

Het invloedsgebied van een gesloten verticale bron voor aardwarmte in een klein warmtenet.

Samenvatting

In deze studie worden de mogelijkheden onderzocht om een aantal bodemlussen te laten samenwerken in een klein warmtenetje. De vraag is hoe ver de bodemlussen van elkaar moeten liggen om geen al te grote onderlinge negatieve beïnvloeding te veroorzaken. Daarbij speelt de snelheid van de grondwaterstroming een rol. De conclusies zijn:

1. Hoe dieper een bron is hoe meer warmte er uit is te halen, en mede t.g.v. de geothermische gradiënt hoe efficiënter dit kan. Een nadeel is het hogere pompvermogen voor de circulatie van het water in de bodemlus. Ook kunnen de boorkosten onevenredig toenemen. In overleg met een bedrijf voor het boren van putten dient de optimale diepte en de optimale gemiddelde warmte-onttrekking per meter te worden vastgesteld.
2. Bij het onttrekken van warmte uit een bodemlus voor het voeden van een warmtepomp treedt ook uitwisseling van warmte op tussen diepere aardlagen en meer oppervlakkige aardlagen.
3. De gangbare dieptes voor bodemlussen zijn tot maximaal 200 m. Onder Castricum heeft het grondwater een effectieve transportsnelheid voor warmte van 3 m/jr in de bovenste 110 m en 15 m/jr in de daaronder liggende 80 m.
4. Mede t.g.v. de grondwaterstroming kunnen bronnen op een afstand van 5 tot 10 m van elkaar geplaatst worden zonder veel invloed op de efficiency van de warmtepomp.
5. Zomerse regeneratie van de in de winter onttrokken bodemwarmte heeft een duidelijk positief effect op de efficiency van de warmtepomp, echter de bespaarde elektrische energie is waarschijnlijk onvoldoende om de benodigde extra investeringen te rechtvaardigen. Dit dient in een aparte studie te worden uitgewerkt. Tegenwoordig zijn er projecten met een bodemlus plus warmtepomp alsmede projecten met PVT panelen plus warmtepomp. Bij de laatste wordt de slechtere efficiency in zeer winterse omstandigheden gecompenseerd door een betere efficiency in de andere perioden. Een nadeel is dat geen passieve zomerse koeling mogelijk is. Misschien is er een tussenvorm met een combinatie van bodemlussen, PVT panelen en warmtepompen met een gunstige business case.

1. Inleiding

Met het toenemen van het aantal warmtepompen die hun warmte onttrekken aan de bodem neemt de zorg toe dat bronnen te dicht bij elkaar komen te liggen, waardoor ze elkaar uitputten. De warmte die uit een bron wordt gehaald wordt enkel via geleiding uit de omgeving weer aangevuld. De geleiding vanuit de bovenkant, of vanuit de onderkant middels de geothermische gradient in de bodem, is vele malen te traag om te compenseren voor de afgetapte warmte. De bodem zal dus steeds kouder worden, tenzij deze warmte in de zomer weer wordt teruggepompt.

Als er in de bodem een waterstroming aanwezig is zal via dit water de warmte in de bron aangevuld worden. Stroomafwaarts van de bron, echter, zal er een gebied van lagere temperaturen optreden. Als in dit gebied een andere bron aanwezig is zal die bron daarvan hinder ondervinden, d.w.z. dat die bron dieper moet worden gekoeld om voldoende warmte te onttrekken. Dit betekent dat de efficiency van de warmtepomp verslechtert.

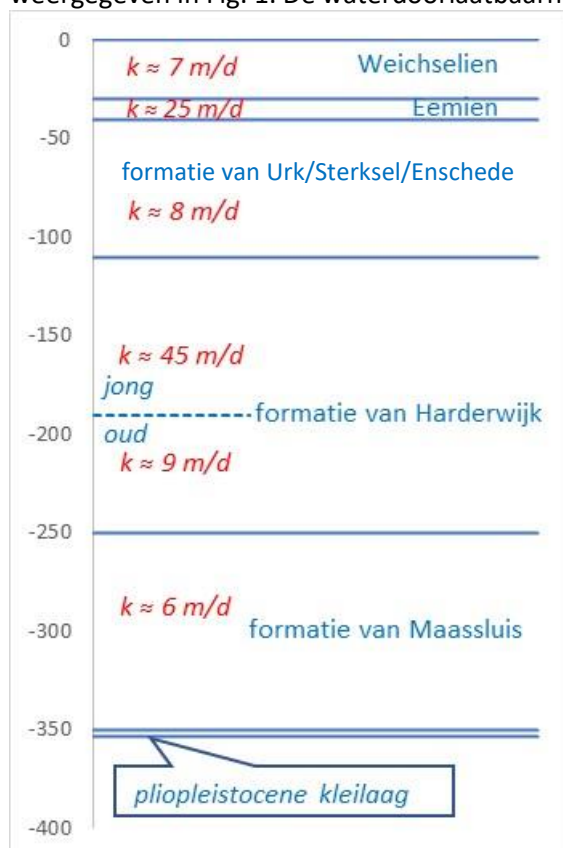
In de regelgeving voor gesloten bronnen voor bodemenergie, zie ref. [5], wordt gesteld dat er maximaal 1,5°C interferentie mag optreden. De gemeente heeft de taak gekregen toezicht te houden op de aanleg van gesloten bronsystemen. Voor open systemen ligt de verantwoordelijkheid bij de provincie.

Voor gemeentes is er een eenvoudige tool beschikbaar om de interferentie uit te rekenen, zie ref. [4]. Voor de meeste situaties wordt hiervoor de methode gebruikt zoals beschreven in ref. [3]. Hierin wordt de interferentie tussen bronnen bepaald voor een situatie zonder grondstroming. Daarbij wordt gerekend met een bedrijfstijd van 25 jaar. Na die 25 jaar is de invloed van een bron tot op enkele tientallen meters merkbaar. Voor situaties met een relatief grote grondwater stroomsnelheid moet de invloed modelmatig worden bepaald met meer algemene programma's.

In de bodem onder Castricum is de stroomsnelheid van het grondwater net onder de grens waarvoor de modelmatige aanpak vereist is. In onderstaande theorie wordt de invloed van grondstroming toch meegenomen. De reden is dat er bij energiecoöperatie CALorie gedacht wordt aan kleine warmtenetjes op basis van enkele bronnen die onderling minder dan enkele tientallen meters van elkaar liggen. De vraag is ook of daarbij positief gebruik kan worden gemaakt van de grondwaterstroming, door de koelbehoefte in de zomer en de warmtebehoefte in de winter op elkaar af te stemmen. In sectie 2 wordt eerst een overzicht gegeven van de hydrologische ondergrond van Castricum. Sectie 3 geeft de resultaten van een stationaire theorie. Tenslotte wordt in sectie 4 bekeken hoe nabijgelegen bronnen zouden kunnen samenwerken in een klein warmtenetje.

2. De hydrologische situatie in Castricum

De ondergrond in Castricum is uitvoerig in kaart gebracht door Pomper^[ref.1]. Op een diepte van ongeveer 350 m ligt een pleistocene kleilaag met daarboven verschillende formaties zoals weergegeven in Fig. 1. De waterdoorlaatbaarheid wordt weergegeven door de zgn. $\bar{k}$ -waarde, die de



bulksnelheid van het water weergeeft bij een drukval van 1 meter waterkolom per meter afstand. De laagdiktes en $\bar{k}$ -waarden in de grafiek zijn zo goed mogelijk gehaald uit de figuren in ref. [1] voor de omgeving Castricum.

Er worden 3 watervoerende pakketten onderscheiden: het eerste in de bovenste 30 m (de afzettingen van de laatste ijstijd, het Weichselien), het tweede in de formatie van Urk/Sterksel/Enschede (tussen -40 m en -110 m) en het derde in de formatie van Harderwijk (tussen -110 m en -190 m). De laag van 10 m tussen de eerste en tweede watervoerende laag heeft een redelijk hoge $\bar{k}$ -waarde (25 m/d), en zou dus eigenlijk ook als watervoerend beschouwd moeten worden. Dit is de laag die is afgezet in de periode tussen de laatste twee ijstijden (het Eemien). In deze periode lag Noord Holland beneden zeeniveau. Tussen het tweede en derde watervoerend pakket ligt een dun kleiig laagje.

Fig. 1: Pleistocene aardlagen onder Castricum

De watersnelheid in de aardlaag wordt gegeven door de drukval in horizontale richting. Deze is te bepalen uit de gradiënt van de grondwaterstand. De isohypsen (hoogtelijnen van het grondwater) kunnen worden gevonden m.b.v. ref. [2]. In Fig. 2 worden hiervan twee voorbeelden gegeven voor Castricum. Het betreft twee data die een half jaar uit elkaar liggen. Het is te zien dat op beide data in het grootste deel van het dorp Castricum de gradient ongeveer 0,5 m/km is in OZO richting. In het westelijk deel van Castricum, met name in de omgeving van de Beverwijkerstraatweg en de Heerenweg is de gradient veel groter.

Met bovenstaande gradiënt is de grondsnelheid te bepalen als

$$u_o[\text{m/jr}] \approx \frac{1}{6} \bar{k} [\text{m/d}]$$

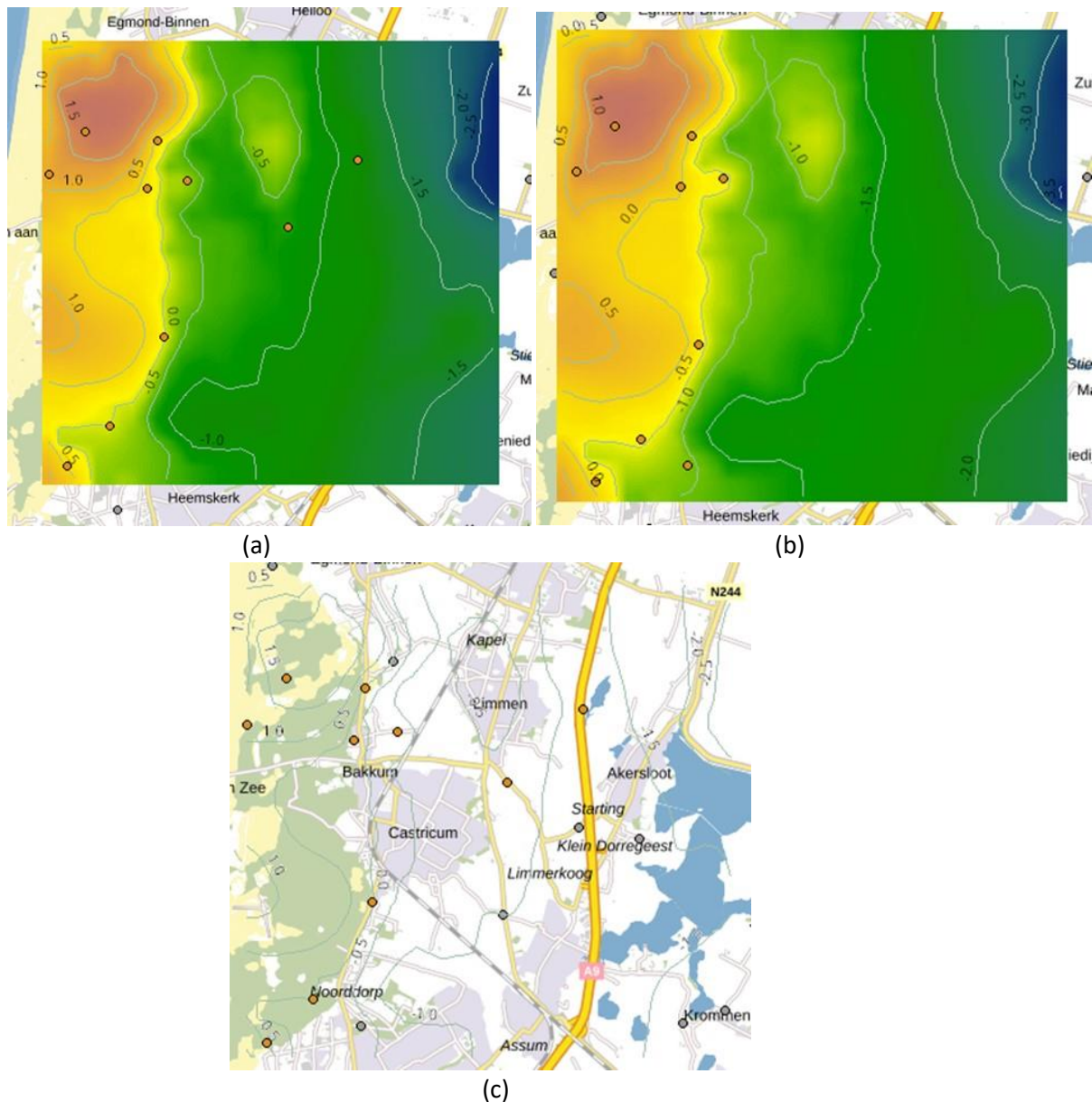


Fig. 2: Isohypsens in de omgeving van Castricum. (a) situatie op 28 jan 2010, (b) situatie op 28 juli 2010, (c) kaartje voor de positiebepaling

De $\bar{k}$ -waarden zijn niet op elke diepte nauwkeurig bekend. De “waarde” die ref. [1] geeft voor de formatie van Urk/Sterksel/Enschede (2^e watervoerend pakket) in de omgeving van Castricum is “tussen <10 en 30 m/d”. In Fig. 16 van ref. [1] wordt voor $\bar{k}$ maal de pakketdikte onder Castricum een waarde tussen 500 en 1000 m²/d gegeven. Daarom nemen we in dit rapport een waarde van 8 m/d voor $\bar{k}$. De $\bar{k}$ -waarde in de formatie van Harderwijk (3^e watervoerend pakket) is ook niet erg duidelijk. Er worden twee meetmethoden genoemd die sterk verschillende resultaten geven, de methode met de laagste waarden (de pulsmethode) wordt als meer betrouwbaar beschouwd.

2. Stationaire theorie

We beschouwen een homogeen gepakt zandbed waarin zich op $(x,y)=(0,0)$ een lijnbron van warmte bevindt met sterkte q' [W/m]. Het bed wordt doorstroomd door water met homogene (bulk)snelheid¹ u_o in x -richting. Hoewel in de praktijk de sterkte q' sterk varieert in de tijd nemen we hier een constante waarde aan, omdat het er in deze paragraaf om gaat tot hoever de invloed van de lijnbron zich gemiddeld over de tijd uitstrekt. Ook voor u_o nemen we een constante waarde. Zoals hierboven bleek heeft u_o een gemiddelde waarde van 1,5 m/jr in de bovenste 110 m van de formatie en ongeveer 7 m/jr in de daaronder liggende 80 m.

De waarde van q' is een belangrijke parameter. Typische waardes zijn 80 kWh/m.jr, oftewel 10 W/m. De piekbelasting is uiteraard veel groter, maar deze treedt slechts gedurende korte periodes in de winter op. Door de bron in de zomer ook te gebruiken om te koelen gaat de waarde van q' omlaag.

De theorie wordt uitgewerkt in Bijlage A. In Fig. 3 worden de resultaten grafisch weergegeven in de vorm van isothermen rond de bron. Daarbij zijn de temperatuur en de afstand dimensieloos gemaakt met een karakteristieke referentietemperatuur T_{ref} en een referentie-afstand L_{ref} , gegeven door:

$$T_{ref} \equiv \frac{q'}{4\pi\lambda_{bed}}; L_{ref} \equiv \frac{4a_{bed}}{u_{eff}}$$

Daarbij zijn λ_{bed} en a_{bed} de warmtegeleidingscoëfficiënt en de warmtediffusiecoëfficiënt van het zandbed (of algemener gezegd de formatie). De term u_{eff} is de *effectieve* snelheid van het water voor warmtetransport door de aarde, zoals gegeven in verg. (A.3). Hieruit blijkt dat $u_{eff} \approx 2u_o$. Het mag vreemd lijken dat het convectieve warmtetransport sneller is dan de bulksnelheid van het water. Dit kan echter omdat het water door de poriën een veel grotere snelheid heeft dan de bulk snelheid. λ_{bed} en a_{bed} hebben waardes van ongeveer 2 W/m.°K en 30 m²/jr resp. Dit betekent dat T_{ref} van de orde 0,4 °C is, en L_{ref} van de orde van 40 m in de bovenste 110 m van de formatie en 8 m in de daaronder liggende 80 m.

Als het criterium wordt gehanteerd dat de temperatuurinvloed niet groter mag zijn dan 1°C, dus $T/T_{ref} < 2,5$ dan blijkt uit de grafiek dat het interferentiegebied beperkt is tot $-0,12 < x/L_{ref} < 0,4$ en $-0,2 < y/L_{ref} < 0,2$. Dit betekent dat het interferentiegebied van een enkele bron in Castricum zeer beperkt is: in de bovenste 110 m tussen -5 en 16 m in stroomrichting en +/- 5 m loodrecht op de stroomrichting van het grondwater. In de daaronder liggende 80 m is dat nog eens een factor 5 kleiner. Dit is wel onder de aanname dat $q'=10$ W/m. Als de bron zwaarder wordt belast wordt de ineterferentieafstand evenredig groter.

¹ In ref. [4] wordt dit de Darcy grondwater snelheid genoemd

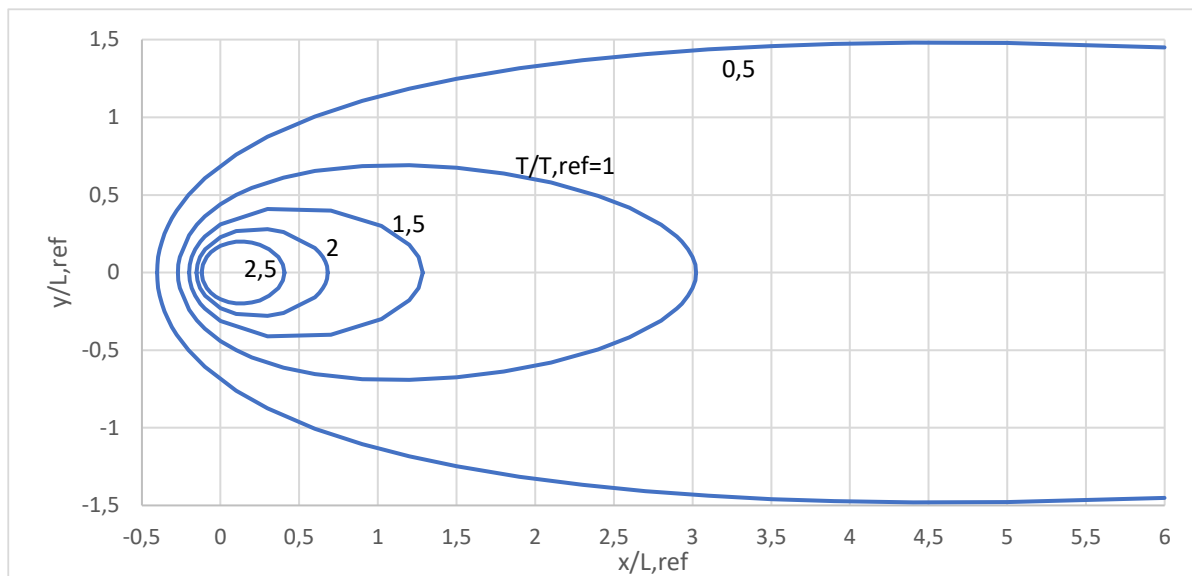


Fig. 3: Isothermen rondom een lijnbron in de oorsprong. Grondwater stroomt in x-richting.

3. Een klein warmtenetje met meerdere bronnen

Op inzicht te krijgen in de effecten van het plaatsen van meerdere bronnen dicht bij elkaar kijken we in deze sectie naar de seizoensafhankelijkheid van de warmte-onttrekking en eventueel -regeneratie. Eerst gaan we in op een aantal praktische vragen die relevant zijn bij het opzetten van een warmtenetje:

1. *Wat is de warmtevraag per seizoen?*

We houden hier een waarde van 12000 kWh per jaar per woning aan, waarvan 2000 kWh voor de warmwatervoorziening. Dit is equivalent aan een jaarlijks gasverbruik van 1300 m³.

2. *Wat is het benodigde piekvermogen?*

Het piekvermogen is te berekenen a.d.h.v. de warmtevraag per graaddag. Voor de dichtstbijzijnde plaats waar het KNMI data verzamelt (Wijk aan Zee) was het gemiddelde aantal gewogen graaddagen over de afgelopen 10 jaar 2630 per jaar (https://www.mindergas.nl/degree_days_calculation). Bij een warmtevraag van 10000 kWh per jaar betekent dit dus 4 kWh per graaddag. Een extreem koude winterdag telt voor ongeveer 30 graaddagen, dus is op zo'n dag 120 kWh aan warmte nodig. Daarnaast is 6 kWh warmte voor tapwater nodig. Met een marge van +15% komen we zo op een piekvermogen van 6kW. Dat is 4,4 maal het gemiddelde vermogen over het jaar.

Dit piekvermogen is in de meeste gevallen relatief kortstondig nodig. Voor de berekening van het effect van warmte-onttrekking op naburige bronnen is enkel de seizoensvariatie van belang. Als we deze variatie benaderen met een sinusvormige functie gedurende een half jaar plus een constante tapwatervoorziening gedurende het hele jaar dan is de piek van deze sinus 2,8 maal het gemiddelde vermogen over het jaar.

3. *Wat is de verwachte warmte-teruglevering per seizoen?*

Het is niet te verwachten dat het koelen van een huis in de zomer zeer veel warmte-teruglevering zal betekenen, althans niet bij een CV-systeem met water. Dat komt omdat het water niet kouder mag zijn dan het dauwpunt van de lucht, zodat de drijvende kracht voor koeling klein is. Naar verwachting is daarom niet meer dan 1 tot hooguit 2 kW mogelijk. In het hele seizoen is daarmee niet meer dan 2000 tot hooguit 4000 kWh terug te leveren.

Bij luchtverwarming/koeling is een groter vermogen haalbaar omdat het ontvochtigen veel energie onttrekt.

De beste methode om 's zomers warmte in de bodem te stoppen is d.m.v. PVT panelen of zonnecollectoren. Dit vereist echter een behoorlijke extra investering, die maar gedeeltelijk wordt terugverdiend in de vorm van een hogere COP in de winter. In deze paragraaf simuleren we twee situaties: (a) de warmte die in de winter aan de bron wordt onttrokken wordt in de zomer niet geregenereerd, en (b) de bron wordt 100% geregenereerd. Dit wordt uitgewerkt in Bijlage B. Zoals hieronder zal blijken is de besparing door volledige regeneratie vrij beperkt: slechts 100 tot 200 kWh elektriciteit per jaar. Daarbij is geen rekening gehouden met het feit dat een deel van de tijd het (warmere) water van het dak rechtstreeks naar de warmtepomp kan gaan. Het is echter de vraag of dit voldoende is om de investering te rechtvaardigen.

4. *Wordt gebruik gemaakt van een gemeenschappelijke warmtepomp, of van individuele?*

Het voordeel van een gemeenschappelijke warmtepomp is dat de kosten aanzienlijk omlaag gaan, en een iets hogere COP realiseerbaar is. Naar schatting kost een warmtepomp van 6 kW ongeveer €10k, en is één warmtepomp van 60 kW voor 10 aansluitingen zo'n 30% goedkoper per aansluiting. Daar staat tegenover dat een gemeenschappelijke warmtepomp permanent de hoogste benodigde temperatuur moet leveren, hetgeen ten koste gaat van de efficiency. In het algemeen is de hoogste benodigde temperatuur ruim 60°C (voor het tapwater), en daarbij is een COP te halen van 3. Voor veel woningen is 35 á 45°C voldoende, en is de COP 5 á 4. Dit scheelt jaarlijks meer dan 1000 kWh aan elektrische energie. Men zou kunnen overwegen de huizen te voorzien van een doorstroom geiser, zodat de warmtepomp geen water van 60° hoeft te leveren. Dit levert ófwel een te laag debiet ófwel een te hoge netbelasting.

5. *Worden de bronnen in serie of parallel geschakeld?*

Een voordeel van plaatsing in serie is dat hiermee een WKO systeem kan worden gesimuleerd, waarin de warmte zich concentreert aan één zijde, en de koude aan de andere zijde. Daarmee kan zowel koeling in de zomer als verwarming in de winter efficiënter plaats vinden. Een nadeel is dat de efficiency waarmee warmte met de bodem wordt uitgewisseld afneemt. Als bijvoorbeeld 2 bronnen in serie worden geschakeld zal de tweede typisch zo'n 40% minder uitwisseling laten zien. Daarom gaan we er voorlopig van uit dat parallelschakeling het beste is.

Een punt om nog wel rekening mee te houden is dat er een hydrostatisch drukverschil bestaat tussen de beide buizen van de bodemlus. Dit is in de praktijk van de orde 10^3 Pa. Dit zou bij lage debieten kunnen leiden tot instabiliteit: één of meerdere van de bronnen krijgt dan geen of weinig toevoer. Dit risico wordt kleiner bij (gedeeltelijke) serieschakeling.

6. *Hoe diep moet een bron zijn?*

De bronnen die momenteel al in Castricum aanwezig zijn hebben dieptes tot 200 m. Het voordeel van een diepere bron is dat warmere aardlagen aangeboord worden. Slechts een deel hiervan kan echter maar rechtstreeks worden "geoogst": de in diepere lagen onttrokken warmte wordt gedeeltelijk weer in hogere lagen afgestaan aan het koudere gesteente. Naar schatting komt 30-40% rechtstreeks ten goede aan de input voor de warmtepomp.

Een belangrijk nadeel van een diepere put is dat de circulatiepomp steeds meer energie vraagt. Enerzijds komt dat omdat een twee maal zo diepe put twee maal zo veel warmte moet opnemen dus twee maal zo veel flow moet hebben. Dat betekent dat de vereiste pompenergie per eenheid onttrokken warmte een factor 8 maal zo groot wordt. Dit kan natuurlijk ondervangen worden door de buizen dikker te maken, maar het is de vraag of daar voldoende ruimte voor is. Dit moet worden uitgezocht in overleg met een bedrijf dat putten

boort. Het zou bijv. best kunnen dat het boren van 10 putten van 100 m goedkoper is dan 5 putten van 200 m. Bij het bepalen van het optimum moet ook rekening worden gehouden met het hogere energieverbruik van de circulatiepomp en de iets hogere COP van de warmtepomp in geval van een diepere put.

7. Hoe sterk mag een bron belast worden?

In deze notitie wordt een gemiddelde warmte-onttrekking van 10 W/m aangenomen. Dit leidt tot een referentietemperatuur T_{ref} van 0,4°C. Een grotere waarde gaat ten koste van het rendement van de warmtepomp, maar de kosten van de bron gaan omlaag. Het optimum moet worden vastgesteld aan de hand van de kosteninformatie van een bedrijf dat bronnen boort.

Een ander aspect is dat een grotere gemiddelde warmte-onttrekking tijdens piekbelasting leidt tot het bevriezen van de bron. Op zich is dat geen nadeel: de latente warmte van ijs en de grotere warmtegeleidingscoëfficiënt leiden tot demping van de temperatuurverlaging. De vraag is echter of er mechanische schade kan ontstaan. Dit gebeurt niet tijdens het bevriezen, omdat de interface ijs/water zich van binnen naar buiten beweegt. Echter als het weer ontdooien niet geleidelijk gaat kan er onderdruk ontstaan rondom de bodemlus.

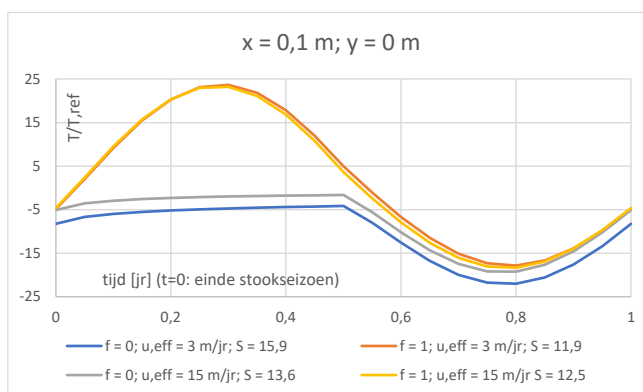
8. Hoe ver dienen de bronnen uit elkaar geplaatst te worden?

In sectie 3 is al aangegeven dat het tijdsgemiddelde interferentiegebied van een enkele bron niet buitengewoon groot is. Hieronder zijn de resultaten weergegeven van een simulatie van seizoensfluctuaties, waarbij elf jaar lang een bron in operatie is. De bodemtemperaturen in het laatste jaar van operatie worden uitgerekend voor een aantal posities rondom de bron, zowel parallel aan de stroomrichting van het grondwater als loodrecht daarop.

Wat is nu het criterium op grond waarvan de resultaat moet worden beoordeeld? Dat moet zijn de invloed die deze heeft op de efficiency van de warmtepomp, oftewel op de benodigde elektrische energie per eenheid geleverde warmte. Dit wordt in bijlage B uitgewerkt, met als eindresultaat dat de seizoensgemiddelde elektriciteit die nodig is per eenheid warmte gegeven wordt door:

$$\text{SCOP}^{-1} = 0,115 + 0,02T_{\text{cv}} + \frac{T_{\text{ref}}}{190}S$$

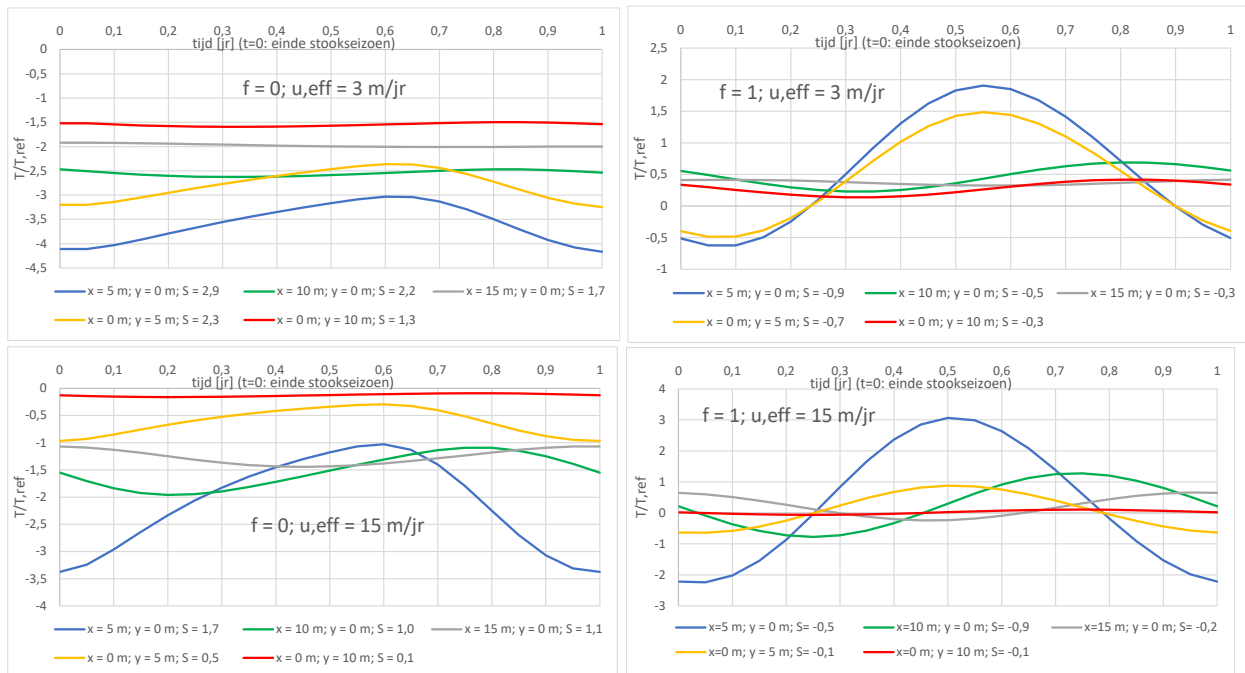
De term T_{cv} , gedefinieerd in Bijlage B, is een eigenschap van het CV-systeem van de woning, en varieert naar schatting tussen 4°C voor een woning met enkel vloerverwarming tot 12°C voor een woning met radiatoren+radiatorventilators. De term S representeert het effect van de verspreiding van de warmte in de bodem, en in onderstaande figuren worden de resultaten weergegeven voor een aantal situaties.



De eerste groep berekeningen geeft de situatie weer voor een enkele bron. De in Figuur 4 weergegeven dimensionloze temperatuur geeft de waarde in de bodemlus gedurende het laatste van de 11-jaars periode van de simulatie. Hiervoor is tentatief een afstand van 0,1 m van de bron genomen.

Fig. 4: Temperatuureffect vlak bij de bron na 10 jaar operatie

De simulaties zijn gemaakt voor twee waarden van de mate van regeneratie, f , en voor twee waarden van de grondwatersnelheid u_{eff} . Het is duidelijk te zien dat bij volledige regeneratie van de bron ($f=1$) de S-factor verbetert t.o.v. geen regeneratie, met name in de bovenste 110 m waar $u_{\text{eff}}=3\text{ m/jr}$. Het voordeel is echter ook weer niet buitengewoon groot: bij een verbetering van $S=15,9$ naar $S=11,9$ verbetert SCOP^{-1} met $0,02T_{\text{ref}}$, en als $T_{\text{ref}}=0,4^\circ\text{C}$ is dat minder dan 0,01. Bij een warmtebehoefte van 1200 kWh/jr betekent dit een besparing van slechts 100 kWh aan elektriciteit per jaar.



Figuur 5: Temperatuurontwikkeling op verschillende afstanden van de bron

Figuur 5 geeft de resultaten van de simulaties op diverse (veel grotere) afstanden van de bron *ten gevolge van de bron in de oorsprong*. Indien op deze afstand een tweede bron wordt gebruikt dan is de temperatuur op 0,1 m van *die* bron de som van de voor die afstand weergegeven temperatuur en de verdeling op 0.1 m van de bron in de oorsprong (zoals weergegeven in Figuur 4). Ook voor de S-waarde geldt dat deze additief is. Uit Figuur 5 blijkt dat volledige regeneratie van een bron in de oorsprong ook op enige afstand van die bron een positief effect heeft. Op 5 m van een bron in de oorsprong verbetert de S-factor met 2 á 3 punten als de bron volledig wordt geregenereerd. Aan de andere kant zijn de kosten van het *niet* regenereren ook niet dramatisch: het gaat om minder dan 100 kWh per jaar per woning.

In praktijk zal toch een deel van de onttrokken warmte geregenereerd worden om in de zomer te koelen. Een optie om quasi-regeneratie toe te passen zonder veel extra kosten is om de bodemlus te gebruiken zonder netto warmte-onttrekking of -teruglevering. In dat geval zal warmte in diepere lagen uitgewisseld worden met de koudere lagen bovenin. Op de vraag hoe ver bodemlussen in een warmtenetje uit elkaar moeten liggen is het antwoord: 5 á 10 m is voldoende om minder dan 1°C interferentie te hebben. Uit Fig. 5 wordt ook duidelijk dat er niet veel voordeel te behalen valt uit “strategische” onderlinge plaatsing van twee bronnen (opdat nl. in de zomer geregenereerde warmte in de winter geoogst kan worden): de temperatuur op 5 á 10 m van de bron is in het stookseizoen ($0,5 < t < 1$) slechts weinig verhoogd.

Notatie

α_{bed}	[m ² /jr]	warmtediffusiecoëfficiënt in de bodem
COP	[-]	Coefficient of Performance (warmtelevering van een warmtepomp per eenheid elektrische energie)
f	[-]	mate van regeneratie van de bron
$\bar{k}$	[m/d]	permeabiliteit van de aardlaag voor water
L_{ref}	[m]	referentieafstand: maat voor verhouding tussen warmtediffusie en warmte-advectie
q'	[W/m]	warmte-onttrekking in de bron per m diepte
q	[W]	warmte-toevoer aan de woning
S	[-]	effect van de daling van de bodemtemperatuur t.g.v. warmte-onttrekking op de COP van de warmtepomp
SCOP	[-]	seizoensgemiddelde COP
T	[°C]	temperatuur in de formatie
T_{cv}	[°C]	karakteristieke temperatuur van een CV systeem: maat voor de benodigde watertemperatuur
T_{ref}	[°C]	referentietemperatuur: maat voor de mate waarin de bodem in temperatuur daalt t.g.v. warmte-onttrekking
t	[jr]	tijd
t_{eq}	[jr]	tijd waarna advectie door de waterstroming sterker is dan warmtediffusie
u_o	[m/jr]	bulksnelheid van het grondwater
u_{eff}	[m/jr]	transportsnelheid voor warmte van het grondwater
x	[m]	afstand tot de bron in stroomrichting van het grondwater
y	[m]	afstand tot de bron loodrecht op de stroomrichting van het grondwater
λ_{bed}	[W/m.°C]	warmtegeleidingscoëfficiënt in de bodem

Literatuur

- [1] A.B. Pomper: *“De geologische en geohydrologische opbouw van Noord Holland boven het noordzeekanaal”* (sept 1979)
- [2] Grondwatertools van de Geologische Dienst Nederland (website: <https://www.grondwatertools.nl/grondwatertools-viewer#>)
- [3] Groenholland Geo-energiesystemen: *“ITGBES InterferentieTool BodemenergieSystemen”*, Rapport GHNL 180760 in opdracht van Ministerie voor Infrastructuur en Waterstaat, 27/09/2019
- [4] SIKB: [Bijlage 2 BUM en HUM Bodemenergie deel 2](#) : *“Methode toetsen interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen”* (Handreiking – Versie 2.4, maart 2020)
- [5] Rijkswaterstaat: [Factsheet Bodemenergiesystemen Wet en regelgeving gemeente](#)

Bijlage A: Stationaire oplossing

Beschouw een homogeen gepakt zandbed waarin zich op $(x,y)=(0,0)$ een lijnbron van warmte bevindt met sterkte q' [W/m]. Het bed wordt doorstroomd door water met homogene (bulk)snelheid u_o in x -richting. Hoewel in de praktijk de sterkte q' sterk varieert in de tijd nemen we hier een constante waarde aan, omdat het er in dit artikel om gaat tot hoever de invloed van de lijnbron zich gemiddeld over de tijd uitstrekt. Ook voor u_o nemen we een constante waarde.

De uitwisseling van warmte tussen het (stilstaande) zandbed en het (bewegende) water wordt bepaald door de snelheid van het water. Als de snelheid zeer hoog is dan is deze uitwisseling vertraagd, en wordt a.h.w. slechts een deel van de warmte met het water meegevoerd en blijft een deel achter in het zand. Als de snelheid zeer klein is zal er geen verschil zijn in de temperatuur van het zand en die van het omringende water. Of de snelheid hoog of laag is wordt bepaald door het Péclet getal:

$$Pe = \frac{u_o d}{a} \quad (A.1)$$

waarbij d de deeltjesgrootte van het zand is, en a de warmte-diffusiviteit van het bed. In praktijk is de waarde van het Peclet getal veel kleiner dan 1 (in het praktijkvoorbeeld van de volgende paragraaf is het $(5\text{m/jrx}2\text{mm}/0,5\text{mm}^2/\text{s}=6^{\text{E}}-4)$). In dit geval wordt de warmtediffusie beschreven door

$$\rho_{\text{bed}} c_{p,\text{bed}} \frac{\partial T}{\partial t} + u_o \rho_w c_{p,w} \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{\text{bed}} \nabla^2 T \quad (A.2)$$

waarbij ρ de dichtheid, c_p de specifieke warmte, en λ de warmtegeleidingscoëfficiënt is. De index $_{\text{bed}}$ geeft een bulk waarde voor het bed aan, en de index $_w$ een waarde voor het water.

We beschouwen nu eerst een puls warmte ter grootte $\Delta Q' = q' \Delta \tau$ die op tijdstip $t = \tau$ op $(x,y)=(0,0)$ wordt geïnjecteerd. Deze puls beweegt met een effectieve snelheid u_{eff} mee met het water, waarbij u_{eff} gegeven wordt door

$$u_{\text{eff}} = \frac{\rho_w c_{p,w}}{\rho_{\text{bed}} c_{p,\text{bed}}} u_o \quad (A.3)$$

De warmtediffusie wordt nu beschreven door een cilindrisymmetrisch profiel:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{\text{bed}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (A.4)$$

waarbij r en a_{bed} worden gegeven door

$$r^2 = (x - u_{\text{eff}} \tau)^2 + y^2 \quad (A.5)$$

en

$$a_{\text{bed}} = \frac{\lambda_{\text{bed}}}{\rho_{\text{bed}} c_{p,\text{bed}}} \quad (A.6)$$

Deze vergelijking heeft de volgende oplossing:

$$\Delta T(r, t) = \frac{\Delta Q'}{4\pi \lambda_{\text{bed}} (t - \tau)} e^{-r^2 / 4 a_{\text{bed}} (t - \tau)} \quad (A.7)$$

De oplossing voor een oneindige reeks van warmtepulsjes $\Delta Q'$, de stationaire oplossing, is nu

$$T(x, y) - T_{\infty} = \frac{q'}{4\pi\lambda_{\text{bed}}} \int_{\tau=-\infty}^t \frac{1}{t-\tau} e^{-[(x-u_{\text{eff}}(t-\tau))^2 + y^2]/4a_{\text{bed}}(t-\tau)} d\tau \quad (\text{A.8})$$

Waarbij T_{∞} de temperatuur in het ongestoorde medium is. We introduceren nu de dimensieloze variabelen

$$\Theta \equiv 4\pi \frac{\lambda_{\text{bed}}}{q'} (T - T_{\infty}); \quad \xi \equiv \frac{u_{\text{eff}}}{4a_{\text{bed}}} x; \quad \eta \equiv \frac{u_{\text{eff}}}{4a_{\text{bed}}} y \quad (\text{A.9})$$

Bovenstaande oplossing is dan te schrijven als

$$\Theta = \int_{\psi=0}^{\infty} \frac{1}{\psi} e^{-[(\xi-\psi)^2 + \eta^2]/\psi} d\psi \quad (\text{A.10})$$

waarbij $\psi \equiv (t - \tau)/t_{\text{eq}}$ met $t_{\text{eq}} \equiv 4a_{\text{bed}}/u_{\text{eff}}^2$.

De tijd t_{eq} is een tijdschaal waarop diffusie en convectie van warmte ongeveer even sterk zijn.

In het verre veld, voor $\xi \gg 1$, gedraagt de temperatuur zich als

$$\Theta(\xi, \eta) \rightarrow \int_{\psi=0}^{\infty} \frac{1}{\xi} e^{-[(\xi-\psi)^2 + \eta^2]/\xi} d\tau$$

Ofwel

$$\Theta(\xi, \eta) \rightarrow \sqrt{\frac{\pi}{\xi}} e^{-\eta^2/\xi} \quad (\xi \gg 1) \quad (\text{A.11})$$

Voor ξ én $\eta \ll 1$ gedraagt de temperatuur zich als

$$\Theta(\xi, \eta) \rightarrow \ln \left(1 + \frac{1}{\pi(\xi^2 + \eta^2)} \right) \quad (\xi^2 + \eta^2 \ll 1) \quad (\text{A.12})$$

Bijlage B: Effect van tijdsafhankelijkheid van de bronsterkte

In deze bijlage beschouwen we de situatie dat de lijnbron een variabele sterkte heeft. We nemen twee gevallen:

- a) Geen regeneratie van de bron.

In dit geval is de bronsterkte te schrijven als (zie paragraaf 3, 2^e punt):

$$q'(t) = \bar{q}'\{2,62 \sin(2\pi\tau[jr]) - 0,17\} \text{ (winter, } \tau > 0,5) \\ -0,17 \bar{q}' \text{ (zomer, } \tau < 0,5) \quad (\text{B.1}^a)$$

- b) Volledige regeneratie van de bron.

In dit geval is de bronsterkte te schrijven als:

$$q'(t) = \bar{q}'\{2,62 \sin(2\pi\tau[jr]) - 0,17\} \text{ (winter, } \tau > 0,5) \\ \bar{q}'\{3,69 \sin(2\pi\tau[jr]) - 0,17\} \text{ (zomer, } \tau < 0,5) \quad (\text{B.1}^b)$$

Dit is ook te schrijven als

$$q' = \bar{q}'\{(1,31 + 1,84f) \sin(2\pi\tau[jr]) - (1,31 - 1,84f) |\sin(2\pi\tau[jr])| - 0,17\} \quad (\text{B.2})$$

waarbij f de mate van regeneratie is: $f=0$ voor bovenstaand geval (a), en $f=1$ voor geval (b).

We zijn geïnteresseerd in het temperatuureffect op een aantal stroomafwaartse posities van de bron. Om dit te berekenen is opnieuw verg. (A.7) te gebruiken, maar nu komt q' onder het integraalteken in (A.8):

$$T(x, y, t) = T_{\infty} + \frac{1}{4\pi\lambda_{\text{bed}}} \int_{\tau=-\infty}^t \frac{q'(\tau)}{t-\tau} e^{-[(x-u_{\text{eff}}(t-\tau))^2 + y^2]/4a_{\text{bed}}(t-\tau)} d\tau \quad (\text{B.3})$$

De vraag is nu welk effect merkbaar is op de efficiency van een warmtepomp die een andere bron gebruikt op een bepaalde afstand van de oorsprong. Voor deze efficiency, de COP, is er een fundamentele natuurwet die zegt dat deze nooit beter kan zijn dan de Carnot efficiency:

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_{\text{warm}} + 273}{T_{\text{warm}} - T_{\text{koud}}}$$

Hierbij is T_{warm} de temperatuur van het medium waar de warmte naar toe moet (in ons geval het CV systeem), en T_{koud} de temperatuur van het medium waar de warmte uit gehaald wordt. Dit veronderstelt dat beide temperaturen constant zijn, hetgeen het geval is bij de huidige warmtepompen op basis van koudemiddelen. Op basis van bovenstaand theoretisch maximum is de COP van een bestaand systeem te benaderen met

$$\text{COP} = \eta_{\text{WP}} \frac{T_{\text{warm}} + 273}{T_{\text{warm}} - T_{\text{koud}} + \Delta T}$$

Waarbij η_{WP} de efficiency van de warmtepomp is, en ΔT het temperatuurverschil tussen het water in de bodemlus en de formatie dat nodig is om de warmte te kunnen onttrekken. We nemen de

volgende benadering, gebaseerd op data van een warmtepompfabrikant² (ref. [6]), waarbij we voor het gemak de inverse van de COP schrijven:

$$\text{COP}^{-1} \approx \frac{T_{\text{warm}}[\text{°C}] - T_{\text{koud}}[\text{°C}] + 5}{190} \quad (\text{B.4})$$

De volgende vraag is: hoe warm moet het CV water zijn. Hiervoor nemen we een waarde die gegeven wordt door de volgende vergelijking³:

$$T_{\text{warm}} = 20 + T_{\text{cv}} \frac{q}{\bar{q}} \quad (\text{B.5})$$

waarbij T_{cv} de temperatuurverhoging is van het CV water wanneer het warmtevermogen q gelijk is aan het jaargemiddelde $\bar{q}$. De coëfficiënt T_{cv} is eigenlijk een maat voor de grootte van het warmte-overdragend oppervlak van de woning. Bij een huis met enkel vloerverwarming is een schatting dat T_{cv} ong. 4°C is. In een huis met radiatoren plus radiatorventilatoren zou 10-15°C een betere waarde zijn. Voor de periodes waarin tapwater wordt bereid moet T_{warm} gelijk worden gesteld aan 60°C.

De jaargemiddelde COP, de SCOP, wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} \text{SCOP}^{-1} &= \int_{t=0}^1 \frac{q(t)}{\bar{q}} \text{COP}^{-1} dt \\ &= -0,026 + \frac{1}{190} \int_{t=0}^1 \frac{q(t)}{\bar{q}} T_{\text{warm}} dt - \frac{1}{190} \int_{t=0}^1 \frac{q(t)}{\bar{q}} (T_{\text{koud}} - T_{\infty}) dt \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

Waarbij voor T_{∞} de waarde van 10°C is genomen. Hierbij moet bedacht worden dat de integratie in de zomer alleen betrekking heeft op de tapwaterbereiding. We nemen aan dat de tapwaterbereiding elke dag gedurende 1 uur plaats vindt, en dat in de resterende tijd het vermogen een sinusvormige functie is met amplitude $24/23 * 2,62 = 2,73$. Door dit uit te werken verkrijgt men:

$$\frac{1}{190} \int_{t=0}^1 \frac{q(t)}{\bar{q}} T_{\text{warm}} dt = 0,141 + 0,02 T_{\text{cv}} \quad (\text{B.6})$$

Hierbij is opgemerkt dat de voorfactor van T_{cv} in bovenstaande vergelijking tentatief met een factor 2 verhoogd is. Dit komt omdat vergelijking (B.1) het meerjarengemiddelde weergeeft van het warmtevermogen. Kortetermijnvariaties vallen in het gemiddelde weg, maar zorgen bij kwadratering (zoals in de voorfactor van T_{cv}) voor een extra bijdrage.

De laatste term in verg. (B.5) kan worden uitgerekend m.b.v. verg. (B.3). Dit moet numeriek gebeuren. De resultaten, gepresenteerd in paragraaf 4, zijn daarbij te schrijven als

$$\text{SCOP}^{-1} = 0,115 + 0,02 T_{\text{cv}} + \frac{1}{190} \frac{\bar{q}'}{4\pi\lambda_{\text{bed}}} S \quad (\text{B.7})$$

Waarbij S een functie is van de positie t.o.v. de bron en de regeneratiefactor f .

² Zie Alpha Innotec: "Installatie- en gebruikershandleiding WZSV-serie". Het moet opgemerkt dat deze gegevens gelden voor deellast. Bij vollast is de efficiency wat lager. Dit verwaarlozen we hier.

³ Deze stooklijn geldt niet als de woning 'gewone' radiatoren heeft omdat het afgegeven vermogen daarvan sterk niet-lineair is met de watertemperatuur. Dat geldt ook voor de zgn. LT-radiatoren, tenzij radiatorventilatoren worden geplaatst.