

Warmtepompen in de kas

**Gegevens warmtepompsystemen, aquifers en warmteoverdracht
betonvloer**

Zakelijke Gastoepassingen

Warmtepompen in de kas

Gegevens warmtepompsystemen, aquifers en warmteoverdracht
betonvloer

Zakelijke Gastoepassingen

Opdrachtgever : IMAG-DLO
Projectnummer : 000869
Projectleider : ing. W.F. Büthker
Projectleden : drs. ing. H. Hondeman
 : dr. ir. C.J.A. Pulles
 : ing. C. Jansen
Rapportnummer : ZGT020

COLOFON

GASTEC NV, Centrum voor Gastechnologie, is een technisch dienstverlenend bedrijf met een internationale reputatie op het gebied van gastechnologie. De activiteiten richten zich op onderzoek en ontwikkeling, advisering, engineering, certificatie en opleidingen. Opdrachtgevers zijn energiebedrijven, fabrikanten van toestellen en distributiematerialen, installateurs en aannemers. Ook werkt Gastec voor collega-onderzoekers en andere bedrijven, die behoefte hebben aan aardgasexpertise. Bij Gastec werken circa 400 mensen in vestigingen in Nederland, Italië, Groot-Brittannië en Bulgarije en bij de dochterbedrijven Dejatech en Petrogas.

De dienstverlening omvat onder meer ondersteuning bij de inkoop en verkoop van gas en de distributie van gas en warmte. Daarnaast levert Gastec technologische kennis over energietoepassingen in het algemeen en die van aardgas in het bijzonder. Gastec keurt en certificeert gastechnologische producten en zorgsystemen en richt zich verder op de ontwikkeling en verzorging van specialistische cursussen en seminars.

Beschikbaarheid: Openbaar

GASTEC NV
Centrum voor Gastechnologie
Postbus 137, 7300 AC Apeldoorn
Wilmersdorf 50, 7327 AC Apeldoorn

Telefoon: 055 - 5 393 393
Fax: 055 - 5 393 494
E-mail: post@gastec.nl
www.gastec.nl

© 2002, GASTEC NV, Apeldoorn

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, in enige vorm of enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van GASTEC NV.

INHOUDSOPGAVE

1. DE WARMTEPOMP.....	6
1.1 Inleiding.....	6
1.2 Overzicht technische prestaties.....	6
1.2.1 Thermische compressie	7
1.2.2 Mechanische compressie.....	10
1.2.3 Deellast	11
1.2.4 Start/stop-verliezen.....	12
1.2.5 Maximale temperatuur	13
1.3 Overzicht financiële gegevens.....	13
1.3.1 Aanschafprijs.....	13
1.3.2 Overige kosten	14
1.3.3 Onderhoud.....	14
2. DE AQUIFER.....	15
2.1 Inleiding.....	15
2.2 Beschrijving systemen.....	15
2.2.1 Doubletsysteem.....	16
2.2.2 Mono-bron	17
2.3 Aanleg en onderhoud.....	18
2.3.1 Geschiktheid ondergrond	18
2.3.2 Aanleggen bronsysteem.....	18
2.3.3 Ontgassing/ijzer/geleiding/mineralen.....	19
2.4 Diepte, temperaturen, debiet, afstand	20
2.5 Financiële gegevens aquifers.....	23
3. DE BETONVLOER	26
3.1 Inleiding.....	26
3.2 Basisgegevens	27
3.3 Beschrijving van het model	28
3.3.1 Basisformules.....	29
3.3.2 Uitvoervariabelen.....	30
3.3.3 Implementatie.....	31
3.4 Stralingsuitwisseling	33

INLEIDING

IMAG-DLO wil de toepassingsmogelijkheden van warmtepompen bij de tuinbouwbedrijven met vloerverwarming bepalen. IMAG-DLO beschikt over het simulatieprogramma KASPRO. Om met dit programma simulaties met toepassing van warmtepomp, aquifer en betonvloer in de kas uit te kunnen voeren, dienen aan dit programma modules te worden toegevoegd. De modules geven een beschrijving van de warmteoverdracht vanuit de betonvloerverwarming en een relatie tussen de COP van een warmtepomp met de temperatuur van de aquifer en de afgiftetemperatuur in de betonvloer. In opdracht van IMAG-DLO heeft Gastec de gevraagde informatie uitgezocht en opgesteld.

In hoofdstuk 1 zijn relaties opgesteld die het verband tussen bron- en afgiftetemperatuur en de COP van verschillende soorten warmtepompen aangeven. In hoofdstuk 2 is informatie gegenereerd over de warmtebron (aquifer) waar de warmtepomp zijn warmte aan onttrekt. Naast de technische informatie wordt ook informatie over de kosten van dergelijke systemen gegeven. In hoofdstuk 3 tenslotte is een dynamisch model gegenereerd waarmee de warmteaccumulatie in een betonvloer en warmteoverdracht vanuit een betonvloer worden beschreven als functie van de watertemperatuur en het waterdebiet door de betonvloer en de kasluchttemperatuur (alle als functie van de tijd).

1. DE WARMTEPOMP

1.1 Inleiding

Voor dit project heeft Gastec in opdracht van IMAG-DLO de relaties opgezet die het verband tussen bron- en afgiftemperatuur en COP van verschillende soorten warmtepompen aangeven, zowel gasgestookt als elektrisch. Bij de gasmotorgedreven warmtepomp is een onderscheid gemaakt tussen het warmtepompgedeelte en het gasmotorgedeelte. Deze informatie is gebaseerd op de state-of-the-art. Tevens is bekeken of de warmtepompen commercieel verkrijgbaar zijn en zijn de benodigde bedragen voor investeringen en onderhoud gegeven.

De gegeven relaties zijn alleen geldig in het vermogensbereik van de warmtepomp van 300 kW tot 2,4 MW thermisch. Dit is gebaseerd op een kasgrootte van minimaal 1 tot maximaal 8 hectare waarbij het maximaal afgegeven vermogen 30 W/m^2 , en het jaarlijks totaal afgegeven vermogen 500 MJ/m^2 bedraagt.

1.2 Overzicht technische prestaties

Als bedrijfscondities is uitgegaan van een aanvoertemperatuur van de warmtepomp van $35 \text{ }^\circ\text{C}$ en een uitkoeling van het aquiferwater naar $7 \text{ }^\circ\text{C}$.

In de formules en diagrammen in de volgende hoofdstukken is:

Taanvoer	($^\circ\text{C}$)	De temperatuur van het verwarmingswater de warmtepomp uit
Tbron	($^\circ\text{C}$)	De temperatuur van het bronwater naar de warmtepomp toe
kW	(kW)	Het opgestelde verwarmingsvermogen van de warmtepomp
gasinput	(kW)	Het gasverbruik van de gasmotor
kWgm	(kW)	De vrijkomende (extra) warmte van de gasmotor
cap	(%)	Deellast van de warmtepomp. Aangegeven is de capaciteit waarin de warmtepomp werkelijk draait ten opzichte van de geïnstalleerde capaciteit.

Om de formules te vereenvoudigen is zoveel mogelijk van lineaire relaties uitgegaan. Daardoor is het toepassingsgebied van de formules beperkt tot een aanvoertemperatuur van de warmtepomp van 28 tot 38 °C. De koude kant van de warmtepomp wordt gevarieerd tussen 3 en 9 °C. Het vermogen van de warmtepomp is in de formules beperkt tot het toepassingsgebied van 300 kW tot 2,4 MW.

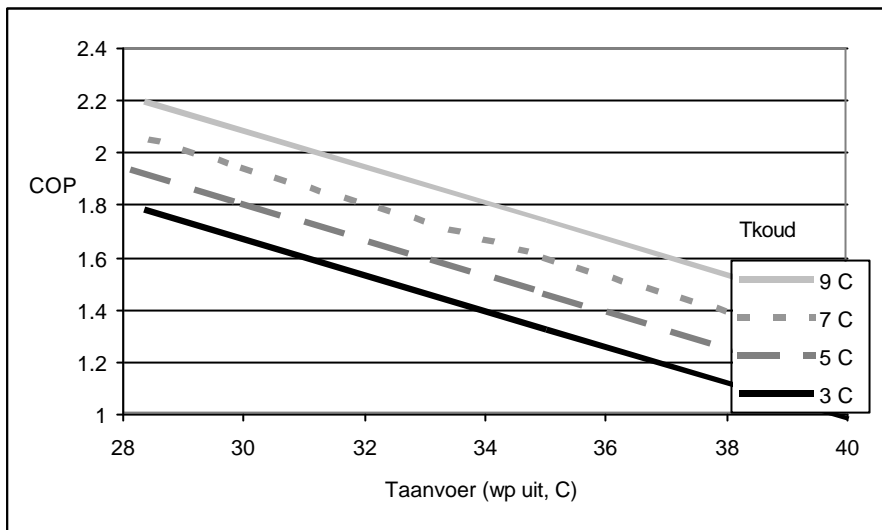
1.2.1 ***Thermische compressie***

Hieronder vallen zowel de 1-traps als de 2-traps absorptiemachines. Bij de 2-traps absorptiemachine drijft de 1e trap de 2e trap aan. De 1-traps absorptiemachine is niet in staat een hogere COP te halen als de aandrijftemperatuur hoog wordt (70 - 130 °C). Daarom worden 1-traps absorptiemachines toegepast bij lagere aandrijftemperaturen (warmwater of stoom) en de 2-traps-machine bij hogere aandrijftemperaturen (stoom of gasvlam). De absorptiemachines zijn onderverdeeld in direct en indirect gestookt. Direct gestookt wil zeggen dat de warmtepomp met een gasvlam aangedreven wordt; indirect gestookt wil zeggen dat de warmtepomp met heet water of stoom aangedreven wordt. Er zijn 3 uitvoeringsmogelijkheden die als vereenvoudigde functie het best benaderd worden door de hieronder staande formules.

1-traps indirect:

$$COP = 3.53 - 0.069 * Taanv + 0.069 * Tverdamer$$

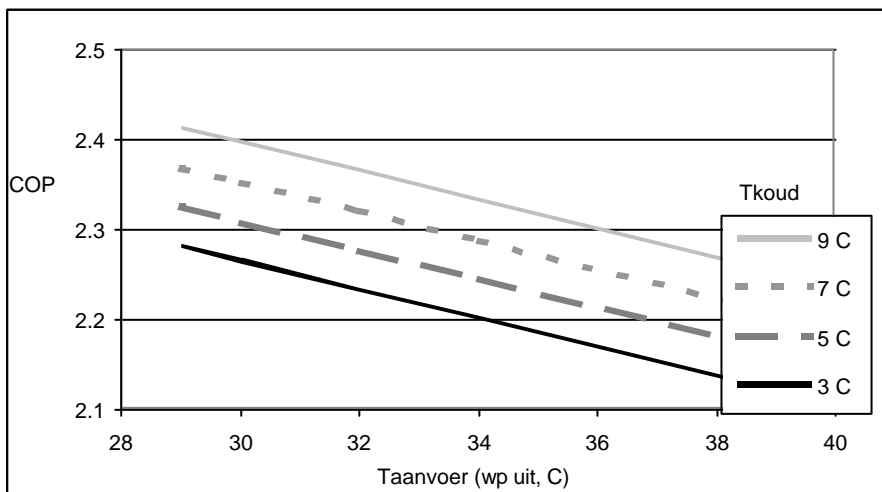
Dit is grafisch weergegeven in onderstaande grafiek:



Figuur 1: Relatie COP/Taanvoer voor 1-traps indirect absorptie warmtepomp

2-traps direct fired:

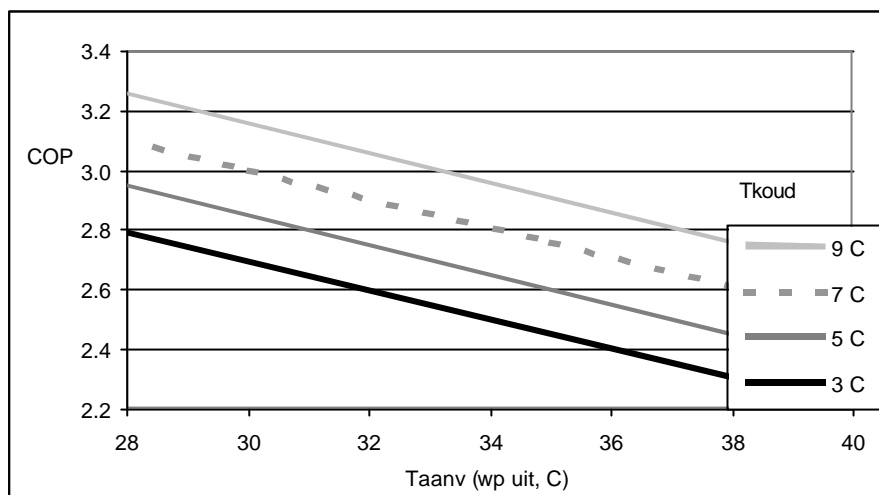
$$COP = 2,52 - 0,015 * Taanvoer + 0,020 * Tkoud$$



Figuur 2: Relatie COP/Taanvoer voor een 2-traps direct absorptie warmtepomp

2-traps indirect

$$COP = 3.93 - 0.049 * Taanv + 0.078 * Tkoud$$



Figuur 3: Relatie COP/Taanvoer voor een 2-traps indirect absorptie warmtepomp

1.2.2 **Mechanische compressie**

Hieronder vallen zowel de elektrische- als de gasmotor gedreven warmtepompen.

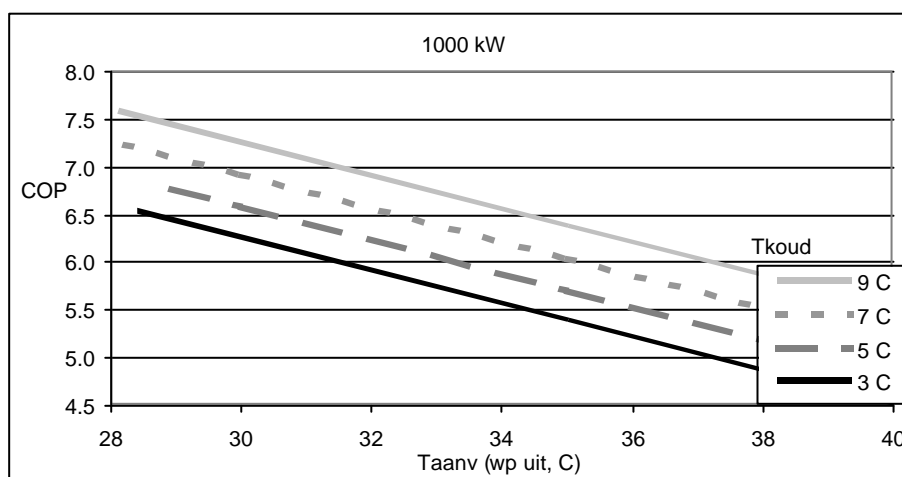
De compressiewarmtepompen zijn nog onder te verdelen in het soort compressor:

scroll compressor	1 – 10 kW
zuigercompressor	tot 500 kW _{th}
schroefcompressoren	tot 4 MW _{th}
centrifugaalcompressoren	2 MW - 50 MW _{th}

Bij de compressie warmtepompen is de invloed van het vermogen op de COP niet te verwaarlozen. Dit is in de formules meegenomen. Voor de grafieken is uitgegaan van een vermogen van 1000 kW.

Elektrische warmtepomp

$$\text{COP} = 10.83 + 0.00018 * K_w - 0,175 * T_{aan} + 0,167 * T_{koud}$$



Figuur 4: Relatie COP/Taanvoer voor een elektrische warmtepomp

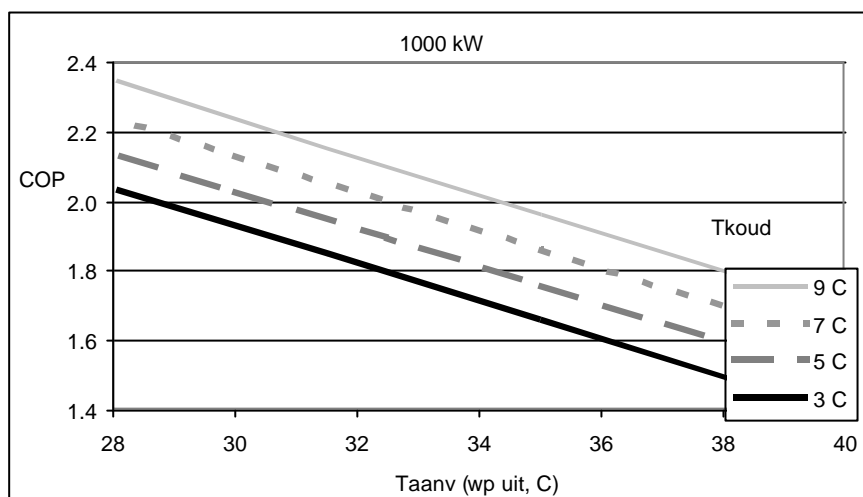
Gasmotor gedreven warmtepomp

Voor de eenvoud van de formules is de COP opgesplitst in een warmtepompdeel, gelijk aan de elektrische warmtepomp, en een gasmotordeel. De COP van de gasmotor warmtepomp is gebaseerd op de hoeveelheid gas welke de gasmotor in

gaat, zonder meenemen van de warmte welke de gasmotor verlaat via het koelwater en de rookgassen.

De formule van het systeem van een gasmotor met warmtepomp wordt dan:

$$COP = (10.83 + 0.00018 * kW - 0,175 * T_{aan} + 0,167 * T_{koud}) * (0,000035 * kW + 0,274)$$



Figuur 5: Relatie COP/Taanvoer voor een gasmotor warmtepomp

De term die bij de formule van de COP gasmotor warmtepomp is toegevoegd aan de elektrische warmtepomp is gelijk aan de omzetting van het gas in elektriciteit (elektrisch rendement gasmotor).

De warmte die vrij komt van de gasmotor is gelijk aan:

$$kW_{gm} = (-0,000035 * kW + 0,68) * gasinput$$

Indien de warmte van de gasmotor wel wordt meegenomen in de COP-berekening van de gasmotor aangedreven warmtepomp, zal deze verhoogd worden met een waarde gelijk aan $kW_{gm}/gasinput$.

$$COP_{totaal} = COP + kW_{gm} / gasinput$$

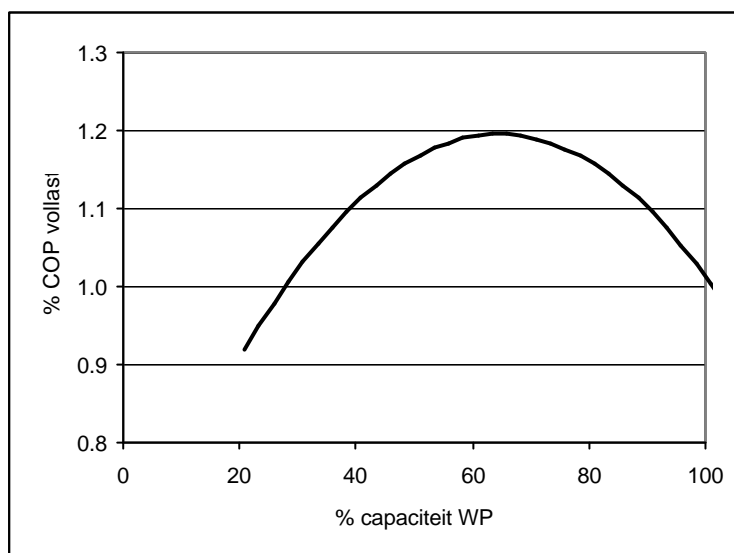
1.2.3

Deellast

De gegeven formules voor de COP zijn bij stationaire condities en bij vollast. De warmtepompen kunnen echter ook in deellast worden ingezet.

Voor de absorptie warmtepompen kan een vergelijking worden gegeven waarin het % (y) van de COP, berekend bij vollast, wordt berekend als functie van het % van de capaciteit waarop de warmtepomp werkelijk draait (cap):

$$y = - 0.00014 * cap^2 + 0.0184 * cap + 0.599$$



Figuur 6: Relatie tussen COP en deellast van een absorptie warmtepomp

Bij de gasmotor warmtepomp blijft het rendement van de gasmotor nagenoeg gelijk als in toeren wordt teruggeregeld. Bij de gasmotor kan tot 65% van de maximale capaciteit wordt teruggeregeld waarbij de COP met 10 à 20% stijgt. Dit komt overeen met de absorptiewarmtepomp.

De elektrische warmtepomp kan verder worden teruggeregeld maar hierbij zal net zoals bij de absorptiewarmtepomp de COP eerst stijgen maar later weer dalen.

1.2.4

Start/stop-verliezen

Als vuistregel kan worden aangenomen dat men per start/stop bij de absorptiewarmtepompen 2 minuten van het gasverbruik kwijt is. Bij de gasmotorwarmtepompen is dit ca. 1 minuut. Voor de elektrische warmtepomp is dit ca. 30 seconden.

Bij een korte stop van de warmtepomp is de warmte nog in de warmtepomp aanwezig en is het verlies kleiner.

1.2.5 **Maximale temperatuur**

De maximale temperatuur van de absorptiewarmtepompen is 40 °C. Van de compressie warmtepompen is de maximale temperatuur afhankelijk van het werkmedium. In overleg met de leverancier kan uit verschillende mediums worden gekozen. Over het algemeen wordt als werkmedium in de warmtepomp R407 toegepast en is de maximaal te halen temperatuur 55 tot 65 °C.

1.3 **Overzicht financiële gegevens**

In de formules en grafieken in de volgende hoofdstukken is:

Aanschaf	fl	Aanschafprijs van een warmtepomp
kW	kW _{th}	Het geïnstalleerde verwarmingsvermogen

1.3.1 **Aanschafprijs**

Voor de aanschafprijs van de verschillende warmtepompen is getracht een richtlijn te geven. De prijzen op de markt lopen echter zeer uiteen. De aanschafprijzen kunnen variëren van -50% tot +50% van de hier berekende prijs.

De prijzen zijn in Nederlandse guldens.

Elektrische warmtepomp

$$Aanschaf = 82,6 * kW + 45.400$$

Gasmotor gedreven warmtepomp

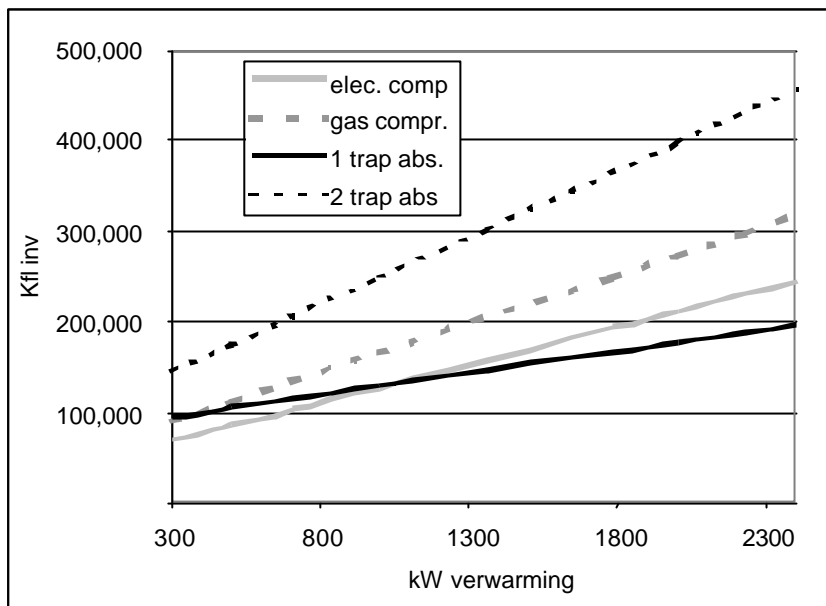
$$Aanschaf = 107,4 * kW + 59.020$$

Absorptie 1-traps warmtepomp

$$Aanschaf = 48,0 * kW + 81.300$$

Absorptie 2-traps warmtepomp

$$Aanschaf = 147,9 * kW + 100.900$$



Figuur 7: Investering als functie van verwarmingsvermogen van de verschillende warmtepompen

1.3.2 Overige kosten

Naast de warmtepomp zijn nog andere voorzieningen nodig. Buiten het leidingwerk is ook een geschikte ondergrond nodig en zondig een binnenopstelling. De prijs hiervan kan zeer variëren. Als vuistregel kan de volgende regel dienen:

Prijs overige voorzieningen als % van de aanschafprijs:

$$\% = 0,015 * kW + 25,7$$

1.3.3 Onderhoud

Als kosten voor het onderhoud kan voor alle warmtepompen ca. 2% van de aanschafwaarde worden aangehouden.

2. DE AQUIFER

2.1 Inleiding

Voor dit project heeft Gastec in opdracht van IMAG-DLO een onderzoek verricht naar aquifers. De wijze waarop de warmtebron wordt geregenereerd valt buiten de doelstelling van het project. In dit hoofdstuk wordt een indicatie gegeven omtrent de investering en de onderhoudskosten.

2.2 Beschrijving systemen

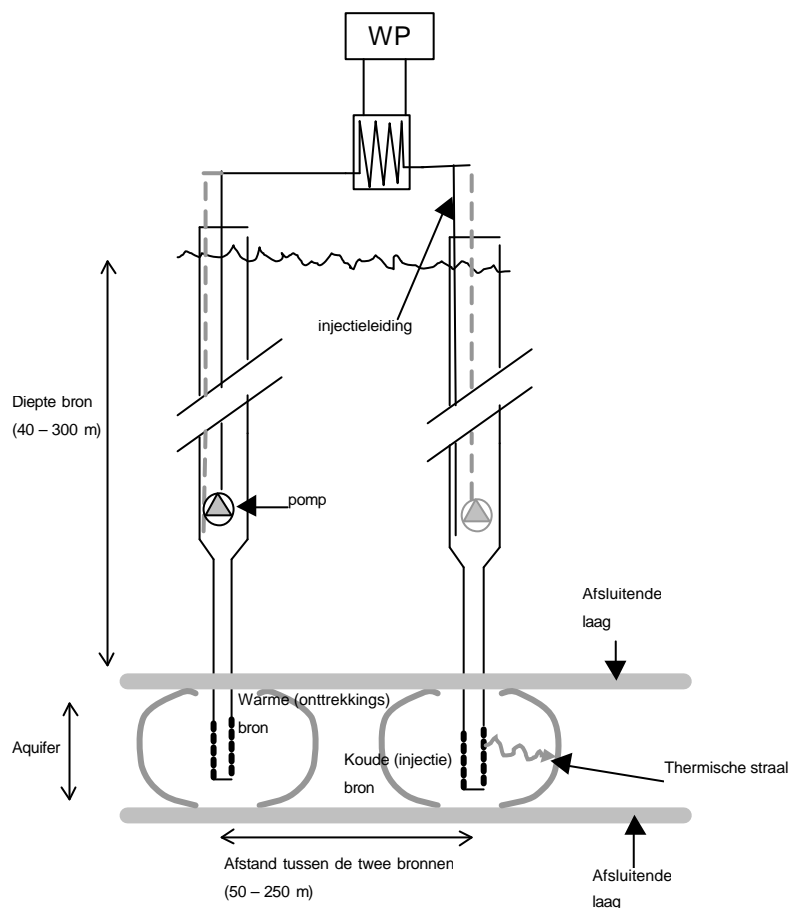
Voor het onttrekken van warmte uit de bodem zijn verschillende systemen beschikbaar. Naast de horizontale en verticale bodemwisselaars zijn dat de aquifers. Een aquifer onttrekt warmte uit een poreus, waterdoorlatende zandlaag, boven en onder afgesloten door een dichte kleilaag of rotsformatie. Zo ontstaat een watervoerende laag welke gebruikt kan worden voor opslag van warmte (of koude). In tegenstelling tot de bodemwisselaars is men met een aquifer verplicht warmteneutraal te werken. Naast het onttrekken van warmte moet bij een aquifer ook warmte worden toegevoegd.

Een aquifer is dan ook, in tegenstelling tot bodemwisselaars, een opslagsysteem. 's Zomers kan bijvoorbeeld het water worden opgepompt en door middel van de buitenlucht worden opgewarmd en weer teruggebracht worden in de aquifer. Maar ook restwarmte, welke vrijkomt bij de opwekking van CO₂, kan worden gebruikt voor de warmte-input van de aquifer. In de winter kan de warmte, die is opgeslagen in de aquifer, als bron dienen voor een warmtepomp. De methode van regenereren wordt echter voor dit project buiten beschouwing gelaten.

Aquifers kunnen worden ingedeeld in mono-bron en duo-bron (doublet-systeem). Tevens kan de onderverdeling in een opslag en circulatiebron worden gemaakt. De zo ontstane indeling wordt hieronder kort weergegeven en besproken.

2.2.1 Doubletsysteem

Het doubletsysteem bestaat uit twee (of meer) bronnen. Deze bronnen kunnen dienen als opslag van warmte en koude of alleen als onttrekkingsbron van warmte (of koude). Dit wordt hieronder nader beschreven. In figuur 9 is een schematische weergave van een doubletsysteem gegeven.



Figuur 8: Schematische weergave doubletsysteem

Opslagsysteem

Bij het doublet opslagsysteem wordt in de winter minimaal één bron als warmtebron voor de warmtepomp gebruikt. De ontstane koude wordt in de andere bron(en) opgeslagen. In de zomer wordt de koude bron aangesproken om het gebouw of de installatie te koelen. Het opgewarmde water wordt in de warme bron opgeslagen om in de winter weer gebruikt te worden. Dit systeem kan alleen worden toegepast als de grondwaterstroming ten opzichte van het opgeslagen vermogen voldoende klein is.

Recirculatie systeem

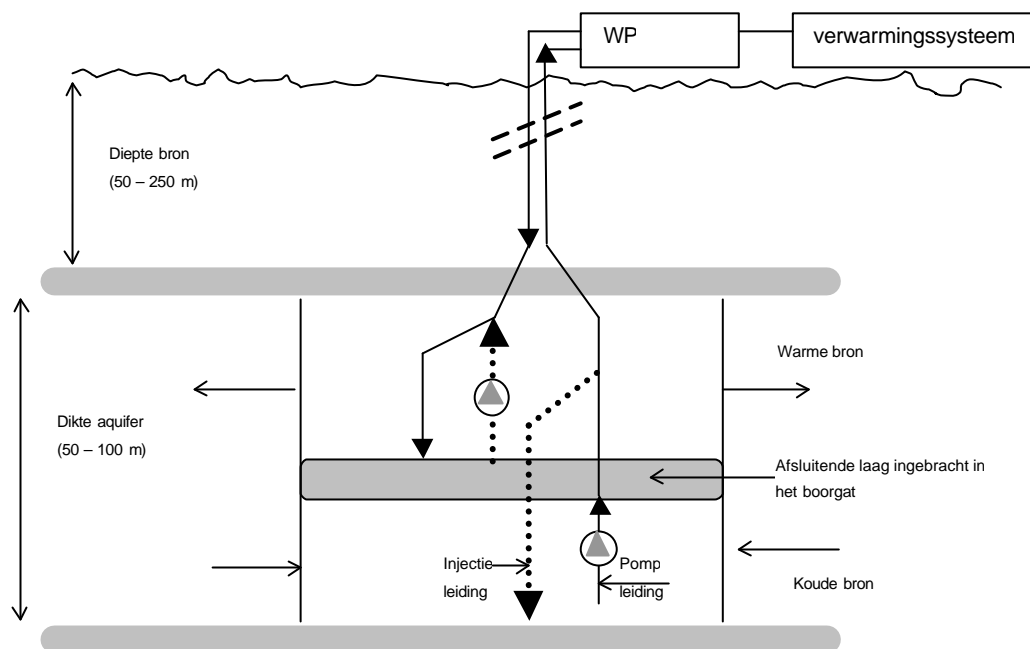
Bij het recirculatie systeem wordt één bron continu als warmtebron voor de warmtepomp gebruikt. In de zomer wordt uit dezelfde bron water onttrokken. Door koeling van een gebouw wordt dit water opgewarmd. Dit warme water wordt dan in de koude bron geïnjecteerd om zo energieneutraal te werken. Op deze manier wordt altijd water met de grondwatertemperatuur uit de warme bron onttrokken en wordt de koude bron afwisselend gekoeld en opgewarmd.

Dit systeem wordt vooral toegepast als de grondwaterstroming hoog is ten opzichte van het onttrokken vermogen.

2.2.2

Mono-bron

De mono-bron wordt gebruikt bij kleine capaciteiten omdat anders kortsluiting tussen de warme en de koude bron ontstaat. In de mono-bron zijn de warme en koude opslag boven elkaar gesitueerd. Ook hier kan het recirculatiesysteem of het opslagsysteem worden toegepast zoals bij het doubletsysteem besproken. Het principe is weergegeven in figuur 10.



Figuur 9: Schematische weergave mono-bron

2.3 Aanleg en onderhoud

2.3.1 *Geschiktheid ondergrond*

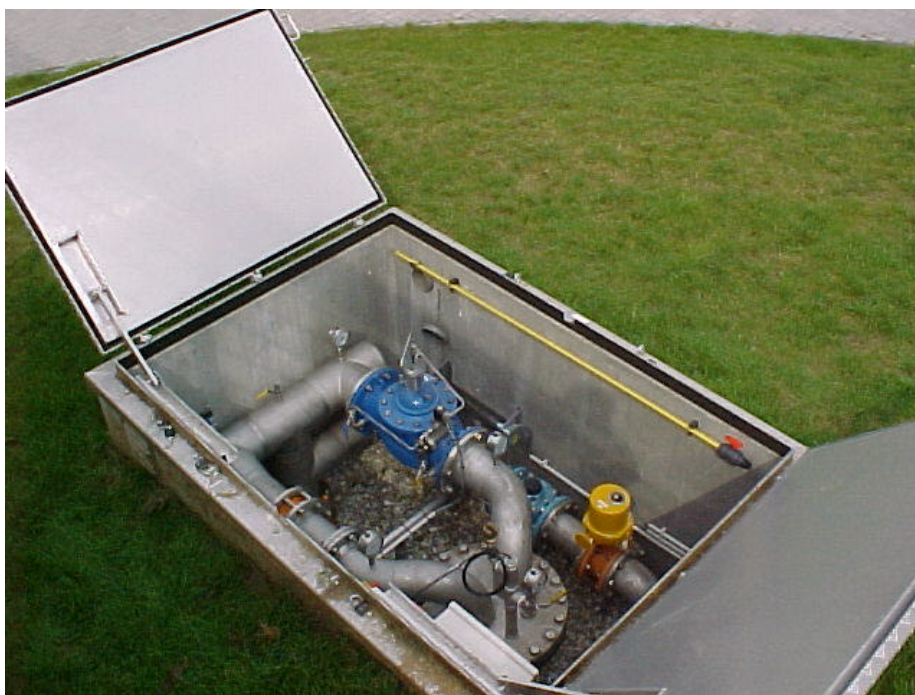
Grote kennis van de opbouw van de ondergrond is nodig. Tegenwoordig is door allerlei proefboringen al vrij veel bekend over grote delen van Nederland. Als over de locatie niet genoeg bekend is, dient eerst een proefboring te worden uitgevoerd. Deze proefboring moet uitwijzen op welke diepte de aquifer zit, hoe dik de aquifer is, wat de grondwaterstroming is, wat de waterdoorlatendheid van de aquifer is, de watereigenschappen enz. Dit alles bepaalt de maximale capaciteit van een bron, de benodigde afstand tussen de bronnen, welk systeem het meest geschikt is, de benodigde pompcapaciteit en de kosten van het aanleggen.

Een geschikte aquifer bestaat uit een watervoerende laag van bijvoorbeeld zandsteen of kalksteen, opgesloten tussen twee niet watervoerende lagen van bijvoorbeeld klei of steen. De watervoerende laag is normaal gesproken geheel met water gevuld.

Hoe waterdoorlatender de laag, hoe makkelijker het water stroomt, hoe kleiner pompvermogen nodig is om water te onttrekken of te injecteren. Echter, bij een betere waterdoorlatendheid is ook de grondwaterstroming groter. Deze stroming kan 10 tot 50 m per jaar bedragen.

2.3.2 *Aanleggen bronsysteem*

Voor kleine bronnen wordt een puls boring uitgevoerd, voor de grotere wordt de zuigboorteknik gebruikt. Voor de gehele installatie is niet veel ruimte nodig. De boring kan gewoon in de bebouwde omgeving worden uitgevoerd en geeft geen trillingen zoals bij heiwerkzaamheden. Tijdens het boren is voor een puls boring maar een klein oppervlak nodig; bij de zuigboorteknik is een oppervlak van ca. 200 m² nodig, dit voor het opstellen van de apparatuur. De boring neemt ca. 2 weken per bron in beslag. Na afloop is alleen een groot putdeksel te zien.



Figuur 10: Put van een bron

2.3.3

Ontgassing/ijzer/geleiding/mineralen

De samenstelling van het water wordt gegeven in termen als hardheid, zoutgehalte, zuurgraad en elektrisch geleidingsvermogen. Dit laatste is een term om de hoeveelheid van opgeloste stoffen, die in het grondwater zitten, aan te geven. Daarnaast kan het water gasen als stikstof, CO₂ en methaan bevatten. De onttrekking en de infiltratiebron kunnen verstoppen door slib, ijzerneslag en gasbellen. Doordat het water zuurstofloos is, blijft het ijzer in oplossing. Tijdens het transport van het water kan echter zuurstof toetreden, wat ijzerneslag in de vorm van ijzerhydroxide tot gevolg heeft. Zuurstoftoetreding is te voorkomen door tijdens bedrijf en stilstand het systeem onder overdruk te houden. Slib en zand kunnen slijtage van de wisselaars en verstopping van de bron veroorzaken. Dit is te voorkomen door vóór inbedrijfname de bron goed te spoelen (ontwikkelen), een lage instroomsnelheid aan de kop te kiezen (boorgatwand; dit is de geperforeerde wand welke als inlaat dient) en het filter van de bron te omstorten met fijn grind. In het water van de bron komen ook gasen als CO₂, N₂ en CH₄ voor. Een lichte overdruk moet daarom in het systeem gehandhaafd worden om ontgassing tegen te gaan. Als tijdens het transport de druk daalt kan het water ontgassen. Het injecteren van een gasbel in de bron kan door de schokgolf een acute verstopping tot gevolg hebben.

2.4 Diepte, temperaturen, debiet, afstand

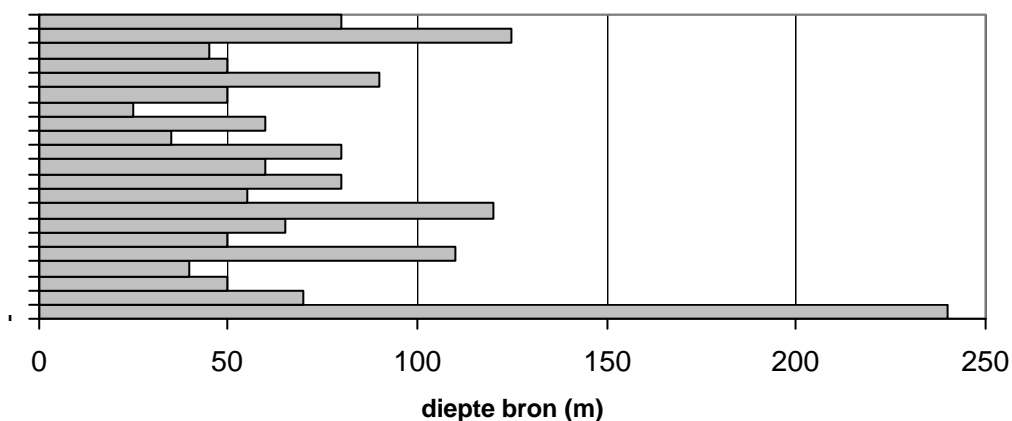
De in dit rapport genoemde onderverdeling van de aquifers heeft zijn voor- en nadelen.

De mono-bron is door het maken van één boorgat goedkoper dan de doubletsystemen.

Of de bron uitgevoerd wordt als opslag of als recirculatie, hangt af van de waterstroming, de dikte van de aquifer, het onttrokken vermogen aan de bron en van de voorschriften van de Provincie. Van de mono-bronuitvoering zijn maar enkele aangelegd. Bij toepassing in een kas zal de in de zomer vrijkomende warmte zorgen voor een voldoende hoog temperatuurniveau. Deze warmte ontstaat door koeling van de kas en bij de CO₂-productie door gasketels. De gasketels welke de CO₂ produceren, produceren ook warmte wat weggekoeld moet worden. Door deze warmteproductie geniet het opslagsysteem de voorkeur.

Diepte

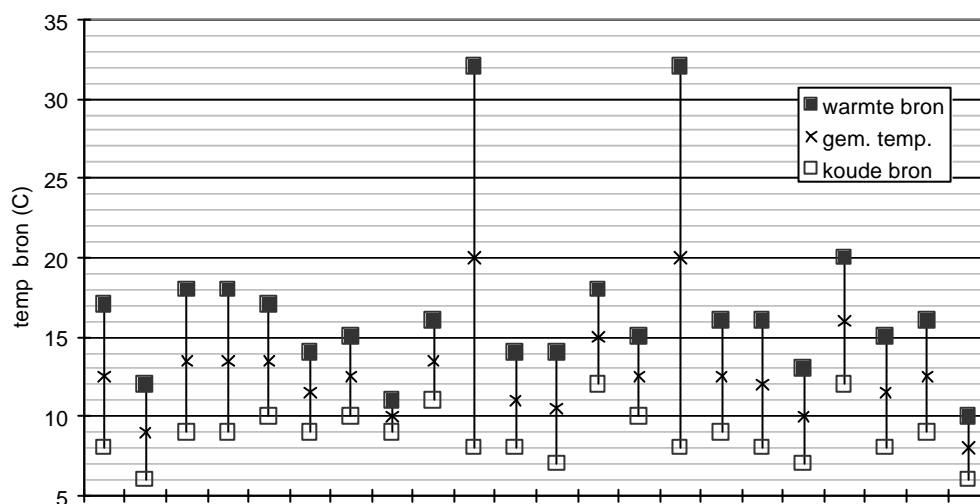
De diepte van de bron hangt af van de gesteldheid van de bodem en beïnvloedt in sterke mate de benodigde investering. In figuur 12 is de diepte van verschillende bronnen weergegeven.



Figuur 11: Diepte van de bron bij enkele projecten verspreid over Nederland

Temperatuur

De temperatuur welke uiteindelijk in de bron wordt bereikt, hangt van vele factoren af. Bij een recirculatiesysteem is de temperatuur van de bron altijd de grondwatertemperatuur die zo'n 12 °C is. Bij een opslagsysteem is dit in evenwicht met de temperatuur waarmee de bron is geregenereerd om energieneutraal te werken. Het regenereren kan in de zomer gebeuren door het opwarmen in koelers van het koude bronwater naar het niveau van luchttemperatuur. Daarmee kan een temperatuur van de warme bron van 18 °C worden gehaald. Wanneer de kas in de zomer met het water wordt gekoeld en er bijstook plaatsvindt voor CO₂-bemesting, zouden hogere temperaturen mogelijk kunnen zijn. Omdat gedurende het jaar energieneutraal gewerkt moet worden, moet het gemiddelde echter wel ca. 12 °C bedragen. Bij hogere opslagtemperaturen neemt door geleiding en grondwaterstroming het energieverlies toe. Enkele projecten zijn uitgevoerd met hogere opslagtemperaturen. In figuur 13 zijn van enkele projecten de temperatuur van de koude en warme bron weergegeven alsmede de gemiddelde temperatuur van de bron.



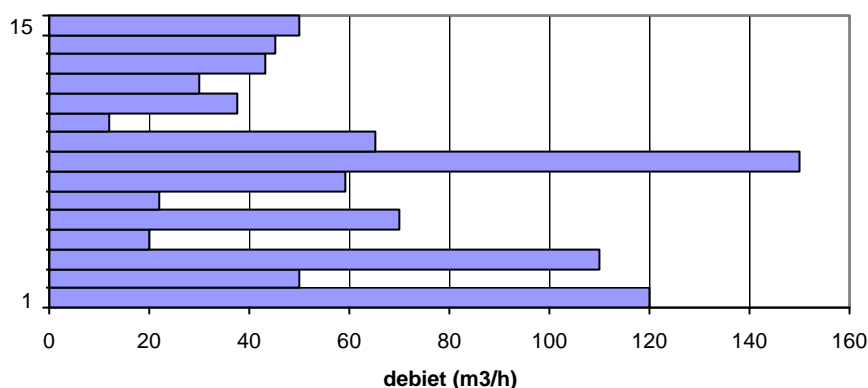
Figuur 12: Temperaturen van de bronnen die zijn gerealiseerd bij enkele projecten verspreid over Nederland

Bij toepassing van een warmtepomp voor vloerverwarming in de kas kan een ΔT van de bron van 5 °C worden aangehouden. Dit houdt dan in een warmtebron van 15 °C en een koude bron van 10 °C.

Debiet

Het debiet van één bron is geheel afhankelijk van de eigenschappen van de aquifer. Afhankelijk van het benodigde vermogen en de temperatuur van de bron, is een bepaald totaal debiet nodig. Dit bepaalt dan het totaal aantal benodigde bronnen.

Hieronder is ter illustratie aangegeven welk debiet er gepompt kan worden uit één bron bij enkele gerealiseerde projecten.

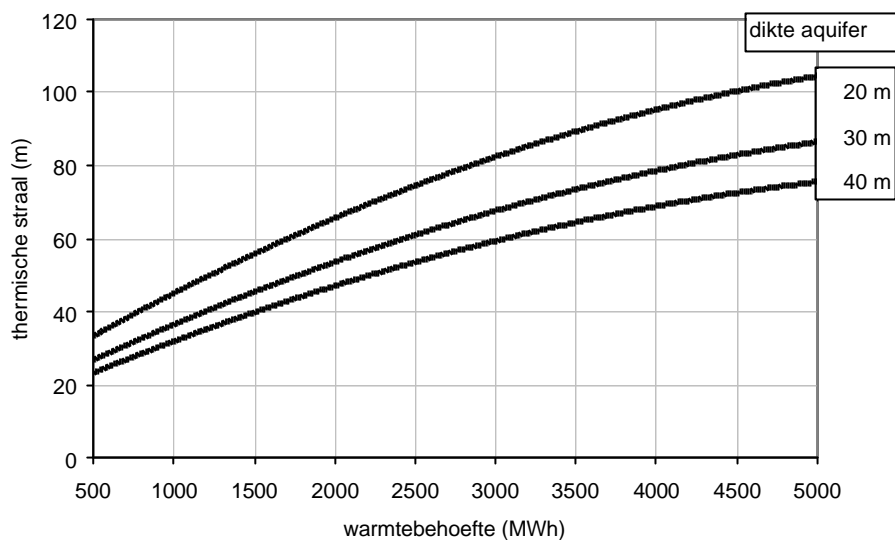


Figuur 13: Het debiet uit één bron bij enkele gerealiseerde projecten verspreid over Nederland

Bij het toepassen van vloerverwarming in een kas is een vermogen nodig als basislast van de warmtepomp van minimaal 300 kW (1 ha) tot maximaal 2,4 MW (8 ha). Bij toepassen van een absorptie warmtepomp (COP = 1,5) wordt dan minimaal 100 kW uit de bron onttrokken; bij toepassen van een elektrische warmtepomp (COP = 5) wordt maximaal 2 MW onttrokken. Bij een temperatuurverschil van 5 °C wordt minimaal 17 m³/h tot maximaal 355 m³/h uit de bronnen onttrokken. De maximale capaciteit zal (geheel afhankelijk van de grondsamenstelling) uit minstens 4 bronnen onttrokken moeten worden (4 doubletsystemen is 8 bronnen).

Afstand

Het vermogen dat uit de bron wordt onttrokken (en later weer wordt geregenereerd) vormt een thermische bel met een bepaalde straal om het inlaat (uitlaat) punt. Deze straal is grotendeels afhankelijk van de gekozen temperatuur van de opslag. Verder wordt de bel van onder en van boven begrensd door de afsluitende lagen van de aquifer. In figuur 15 is de straal van de thermische bel weergegeven wanneer het temperatuurverschil van de ingaande en uitgaande temperatuur 8 K bedraagt.



Figuur 14: De thermische straal van een bron

De afstand van de verschillende bronnen moet in de regel 2 à 3 maal de thermische straal zijn om geen “kortsluiting” tussen de bronnen te krijgen. Bij toepassing van de warmtepomp is de warmtebehoefte voor een kas met de grootte van 8 hectare maximaal 9.000 MWh. Dit vermogen zal uit minstens vier doubletten (8 bronnen) komen zodat de thermische straal dan per bron ca. 60 m bedraagt. Dit kan op het grondgebied van de kas worden gerealiseerd.

2.5 Financiële gegevens aquifers

Het is moeilijk een schatting van de exploitatiekosten te geven. Een grote variatie aan systemen is mogelijk; ook de geschiktheid van de bodem kan sterk verschillen. Daardoor variëren de aanlegkosten, het pompvermogen, de kosten van het onderhoud enz. Alleen een globale prijs kan worden gegeven:

Bodemonderzoek en effectenstudie	fl 50.000,-
Proefboring voor bodemonderzoek	fl 30.000,-
Boren 2 bronnen 150 m diep	fl 300.000,-
TSA (warmtewisselaar)	fl 60.000,-
Leidingen bronwater	fl 80.000,-
Regeltechniek	fl 80.000,-
Advies en begeleiding	fl 130.000,-
Totaal	fl 730.000,-

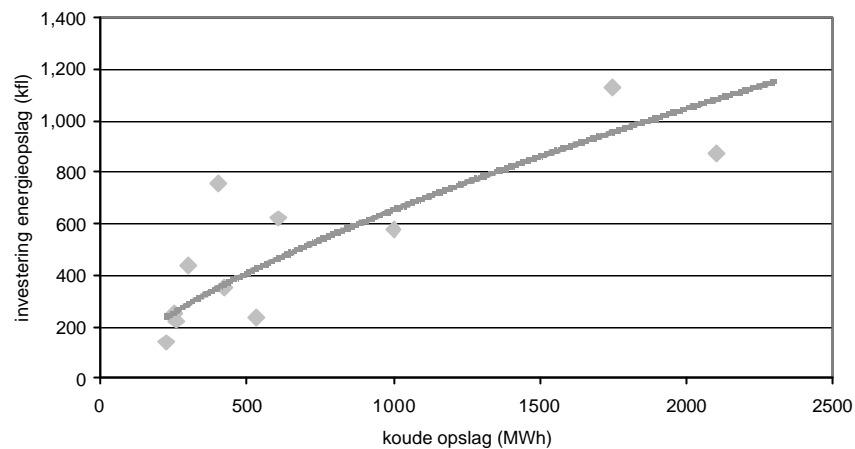
Elektriciteitsverbruik (1250*20 kW)	25.000 kWh (*12 ct)	fl 3.000,-
Electriciteitsvermogenskosten (20 kW _e *12)	240 kW _e (*8,90)	fl 2.136,-
Onderhoudscontract (+ rapportage)	12 maanden (3 % inv)	fl 15.000,-
Totaal onderhoud en energieverbruik		fl 20.136,-

Afschrijving bij 15 j en 4% rente	fl 85.286,-
Totale kosten per jaar <u>circa</u>	fl 105.422,-

Een mono-bron is in de regel 10 à 15% goedkoper dan een doubletsysteem. Dit komt omdat er minder constructiewerk hoeft te worden uitgevoerd en een eenvoudige regeling kan worden gebruikt.

In de regeling is een temperatuur- en flow-registratie opgenomen alsmede kleppen om de injectieleidingen aan te sturen. Omdat de vloerverwarming over het algemeen op één temperatuur zal werken, is uitgegaan van een eenvoudige aan/uit-regeling van de bron.

Om de variatie in kosten weer te geven is hieronder een grafiek gegeven met enkele prijzen van verschillende bronnen per MWh koelvermogen welke de afgelopen jaren in diverse projecten zijn gerealiseerd.



Figuur 15: Investering in bronnen van enkele gerealiseerde projecten verspreid over Nederland

In figuur 16 kan een trendlijn door de diverse investeringen getrokken worden. Dit geeft dan bij benadering de in de praktijk behaalde investering (INV) weer per MWh koudeopslag van de bron (Pbron). In formulevorm is deze trendlijn:

$$INV = 5911 * Pbron^{0,68}$$

3. DE BETONVLOER

3.1 Inleiding

In opdracht van IMAG heeft Gastec N.V. een mathematisch model ontwikkeld dat het instationaire warmtetransport in een vloer van de tuinbouwkas beschrijft.

Voor de vloer en vloerverwarming worden de volgende uitgangspunten geformuleerd:

De vloer bestaat uit drie lagen:

- bovenlaag met evt. water
- middenlaag van beton
- onderlaag van eventueel ander materiaal (isolatie)

In de middenlaag ligt x m buis per m^2 , van gegeven binnenmaat. De warmtecapaciteit en de warmtedoorgangscoefficiënt van de buiswanden worden verwaarloosd.

In de warmteoverdracht van de vloer naar de omgeving is het effect van straling (zowel uitstraling van de vloer naar de omgeving, als rechtstreekse instraling van de zon op het vloeroppervlak) niet opgenomen. Bij voldoende beschaduwing van de planten is dit een acceptabele aanname. Bij afwezigheid van planten tezamen met zoninstraling of een open nachthemel verdient het aanbeveling een correctieterm voor straling in te voeren (zie § 3.4).

Bovendien wordt aangenomen dat de warmtegeleiding van de vloer homogeen is, d.w.z. de vloerconstructie is zodanig dat het effect van verticale koudebruggen (leidingen en bekistingen) verwaarloosbaar is. In beperkte mate kunnen eventuele koudebruggen worden verdisconteerd door het vergroten van de warmtegeleidingscoefficient van het beton. De in de literatuur genoemde waarden voor de warmtegeleiding van beton vertonen overigens een grote spreiding. De waarde is afhankelijk van de betonsoort (grootte en soort van de vulstoffen).

In het model is afgezien van het modelleren van de diffusie van water in het beton. Als regelmatig veel water op de vloer gespreid wordt kan dit een belangrijk effect hebben op de warmtestroming in de vloer. Als er alleen sprake is van eventuele condensatie van waterdamp uit de lucht, zijn de effecten beperkt. Vanwege de complexiteit van de modellering van de water/waterdampdiffusie in het beton is ervoor gekozen om de effecten te modelleren als de aanwezigheid van een dunne waterfilm bovenin het beton. De dampdiffusie-weerstand in het beton wordt verwaarloosd.

3.2 Basisgegevens

Nb xxx zijn waarden die door de gebruiker van het model nader gespecificeerd moeten worden.

Warmteoverdrachtcoëfficiënt vloer-lucht ¹ :	α_{vl}	= $3.3 (T_{vloer} - T_{lucht})^{1/4}$ in W/m ² /K
Dampoverdrachtcoëfficiënt vloer-lucht	β_{vl}	= $6.8 \cdot 10^{-9} \alpha_{vl}$ in kg/m ² /Pa (altijd evenredig met α_{vl})
Warmtegeleidingscoëfficiënt beton	λ_{beton}	= 0.2 - 20 W/m/K (droog beton)
Warmtegeleidingscoëfficiënt isolatie ²	λ_{iso}	= 0.04 W/m/K
Warmtecapaciteit beton ³	C_{beton}	= 1000 J/kg/K
Warmtecapaciteit isolatie ⁴	$C_{isolatie}$	= 750 J/kg/K
Warmtecapaciteit water	C_{water}	= 4180 J/kg/K
Verdampingswarmte water	C_{latent}	= $2.26 \cdot 10^6$ J/kg
Soortelijke massa water	ρ_{water}	= 1000 kg/m ³
Soortelijke massa beton	ρ_{beton}	= 1600 kg/m ³
Soortelijke massa isolatie	$\rho_{isolatie}$	= 20 - 200 (kies 100 kg/m ³ ivm drukvastheid)
Bodemtemperatuur ⁵	T_{bodem}	= 8 °C
Diameter waterbuis	D_{buis}	= xxx m
Hart op hart afstand waterbuis	D_{hh}	= xxx m
Buislengte tussen wateraanvoer en waterafvoer	L_{buis}	= xxx m
Hoeveelheid waterbuis	W	= xxx m/m ² = $1/D_{hh}$
Diepte waterbuis	h_{buis}	= xxx m
Dikte betonlaag	h_{beton}	= xxx m
Dikte isolatielaag	$h_{isolatie}$	= xxx m
Debiet water	Q	= xxx kg/s / m ² (functie van tijd t)

¹ Polytechnisch zakboek 47e druk pag G1/10

² Glaswol en steenwol Binas tabel 10c

³ Polytechnisch zakboek 47e druk pag E1/10

⁴ Div. steenachtige materialen Binas tabel 10a

⁵ Polytechnisch zakboek 47e druk pag G1/20

Debiet water per buis	$Q_{\text{buis}} = Q D_{\text{hh}} L_{\text{buis}} \text{ kg/s}$
Watersnelheid in de buis	$V_{\text{water}} = Q_{\text{buis}} / (\rho_{\text{water}} \cdot 1/4 \pi D_{\text{buis}}^2) \text{ in m/s}$
Aanvoertemperatuur water	$T_{\text{aanvoer}} = \text{xxx } ^\circ\text{C}$ (functie van tijd t)
Temperatuur kaslucht	$T_{\text{lucht}} = \text{xxx } ^\circ\text{C}$
Relatieve vochtigheid kaslucht	$RV = \text{xxx } \%$

3.3

Beschrijving van het model

Om de warmtestromen in de vloer te beschrijven zijn drie fenomenen van belang:

- warmteafgifte van de vloer aan de bovenliggende lucht door convectie en door verdamping
- warmteafgifte van het beton aan de ingebedde water-buizen
- warmteafgifte aan de bodem, via de isolatie.

De warmteoverdracht van de vloer naar de lucht bestaat uit twee delen: de convectieve warmteoverdracht van vloeroppervlak naar lucht en de latente warmte door verdamping of condensatie op de vloer (als er geen water in de vloer aanwezig is en de vloertemperatuur is hoger dan het dauwpunt van de lucht, vervalt deze term).

De warmteoverdracht van het beton en de ingebedde buizen wordt gemodelleerd door aan te nemen dat de warmteoverdracht van de buizen in serie staat met de warmteweerstand van het beton tussen de buizen. De warmtestroom wordt gerelateerd aan de gemiddelde betontemperatuur ter hoogte van de middelpunten van de buizen. De watertemperatuur is gebaseerd op de aanname dat de betontemperatuur nagenoeg constant is gedurende de verblijftijd van het water in de vloer.

Verder is aangenomen dat de warmtedistributie in de vloer homogeen is, d.w.z. retour- en aanvoerpunten van het cv-water zijn evenwichtig verdeeld over het vloeroppervlak. De warmte van de buizen wordt op één niveau in de vloer overgedragen: het niveau van de hartlijnen van de buizen.

De warmteafgifte aan de bodem wordt geacht zo gering te zijn dat ter plaatse van het contact van de isolatie met de bodem, de bodemtemperatuur heerst.

3.3.1

Basisformules

$$\text{Warmteoverdrachtscoëfficiënt water-leiding} \quad \alpha_{\text{wl}} = 740 V_{\text{water}}^{3/4} D_{\text{buis}}^{-1/4}$$

$$\text{Warmteoverdracht leiding-vloer} \quad \alpha_{\text{lv}} = (\lambda_{\text{beton}} / 2 D_{\text{buis}}) / \ln(D_{\text{hf}} / D_{\text{buis}})$$

Warmteoverdracht water-vloer (gebaseerd op buisoppervlak) [W/(m² K)]:

$$\alpha_{\text{ww}} = 1 / (1 / \alpha_{\text{wl}} + 1 / \alpha_{\text{lv}})$$

Retourtemperatuur water [°C]:

$$T_{\text{retour}}(t) = T_{\text{beton}}(t, h_{\text{buis}}) + (T_{\text{aanvoer}}(t) - T_{\text{beton}}(t, h_{\text{buis}})) \cdot \exp\left(-\frac{L_{\text{buis}} \rho \cdot D_{\text{buis}} a_{\text{ww}}}{Q_{\text{buis}} c_{\text{water}}}\right)$$

Warmteafgifte water aan vloer: [W/m²]:

$$H_{\text{water}} = c_{\text{water}} (T_{\text{aanvoer}} - T_{\text{retour}}) Q_{\text{water}}$$

Warmteafgifte lucht aan de vloer [W/m²]:

$$H_{\text{vl}} = \alpha_{\text{vl}} (T_{\text{lucht}} - T(t, 0)) + M_{\text{vocht}} c_{\text{latent}}$$

$$M_{\text{vocht}} = \beta_{\text{vl}} P_{\text{sat}}(T_{\text{lucht}}) RV - P_{\text{sat}}(T(t, 0))$$

gebruik makend van de verzadigingsdampdruk waterdamp [Pa]:

$$P_{\text{sat}} = 10^{11.081 - 2258/(273.15+T)} \text{ (of eventueel gelijksoortige correlatie)}$$

en mits er, als $M_{\text{vocht}} < 0$, voldoende vocht in de vloer aanwezig is (zie implementatie)

Warmtestroom in beton [W/m²] voor $0 < h < h_{\text{beton}}$, m.u.v. het punt $h = h_{\text{buis}}$:

$$H = -I_{\text{beton}} \frac{\partial T_{\text{beton}}}{\partial h}$$

Warmtestroom in isolatie [W/m²] voor $h_{\text{beton}} < h < h_{\text{beton}} + h_{\text{isolatie}}$:

$$H = -I_{\text{isolatie}} \frac{\partial T_{\text{isolatie}}}{\partial h}$$

met r.v.w:

$$H(0)^+ = H_{\text{vl}}$$

$$H(h_{\text{beton}})^+ = H(h_{\text{beton}})^-$$

Temperatuur in beton [°C] voor $0 < h < h_{\text{beton}}$:

$$r_{\text{beton}} c_{\text{beton}} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial h} + H_{\text{water}} d(h - h_{\text{buis}})$$

Temperatuur in isolatie [$^{\circ}\text{C}$] voor $H_{\text{beton}} < h < H_{\text{beton}} + H_{\text{isolatie}}$:

$$r_{\text{isolatie}} c_{\text{isolatie}} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial H}{\partial h}$$

met r.v.w:

$$T(h_{\text{buis}})^+ = T(h_{\text{buis}})^-$$

$$T(h_{\text{beton}} + h_{\text{isolatie}}) = T_{\text{bodem}}$$

3.3.2

Uitvoervariabelen

Warmteafgifte vloer-lucht $Q_{vl} = \text{xxx W/m}^2$ (functie van tijd t)

Retourtemperatuur water $T_{\text{retour}} = \text{xxx } ^{\circ}\text{C}$ (functie van tijd t)

Interne variabelen (waarvan ook startwaarden dienen te worden gegeven)

Eff. dikte waterlaag

(waterhoeveelheid)

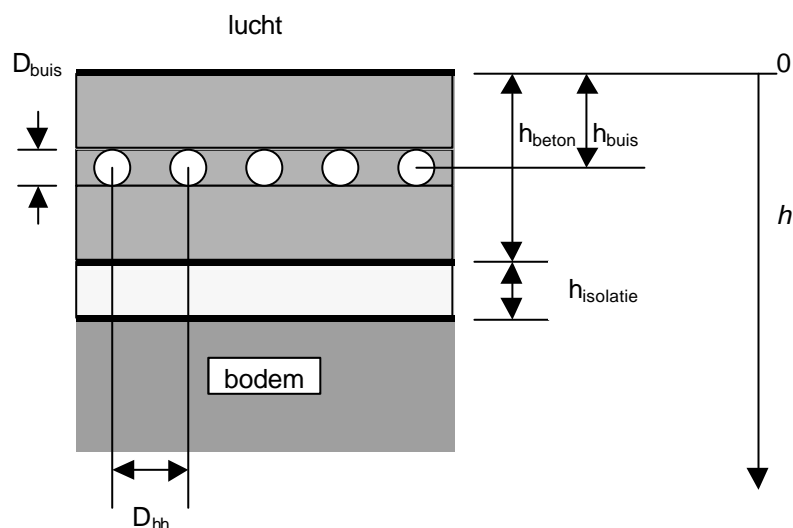
$h_{\text{vocht}} = \text{xxx m}$ (functie van tijd t , altijd ≥ 0)

Vloertemperatuur

$T_{\text{beton}} = \text{xxx } ^{\circ}\text{C}$ (functie van tijd t en hoogte h)

Isolatietemperatuur

$T_{\text{isolatie}} = \text{xxx } ^{\circ}\text{C}$ (functie van tijd t en hoogte h)



Figuur 16: Dwarsdoorsnede van de vloer

3.3.3 Implementatie

Voor gebruik in de computer dient het bovenstaande model gediscrètiseerd te worden in tijdstappen Δt en hoogtestappen Δh .

De meest eenvoudige methode is de 1st orde Euler methode. De methode heeft als nadeel dat de tijdstappen niet willekeurig groot mogen zijn, want dan is de nauwkeurigheid te gering en/of wordt de berekening instabiel.

I.h.a. voldoet het opdelen van de hoogte in ca. 10 à 20 cellen ($\Delta h = 0.1 h_{\text{beton}} = h_{\text{isolatie}}$). Kies niet teveel cellen, want de maximaal toelaatbare tijdstap is omgekeerd evenredig met het kwadraat van het aantal cellen. Bij 10 à 20 cellen is een tijdstap $\Delta t = 10$ sec waarschijnlijk goed toepasbaar.

Het heeft uit oogpunt van rekennauwkeurigheid voordelen om de gridcellen overall even groot te kiezen. Dus h_{beton} en h_{isolatie} zijn bij voorkeur veelvoud van Δh . De buiswarmte wordt conceptueel halverwege in een gridcel toegevoerd. Dus $h_{\text{buis}} = (i + 1/2) \Delta h$ met i een geheel getal.

De warmtestromen worden bepaald op de grens tussen twee gridcellen. De temperaturen worden vastgelegd in het centrum van de gridcel. Dit betekent dat de oppervlaktetemperatuur van de vloer $T(0)$ niet direct beschikbaar is. Deze moet door een additionele berekening uit de warmtestroom en de temperatuur in de eerste gridcel berekend te worden

Bij aanvang van de berekening dient de temperatuurverdeling in het beton en de isolatie ($T_1..T_n$), alsmede de vochthoeveelheid in de vloer (h_{vocht}) bekend te zijn.

Ga nu per tijdstap Δt als volgt te werk:

- 0a bepaal de kasluchttemperatuur en de wateraanvoertemperatuur en het waterdebiet in de buizen.
- 0b bepaal de vloertemperatuur met:

$$T(0) = T_1 + H_0 \cdot \frac{1}{2} \Delta h$$
 (neem voor de eerste tijdstap $H_0=0$)
- 0c bepaal de vochtstroom van de vloer naar de lucht met:

$$M_{\text{vocht}} = \beta_{v1} (P_{\text{sat}}(T(0)) - RV P_{\text{sat}}(T_{\text{lucht}}))$$

$$h_{\text{vocht}} := h_{\text{vocht}} - \Delta t M_{\text{vocht}} / \rho_{\text{water}}$$

 indien $h_{\text{vocht}} < 0$ dan

$$M_{\text{vocht}} = -h_{\text{vocht}} \rho_{\text{water}} / \Delta t$$

$$h_{\text{vocht}} = 0$$
- 1a Bereken de warmtestroom H_0 aan de bovenzijde met:

$$H_0 = \alpha_{v1} (T(0) - T_{\text{lucht}}) - c_{\text{latent}} M_{\text{vocht}}$$
- 1b Bereken de warmtestromen $H_1 \dots H_{n-1}$ tussen gridcellen met:

$$H_i = (T_i - T_{i+1}) \lambda / \Delta h$$
 (Nb: λ is λ_{beton} of $\lambda_{\text{isolatie}}$)
- 1c Bereken de warmtestroom bij de overgang van beton naar isolatie met:

$$H_i = (T_i - T_{i+1}) \lambda / \Delta h$$
 met $\lambda = 1 / (1/\lambda_{\text{beton}} + 1/\lambda_{\text{isolatie}})$
- 1d Bereken de warmtestroom bij de overgang van isolatie naar bodem met:

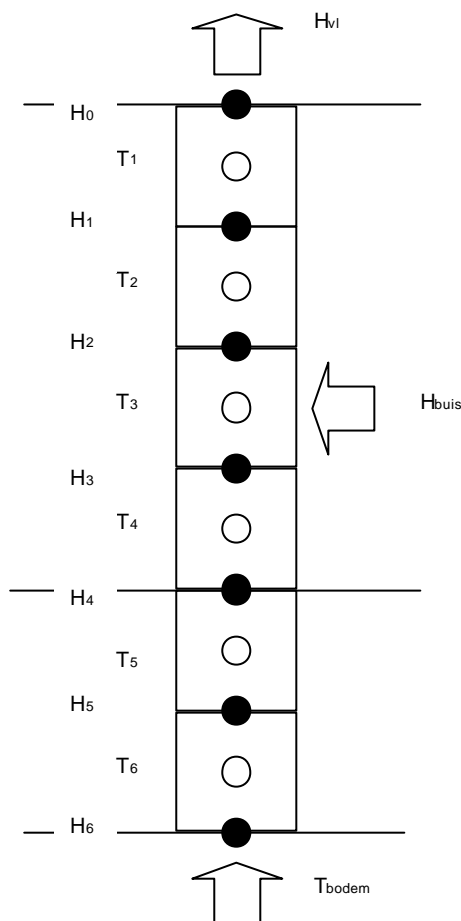
$$H_n = (T_n - T_{\text{bodem}}) \lambda_{\text{isolatie}} / \Delta h$$
- 1e Bereken de warmtestroom van het water H_{water} met de reeds eerder gegeven formule:

$$H_{\text{water}} = c_{\text{water}} (T_{\text{aanvoer}} - T_{\text{retour}}) Q_{\text{water}}$$
- 2a Pas de temperatuur in de gridcellen in het beton aan, met:

$$T_i := T_i + \Delta t \cdot (H_{i-1} - H_i) / (\rho_{\text{beton}} \cdot c_{\text{beton}} \Delta h)$$
- 2b Pas daar bovenop de temperatuur in de gridcel met de waterbuizen aan, met:

$$T_i := T_i + \Delta t \cdot H_{\text{water}} / (\rho_{\text{beton}} \cdot c_{\text{beton}} \Delta h)$$
- 2c Pas de temperatuur in de gridcellen in de isolatie aan, met:

$$T_i := T_i + \Delta t \cdot (H_{i-1} - H_i) / (\rho_{\text{isolatie}} \cdot c_{\text{isolatie}} \Delta h)$$



Figuur 17: Nummering en definitie van temperaturen en warmtestromen

3.4

Stralingsuitwisseling

Stralingsuitwisseling van de vloer met de omgeving is gerelateerd aan een effectieve omgevingstemperatuur T_{omgeving} en de zoninstraling H_{zon} . De effectieve omgevingstemperatuur ligt tussen de kasluchttemperatuur en de (nacht)hemeltemperatuur.

I.h.a. is de emissiecoëfficiënt ε ongeveer 0.9. Voor de warmtebalans aan de bovenzijde van de vloer geldt:

$$H_{\text{zon}} + \sigma \varepsilon (T_{\text{omgeving}}^4 - T(0)^4) - H_{\text{vi}} + H(0)^+ = 0$$

(temperaturen in K)

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$$

De niet-lineaire term in deze randvoorwaarde kan numeriek problemen geven. Het is mogelijk deze in goede benadering te lineariseren rondom een gemiddelde karakteristieke vloertemperatuur T_{vl} (bijv. 288 K). Dan geldt:

$$\sigma \varepsilon (T_{omgeving}^4 - T(0)^4) \sim \alpha_{str} (T_{omgeving} - T(0))$$

met

$$\alpha_{str} = \sigma \varepsilon (T_{omgeving}^2 + T_{vl}^2) (T_{omgeving} + T_{vl})$$

(temperaturen in K)