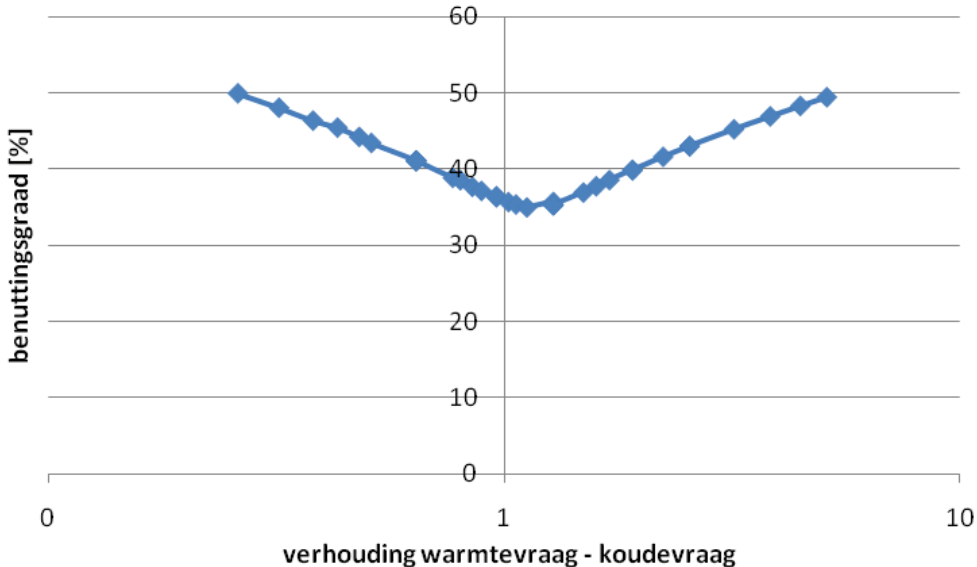
In het voorbeeld (Figuur 65) is sprake van een koudeoverschot in de ondergrond. De afstand tussen de warme en koude bel is het gemiddelde van de thermische straal van de koude en de warme bel. Om de benuttingsgraad te berekenen, is het ruimtebeslag van de warme of koude bel in het vierkant uit Figuur 65 bepaald.



Figuur 65 Plaatsing van de bronnen bij onbalans (worst case)

De verhouding tussen de grootte van de warme en koude bel hangt af van de mate van onbalans. Figuur 66 geeft de benuttingsgraad weer bij verschillende verhoudingen tussen de warmte- en koudevraag. Bij gelijke warmte- en koudevraag is de verhouding 1.

Wanneer de koudevraag groter is dan de warmtevraag, is de verhouding kleiner dan 1 en wanneer de koudevraag kleiner is dan de warmtevraag, is de verhouding groter dan 1. Uit figuur 6 kan worden opgemaakt dat de benuttingsgraad het kleinst is bij een energiebalans (verhouding = 1:1) en toeneemt bij een energieonbalans.



Figuur 66 Benuttingsgraad ten opzichte van onbalans, uitgedrukt in verhouding warmte en koude. Duur onbalans: vijf jaar.

Hoewel de benuttingsgraad toeneemt, neemt gelijktijdig ook het ondergronds ruimtebeslag toe: de oppervlakte van het vierkant tussen de bronnen is bij een onbalans groter dan bij een balans, zodat meer ruimte nodig is. Uitgaande van de configuratie uit Figuur 65 kan dit als volgt worden berekend uit de thermische straal van de warme bron ($r_{th,W}$ op basis van de te infiltreren hoeveelheid per jaar) en de thermische straal van de koude bron ($r_{th,K}$ op basis van de te infiltreren hoeveelheid per jaar plus jaarlijkse onbalans maal het aantal jaren van onbalans).

$$\text{Ruimtebeslag} = (3 * (r_{th,W} + r_{th,K}))^2$$

Uitgaande van één doublet bronnen is het ruimtebeslag hiervan de helft. Dit is de zogenoemde Footprint:

$$\text{Footprint} = \text{Ruimtebeslag van één doublet} = (3 * (r_{th,W} + r_{th,K}))^2 / 2$$

I.ii.c Energiehoeveelheid en thermische straal in de vereenvoudigde benadering

Voor het berekenen van de energiehoeveelheid (Q_t , in kWh) is de volgende formule gebruikt:

$$Q_t = 1,16 \cdot V_{gem} \cdot \Delta T_{gem}$$

Waarbij

V_{gem} = gemiddelde waterhoeveelheid (m³/jaar)

ΔT_{gem} = gemiddelde temperatuurverschil (°C)

1,16 = omrekeningsfactor 4.200 kJ/m³/3.600 kJ/kWh.

De thermische straal kan worden berekend met de volgende formule:

$$r_{th} = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot H \cdot n \cdot R}}$$

waarbij

- r_{th} = thermische straal (m)
- V = opgeslagen hoeveelheid warm/koud water (m³)
- H = filterlengte of effectieve dikte van de warme/koude bel (m)
- n = porositeit = 0,35
- R = vertragsfactor voor de verspreiding van warmte door de bodem (doordat een deel van de warmte en koude dat in het bodemmateriaal wordt opgeslagen) = 2.

I.iii Vereenvoudigingen in bepaling footprint op basis van thermische straal

In de methodiek op basis van de thermische straal is een aantal vereenvoudigingen doorgevoerd.

- Uitgangspunt is een scherpe temperatuurgrens tussen de warme/koude bel en het omringende grondwater. In de praktijk zorgen meerdere processen ervoor dat er sprake is van een geleidelijke overgang, met name diffusie, dispersie en warmtegeleiding. Als het thermisch invloedsgebied wordt gedefinieerd als het gebied waarin de temperatuur 0,5°C of meer afwijkt van de oorspronkelijke temperatuur, dan zal de werkelijke straal van het thermisch invloedsgebied vrijwel altijd groter zijn dan de thermische straal.
- De invloed van de grondwaterstroming is niet meegenomen. Aangezien de snelheid van de grondwaterstroming in Nederland meestal relatief laag is, is deze aanname te rechtvaardigen voor het ontwerp van één systeem. Op gebiedsniveau gaat de grondwaterstroming op de lange termijn echter wel degelijk een rol spelen.
- Verondersteld wordt dat geen warmte of koude verloren gaat door geleiding naar boven- of onderliggende bodemlagen (zoals afsluitende kleilagen). In de praktijk is wel degelijk sprake van verliezen door warmtegeleiding. Verliezen door geleiding betekenen een lagere energie-inhoud van de warme/koude bel en zou een kleinere thermische straal moeten opleveren.

Om na te gaan in hoeverre deze beperkingen tot onnauwkeurige inschattingen van het ruimtebeslag leiden, zijn thermische berekeningen uitgevoerd met het programma HST-2D.

I.iv Modelling in 2D

HSTwin 2D

Het berekenen van de thermische effecten van de energieopslag wordt uitgevoerd met het programma HstWin-2D. Met het programma HstWin-2D kunnen warmte- en stoftransport worden berekend in een verzadigd tweedimensionaal grondwatersysteem.

Als bodemopbouw wordt uitgegaan van een veel voorkomende bodem, bestaande uit:

- een deklaag van 10 m dikte en een weerstand van 1.000 dagen;
- het eerste watervoerende pakket van 30 m dikte en een doorlatendheid van 25 m per dag;
- een eerste scheidende laag van 20 m dikte met een weerstand van 2.000 dagen;
- het tweede watervoerende pakket waarin de filters staan en waarvan de dikte en de snelheid van de grondwaterstroming wordt gevarieerd;

- de hydraulische basis.

In Figuur 67 is een schematische weergave van de ondergrond opgenomen.



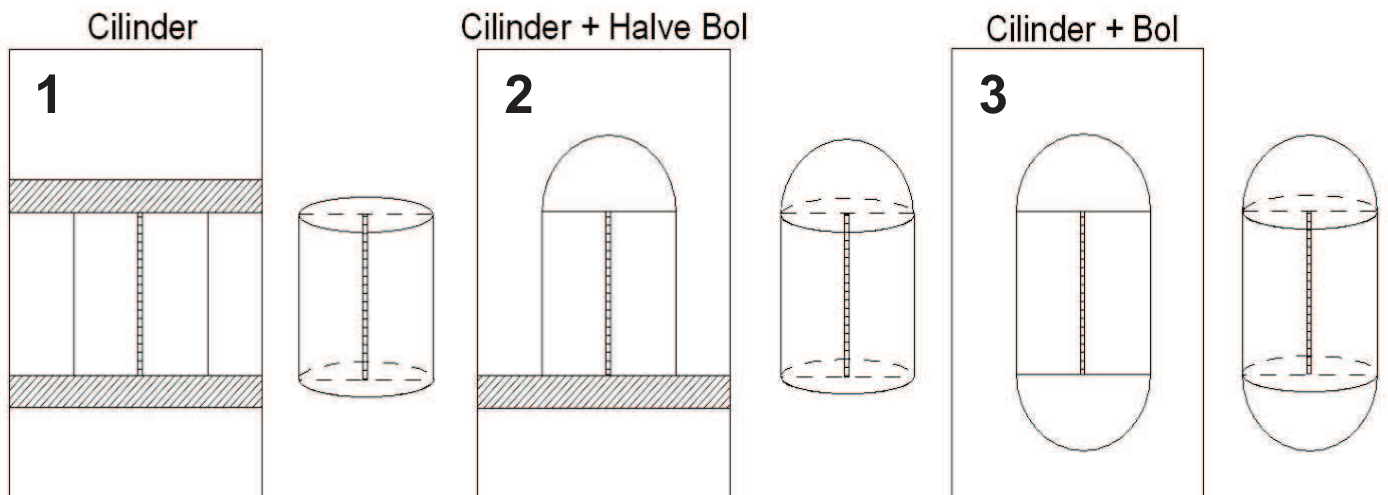
Figuur 67 Schematische weergave ondergrond

I.v Onderbouwing thermische berekeningen in 2D

In de bovenstaande benadering is het uitgangspunt dat er sprake is van cilindervormige warme en koude bellen. In deze subparagraaf wordt deze vereenvoudiging nader toegelicht.

De gemiddelde dikte van de bel is afhankelijk van de filterlengte en de geohydrologische situatie, waarbij drie situaties te onderscheiden zijn:

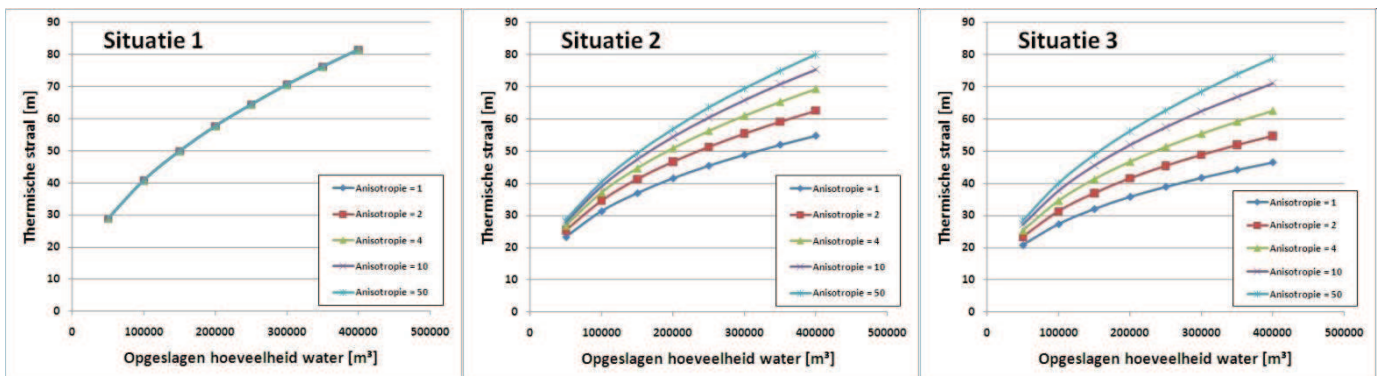
- 1) Als een watervoerend pakket aan de boven- en onderzijde wordt begrensd door scheidende lagen en de bronfilters (vrijwel) de gehele dikte van het watervoerende pakket beslaan, dan is de dikte van de bel constant en gelijk aan de dikte van het watervoerende pakket. De warmte (of koude) verspreidt zich alleen in horizontale richting en er ontstaat een cilindervormige bel.



Schematische weergaven van de geohydrologische situaties met van links naar rechts situatie 1, 2 en 3.

- 2) De bronfilters worden bovenin (of onderin) een watervoerend pakket geplaatst, met aan de bovenzijde (of onderzijde) een scheidende laag. In dit geval verspreidt de warmte en koude zich niet alleen in horizontale richting, maar deels ook naar beneden (of boven). Er ontstaat een cilindervormige bel met aan de onderzijde (of bovenzijde) een uitstulping in de vorm van een (afgeplatte) halve bol. De mate van afplatting van de halve bol is afhankelijk van de verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid in het watervoerende pakket (verticale anisotropie).
- 3) De bronfilters worden midden in een dik watervoerend pakket geplaatst, waarbij geen scheidende lagen aanwezig zijn nabij het filtertraject van de bronnen. In dit geval ontstaat een cilindervormige bel met zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde een uitstulping in de vorm van een (afgeplatte) halve bol.

In situatie 2 en 3 zal een deel van de warmte en koude naar boven en naar onder stromen. De gemiddelde dikte van de bel is daardoor groter dan in situatie 1. Dat betekent dat de thermische straal in situatie 2 en 3 kleiner zal zijn dan in situatie 1. Hieronder is de horizontale thermische straal van de bel in beeld gebracht voor situatie 1, 2 en 3. Uitgangspunten zijn een effectieve filterlengte van 30 m (voor situatie 1 is dit ook de pakketdikte) en verschillende waarden voor de anisotropie en de geïnfiltreerde hoeveelheden water per seizoen.



Berekende horizontale thermische straal in situatie 1-3 voor verschillende geïnfiltreerde hoeveelheden water en verschillende waarden voor de verticale anisotropie. In de berekeningen is uitgegaan van een filterlengte van 30 m.

Uit deze figuren blijkt dat de thermische straal het grootst is in situatie 1 en het kleinst in situatie 3. Verder is te zien dat bij een hoge waarde voor de verticale anisotropie het verschil tussen situatie 1 en beide andere situaties nog maar klein is: in dat geval verspreidt de bel zich nog namelijk maar nauwelijks in verticale richting.

In een horizontaal 2D-model zijn twee keuzes mogelijk.

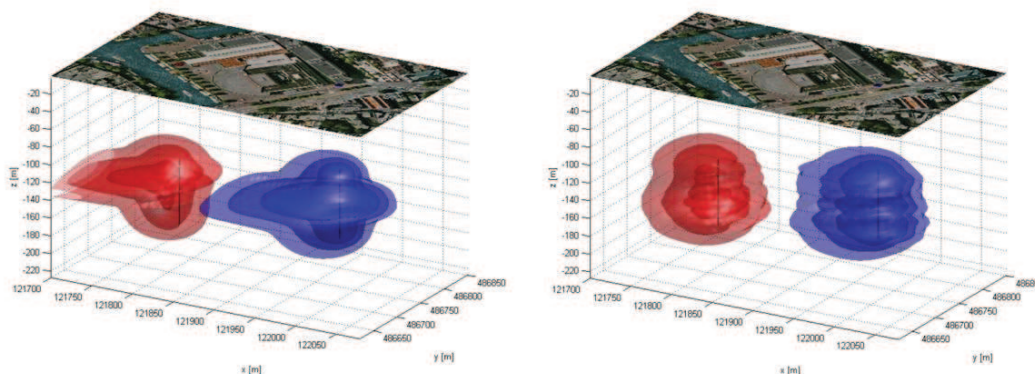
- 1) Kiezen voor het gebruik van de filterlengte. In dat geval wordt het model doorgerekend op basis van situatie 1. Als de werkelijkheid anders is (2 of 3), dan wordt met het model een te groot thermisch invloedsgebied berekend en is dus sprake van een worst-case benadering.
- 2) Kiezen voor het gebruik van de gemiddelde dikte van de bel. In dat geval wordt de dikte zodanig gekozen dat de thermische straal overeen komt met de berekende thermische straal voor de betreffende situatie.

Een voorbeeld: in situatie 2 is bij infiltratie van 200.000 m³ en een anisotropie van 4 een (horizontale) thermische straal berekend van 50,8 m. In situatie 1 zou bij deze straal een geïnfiltreerde hoeveelheid water van 156.000 m³ horen. Om toch de juiste thermische straal te berekenen, kan de dikte van het model daarom worden aangepast naar $(30 \text{ m} * 200.000 / 156.000) = 38,5 \text{ m}$.

Op de lange termijn zal de bel zich verder uitbreiden dan in het eerste seizoen, waardoor ook deze benadering nog een overschatting van het thermisch invloedsgebied oplevert. De overschatting is echter minder groot dan bij keuze voor benadering 1.

Geconcludeerd wordt dat een 2D-model gerechtvaardigd is als worst-case benadering. Hierbij geeft gebruik van de effectieve filterlengte een grotere overschatting van de thermische effecten dan gebruik van de effectieve dikte van de bel.

I.vi Invloed van heterogeniteit



Figuur 68 Invloed van heterogeniteit in de verticale richting als gevolg van gelaagdheid (Bron: Caljé, 2010).

Links:

Homogeen watervoerend pakket met een 12 m dikke grindlaag (gemiddelde doorlatendheid watervoerende pakket 37 m/d en doorlatendheid grindlaag 250 m/d).

Rechts:

Situatie waarin per laag van 5 m dik een ruimtelijke variatie in doorlatendheid is gegenereerd met een gemiddelde waarde van 37 m/d en een standaard deviatie van 18,5 m/d.

Zowel in de vereenvoudigde berekeningen conform bijlage I.ii.c als de simulaties conform bijlage I.iv is sprake van een homogene samenstelling van de bodem. Figuur 68 geeft een indruk van de mogelijke invloed van heterogeniteit van de bodem op de vorm van de warme en de koude bel. Deze zijn ontleend aan de studie van Caljé [8].

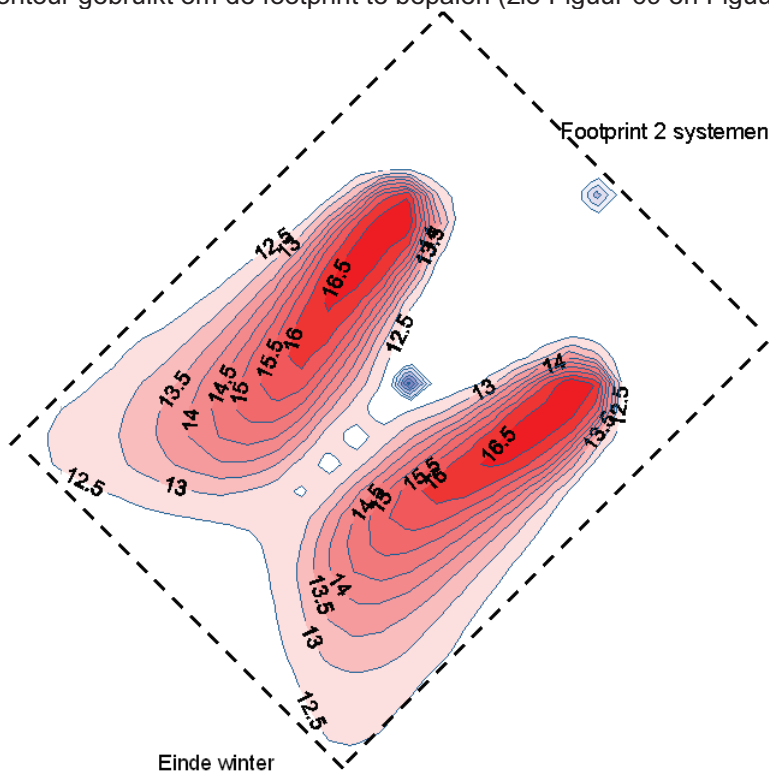
I.vii Vergelijking footprints HST-2D met de vereenvoudigde benadering

In deze bijlage worden de resultaten van HST-2D en de vereenvoudigde benadering uit I.ii.c vergeleken. Bij afwezigheid van grondwaterstroming kan men dit doen op basis van de thermische straal van de warme en de koude bel. De resultaten zijn gegeven in Tabel 29.

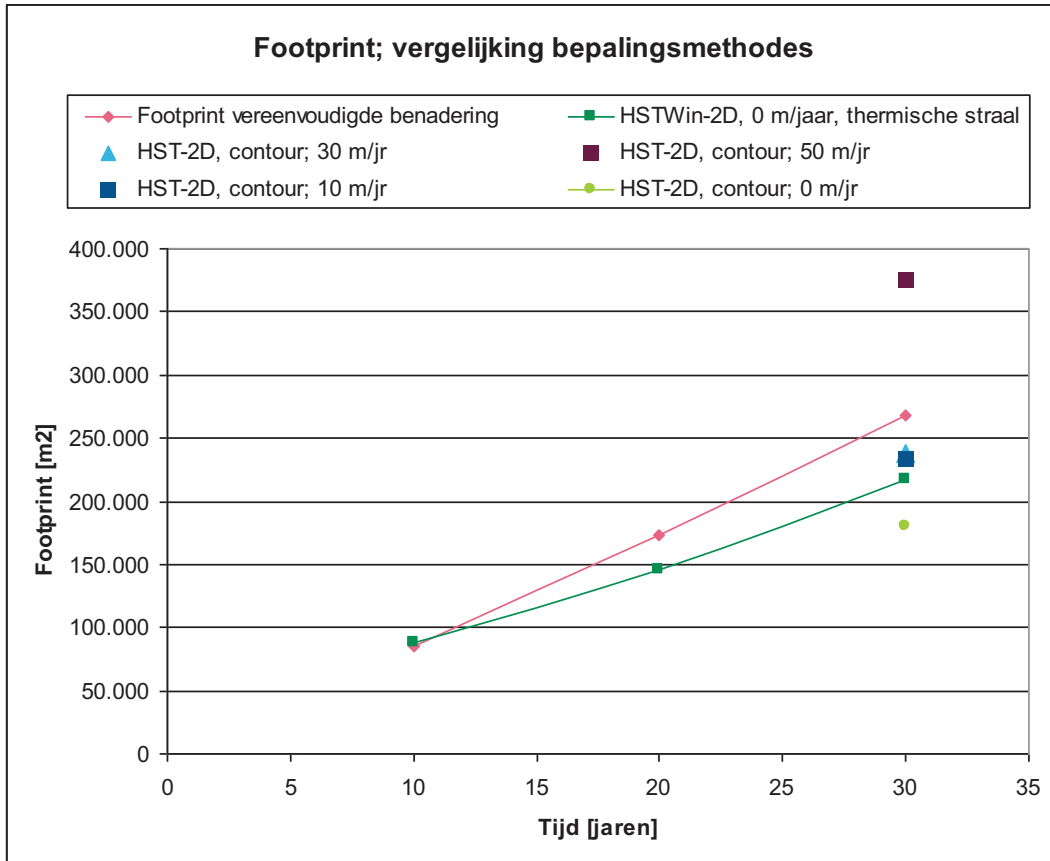
Tabel 29 *Vergelijking thermische stralen op basis van vereenvoudigde benadering met de straal van het thermisch invloedsgebied zoals berekend met HSTWin-2D (scenario onbalans en 0 m/j)*

Tijd (jaren)	Resultaten vereenvoudigde benadering			Resultaten HSTWin-2D berekeningen		
	Thermische straal (m)		Ruimtebeslag (m ²)	Straal invloedsgebied (m)		Ruimtebeslag (m ²)
	Warme bron	Koude bron		Warme bron	Koude bron	
10	117	21	85.698	120	20	88.200
20	175	21	172.872	160	20	145.800
30	224	20	267.912	200	20	217.800

In geval van grondwaterstroming geeft dit geen goede vergelijking door de langgerekte vorm van de warme en koude bellen. Voor deze resultaten wordt er een rechthoekige contour gebruikt om de footprint te bepalen (zie Figuur 69 en Figuur 36).



Figuur 69 *Footprint twee systemen, onbalanssituatie (grondwaterstroming 50 m/jr).*



Figuur 70 Footprint: vergelijking bepalingmethoden; contour: methode Figuur 69; thermische straal: Tabel 29.

Figuur 70 geeft de vergelijking tussen de vereenvoudigde benadering van de footprint en de 2D- berekeningen met HST-2D. Voor de situatie zonder grondwaterstroming zijn de resultaten uit Tabel 29 weergegeven. Voor de situatie na dertig jaar zijn de resultaten voor verschillende waarden van de grondwaterstroming ook weergegeven in Figuur 70 (zie ook Figuur 37).

Uit de bovenstaande tabel en figuur kan worden afgeleid dat beide benaderingen redelijk overeenkomen. Wel neemt in de modelberekeningen het ruimtebeslag in de tijd minder snel toe dan in de vereenvoudigde benadering, waardoor het ruimtebeslag op langere termijn kleiner is (en waarschijnlijk wat groter op korte termijn). Het minder snel toenemen van het ruimtebeslag in de modelberekeningen kan worden verklaard door de warmteverliezen naar de boven- en onderliggende afsluitende lagen, die niet zijn inbegrepen in de vereenvoudigde benadering. Het grotere ruimtebeslag op korte termijn kan worden verklaard doordat in de modelberekeningen sprake is van een geleidelijke temperatuurovergang, terwijl in de vereenvoudigde benadering is uitgegaan van een scherpe temperatuurgrens.

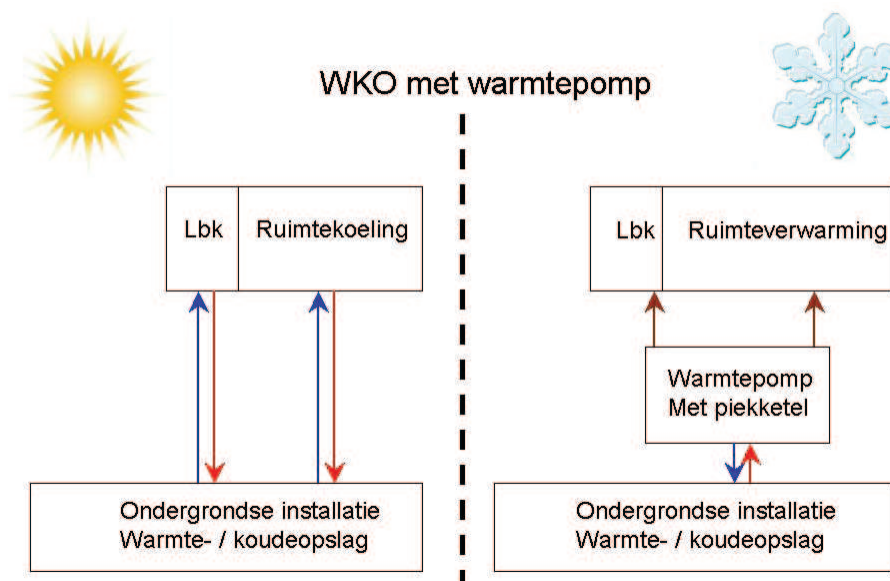
De vereenvoudigde methode is een redelijke benadering voor een eerste inschatting tot een grondwaterstroming tot 30 m/jaar. Voor hogere grondwaterstromingen zijn de afwijkingen te groot met de vereenvoudigde methode. Voor een nauwkeuriger beeld zijn 2D-modelberekeningen nodig.

II Toelichting bij invloedsfactoren bovengrondse installatie op ondergronds ruimtegebruik

Tabel 10 geeft de resultaten voor de footprint van de WKO voor verschillende verhoudingen van de warmte- en koudevraag van het gebouw. De resultaten zijn afgeleid voor gangbare ontwerpparameters van de bovengrondse installatie. In deze bijlage wordt voor een aantal parameters een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Ter vergelijking worden hier nogmaals de resultaten van weergegeven (Tabel 30).

De ontwerpparameters die een grote invloed hebben op de footprint zijn de volgende.

- Aandeel warmtelevering door de warmtepomp. Het uitgangspunt hiervoor was 85%.
 - De energievraag aan de bodem is afgeleid voor het systeem zoals weergegeven in Figuur 71. De ondergrond levert warmte aan de zogenoemde verdamper van de warmtepomp. Samen met de elektriciteit van de warmtepomp en de bijdrage van de piekketel geeft dit de warmtevraag van het gebouw. De elektriciteitsvraag van de warmtepomp wordt bepaald door de zogenoemde COP van de warmtepomp. In dit systeem is nog geen sprake van een voorziening om de bodem weer in balans te brengen (regeneratie). Als de warmtepomp om een bepaalde reden geen 85% van de warmte levert, maar 30%, dan valt de balans heel anders uit en zal de footprint wijzigen (zie Tabel 31).
- Aandeel koudelevering door de ondergrondse installatie. Het uitgangspunt hiervoor was 100%. Als er een warmtepomp als koelmachine wordt ingezet, dan zal dit percentage kleiner worden. Het effect is in te zien door in Tabel 30 één kolom naar links op te schuiven.
- Temperatuurtrajecten warmte- en koudelevering. De uitgangspunten hiervoor waren: temperatuurverschil warmte leveren door ondergrond: 6°C, temperatuurverschil koude leveren door ondergrond: 5°C.
 - De temperatuurtrajecten bepalen sterk de hoeveelheid verpompt water. Bij een kleiner temperatuurverschil tussen de warmte- en de koudebron is er meer water nodig voor dezelfde hoeveelheid energie. In de vereenvoudigde benadering conform I.ii.b geeft een halvering van de temperatuurverschillen een verdubbeling in de footprint (Tabel 32).



Figuur 71 Systeemconfiguratie: 85% warmtelevering met warmtepomp; 15% met piekketel; 100% koudelevering met ondergrondse installatie. Geen voorziening om energiebalans te herstellen.

Tabel 30 Footprint van de WKO behorend bij een gebouw van 20.000 m², als functie van de warmte- en koudevraag. Uitgangspunten conform Tabel 12 en Tabel 13. Duur van de onbalans: één jaar.

Koudevraag (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag (kWh/m ²)					
20	2.763	3.772	6.240	9.762	13.623
40	4.287	5.525	8.447	12.480	16.804
60	5.682	7.096	10.366	14.792	19.471
80	7.011	8.573	12.137	16.894	21.872
100	8.298	9.990	13.813	18.861	24.103
120	9.555	11.365	15.421	20.733	26.213
140	10.788	12.707	16.978	22.532	28.231

Tabel 31 Footprint van de WKO behorend bij een gebouw van 20.000 m², als functie van de warmte- en koudevraag. Uitgangspunten conform Tabel 12 en Tabel 13, maar **warmtelevering 30%** door warmtepomp in plaats van **85%**. Duur van de onbalans: één jaar.

Koudevraag (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag (kWh/m ²)					
20	1.592	2.378	4.401	7.421	10.829
40	2.264	3.185	5.478	8.802	12.484
60	2.858	3.884	6.384	9.941	13.835
80	3.414	4.527	7.201	10.955	15.027
100	3.944	5.135	7.962	11.890	16.118
120	4.456	5.717	8.683	12.767	17.137
140	4.954	6.280	9.374	13.602	18.102

Tabel 32 Footprint van de WKO behorend bij een gebouw van 20.000 m², als functie van de warmte- en koudevraag. Uitgangspunten conform Tabel 12 en Tabel 13, maar **halvering van de temperatuurverschillen voor warmte- en koudelevering**. Duur van de onbalans: één jaar.

Koudevraag (kWh/m ²)	5	10	25	50	80
Warmtevraag (kWh/m ²)					
20	5.525	7.544	12.480	19.524	27.246
40	8.573	11.050	16.894	24.960	33.608
60	11.365	14.193	20.733	29.584	38.942
80	14.023	17.147	24.274	33.788	43.744
100	16.596	19.981	27.626	37.722	48.205
120	19.109	22.729	30.842	41.466	52.426
140	21.576	25.413	33.956	45.064	56.463

III Simulatiemodel van het bovengrondse gedeelte

III.i.a Referentiekantoor

Voor simulatieberekeningen is binnen DWA een standaard kantoorgebouw ontwikkeld. In [2 en 3] zijn resultaten van simulaties met dit kantoorgebouw gevalideerd met metingen. In Tabel 33 zijn de afmetingen en benamingen van de verschillende ruimtes (zones) weergegeven. De verdeling van de vloeroppervlakken over de verschillende ruimten is conform ISSO-publicatie 33.

Tabel 33 Gebouwparameters van het standaardkantoor

Gross Floor area [m ²]		orientation	317 (offices 50%, conference rooms 15%, circulation space 20%, construction 12%, technical area 3%)
5,4	A: Conference room		
1,8	B: Office	Stair well NO TABS	
5,4	C: Office		
3,6	D: Office		
corridor			
North			
Window area of facade [%]			50%
U-value façade [W/m ² K]			0.333
U-value window [W/m ² K]/g-value (glazing)/t-value (glazing)			1.3 / 0.33 / 0.6
Sun shading			Internal shading
Infiltration [m ³ /s.m ² façade]			0.00034
Air change rate [1/h]			2
Internal heat load [W/m ² gross floor area]			20

Uitgangspunt voor het referentiegebouw is een kantoor met warmte-/koudeopslag met een bruto vloeroppervlak van 20.000 m². Dit is een omvang die meer dan voldoende schaalgrootte biedt voor toepassing van WKO. ISSO-publicatie gaat uit van dezelfde omvang voor een daar uitgewerkt voorbeeldgebouw. Dit geeft tevens referentiegegevens voor de dimensionering van componenten. In de rapportage wordt dit typische kantoorgebouw aangeduid met 'referentiekantoor'.

III.i.b Dimensionering installatie energiecentrale

Het referentiekantoor is uitgerust met de volgende installaties:

- betonkernactivering voor verwarmen en koelen;
- luchtbehandelingskast met warmtewiel voor ventilatie;
- warmtepomp voor de opwekking van warmte en koude;
- warmte- en koudeopslag;
- piekkel;
 - droge koeler voor het laden van de opslag en het afvoeren van condensorwarmte.

Aan de hand van ISSO-publicatie 81 zijn deze componenten gedimensioneerd. Hiervoor is gebruikgemaakt van het referentieklimaatjaar voor energieprestatieberekeningen uit de NEN5060 (bijlage A2).

Tabel 34 Scenario's gebouwgebruik en kwaliteit

Scenario	Interne warmtelast [W/m ² _{BVO}]	ZTA-waarde [-]	Infiltratievoud [1/h]*
1	0	0.21	0.51
2	20	0.33	0.17
3	40	0.60	0.17

ISSO 32 'Uitgangspunten Temperatuursimulatieberekeningen' geeft waarden in de range van 0,1 tot 0,5. Deze laatste waarde correspondeert met een slechte gevelkwaliteit (gebouwen van voor 1992).

In hoofdstuk 4 is gebruikgemaakt van drie scenario's van het gebouwgebruik en de gebouwkwaliteit. In Tabel 34 zijn deze scenario's gekwantificeerd. Bij elk scenario hoort een ander ontwerp van de energieopwekkingsinstallatie. In Tabel 35 zijn de belangrijkste ontwerpresultaten weergegeven.

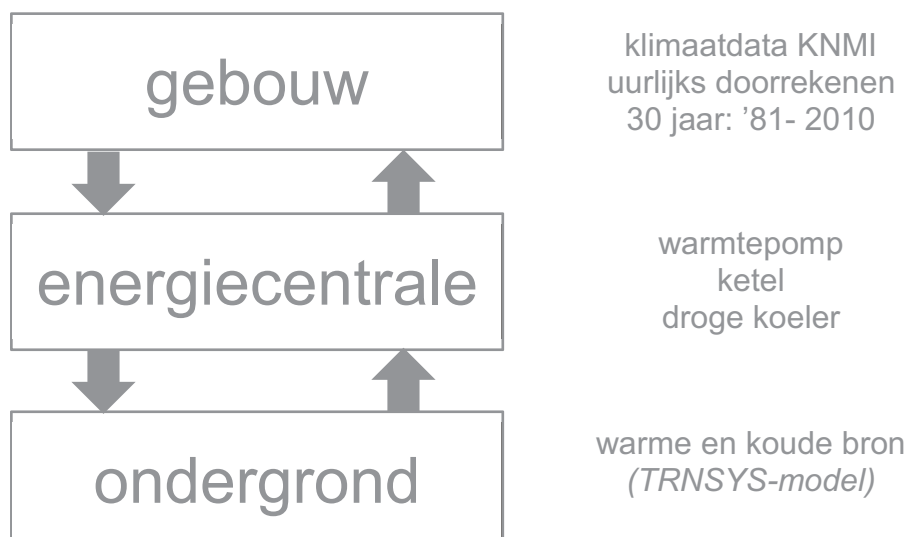
Tabel 35 Belangrijkste ontwerpparameters voor elk van de drie scenario's

Scenario	1	2	3
Pkoeling (W/m ²)	40	60	80
Pverwarming (W/m ²)	40	30	30
Pwko (kW)	580	870	1.160
Pwp (verdampers/condensator) (kW)	220/300	330/440	440/600
Pketel	500	160	0
Pdk (kW)	300 (condensorkoeling)	440 (condensorkoeling)	980 (condensorkoeling + extra voor koude laden)

III.i.c Simulatie omgeving

Het referentiekantoor met de bijbehorende afgifte- en opwekkingsinstallaties voor verwarming en koeling zijn gemodelleerd met behulp van TRNSYS. Dit is een grafische softwareomgeving voor het modelleren en simuleren van dynamische systemen ontwikkeld door Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. Elk simulatiemodel wordt opgebouwd uit componenten, die al dan niet door de gebruiker zelf kunnen worden bewerkt of geschreven. TRNSYS levert standaard zo'n 150 componenten mee, waarvan een groot deel geënt is voor het gebruik in simulaties van thermische systemen. Deze standaard componenten zijn uitgebreid gevalideerd door TRNSYS en daardoor algemeen geaccepteerd in wetenschappelijk literatuur.

In Figuur 72 is de opbouw van het gebruikte simulatiemodel schematisch weergegeven.



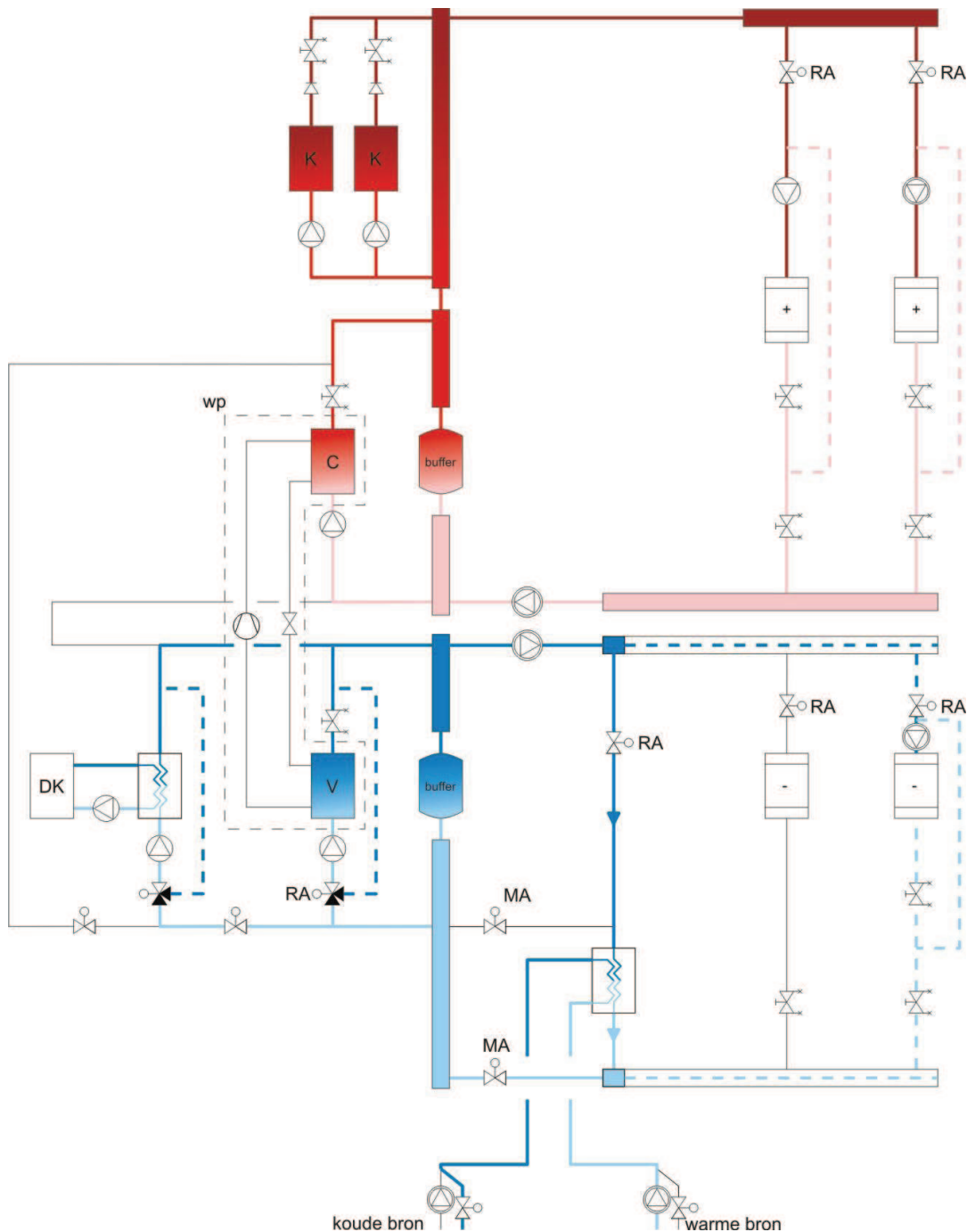
Figuur 72 Schematische weergave simulatiemodel
WKO.docx

Gebouw

Het standaard kantoor is opgebouwd in standaard component type 56. Dit is de TRNSYS-component voor het modelleren van gebouwen. Het afgiftesysteem voor verwarming en koeling is betonkernactivering, hiervoor is component type 306 van TRANSSOLAR gebruikt. TRANSSOLAR is een van de ontwikkelaars van TRNSYS en biedt additionele TRNSYS-modules aan. De luchtbehandelingskast en het warmtewiel zijn gemodelleerd met behulp van vergelijkingen. De berekening van het benodigd vermogen voor koeling en verwarming is gebaseerd op het enthalpieverschil respectievelijk temperatuurverschil tussen de lucht na het warmtewiel en de gewenste uittredecondities. Het warmtewiel is gemodelleerd met een apart rendement voor voelbare warmteoverdracht (gebruikt voor opwarming) en latente warmteoverdracht (gebruikt voor afkoeling).

Energiecentrale

In Figuur 73 is het hydraulisch schema van de energiecentrale en de koppeling met de afgifte-installaties en warmte-/koudeopslag weergegeven. Dit is het hydraulisch schema zoals gebruikt in het voorbeeldontwerp van ISSO-publicatie 81.



Figuur 73 Hydraulisch schema energieopwekkingsinstallatie (bron: ISSO 81).

Warmtepomp en ketel

De warmtepomp en ketel zijn gemodelleerd met behulp van vergelijkingen. Om een correcte werking van de warmtepomp te garanderen, wordt deze in werkelijkheid altijd met een verdeelregeling ingepast (zie Figuur 73). Daardoor kan er bij een simulatie met een tijdstap van een uur van worden uitgegaan dat de warmtepomp altijd de gewenste temperatuur levert. Dit maakt een vereenvoudiging van de simulatie van de warmtepomp mogelijk. Het rendement van de warmtepomp en daarmee de verhouding tussen de opgewekte warmte en koude is berekend met behulp van de Carnotfactor.

Indien de warmtepomp niet het gevraagde verwarmingsvermogen kan leveren, resulteert dit in een aanvoertemperatuur richting de ketels die lager is dan de gewenste aanvoertemperatuur. In dat geval schakelen de ketels in om de gewenste temperatuur te bereiken.

Droge koeler

Een droge koeler is bedoeld om water af te koelen met buitenlucht. De basis is een lucht-/waterwarmtewisselaar, waarbij water door leidingen met koelribben stroomt. De buitenlucht wordt met behulp van een ventilator langs de koelribben gezogen. Als het water warmer is dan de lucht, zorgt dit voor afkoeling van het water. De specificaties van de warmtewisselaar en de stroomsnelheid van het water en de lucht zijn bepalend voor de warmteoverdracht. Hogere stroomsnelheden geeft een toenemende effectiviteit van de droge koeler. Echter, tegelijkertijd neemt de geluidsproductie en het energiegebruik toe.

Voor de droge koeler is binnen DWA voor het PIA-simulatiepakket een rekenmodel ontwikkeld. Deze is in het verleden gevalideerd en voor dit project beschikbaar gemaakt als TRNSYS-component.

Voor het bepalen van de warmteoverdracht wordt gebruikgemaakt van de in Tabel 35 genoemde ontwerpspecificaties van de warmtewisselaar. De lucht-/waterwarmtewisselaar in de droge koeler als kruisstroomwarmtewisselaar. Hierbij is gebruikgemaakt van de volgende warmtebalans.

$$Q_v \rho_v c_{p,v} (T_{v,i} - T_{v,u}) = Q_l \rho_l c_{p,l} (T_{l,i} - T_{l,u}) = kA(T_v - T_l)_{gem}$$

Q_v, Q_l	= vloeistof- respectievelijk luchtdebiet (m ³ /s)
ρ_v, ρ_l	= soortelijke massa van vloeistof respectievelijk lucht (kg/m ³)
$c_{p,v}, c_{p,l}$	= soortelijke warmte van vloeistof respectievelijk lucht (J/kgK)
$T_{v,i}, T_{v,u}$	= intrede- en uittredetemperatuur van de vloeistof (°C)
$T_{l,i}, T_{l,u}$	= intrede- en uittredetemperatuur van de lucht (°C)
k	= warmtedoorgangscoefficiënt (W/m ² K)
A	= luchtzijdig oppervlak (m ²)
$(T_v - T_l)_{gem}$	= gemiddeld temperatuurverschil tussen vloeistof en lucht (K)

Voor een aantal droge koelers van verschillende fabrikaten is een dimensioneringsberekening uitgevoerd, waarvan de resultaten in Tabel 36 vergeleken zijn met fabrikantsgegevens.

Tabel 36 Vergelijking dimensioneringsberekening droge koelers met fabrikantsgegevens

Uitgangspunten		Resultaten	Fabr.	PIA	%
Fabriek A, type 1		Luchtdebiet (m ³ /h)	123.800	123.300	0
Waterdebiet (m ³ /h)	35	Luchtzijdig oppervlak (m ²)	1.280	1.292	1
Twater,i (°C)	15	Twater,u (°C)	8	8	0
Twater,u (°C)	8	Drukverlies waterzijdig (kPa)	48	46	-1
Tbuitenlucht (°C)	2	Koelcapaciteit (kW)	285	284	0
Luchtsnelheid (m ³ /s)	2,5	Pelektrisch (kW)	5,9	4,8	-19
Fabriek B, type 1		Luchtdebiet (m ³ /h)	126.700	121.000	-4
Waterdebiet (m ³ /h)	35	Luchtzijdig oppervlak (m ²)	1.280	1.292	1
Twater,i (°C)	15	Twater,u (°C)	8	7,9	-1
Twater,u (°C)	8	Drukverlies waterzijdig (kPa)	23	21	-9
Tbuitenlucht (°C)	2	Koelcapaciteit (kW)	285	288	1
Luchtsnelheid (m ³ /s)	3,5	Pelektrisch (kW)	11,4	10,1	-11

Uit de resultaten blijkt dat het luchtzijdig oppervlak goed overeenstemt met fabrikantgegevens. De verschillen liggen ruim beneden de 10%. In het drukverlies en het elektrisch vermogen treden grotere afwijkingen op. Tijdens de validatie zijn tevens een aantal deellastberekeningen uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn niet in dit rapport weergegeven. De deellastberekeningen stemmen goed overeen met de fabrikantgegevens. Het rekenmodel voldoet derhalve voor een (voorlopige) selectie en voor simulatieberekeningen.

Regeling

Het voert te ver om de gebruikte regeling in deze publicatie volledig uit te werken. Globaal gezien gelden de volgende regelvoorwaarden.

- De warmtevraag is preferent over de koudevraag.
- De ketels schakelen pas in als het gevraagde verwarmingsvermogen groter is als het vermogen van de warmtepomp.
- Tijdens een warmtelevering door de warmtepomp wordt de geproduceerde koude gebruikt voor eventuele koudevragers. Het overschot wordt gebruikt voor koude laden.
- Tijdens koudelevering is de WKO preferent over de warmtepomp. De warmtepomp schakelt pas in als de temperatuur na de WKO 5-10% boven de gewenste temperatuur ligt.
- De droge koeler is beschikbaar voor koude laden als de buitentemperatuur laag genoeg is en er brondebiet beschikbaar is.

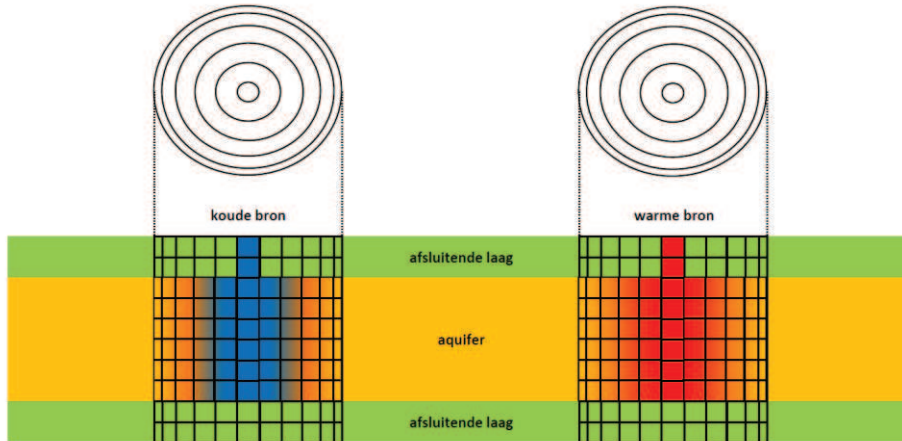
Meer informatie is te vinden in [6] en [19].

Bodem

In het TRNSYS-model is de bodem gemodelleerd met behulp van een vereenvoudigd aquifermodel. Dit rekenmodel voor de warmte-/koudeopslag is binnen DWA voor het PIA-simulatiepakket ontwikkeld. Deze is in het verleden gevalideerd en voor dit project beschikbaar gemaakt als TRNSYS-component.

De aquiferopslag is gemodelleerd als twee cilindervormige opslagdelen, één voor de koude bron en één voor de warme bron. Hierbij is aangenomen dat beide bronnen zover van elkaar gelegen zijn dat er geen sprake is van onderlinge beïnvloeding. De cilindervormen zijn zowel in radiale als verticale richting verdiscretiseerd. In de radiale richting wordt de cilinder opgedeeld in een aantal schillen. In de verticale richting worden

zowel de afsluitende lagen als de aquifer zelf opgedeeld in een aantal lagen. Voor elk knooppunt van de schillen en lagen wordt vervolgens de energiebalans opgesteld. Door het oplossen van al deze energiebalansen voor elke tijdstap van de simulatie is het effect van waterverplaatsing door injectie of onttrekking en het effect van gelding te berekenen. Hieruit resulteert vervolgens de temperatuurverdeling van de warmte-koudeopslag.



Figuur 74 Schematische weergave van de discretisatie in het gebruikte aquifermodel

In het rekenmodel zijn de volgende aannames gemaakt:

- 1 het opgeslagen water bevindt zich cilindervormig rond de bron;
- 2 de hydraulische en thermische eigenschappen van de bodem zijn volledig homogeen;
- 3 er is geen natuurlijke grondwaterstroming;
- 4 het bronfilter is over de gehele hoogte van de aquifer aanwezig;
- 5 er treden een verticale convectiestromen op als gevolg van temperatuurverschillen tussen de boven- en onderzijde van de aquifer.

Injecteren of onttrekken betekent dat het water in de aquifer zich van schil naar schil verplaatst. In de tijd gezien vinden beurtelings berekeningen plaats van de injectie/onttrekking van water en van de warmtegeleiding van de ondergrond. De afmetingen van de schillen wordt bepaald door de geschatte (nominale) koudevraag en de brontemperaturen.

Het rekenmodel is in feite een vereenvoudigde versie van het uitgebreidere rekenmodel HST2D, dat specifiek is ontwikkeld voor de berekening van stroming en warmteoverdracht in de ondergrond. HST2D is uitgebreid getest en gevalideerd, in Tabel 37 zijn voor een aantal berekeningen de resultaten van het hierboven beschreven model vergeleken met de resultaten uit HST2D.

Tabel 37 Vergelijking tussen HST2D en TRNSYS aquifer module

Uitgangspunten		Geval 1	Geval 2	Geval 3
Aquiferdikte	m	20	50	50
Injectietemperatuur	°C	6	8	2
koude bron		16	18	12
Afkapt temperatuur	°C	10	10	8
Opgeslagen hoeveelheid water	m ³	100.000	50.000	500.000
Berekende gegevens voor het eerste jaar		HST2D TRNSYS	HST2D TRNSYS	HST2D TRNSYS
Werkelijke hoeveelheid opgeslagen water	m ³	99.590 100.464	49.620 50.112	488.030 500.688
Hoeveelheid geladen koude	MWh	1.162 1.165	578 580	5.685 5.806
Onttrokken hoeveelheid water uit de koude bron	m ³	104.220 101.626	34.070 36.774	508.530 488.920
Hoeveelheid onttrokken koude	MWh	985 980	363 389	4.650 4.449
Opslagrendement	%	82 84	63 67	76 76

III.i.d Vergelijk met referentiewaarden

Het gebruik van simulatiemodellen is afhankelijk van de aannames die gedaan worden en in te parameters. Om de betrouwbaarheid van de simulaties te kunnen beoordelen worden in deze paragraaf de uitkomsten vergeleken met referentiewaarden uit de literatuur of uit metingen. Verder validatiestudies van de gebruikte modellen zijn te vinden in referentie [2] en [3].

De resulterende rendementen zijn van invloed op de hoeveelheid te laden koude of warmte in de bodem. Tevens zijn ze van belang voor de extra CO₂-uitstoot voor het in balans brengen van de bodem. De resulterende rendementen zijn daarom vergeleken met referentiewaarden uit de literatuur.

In Tabel 38 staan de gemiddelde COP's weergegeven die volgen uit de berekeningen van Scenario 3 met 100% onbalanscorrectie en een vergelijking met referentiewaarden uit de literatuur of metingen. In de volgende tekst is de berekeningswijze van deze COP's beschreven.

Tabel 38 Gemiddelde COP's uit simulatie van scenario 3 met 100% onbalanscorrectie. De andere scenario's vertonen vergelijkbare waarden, alhoewel de COP van warmte-/koudeopslag sterker varieert. Dit, vanwege de afhankelijkheid van de COP van het temperatuurverschil tussen de bronnen.

		COP (-)	Referentiewaarden
Warmtepomp	Koudeproductie	3,5	Gangbaar voor koelmachines COP = 3,5
	Warmteproductie	4,8	Zie Figuur 75
Warmte-/koudeopslag	Koude onttrekken	52,0	41 (bron:[9])
	Warmte onttrekken	36,1	25 (bron: [9])
Droge koeler	Condensorwarmte afvoeren	48,4	Niet beschikbaar
	Koude laden	9,9	Zie Figuur 76 en Figuur 77

Hieronder worden de rendementen verder toegelicht.

Warmtepomp

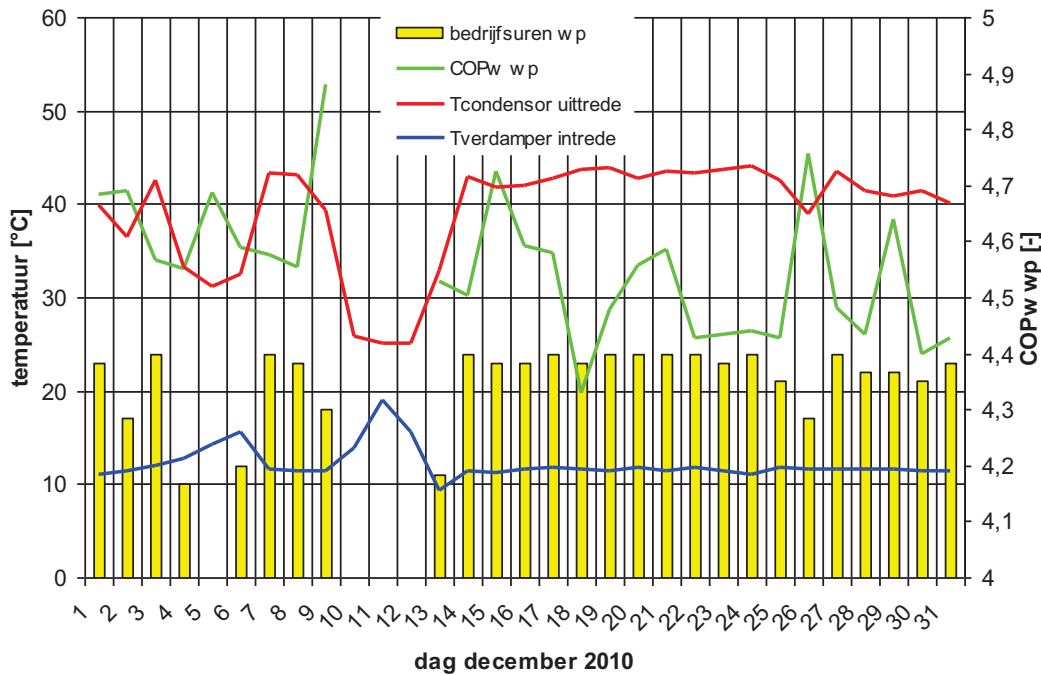
De COP van de warmtepomp is als volgt gedefinieerd.

$$COP_{wp} = \frac{E_{cond}}{E_{elek}}$$

E_{cond} = opgewekte warmte aan de condensorzijde van de warmtepomp (kWh)

E_{elek} = benodigde elektrische energie om E_{cond} op te wekken (kWh)

Wanneer de warmtepomp als koelmachine gebruikt wordt, kan voor het berekenen van de COP E_{cond} in de bovenstaande vergelijking vervangen worden door E_{verd} (opgewekte koude aan de verdamperszijde van de warmtepomp).



Figuur 75 Monitoringsresultaten warmtepomp (Voorbeeld uit gerealiseerd project)

Warmte-/koudeopslag

De COP van de warmte-/koudeopslag is de nuttig geleverde warmte en/of koude gedeeld door de benodigde elektrische energie voor pompen. Aan de hand van het verschil tussen de onttrekkings- en injectietemperatuur kan dit worden berekend. De injectietemperatuur is equivalent aan de temperatuur van de bron. Derhalve kan ook het temperatuurverschil tussen de warme en koude bron gebruikt worden.

$$COP_{wko} = \frac{P_{therm}}{P_{elek}} = \frac{\rho c_p \eta (T_w - T_k)}{\Delta p}$$

- ρ = soortelijke massa van water (kg/m³)
- c_p = soortelijke warmte van water (J/kgK)
- Δp = opvoerhoogte van de bronpomp (Pa)
- η = rendement van de bronpomp (-)
- T_w, T_k = temperatuur van de warme, respectievelijk koude bron (°C)

Voor de benodigde opvoerhoogte en het rendement van de bronpomp kunnen de volgende vuistregels worden aangehouden:

- Δp = 400-450 Pa.
- η = 0,6.

Ingevuld levert dit de volgende vuistregel voor de COP voor het ontladen van koude (= leveren van koeling):

$$COP_{ontladen} = 6(T_w - T_k)$$

De pompenergie voor het laden van de koude is ongeveer gelijk is aan die voor het ontladen. Dus dan wordt de overall rendement:

$$COP_{\substack{\text{laden} \\ +\text{ontladen}}} \approx 3(T_w - T_k)$$

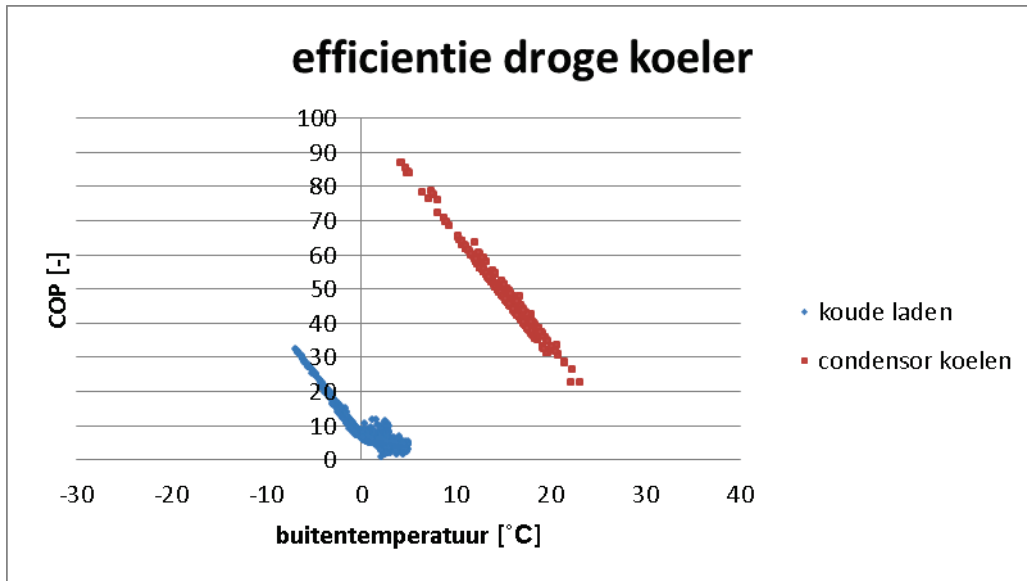
Droge koeler

De COP van de droge koeler wordt op dezelfde wijze berekend als de COP voor de warmtepomp:

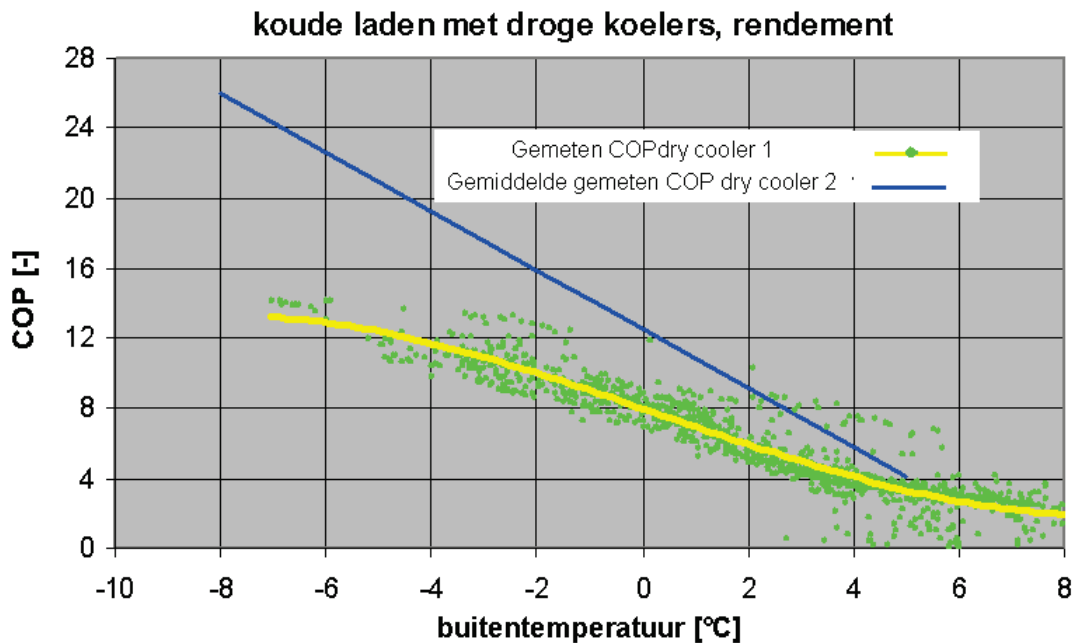
$$COP_{dk} = \frac{E_{therm}}{E_{elek}}$$

- E_{therm} = door de droge koeler opgewekte koude (= afgevoerde warmte) (kWh)
- E_{elek} = benodigde elektrische energie om E_{therm} op te wekken (kWh)

In Figuur 76 is de afhankelijkheid van de COP van de droge koeler ten opzichte van de buitentemperatuur weergegeven. Hoe kouder het buiten is, hoe hoger de COP, omdat er minder lucht verplaatst hoeft te worden om het water af te koelen tot de gewenste temperatuur. Dientengevolge is er minder ventilatorenergie nodig, waardoor de COP omhoog gaat. Figuur 77 geeft waarden van praktijkmetingen van COP's voor koudeladen met dry coolers. De waarden die volgen uit de simulaties zijn als realistisch te beschouwen.



Figuur 76 Typische COP's van de droge koeler tijdens koude laden en het koelen van de condensor bij verschillende buitentemperaturen.



Figuur 77 Gemeten waarden van de COP tijdens het laden van koude met een droge koeler. Vergelijking van 2 systemen. Dry cooler 1 is suboptimaal geplaatst waardoor het rendement lager is dan technisch mogelijk.

III.i.e Energiebalans

Voor het berekenen van de procentuele energiebalans is gebruikgemaakt van de volgende definitie:

$$balans = \frac{\int_0^{\tau} E_{ontladen} - E_{laden} dt}{\int_0^{\tau} E_{ontladen} + E_{laden} dt}$$

E_{ontladen} = hoeveelheid koude die gedurende tijdsinterval dt aan de bodem is onttrokken
(= hoeveelheid warmte die toevoegd is aan de bodem).

E_{laden} = hoeveelheid koude die gedurende tijdsinterval dt aan de bodem is toegevoegd.
 T = simulatietijd vanaf $t = 0$.

De energie die worden onttrokken of toegevoegd, is eenvoudig te berekenen met behulp van de volgende vergelijking:

$$E_{(\text{ont})\text{laden}} = \int_{t-dt}^t q\rho c_p \Delta T dt$$

q = verplaatste waterhoeveelheid (m^3/s)

ρ = dichtheid water (kg/m^3)

c_p = warmtecapaciteit water (J/kgK)

ΔT = absoluut verschil tussen de onttrekkings- en injectietemperatuur (K)

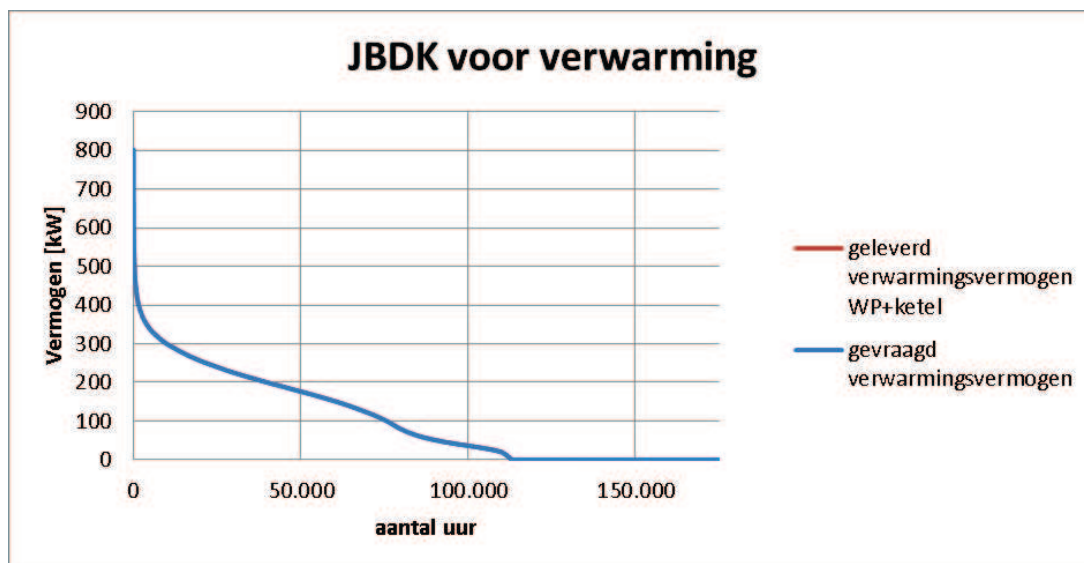
In paragraaf 4.1.1.2 is voor de drie bovengenoemde scenario's de energiebalans weergegeven voor een situatie waarbij er geen extra koude wordt geladen. Doordat er sprake is van een cumulatieve energiehoeveelheid, worden fluctuaties steeds verder uitgedempt. De stabiele waarden kunnen met behulp van de energievraag voor verwarming en koeling worden vergeleken met Tabel 12. In Tabel 39 zijn de waarden uit de simulatie en interpolaties van Tabel 12 met de correcte COP en aandeel warmtelevering met elkaar vergeleken.

Tabel 39 Vergelijking resultaat uit simulatie met eenvoudige berekening

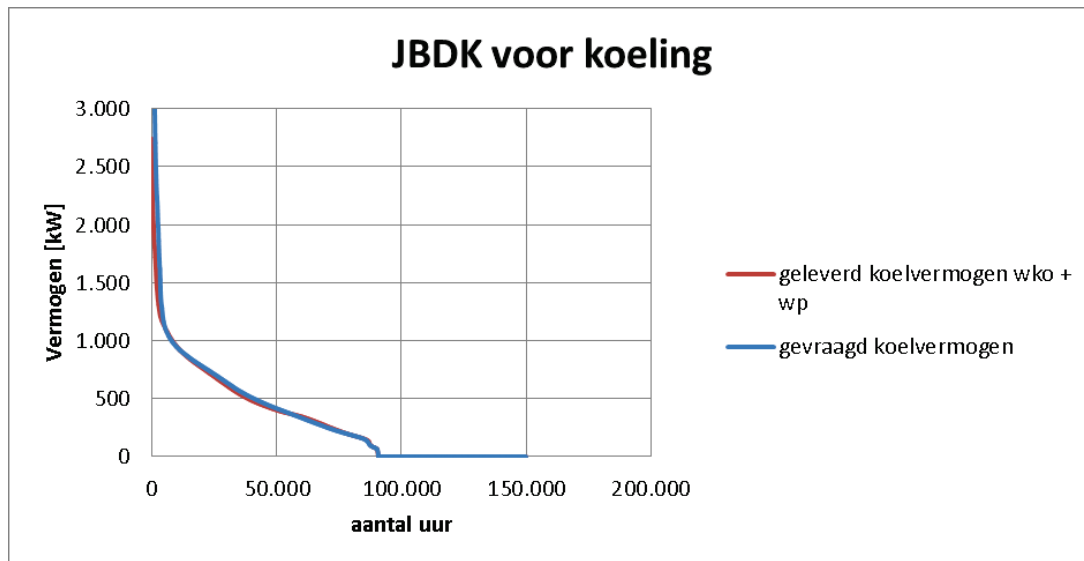
Scenario	Koudevraag (kWh/jr)	Warmtevraag (kWh/jr)	Onbalans volgens simulatie	Onbalans volgens conform aanpak bijlage II
1	5	66	-80%	-82%
2	21	39	-20%	-16%
3	81	30	54%	57%

III.i.f Jaarbelastingsduurkrommes gebouwvraag

Voor scenario 3 is in Figuur 78 en Figuur 79 voor respectievelijk verwarming en koeling de belastingduurkromme weergegeven van de gesimuleerde dertig jaar.



Figuur 78 Belastingduurkromme voor verwarming over dertig jaar (scenario 3)



Figuur 79 Belastingduurkromme voor koeling over dertig jaar (scenario 3)

III.i.g Kosten onbalanscorrectie

Om de kosten voor het corrigeren van de energiebalans in de juiste context te plaatsen, zijn de investeringskosten voor de energieopwekkingsinstallatie opgenomen in de kosten zoals weergegeven in Tabel 2. In deze paragraaf zijn de achterliggende berekeningen beschreven.

Investeringskosten

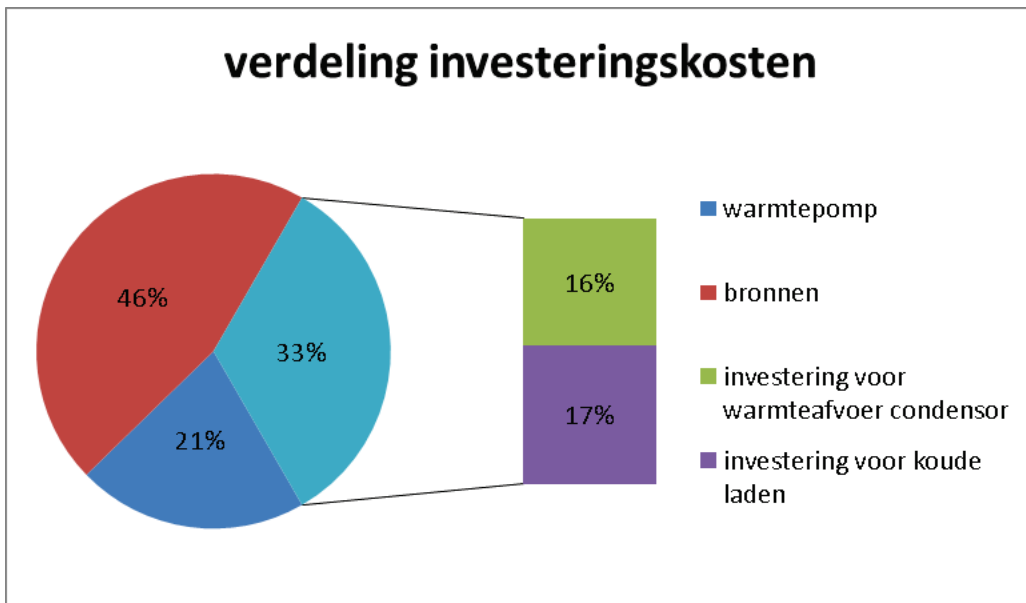
De investeringskosten van de energieopwekkingsinstallatie zijn opgebouwd uit de kosten van de volgende componenten.

- Warmtepomp: onafhankelijk van grootte onbalanscorrectie.
- Ketel: onafhankelijk van grootte onbalanscorrectie.
- Warmte-/koudeopslag: deels afhankelijk van grootte onbalanscorrectie.
- Droge koeler: afhankelijk van grootte onbalanscorrectie.
- TSA warmte-/koudeopslag: onafhankelijk van grootte onbalanscorrectie.
- TSA droge koeler: afhankelijk van grootte onbalanscorrectie.

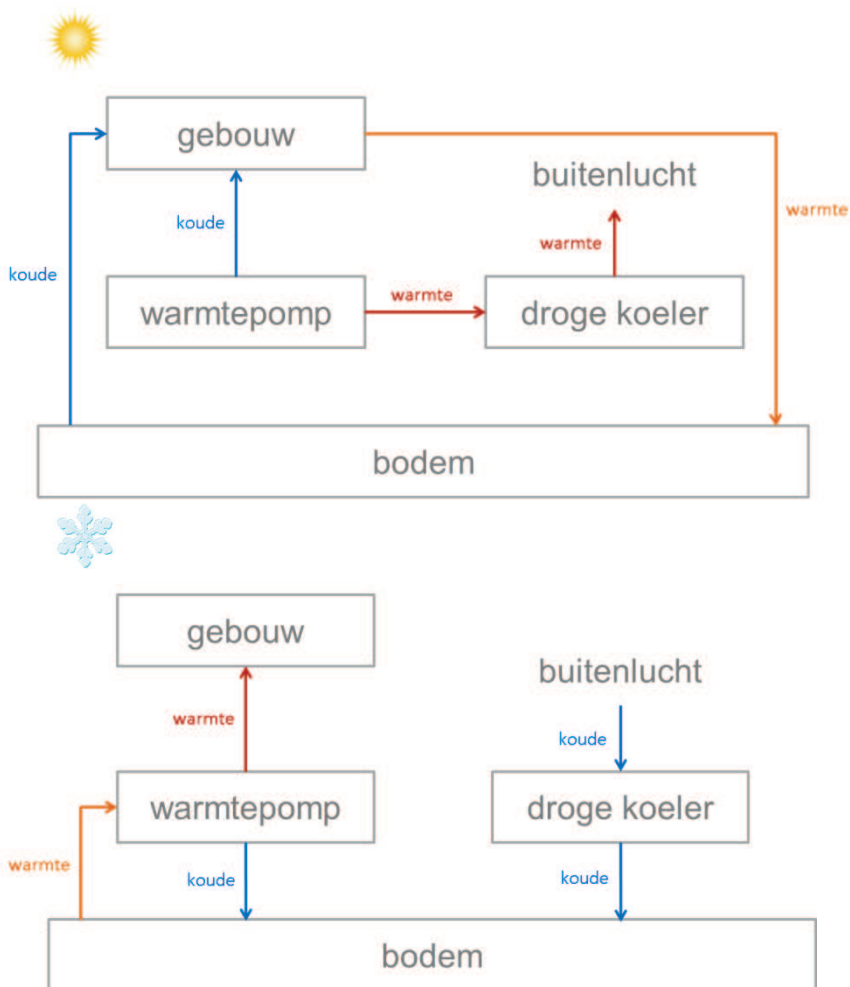
De kosten van de overige delen van de installatie (leidingwerk, kleppen, pompen et cetera) gelden voor elk type installatie. De installatieonderdelen die in de investeringskosten worden meegenomen, zijn specifiek voor een energieopwekkingsinstallatie met warmte-/koudeopslag. De investeringskosten gelden alleen voor het ontwerp van scenario 3 van het hierboven beschreven referentiekantoor.

Wanneer er wordt uitgegaan van een situatie waarin de energiebalans geen rol speelt, kan het pompdebiet van de warme bron omlaag bijgesteld worden naar het debiet dat nodig is voor de warmtepomp. Speelt de energiebalans een rol, dan bepaalt de grootte van de droge koeler hoeveel extra pompdebiet er nodig is voor de warme bron. Het water voor de laden van koude moet immers door de pomp in de warme bron worden verplaatst naar de koude bron. Deze grotere bronpomp zorgt naast het extra vermogen van de droge koeler voor de extra investering voor het laden van koude.

Tabel 2 en Figuur 14 laten zien dat zonder extra investeringskosten de onbalans met zo'n 70% kan worden gereduceerd. Dit is mogelijk door het gebruik van de droge koeler die bestemd is voor het afvoeren van condensorwarmte. In Figuur 81 is dit principe schematisch weergegeven. Hierdoor is in dit scenario de voorziening voor correctie van 70% reeds aanwezig in het installatieconcept. Bij 100% balanscorrectie komen hier extra investeringen bij (Figuur 80).



Figuur 80 Verdeling van de investeringskosten voor scenario 3 met extra voorzieningen voor het laden van koude. De meerinvestering voor het laden van koude omvat zowel de grotere droge koeler, als het groter warme brondebiet en bijbehorende warmtewisselaars.



Figuur 81 Toevoeren van extra koude aan de bodem in de winter (onder) met behulp van de droge koeler die bestemd is voor het afvoeren van condensorwarmte van de warmtepomp in de zomer (boven).

Exploitatiekosten

De exploitatiekosten van de energieopwekkingsinstallatie zijn opgebouwd uit de energiekosten van de volgende componenten:

- droge koeler;
- bronpompen;
- ketel;
- warmtepomp.

Het energiegebruik van deze componenten is afgeleid uit de instantane COP van elke component. In Tabel 40 zijn de waardes van de gebruikte variabelen om de energiekosten te berekenen weergegeven. Tevens is de gebruikte omrekenfactor voor het berekenen van de CO₂-uitstoot weergegeven. Bij de elektriciteits- en gasprijs is rekening gehouden met de schaalgrootte van het verbruik.

Tabel 40 Waardes van gebruikte variabelen. Voor de gas- en elektriciteitsprijs geldt; prijspeil 2011

Variabele	Gebruikte waarde
Electriciteitsprijs	0,107 €/kWh
Gasprijs	0,518 €/m ³
Energie-inhoud gas	31,65 MJ/m ³
CO ₂ -uitstoot elektriciteit	0,0689 kg/MJ
CO ₂ -uitstoot gas	0,0567 kg/MJ
Rendement gasketel	85 %
COP koelmachine	3,5

IV Opties voor het regenereren van warmte of koude

De casus uit paragraaf 4.1 is gebaseerd op één referentiekantoor met droge koelers als regeneratievoorziening.

In Tabel 41 zijn de verschillende mogelijkheden opgesomd om extra koude of warmte aan de bodem te kunnen toevoegen.

Tabel 41 *Mogelijke methodes om extra warmte of koude aan de bodem toe te voegen. Voor alle methodes geldt dat naast de aanwezigheid van het apparaat ook de juiste hydraulische inpassing noodzakelijk is om warmte of koude aan de bodem te kunnen toevoegen.*

Methode	Geschikt voor warmte laden	Geschikt voor koude laden
Droge koeler	X	X
Koeltoren		X
Oppervlaktewater	X	X
Energiedak	X	X
Luchtbehandelingskast		X
Asfaltcollector	X	X
Zonnecollector	X	
Afvoer condensorwarmte van een warmtepomp	X	
Afvoer van koude van de verdamper van de warmtepomp		X
Restwarmte	X	
Koppeling aan naburige WKO	X	X

Het voert buiten het kader van deze studie om de verschillende regeneratiemogelijkheden hier verder te vergelijken. Droge koelers staan bekend als een kosteneffectieve manier voor het regenereren van de bodem en zijn daarom als techniek toegepast voor regeneratie in het geval van de casus in paragraaf 4.1.