

Dit rapport is opgesteld in opdracht van InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster en de Stichting Innovatie Glastuinbouw door:

*Dr.ir. F.H. de Zwart, Agrotechnology and Food Innovations (voorheen IMAG), Wageningen (deelstudie 1)*

*Ir. M.M. van Aarssen en drs. R.E. van Elswijk, IF Technology, Arnhem (deelstudie 2)*

*Dr.ir. E. van Andel, Fiwihex, Almelo (deelstudie 3)*

Dit rapport – bestaande uit drie deelstudies - is onderdeel van het eerder uitgebrachte rapport “Concept voor een Energieproducerende Kas” (rapportnr. 02.2.015) en maakt deel uit van het programma “Glastuinbouw 2020”, speerpunt “Kas als Energiebron”.

Programmteam speerpunt “Kas als Energiebron”

Dr.ir. H.J. van Oosten (InnovatieNetwerk, SIGN)

Dr. H.J. Huizing (InnovatieNetwerk)

# Concept voor een energieproducerende kas – Enkele deelstudies

*InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster*

Postbus 20401

2500 EK Den Haag

tel.: 070 378 56 53

internet: <http://www.agro.nl/innovatienetwerk/>

*Stichting Innovatie Glastuinbouw*

Postbus 29773

2502 LT Den Haag

tel. : 070 338 27 55

internet : <http://www.lto.nl/>

ISBN: 90 - 5059 – 219 - 8

Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.

Rapportnr. 04.2.068 (serie achtergrondrapporten), Den Haag, maart 2004

# Voorwoord

In het voorjaar van 2002 werd door dr.ir. E. van Andel (Fiwihex, Almelo) een concept beschreven voor een energieproducerende kas. Dit concept werd besproken met een aantal experts. Dat leidde tot een serie vragen, die ten dele door externe partijen beantwoord diende te worden. Het concept, de vragen uit de expertmeeting en een samenvatting van de rapportages van IMAG (berekeningen met het model Kaspro), IF Technology (gegevens over aquifers) en Fiwihex (extra metingen over koeling en luchtstroming in een kas) zijn eerder gepubliceerd in het rapport van InnovatieNetwerk en SIGN “Concept voor een energieproducerende kas” (02.2.015).

Dit werkdocument bevat de volledige tekst van de drie achtergronddocumenten van IMAG, IF Technology en Fiwihex.

De resultaten zijn besproken in een begeleidingscommissie bestaande uit:

Ir. T. van Wunnik	(Projectbureau Duurzame energie, te Arnhem)
Dr.ir. C. van Liere	(voorheen Kema, heden Alpha Power Systems, te Arnhem)
S. Huisman	(Tuinbouwondernemer, te Huissen)
Dr. H. Huizing	(InnovatieNetwerk, te Den Haag)
Dr.ir. H.J. van Oosten	(InnovatieNetwerk en SIGN, te Den Haag)

Tevens namen deel aan de discussie:

Dr.ir. F. de Zwart	(Agrotechnology and Food Innovations BV (voorheen IMAG), te Wageningen)
Dr.ir. E. van Andel	(Fiwihex, te Almelo)
Dr.ir. E.E. van Andel	(Fiwihex, te Almelo)

De resultaten hebben geleid tot het uitvoeren van 2 experimenten:

- a. een beoordeling van de eigenschappen van de Fiwihex warmtewisselaar;
- b. een experiment met warmtewisselaars in een kas met een tuinbouwgewas.

Deze vervolggexperimenten zijn in 2003 op het IMAG uitgevoerd en zijn in aparte rapporten beschreven.

# Inhoudsopgave

Voorwoord	i
<b>Deelstudie 1: Berekeningen met het IMAG-Kasmodel voor het concept “Energieproducerende Kas”</b>	<b>1</b>
1. Feasibility studie naar een met grondwater verwarmde kas	3
1.1. Aanleiding en achtergrond	3
1.2. Systeembeschrijving	3
1.3. Modellering van de FiwiHex	4
1.4. Besturing van de installatie	5
1.5. Luchtvochtigheidsregeling	5
1.6. Nakoeling	6
2. Resultaten bij een voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt van 30 W/(m <sup>2</sup> K) (1 FiwiHex per 3,7 m <sup>2</sup> )	7
2.1. Kasluchttemperatuur	7
2.2. RV-beheersing	8
2.3. Ventilatorvermogen (= warmteoverdrachtscoëfficiënt)	9
2.4. Jaarbalans van warmte- en koudevraag	11
2.5. Elektriciteitsverbruik	11
2.6. Aquifertemperatuur	12
3. Resultaten bij een voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt van 50 W/(m <sup>2</sup> K)	15
3.1. Kasluchttemperatuur	15
3.2. RV-beheersing	16
3.3. Ventilatorvermogen (=warmteoverdrachtscoëfficiënt)	17
3.4. Jaarbalans van warmte- en koudevraag	18
3.5. Elektriciteitsverbruik	19
Literatuur	21
<b>Deelstudie 2: Energieproducerende kas - ondergrondse energieopslag</b>	<b>23</b>
1. Bodemgeschiktheid KWO in Nederland	25
1.1. Inleiding	25
1.2. Technische aspecten	25
1.3. Vergunningtechnische aspecten	27

1.4. Aquiferkeuze (ondiep of diep)	28
1.5. Bodemgeschiktheid van geselecteerde gebieden	29
2. Dimensionering grondwatersysteem	31
2.1. Definiëren eigenschappen van ondiepe en diepe aquifer	31
2.2. Globale dimensionering bronnen	32
2.3. Bronlocaties	32
3. Investeringskosten en energieverbruik	35
3.1. Raming van de investeringskosten	35
3.2. Energieverbruik bronpomp	36
4. Conclusies en aanbevelingen	39
<b>Deelstudie 3: Energieproducerende kas - koeling en luchtstroming</b>	<b>41</b>
1. Koelproef	43
1.1. Meetopstelling	43
1.2. Warmtewisselaar	43
1.3. Meetresultaten	44
2. Conclusie	47

# **Deelstudie 1**

## **Berekeningen met het IMAG- Kaspromodel voor het concept “Energieproducerende kas”**

**Resultaten van Kaspro-berekeningen aan een  
dubbeldeks tuinbouwkas die met directe  
grondwaterwarmte wordt gekoeld en verwarmd**

Dr.ir. F.N. de Zwart

Agrotechnology Technology Food Innovations BV (voorheen IMAG)  
Wageningen



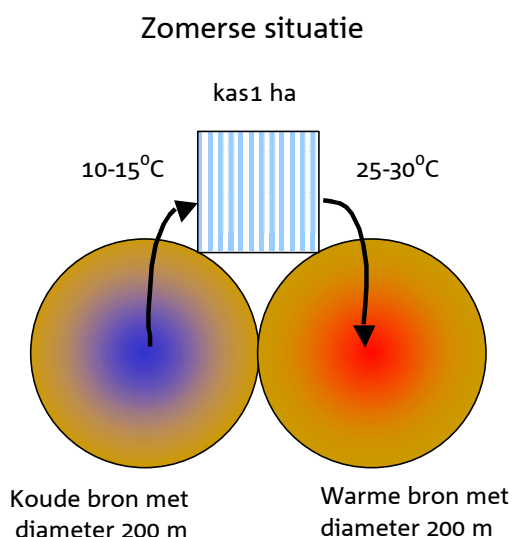
# 1. Feasibility studie naar een met grondwater verwarmde kas

## 1.1. Aanleiding en achtergrond

In het kader van het ontwikkelen van innovatieve, energiezuinige kassen heeft de heer Van Andel een nieuw concept beschreven van een kas die met efficiënte warmtewisselaars binnen redelijke temperatuurgrenzen gehouden wordt, waarbij een heel geringe hoeveelheid externe energie gebruikt wordt. Aan het IMAG is gevraagd om met behulp van het dynamisch kasklimaatmodel te bepalen wat de implicaties op kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid zijn, en hoe groot het warmteoverschot is. De resultaten van dit werk worden hier in de vorm van een werkdocument gepresenteerd.

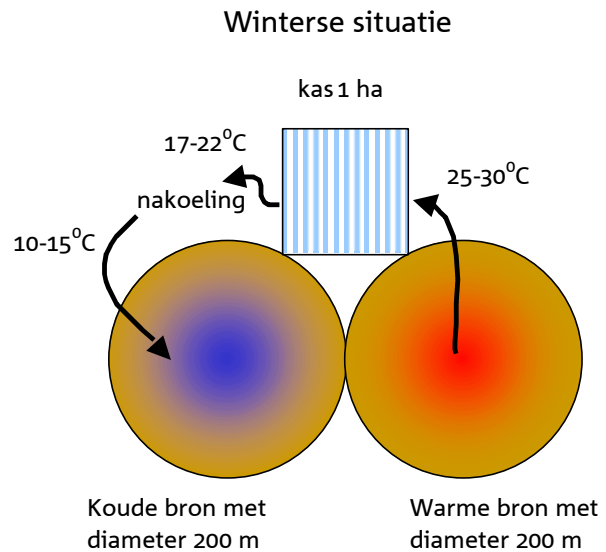
## 1.2. Systeembeschrijving

Het voorgestelde systeem bestaat uit een dubbeldeks kas waarvan de kaslucht met behulp van water/lucht-warmtewisselaars kan worden gekoeld (en ontvochtigd) en verwarmd. De warmtewisselaars koelen de kas in de zomer, waarbij koud grondwater aan de kaslucht wordt verwarmd tot een temperatuurniveau van zo'n 28 °C en vervolgens in ondergrondse watervoerende lagen wordt bewaard voor gebruik in de winter. In de winter wordt dit warme water via dezelfde wisselaars teruggevoerd, om op die manier de kaslucht te verwarmen. Beide situaties zijn in nevenstaande schetsen getekend.



Een belangrijk detail voor de winterse situatie is de behoefte aan nakoeling. Zonder deze nakoeling zal de koude put niet veel kouder worden dan de 17-22 °C die bij het verwarmen vanuit de warmtewisselaar terugkomt (afhankelijk van het gewenste temperaturniveau), waardoor de koelcapaciteit van het systeem in de zomer aanzienlijk beperkt zou worden.

Bovendien biedt deze nakoeling de mogelijkheid om tegemoet te kunnen komen aan de eis dat ondergrondse energieopslagsystemen een energieneutrale jaarcyclus moeten hebben. De oppervlakten van de kas en de aquifers zijn ongeveer op schaal getekend, uitgaande van een aquifer met een dikte van 20 m. Qua totale pompcapaciteit van en naar de putten moet gedacht worden aan ongeveer 500 m<sup>3</sup>/ha per uur. Wanneer er nog wat buffercapaciteit zou kunnen worden gecreëerd, zou de pompcapaciteit kunnen dalen naar ongeveer 300 tot 400 m<sup>3</sup>/(ha uur).



De berekeningen zijn ervan uitgegaan dat het aquiferwater direct door de warmtewisselaars van de kas kan worden gevoerd. Hierdoor wordt een extra scheidingswisselaar, met de daarbij behorende kosten en temperatuurverliezen, voorkomen. De aquiferafmetingen met een diameter van 200 m en een dikte van 20 m corresponderen goed met het volume dat voor opslag verwacht mag worden (600.000 m<sup>3</sup>). Per m<sup>2</sup> kas is dit dus 60 m<sup>3</sup>. Uitgaande van een warmtecapaciteit van grond van 3MJ/m<sup>3</sup>/°C kan de aquifer bij een temperatuurverschil van 10 °C dus 1800 MJ bufferen, wat qua ordegrrootte overeenkomt met het warmteoverschot.

### 1.3. Modelling van de FiwiHex

Om een realistische simulatie te kunnen maken, is de warmtewisselaar gemodelleerd als een oppervlak waarvan de temperatuur wordt bepaald door een warmtebalans. Deze warmtebalans wordt gevormd door aan de ene kant voelbare en, tijdens koelen, latente warmte-uitwisseling met de kas, en aan de andere kant energietoevoer of -afvoer vanuit de aquifer. De warmte-uitwisseling met de kas wordt geregeld met behulp van een regelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt, wat in de fysieke uitvoering betekent dat het ventilatorvermogen wordt geregeld. De simulaties zijn uitgevoerd met een maximale warmteoverdracht van 30 W/(m<sup>2</sup> K) en 50 W/(m<sup>2</sup> K). De stofoverdrachtscoëfficiënt tijdens condensatie is gekoppeld aan de voelbare



warmteoverdrachtscoëfficiënt. De warmte-uitwisseling met de aquifers wordt geregeld via het debiet waarmee water uit de warme put (tijdens verwarmen) en uit de koude put (tijdens koelen) wordt gepompt. Tijdens het verwarmen is het debiet begrensd op 400 m<sup>3</sup>/uur (voor deze kas van 1 ha). Tijdens het koelen mag het debiet maximaal 500 m<sup>3</sup>/uur zijn. Bij een  $\Delta T$  van 10 °C betekent dit een maximaal koelvermogen van 580 W/m<sup>2</sup>. Tijdens het verwarmen zal, zeker aan het eind van de winter, het verschil tussen de temperatuur van de warme aquifer en de gewenste temperatuur van de warmtewisselaar (Stooklijn +2 °C) klein zijn. Het verwarmingsvermogen komt daarmee op typische waarden van maximaal rond de 100 W/m<sup>2</sup>. Ofschoon in werkelijkheid de watertemperatuur die uit de warmtewisselaar komt een functie zal zijn van kasluchttemperatuur, gemiddelde warmtewisselaartemperatuur en afgegeven of opgenomen vermogen, wordt in de huidige implementatie gesteld dat de uitgaande watertemperatuur gelijk is aan de gemiddelde warmtewisselaartemperatuur. *Tijdens verwarmen zal deze temperatuur in werkelijkheid iets hoger liggen en tijdens koelen iets lager.*

#### **1.4. Besturing van de installatie**

Bij de regeling van de kasluchttemperatuur met de warmtewisselaars kan het verwarmingsvermogen worden aangepast door het ventilatortoerental en door de warmtewisselaartemperatuur. In de huidige implementatie is de regeling ingericht op het maximaliseren van de uitkoeling/opwarming van het aquiferwater tijdens het respectievelijk koelen en verwarmen. Dit betekent dat tijdens het verwarmen de gewenste temperatuur van de warmtewisselaar op de stooktemperatuur + 2 °C wordt ingesteld, maar nooit hoger dan de actuele temperatuur van de warme bron minus 2 °C. *Dus als de gewenste kasluchttemperatuur 20 °C is, wordt tijdens stoken de gewenste temperatuur voor de warmtewisselaar op 22 °C gesteld, tenzij de warme put van de aquifer onder de 24 °C is gezakt.* Tijdens koelen wordt de gewenste temperatuur van de warmtewisselaar op 25 °C gesteld. De warmteoverdrachtscoëfficiënt naar de kaslucht (het ventilatortoerental) wordt via een proportionele regelaar beïnvloed. De temperatuur van het gesimuleerde warmtewisselaaroppervlak wordt via een PI-regelaar geregeld met het debiet vanuit de aquifer.

#### **1.5. Luchtvochtigheidsregeling**

In die simulaties waarin actief op de luchtvochtigheid wordt ingegrepen, gebeurt dit door ramen in de kas te openen. Hiervoor wordt een proportionele regeling gebruikt die het raam 10% opent per % overschrijding van de RV. 100% Raamopening wil zeggen dat  $\frac{3}{36}$  van het kasdek geheel geopend is (in een standaard kas-lay-out zit er op

36 m<sup>2</sup> kas 1 raam van 3 m<sup>2</sup> aan de lijszijde en 1 raam van 3 m<sup>2</sup> aan de loefzijde. Voor de ontvochtiging wordt alleen het raam aan de lijszijde gebruikt).

## 1.6. Nakoeling

Om thermische vervuiling van de aquifer te voorkomen en voldoende koelvermogen voor de zomer te hebben, wordt het water dat uit de warmtewisselaar terugkomt zoveel mogelijk verder afgekoeld. Deze verdere uitkoeling is in de huidige versie van het model niet fysisch gemodelleerd. Er wordt eenvoudigweg gesteld dat de temperatuur waarmee het water terug wordt gestuurd naar de koude put gelijk is aan

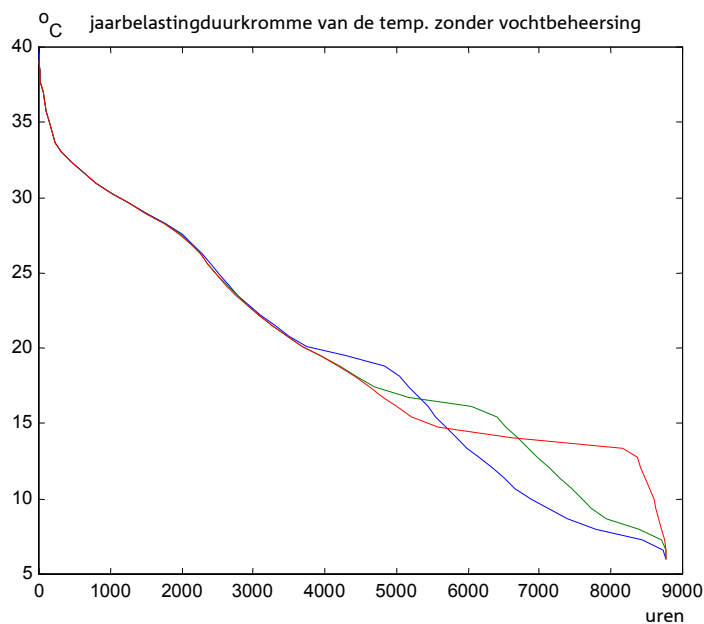
$$T_{\text{aquif\_koud\_in}} = \max(5, \min(T_{\text{FiwiHex}}, T_{\text{buiten}} + 5))$$

Onder deze conditie kan de koude put worden gekoeld tot temperaturen onder de 10 °C.

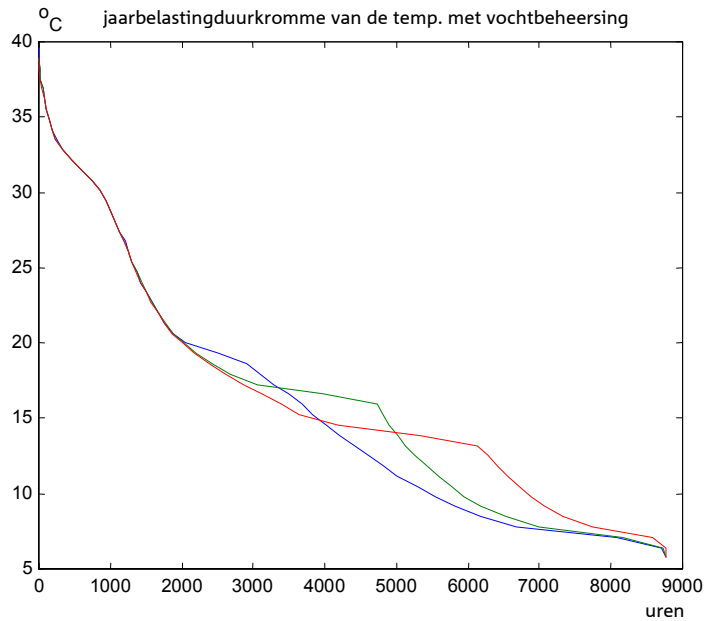
## 2. Resultaten bij een voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt van 30 W/(m<sup>2</sup>K) (1 Fiwihex per 3,7 m<sup>2</sup>)

### 2.1. Kasluchttemperatuur

De mate waarin de installatie in staat is de kasluchttemperatuur te beheersen, kan goed worden afgelezen uit de jaarbelastingduurkromme. In figuur 1 is deze weergegeven voor de kas die geen rekening houdt met de luchtvochtigheid. In figuur 2 staat dezelfde figuur, maar dan voor het geval de kas de ramen opent op het moment dat de kaslucht RV boven de 85% komt.



Figuur 1: Jaarbelastingduurkromme voor de temperatuur in de kas die naar onder toe zoveel mogelijk wordt begrensd op 20 °C (blauwe lijn), 17,5 °C (groene lijn) en 15 °C (rode lijn). Aan de bovenkant komt de koelinstallatie in werking als de kaslucht warmer wordt dan 27,5 °C.

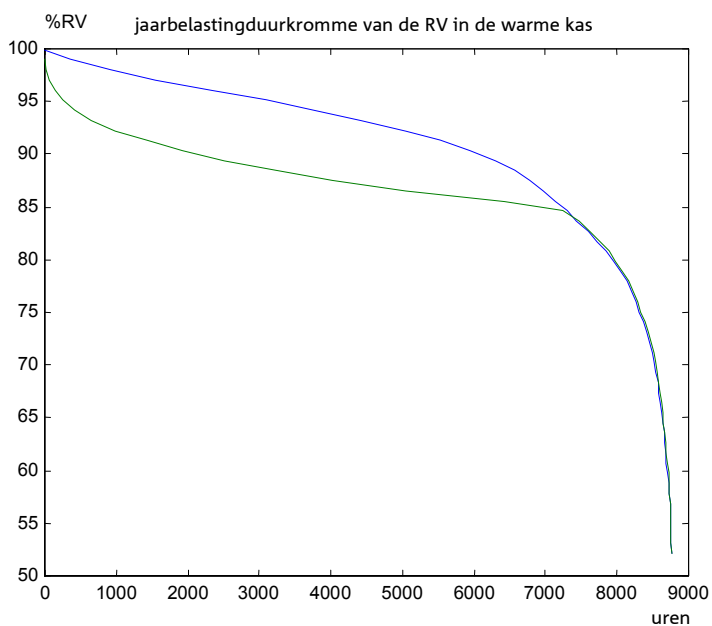


Figuur 2: Vergelijkbare figuur als figuur 1, maar dan in geval er wel een vochtbeheersingsregeling wordt toegepast.

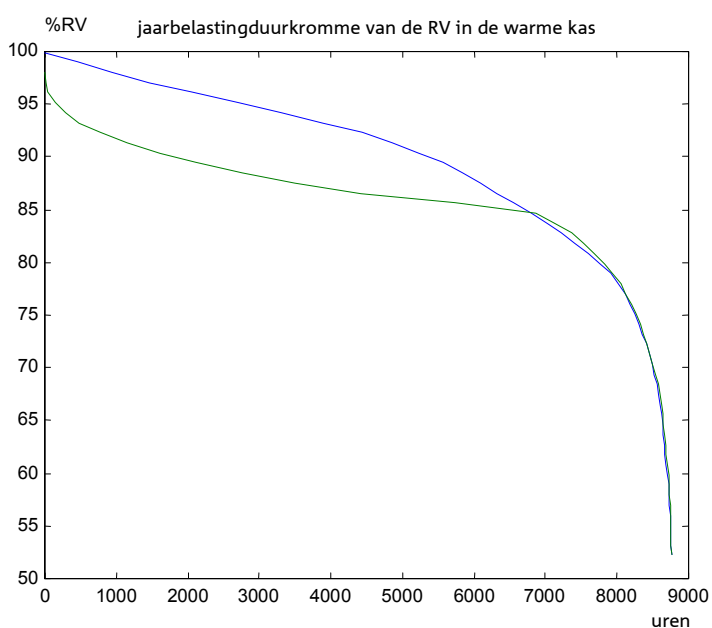
Vergelijking van figuur 1 en 2 laat zien dat de luchtvochtigheidsbeheersing energie kost, waardoor de warme aquifer sneller wordt leeggetrokken en de kasluchttemperatuur minder uren op de gewenste waarde kan worden gehouden.

## 2.2. RV-beheersing

De RV-beheersing leidt tot een substantiële verlaging van de RV in de kas. Dit blijkt uit de volgende jaarbelastingduurkromme, waarin duidelijk naar voren komt dat het aantal uren met een hoge RV door de regeling fors daalt. Het P-regelaarkarakter van de regeling komt tot uiting in het feit dat de jaarbelastingduurkromme gradueel verlaagd wordt en niet begrensd op 85%.



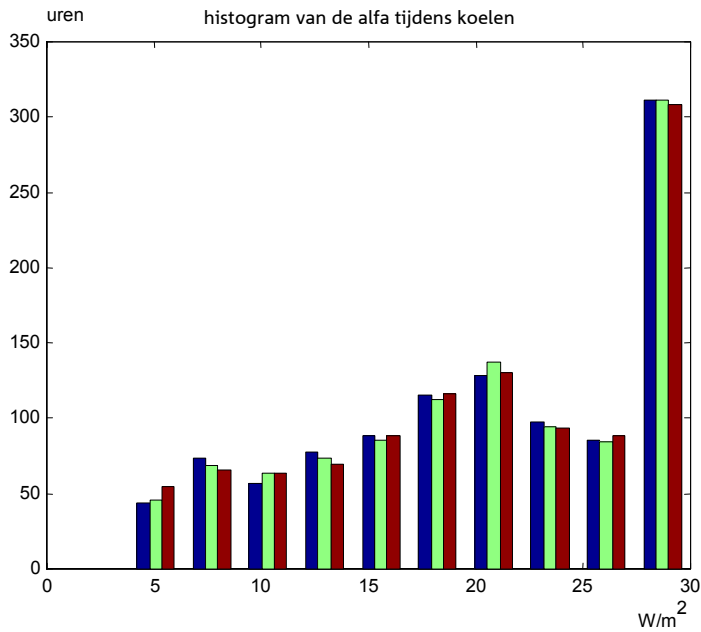
Figuur 3: Jaarbelastingduurkromme voor de RV in de kas met hoge stooklijn (20 °C). De blauwe lijn geldt voor de ongeregelde situatie.



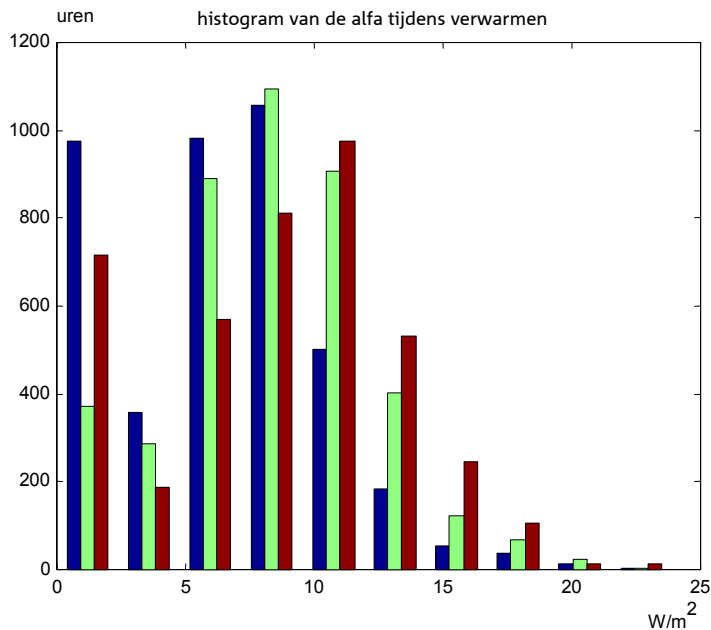
Figuur 4: Vergelijkbaar met figuur 3, maar dan voor de kas met lage stooklijn (15 °C).

### 2.3. Ventilatorvermogen (= warmteoverdrachtscoëfficiënt)

Het verwarmings- en koelvermogen wordt geregeld via de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de warmtewisselaar. In onderstaande histogrammen zijn deze overdrachtscoëfficiënten getoond. Beide grafieken gelden voor de situatie met vochtregeling.



Figuur 5: Histogram van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de FiwiHex tijdens koelen van de kas. Per clustertje geldt het linkerblokje (blauw) voor de warme kas (stooklijn is 20 °C), het middelste blokje voor de gemiddelde stooklijn (17,5 °C) en het rechterblokje voor de koudste kas (stooklijn is 15 °C).



Figuur 6: Histogram van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de FiwiHex tijdens verwarmen van de kas. De kleurvolgorde is vergelijkbaar met figuur 5.

In figuur 5 heeft de ingestelde stooklijn, zoals verwacht mag worden, nauwelijks effect op de alfa. Immers, de ventilatielijn (temperatuur waarboven de kas gaat koelen) is voor alle situaties gelijk (27,5 °C). Het is opmerkelijk te constateren dat de warme kas veel bij lage alfa's en de gematigde kas bij veel alfa's rond de 10  $W/(m^2 K)$  werkt. Ik heb hier op dit moment geen nadere analyse van gemaakt.

## 2.4. Jaarbalans van warmte- en koudevraag

De kas heeft in de zomer een groot warmteoverschot en in de winter een warmtetekort. In onderstaande tabel worden de jaartotalen weergegeven.

RV-regeling	Stooktemp. [°C]	Verwarming [MJ/(m <sup>2</sup> jr)]	Koeling [MJ/(m <sup>2</sup> jr)]	W-overschot [MJ/(m <sup>2</sup> jr)]
nee	20	226	1461	1235
nee	17,5	292	1448	1157
nee	15	354	1445	1090
ja	20	287	1078	790
ja	17,5	389	1079	690
ja	15	414	1071	657

Op het eerste gezicht is het bevreemdend dat de verwarmingsenergie afneemt naarmate de stooktemperatuur stijgt. Dit geldt voor beide instellingen rond de RV-regeling. Dit effect wordt veroorzaakt door het feit dat de beschikbaarheid van warmte in de warm gestookte kas veel kleiner is dan in de koudere kassen. Immers, in de warm gestookte kas is de ingestelde warmtewisselaartemperatuur 22 °C (dus ongeveer 5 °C lager dan de temperatuur van de warme aquifer) en in de koudere kassen respectievelijk 19,5 en 17 °C. Voor de koude kas is er dus feitelijk 2 keer zoveel energie beschikbaar dan voor de warme kas. De geringere verwarming in de warme kas komt dus doordat de warme aquifer in het begin van het stookseizoen relatief snel wordt leeggepompt, waarbij de resterende warmte via de nakoeling wordt vernietigd. De toename van de gebruikte verwarmingsenergie en de afname van de koelbehoefte van de kas waarin de RV wordt geregeld, komen uiteraard door de grotere ventilatie die met de RV-beheersing gemoeid zijn.

## 2.5. Elektriciteitsverbruik

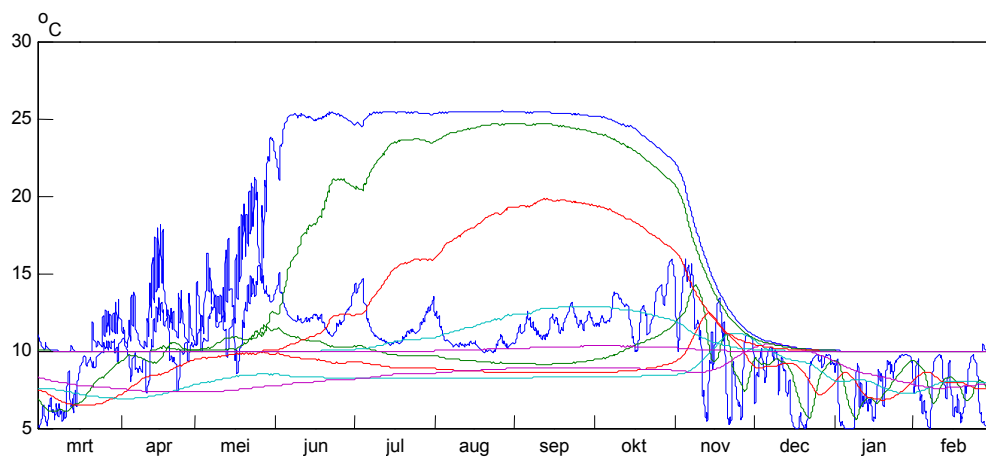
De kas kent twee belangrijke elektriciteitsverbruiksposten. In de eerste plaats is dat het verbruik van de ventilatoren, opgegeven volgens specificatie van de heer Van Andel, en in de tweede plaats is dat het verpompen tussen de zuigput en de infiltratieput. De energie die hiermee gemoeid is, wordt gesteld op 1 MJ/m<sup>3</sup> (De Zwart, 2002) In onderstaande tabellen zijn deze elektriciteitsverbruiken in kaart gebracht.

RV-regeling	Stooktemp. [°C]	Fiwihex [kWh]		Bronpompen [Kwh]		totaal [Kwh]
		Verw.	Koelen	Verw.	Koelen	
nee	20	7	2	27	6	42
nee	17,5	7	3	20	6	36
nee	15	7	3	6	5	22
ja	20	6	2	44	7	59
ja	17,5	6	3	37	5	52
ja	15	6	4	27	5	41

De tabel geeft aan dat onder de gestelde uitgangspunten het elektriciteitsverbruik van de bronpompen groter is dan dat van de warmtewisselaars. De grote debieten (en dus 'verspilling' van warmte) die optreden bij de hoge stooklijnen, komen in deze tabel tot uitdrukking in hoge elektriciteitsverbruiken voor de bronpompen tijdens verwarmen.

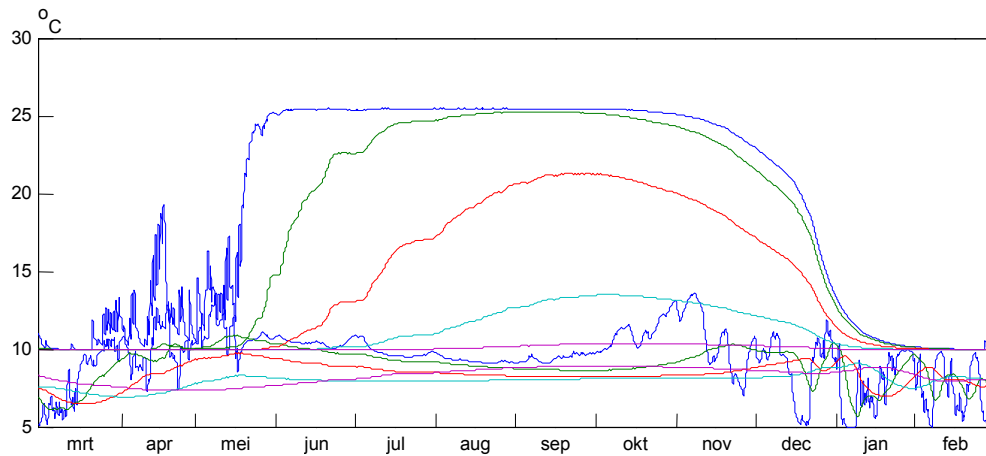
## 2.6. Aquifertemperatuur

Tot slot voeg ik nog een plaatje toe waarop de temperatuur van de aquifer is afgebeeld. Vanwege het feit dat ik geen nadere studie heb gemaakt van de mogelijk- en onmogelijkheden van de nakoeling, en ik bovendien geen nadere overwegingen over de temperatuur waarmee de koude aquifer in de winter wordt geladen heb gemaakt, is dit een zeer indicatief plaatje. Om die reden wordt het geheel hier ook zonder toelichting gepresenteerd.



Figuur 7: Verloop van de aquifertemperaturen in ring 0 (binnenste ring, blauw), 2 (groen), 4 (rood), 6 (turkoois) en 8 (één na buitenste ring, paars). De gestippelde lijnen gelden voor de warme put, de getrokken lijnen voor de koude put. De grafiek geldt voor de kas met luchtvochtigheidsregeling en de gemiddelde stooklijn (17,5 °C).





Figuur 8: Verloop van de aquifertemperaturen voor de kas met luchtvochtigheidsregeling, maar bij een stooklijn van 15 °C. De kleur- en lijncoderingen zijn gelijk aan die van figuur 7. Opvallend is dat de warmte-aquifer langer op temperatuur blijft. De koudere kas gaat duidelijk zuiniger om met de warmte in de warme put.

Beide figuren laten duidelijk het effect zien van de nakoeling op de temperatuur in de kern van de koude put.

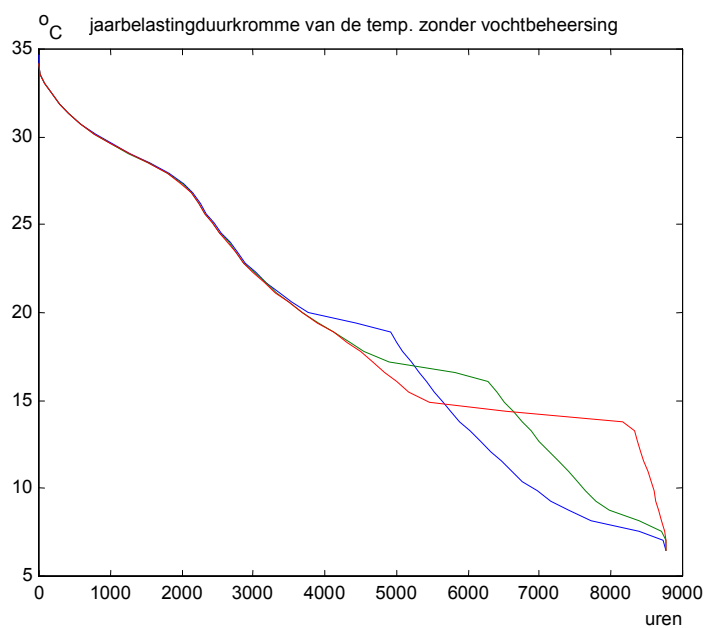


### 3. Resultaten bij een voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt van 50 W/(m<sup>2</sup>K)

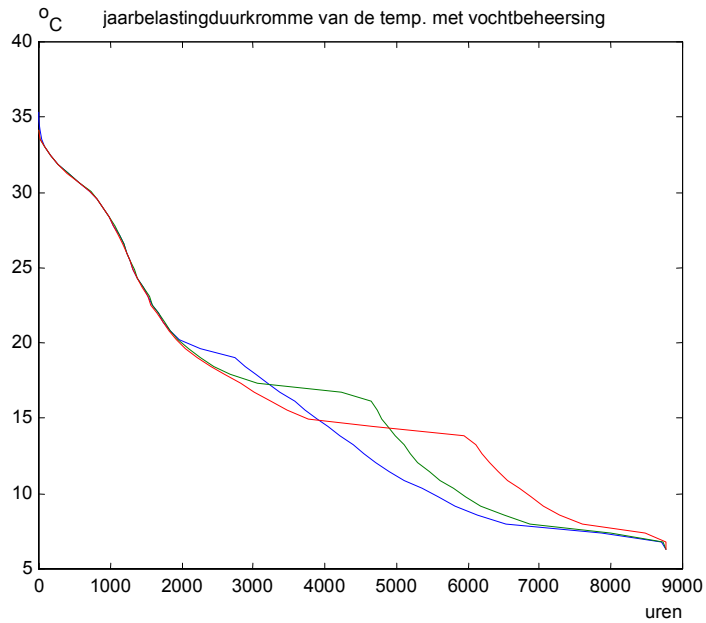
Figuren 9 tot en met 14 zijn vergelijkbaar met de figuren 1 t/m 6, maar gelden voor de situatie bij een groter maximaal vermogen van de warmtewisselaars (50 W/(m<sup>2</sup> K)).

#### 3.1. Kasluchttemperatuur

In figuur 9 is de kasluchttemperatuur weergegeven voor de kas die geen rekening houdt met de luchtvochtigheid. In figuur 11 staat dezelfde figuur, maar dan voor het geval de kas de ramen opent op het moment dat de kaslucht-RV boven de 85% komt.



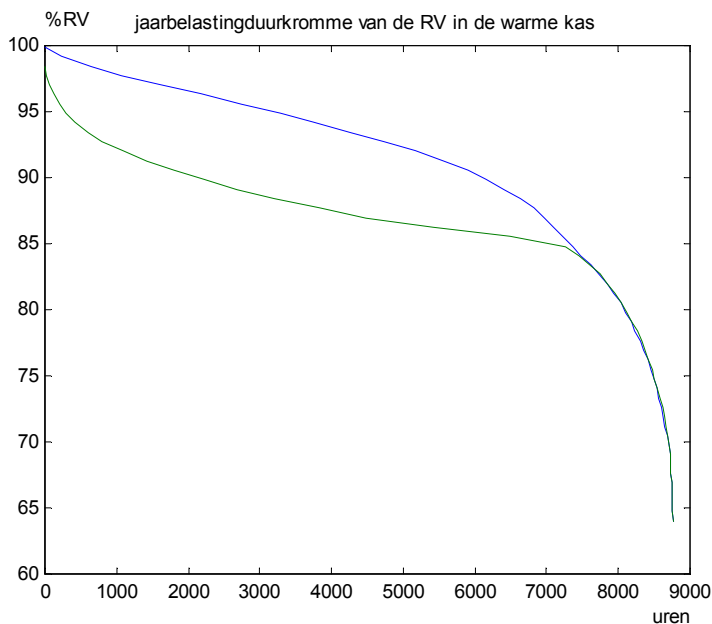
Figuur 9: Jaarbelastingduurkromme voor de temperatuur in de kas die naar onder toe zoveel mogelijk wordt begrensd op 20 °C (blauwe lijn), 17,5 °C (groene lijn) en 15 °C (rode lijn). Aan de bovenkant komt de koelinstallatie in werking als de kaslucht warmer wordt dan 27,5 °C.



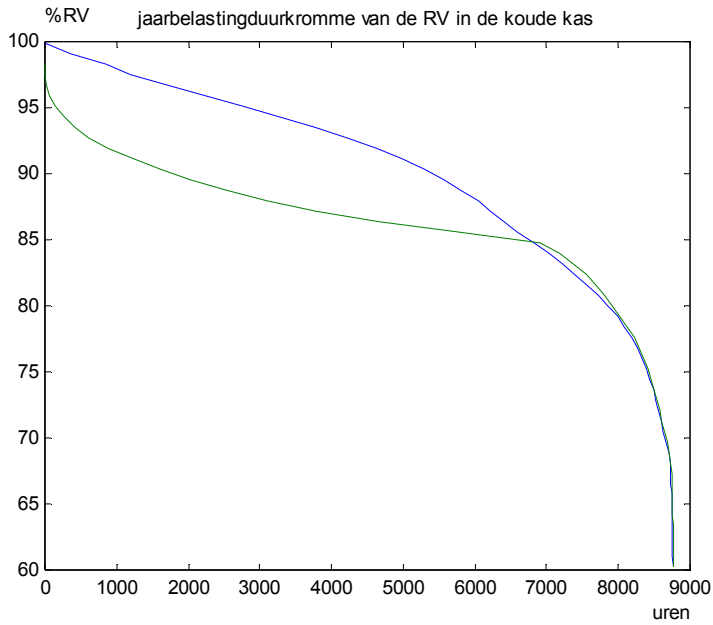
Figuur 10: Vergelijkbare figuur als figuur 9, maar dan in geval er wel een vochtbeheersingsregeling wordt toegepast.

Vergelijking van figuur 9 en 10 met figuur 1 en 2 laat zien dat de toegenomen warmteoverdracht vooral de piek in de temperaturen doet vergroten.

### 3.2. RV-beheersing

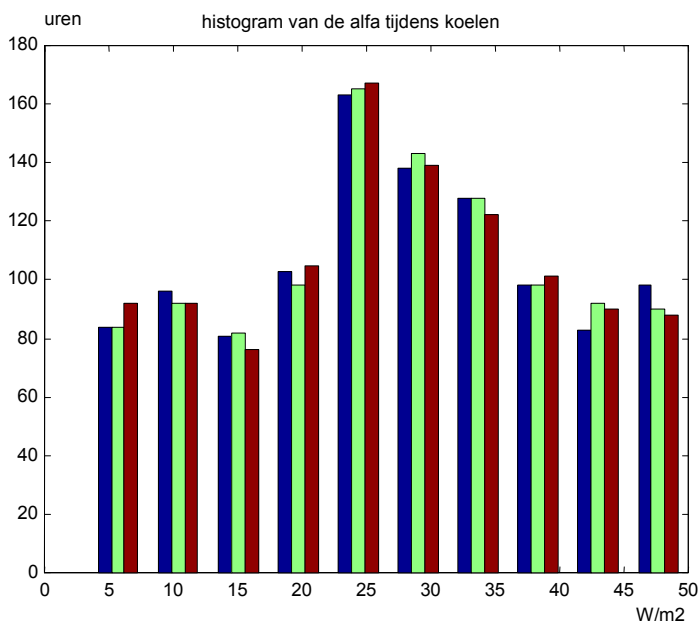


Figuur 11: Jaarbelastingduurkromme voor de RV in de kas met hoge stooklijn (20 °C). De blauwe lijn geldt voor de ongeregelde situatie.

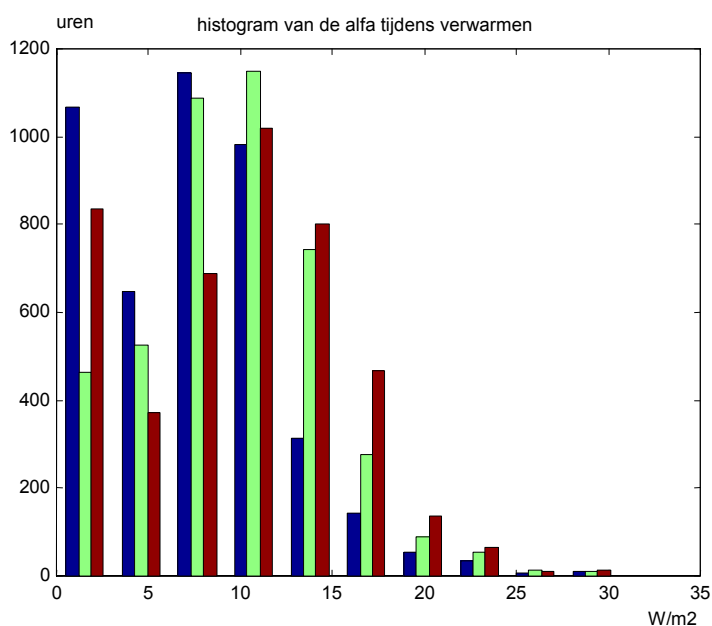


Figuur 12 : Vergelijkbaar met figuur 11, maar dan voor de kas met lage stooklijn (15 °C).

### 3.3. Ventilatorvermogen (=warmteoverdrachtscoëfficiënt)



Figuur 13: Histogram van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de Fiwhex tijdens koelen van de kas. Per clustertje geldt het linkerblokje (blauw) voor de warme kas (stooklijn is 20 °C), het middelste blokje voor de gemiddelde stooklijn (17,5 °C) en het rechterblokje voor de koudste kas (stooklijn is 15 °C).



Figuur 14: Histogram van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de FiwiHex tijdens verwarmen van de kas. De kleurvolgorde is vergelijkbaar met figuur 13.

Vergelijking van figuur 13 en 14 met figuur 5 en 6 laat zien dat met name tijdens het koelen de grotere alfa veel benut wordt.

### 3.4. Jaarbalans van warmte- en koudevraag

De kas heeft in de zomer een groot warmteoverschot en in de winter een warmtekort. In onderstaande tabel worden de jaartotalen weergegeven.

RV-regeling	Stooktemp. [°C]	Verwarming [MJ/(m <sup>2</sup> jr)]	Koeling [MJ/(m <sup>2</sup> jr)]	Woverschot [MJ/(m <sup>2</sup> jr)]
nee	20	239	1505	1266
nee	17,5	308	1491	1183
nee	15	372	1487	1115
ja	20	298	1077	779
ja	17,5	405	1079	674
ja	15	428	1071	643

Vergelijking van deze tabel met de soortgelijke tabel voor de 30 W/(m<sup>2</sup> K) installatie laat zien dat het grotere verwarmingsvermogen uitsluitend voor de gevallen waarin geen luchtvochtigheidsbeheersing wordt toegepast tot een grotere koeling leidt. De andere getallen veranderen nauwelijks.

### 3.5. Elektriciteitsverbruik

Onderstaande tabel is op dezelfde manier gevuld als de eerdere, soortgelijke tabel.

RV-regeling	Stooktemp. [°C]		Fiwihex [kWh]		Bronpompen [Kwh]		totaal [Kwh]
			Verw.	Koelen	Verw.	Koelen	
nee	20		7	2	27	6	43
nee		17,5	7	2	20	6	36
nee		15	7	3	7	5	22
ja	20		6	2	44	7	59
ja		17,5	6	3	38	5	52
ja		15	6	3	28	5	41

De conclusie uit vergelijking van de twee tabellen luidt dat vergroting van het koelvermogen vrijwel geen effect heeft op het elektriciteitsverbruik.





# Literatuur

Zwart, H.F. de, 2002, Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagsystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw, IMAG Wageningen. In voorbereiding.



## **Deelstudie 2**

# **Energieproducerende kas**

## **Ondergrondse energieopslag**

Ir. M.M. van Aarsen

Drs. R.E. van Elswijk

IF Technology

Arnhem



# 1. Bodemgeschiktheid KWO in Nederland

## 1.1. Inleiding

In het project “De energieproducerende kas” wordt in het energieconcept met FiwiHex warmtewisselaars koude-/warmteopslag in de bodem toegepast. De mogelijkheden om koude en/of warmte in de bodem in Nederland op te slaan, worden bepaald door technische en juridische/vergunningtechnische factoren.

## 1.2. Technische aspecten

### Bodemopbouw

De ondergrond van Nederland bestaat vanwege de ligging in een rivierdelta tot een diepte van 200 à 300 m uit een groot aantal lagen sediment. Deze lagen zijn meestal (nog) niet verhard tot vast gesteente en liggen min of meer horizontaal. Op basis van de grondsoort kan de ondergrond beschreven worden als een reeks opeenvolgende klei-, veen- en zandlagen. Door verschillen in waterdoorlatende eigenschappen per grondsoort wordt in de geohydrologie de ondergrond geschematiseerd tot watervoerende pakketten en scheidende lagen. Een watervoerend pakket is in de regel een zand- of grindlaag met een zekere dikte die over een groter gebied wordt aangetroffen. Een scheidende laag bestaat uit een of meer lagen met een minder goede doorlatendheid (klei, leem, veen, lemig zand, etc.) met eventueel dunne laagjes die beter doorlatend zijn ertussenin. Wanneer een scheidende laag niet aan de bovenzijde wordt begrensd door een watervoerend pakket, spreekt men van een **deklaag**. Wanneer een scheidende laag aan de onderzijde (voor zover bekend) niet wordt begrensd door een watervoerend pakket, spreekt men over de ondoorlatende of slecht doorlatende basis van het hydrologisch systeem.

Wat men nog als een afzonderlijk watervoerend pakket wil beschouwen, hangt van de toepassing af. De dikte van een watervoerend pakket limiteert de filterlengte. De minimale filterlengte wordt in hoofdzaak bepaald door de maximaal toelaatbare stroomsnelheid op de boorgatwand van de bron, het debiet, en de maximale boorgatdiameter. Wanneer de minimale filterlengte groter is dan de dikte van het watervoerend pakket, zijn meerdere infiltratie- en/of onttrekkingsputten nodig.

Niet overal in Nederland is binnen 200 à 300 m onder maaiveld (m-mv) een watervoerend pakket te vinden dat geschikt is voor een koude-/warmteopslagproject van enige omvang. Het gaat hier om delen van Twente, de Achterhoek en Zuid-Limburg. In de regel zijn er in Nederland in ieder geval twee watervoerende pakketten aanwezig met uitzondering van het noordoostelijk en oostelijk deel van Nederland en Zeeuws-Vlaanderen. Op enkele plaatsen zijn drie of soms meer watervoerende pakketten aanwezig, zoals in:

- de Centrale Slenk en de Roerdalslenk;
- een deel van zuidelijk en oostelijk Flevoland;
- Waterland en Kennemerland;
- Schouwen-Duiveland, Tholen en Noord-Beveland;
- Vijfheerenlanden, westelijke Betuwe en het zuidelijk deel van de provincie Utrecht.

### **Grondwaterstroming**

Op de meeste plaatsen in Nederland bedraagt de regionale stroming 10 à 30 m/jaar. Een dergelijke stroming vormt voor een opslag van enige omvang geen probleem. Op sommige plaatsen is de stroming echter groter en kan de afstroming van warmte en/of koude aanzienlijk zijn (bijvoorbeeld de Veluwe en de gebieden rondom de Veluwe).

### **Grondwaterkwaliteit**

Praktisch overal in Nederland is op enige diepte zout grondwater te vinden. De dikte van de laag zoet water erboven verschilt echter van plaats tot plaats. In veel gevallen is er geen abrupte overgang van zoet naar zout water, maar is een tussenlaag met brak grondwater te onderscheiden. Onder zoet grondwater wordt hier water verstaan dat een chloridegehalte heeft van minder dan 150 mg/l. In veel gevallen wordt menging van zoet met zout water als gevolg van koude-/warmteopslag niet toegestaan door de vergunningverlener. In bijvoorbeeld het westen van de provincies Zuid- en Noord-Holland is de diepteligging van het zoet/brakgrensvlak zeer belangrijk in relatie tot de keuze van het opslagpakket. Wanneer bij de materiaalkeuze van het systeem daarmee rekening wordt gehouden, is koude/warmteopslag ook mogelijk in brak of zout grondwater.

Naast het aantrekken van zout water is ook het aantrekken van verontreinigd grondwater ongewenst. Dit betekent dat in een vroeg stadium onderzocht moet worden of er verontreinigingen in de buurt zijn, en of deze in belangrijke mate beïnvloed kunnen worden door de opslag.

Menging van ijzerhoudend en zuurstofrijk water kan tot verstopping van de bronfilters leiden (redox-problematiek). Dit aspect dient bijvoorbeeld goed onderzocht te worden in diepe freatische aquifers (Veluwe, Limburg, etc.). Een hoog gasgehalte kan bij het onttrekken en infiltreren leiden tot ontgassing, indien er geen adequate maatregelen

worden genomen. Ontgassing kan ook leiden tot het verstopping van de bronnen. Hoge gasgehaltenes komen met name voor in gebieden waar veel organische stof in de bodem aanwezig is (bijvoorbeeld in veengebieden in West-Nederland).

### **Grondwatertemperatuur**

De grondwatertemperatuur (en dus ook de bodemtemperatuur) varieert met de diepte. Over het algemeen verloopt de temperatuur van het grondwater van circa 11 °C op 25 m tot circa 12 °C op 100 m diepte. Vanaf 100 m diepte geldt in Nederland een temperatuurgradiënt van circa 2 °C per 100 m.

## **1.3. Vergunningtechnische aspecten**

### **Grondwaterwet**

Het onttrekken en infiltreren van grondwater valt onder de Grondwaterwet. De vergunningen worden verleend door Gedeputeerde Staten. De provincie baseert zich daarbij, naast wettelijke regelingen en verordeningen, op provinciaal beleid vastgelegd in het provinciale waterhuishoudingsplan. In de provinciale verordening staat dat alle inrichtingen met een onttrekking boven de 10 m<sup>3</sup>/h en 12.000 m<sup>3</sup>/jaar vergunningplichtig zijn. Beneden deze waarde kan met een melding worden volstaan.

Bij een vergunningaanvraag dienen de effecten op de omgeving gekwantificeerd te worden en dient de invloed op andere grondwatergebruikers c.q. belanghebbenden bepaald te worden. Het principe is dat bestaande gebruikers van het grondwater niet negatief beïnvloed mogen worden door de beoogde opslag. Belangrijke grondwatergebruikers/belanghebbenden zijn: aanwezigheid van verontreinigingen, natuurgebieden, zettingsgevoelige gebouwen en andere grondwateronttrekkers (inclusief drinkwaterwinningen en andere koude-/warmteopslagsystemen).

### **Restricties opgelegd door de provincie**

Rond de meeste onttrekkingen voor de openbare drinkwatervoorziening zijn beschermingsgebieden aanwezig waar in veel gevallen het uitvoeren van boringen en het onttrekken van grondwater door anderen is verboden. Behalve de huidige onttrekkingen zijn ook toekomstige onttrekkingen van belang. Sommige provincies zullen in het nog uit te brengen grondwaterkwantiteitsbeheersplan vastleggen welke gebieden gereserveerd zijn voor de (toekomstige) drinkwatervoorziening. De beschermingsgebieden en de reserveringsgebieden zijn weergegeven in de Provinciale Milieuverordeningen.

## Voorwaarden koude-/warmteopslag

De voorwaarden die in het kader van de vergunning Grondwaterwet worden opgelegd, zijn niet bij alle provincies gelijk. De volgende vergunningsvoorwaarden zijn in het kader van onderhavig onderzoek noemenswaardig:

- Energiebalans in de bodem. Een aantal provincies, zoals bijvoorbeeld Gelderland en Noord-Brabant, stelt dat het grondwater niet op langere termijn (1 jaar of langer) mag opwarmen of afkoelen. De provincie Zuid-Holland stelt dat er alleen netto-afkoeling van het grondwater mag plaatsvinden.
- Maximale infiltratietemperatuur. De meeste provincies stellen een maximale infiltratietemperatuur vast. De gangbare maximale infiltratietemperatuur is 25 °C. De meeste provincies nemen in de vergunningsvoorwaarden op dat het grondwatersysteem hydraulisch van het bovengrondse systeem gescheiden moet zijn.

### 1.4. Aquiferkeuze (ondiep of diep)

Indien er meerdere watervoerende pakketten op de locatie aanwezig zijn, kan een afweging gemaakt worden tussen een opslag in een ondiepe of in een diepe aquifer. De keuze wordt bepaald door de factoren die in paragraaf 1 en 2 beschreven zijn (technische en juridische aspecten). Ook zullen kosten een rol spelen indien meerdere geschikte watervoerende pakketten aanwezig zijn die uit technisch en juridisch oogpunt gebruikt kunnen en mogen worden. Doordat de technische en juridische mogelijkheden van plaats tot plaats sterk kunnen variëren, zal voor elke locatie een afweging gemaakt moeten worden.

In zijn algemeenheid kan het volgende gesteld worden:

- Bij ondiepe freatische aquifers (< 15 à 20 m-mv) kunnen de thermische verliezen en de effecten aan maaiveld groot zijn. Daarnaast zal het maximale brondebiet ook beperkt zijn (< 10 à 30 m<sup>3</sup>/h). Hierdoor zullen er bij een groot opslagsysteem meerdere bronnen nodig zijn.
- Bij ondiepe aquifers met een deklaag zullen de thermische verliezen en de effecten aan maaiveld kleiner zijn dan bij een freatische aquifer. Bij ondiepe aquifers bestaat er vaak nog steeds het risico dat de effecten aan maaiveld groot zijn (invloed op natuurgebieden, zettingen, verontreinigingen, etc.). Door de ondiepe ligging (< 50 m-mv) van het opslagpakket zal in veel gevallen het maximaal debiet per bron nog steeds beperkt zijn (20 à 100 m<sup>3</sup>/h).
- Het toepassen van een opslag in een diepe aquifer (> 50 m-mv) heeft als voordeel dat de effecten aan maaiveld sterk beperkt worden ten opzichte van een ondiepe opslag. Door de diepere ligging van het pakket zullen de boorkosten toenemen, maar doordat het maximaal debiet per bron in veel gevallen kan toenemen (t.o.v. een ondiepe opslag), zijn er minder bronnen nodig. Dit betekent dat het gebruik



van een diepe aquifer niet per definitie leidt tot een duurder grondwatersysteem.

## 1.5. Bodemgeschiktheid van geselecteerde gebieden

Aan de hand van 12 geselecteerde glastuinbouwgebieden is de geschiktheid van de bodem voor opslag gedetailleerder bekeken.

### Ondiepe aquifers

In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van de bodemgeschiktheid voor een opslag in de meest ondiepe aquifer. Dit wordt aangeduid als het eerste watervoerende pakket of het freatische pakket (geen deklaag aanwezig).

Tabel 1: Overzicht van de geschiktheid van de bodem voor diverse glastuinbouwgebieden (ondiepe aquifers)

Glastuinbouw-gebied	Provincie	Dikte deklaag [m]	Dikte 1 <sup>e</sup> of freatische aquifer [m]	Eventuele knelpunten/aandachtspunten
Het Grootslag	Noord-Holland	15 - 20	5 - 10	gasgehalte/ waterkwaliteit(zoet/zout)
Berlikum	Friesland	5 - 10	10 - 20	-
Luttelgeest	Flevoland	ca. 5	10 - 15	-
Koekoekspolder	Overijssel	5 - 10	> 70	-
Bergerden	Gelderland	ca. 3	15 - 20	-
Californië/Siberië	Limburg	5 - 10	5 -15	waterkwaliteit (redox)
Moerdijksehoek	Noord-Brabant	ca. 5	ca. 5	waterkwaliteit (redox)
Nieuwdorp	Zeeland	2 - 5	ca. 30	-
Zuidplaspolder	Zuid-Holland	10 - 15	20 - 25	gasgehalte en
B-driehoek	Zuid-Holland	15 -20	10 - 15	zoet/zout kunnen
Westland	Zuid-Holland	ca. 15	25	probleem zijn

Uit de inventarisatie van de bodemopbouw en eventuele andere geohydrologische belemmeringen blijkt het volgende:

- Een deklaag is bij alle bovengenoemde glastuinbouwlocaties aanwezig. Uit een deklaag kan nauwelijks grondwater onttrokken of geïnfiltreerd worden. Het zandpakket daaronder, het eerste watervoerende pakket, kan wel gebruikt worden om grondwater te onttrekken of te infiltreren. Dit betekent dat in het westen van Nederland (Zuid-Holland, groot deel van Noord-Holland) grondwater onttrokken kan worden vanaf een diepte van 10 à 20 m-mv. De dikte van het eerste watervoerende pakket is beperkt tot ca. 10 à 25 m. Dit pakket is daardoor slechts geschikt voor bronnen met een beperkte capaciteit (< 100 m<sup>3</sup>/h). In Zuid- en Noord-Holland kan het gasgehalte in het eerste watervoerende pakket dermate hoog zijn dat het technisch lastig is om voldoende overdruk in het grondwatersysteem te hanteren om ontgassing te vormen. Ontgassing van het grondwater kan leiden tot het verstopping van de bronfilters. Een ander aandachtspunt is de aanwezigheid van het

zoet/brakgrensvlak. De provincie Zuid-Holland (en in mindere mate de provincie Noord-Holland) staat het niet toe dat het zoet/brakgrensvlak wordt verplaatst. Per locatie moet daarom goed gekeken worden naar de ligging van dit grensvlak.

- Bij de overige locaties (Zeeland, Noord-Brabant, Limburg, Friesland en Gelderland) is een dunne deklaag van 5 à 10 m aanwezig. Bij deze gebieden kan de waterkwaliteit (redox-parameters) een belemmering vormen voor een opslag in de ondiepe pakketten. Aanwezigheid van (ondiep) zuurstofrijk water en (diep) ijzerhoudend water zal bij menging kunnen leiden tot het neerslaan van ijzeroxides en daarmee tot het verstopen van de bronfilters.

### Diepe aquifers

De globale geschiktheid is in onderstaande tabel gegeven ten aanzien van het gebruik van diepe aquifers.

Tabel 2: Overzicht van de geschiktheid van de bodem voor diverse glastuinbouwgebieden voor een diep opslagpakket.

Glastuinbouw-gebied	Provincie	Bodemgeschiktheid*	Opmerking
Het Grootslag	Noord-Holland	+	-
Berlikum	Friesland	+	-
Klazienaveen/Erica	Drente	o / -	-
Luttelgeest	Flevoland	+	-
Koekoekspolder	Overijssel	+	-
Bergerden	Gelderland	+	-
Californië/Siberië	Limburg	o / -	-
Moerdijksehoek	Noord-Brabant	-	Diepere aquifers dan 80m-mv mogen niet gebruikt worden.
Nieuwdorp	Zeeland	-	-
Zuidplaspolder	Zuid-Holland	o	Het aantal kleilagen kan in de diepe aquifers lokaal sterk variëren. In het algemeen zijn het matige aquifers.
B-driehoek	Zuid-Holland	o	
Westland	Zuid-Holland	o	

- \*) + : beter dan gemiddeld - maximaal te onttrekken debiet 150 - 250 m<sup>3</sup>/h  
 o : gemiddeld - maximaal te onttrekken debiet 100 - 150 m<sup>3</sup>/h  
 - : minder dan gemiddeld - maximaal te onttrekken debiet 50 - 100 m<sup>3</sup>/h

## 2. Dimensionering grondwatersysteem

### 2.1. Definiëren eigenschappen van ondiepe en diepe aquifer

Om een dimensionering van een systeem te kunnen maken, moeten aannames gedaan worden omtrent de eigenschappen van het toe te passen watervoerende pakket. Op basis van onze kennis en ervaring zijn een ‘standaard’ ondiepe en diepe aquifer gedefinieerd (zie tabel 2.1). De eigenschappen van de gedefinieerde diepe aquifer is representatief voor het watervoerende pakket dat tussen circa 70 en 160 m-mv wordt aangetroffen in Amsterdam en omgeving, grote delen van Noord-Holland en grote delen van de Veluwe. Dit watervoerend pakket is uitermate geschikt voor het onttrekken en infiltreren van water. De gedefinieerde ondiepe aquifer is niet representatief voor één bepaalde locatie, maar geeft een aardig beeld van ondiepe aquifers die op meerdere plekken in Nederland aangetroffen worden (bijvoorbeeld Den Haag). Zoals reeds aangegeven kan de spreiding in bodemeigenschappen van aquifers in Nederland groot zijn. Dit geldt ook voor de ondiepe aquifers: in het westen van de provincie Utrecht is de aquifer beter ontwikkeld dan de gedefinieerde aquifer; de ondiepe aquifer in Zeeland of in het zuiden van de provincie Zuid-Holland zijn minder goed ontwikkeld. Bij de laatste locaties wordt dan ook vaak uitgeweken naar diepere aquifers.

Tabel 2.1: Eigenschappen “standaard” ondiepe en diepe aquifer

Kenmerk	Ondiepe aquifer	Diepe aquifer
doorlaatvermogen van het opslagpakket (kD)	1000 m <sup>2</sup> /d	2.500 m <sup>2</sup> /d
diepte van de top van de aquifer	25 m-mv	85 m-mv
diepte van de basis van de aquifer	55 m-mv	160 m-mv

Het doorlaatvermogen is een maat voor het vermogen van een watervoerend pakket om water door te laten. Het is het product (kD-waarde in m<sup>2</sup>/d) van de gemiddelde horizontale doorlatendheid (=permeabiliteit, k-waarde in m/d) en de totale laagdikte (D in m) van het watervoerend pakket.

## 2.2. Globale dimensionering bronnen

De dimensionering van het grondwatersysteem is uitgevoerd voor een glastuinbouwkas van 1 ha. Het maximale debiet bedraagt 500 m<sup>3</sup>/h en de verplaatste waterhoeveelheid per seizoen bedraagt circa 430.000 m<sup>3</sup>. In tabel 2.2 is de dimensionering van het bronnensysteem weergegeven voor een opslag in de ondiepe en in de diepe aquifer.

Uit de resultaten van tabel 2.2 blijkt dat bij de opslag in de diepe aquifer volstaan kan worden met 2 koude en 2 warme bronnen (250 m<sup>3</sup>/h per bron). De diepte van de bronnen bedraagt 160 m-mv. Bij een opslag in de ondiepe aquifer zijn er meer bronnen nodig (86 m<sup>3</sup>/h per bron), maar de boordiepte bedraagt slechts 55 m-mv.

Tabel 2.2: Dimensionering van het grondwatersysteem voor de ondiepe en de diepe aquifer

	Ondiepe aquifer	Diepe aquifer
Aantal warme bronnen	6	2
Aantal koude bronnen	6	2
Diameter [m]	700	750
Diepte bronnen [m-mv]	55	160
Effectieve filterlengte [m]	25	60

De bronnen worden voorzien van een geperforeerde kunststofbuis (filterbuis) ter hoogte van het opslagpakket. Deze filterbuis wordt omstort met fijn filtergrind. Tussen de bovenzijde van de filterbuis en het maaiveld bevinden zich achtereenvolgens een stijgbuis en de pompkamer. De pompkamer bestaat uit een kunststof buis met voldoende grote diameter om de onderwaterpomp en de injectieleiding te kunnen plaatsen.

## 2.3. Bronlocaties

Indien gebruikgemaakt wordt van meerdere doubletten, worden de bronnen in zogenaamde warme en koude clusters geplaatst. Het aantal bronnen dat per cluster geplaatst kan worden, hangt af van de injectiedrukken en de effecten op de omgeving. In het algemeen geldt: hoe meer bronnen per cluster, hoe goedkoper het grondwatersysteem. Dit wordt mede veroorzaakt doordat de lengte van de leidingen en de bekabeling tussen de bronnen verkleind wordt.

### Bronnen in diepe aquifer

Bij het bepalen van de bronafstand tussen de koude en warme bronnen is aangehouden dat er (jaarlijks) een thermische balans bestaat tussen de onttrokken en geïnfilterde hoeveelheid energie. Bij de diepe aquifer kunnen de warme bronnen bij elkaar geplaatst worden en de koude bronnen in een ander cluster geplaatst worden.

Om thermische interactie tussen de koude en warme bronnen te voorkomen, is een afstand van minimaal 130 m nodig. De onderlinge afstand van de bronnen binnen het cluster bedraagt circa 30 m.

### **Bronnen in ondiepe aquifer**

Bij de ondiepe aquifer zijn er voor de 6 koude en 6 warme bronnen vier clusters nodig. Twee clusters met elk 3 koude bronnen en twee clusters met elk 3 warme bronnen. De afstand tussen de clusters bedraagt 160 m. De onderlinge afstand tussen de bronnen binnen het warme en koude cluster bedraagt circa 30 m.

### **Ruimtebeslag**

De opslag is gedimensioneerd voor 1 ha glastuinbouw, waarbij wordt aangehouden dat 1 ha glastuinbouw een ruimtebeslag heeft van 1,5 ha, gebaseerd op een bebouwingsdichtheid van 60 à 70 %. Dit betekent een terrein van 122 bij 122 m voor 1 ha glastuinbouw. De diagonaal is dan 173 m lang. Dit betekent dat de koude en warmte bij gebruik van de diepe aquifer opgeslagen kunnen worden onder de tuinbouwkas. Bij de ondiepe opslag is het ruimtebeslag van de opgeslagen koude en warmte groter dan het glastuinbouwoppervlak. Hierdoor moeten de bronnen buiten het terrein geplaatst worden of het opslagoppervlak verkleind worden. De belangrijkste variabelen om het opslagoppervlak te verkleinen zijn het vergroten van de filterlengte en het vergroten van het temperatuurverschil tussen de opgeslagen koude en warmte. Door het vergroten van deze parameters kan er meer energie per ha worden opgeslagen.



# 3. Investeringskosten en energieverbruik

## 3.1. Raming van de investeringskosten

Voor het bepalen van de investeringskosten van het grondwatersysteem is uitgegaan van een systeem volgens de dimensionering in tabel 2.2. Het maximaal debiet dat met het systeem geleverd kan worden is 500 m<sup>3</sup>/h. De raming betreft het volledige grondwatersysteem tot aan de gevel van de tuinbouwkas. Daarbij is er voorlopig van uitgegaan dat er geen scheidingswisselaar toegepast wordt tussen het grondwater en het hydraulische circuit in de kas.

Tabel 3.1: Raming van de investeringskosten van het grondwatersysteem (bedragen in € exclusief btw en onnauwkeurigheid 20%).

		Ondiepe aquifer	Diepe aquifer
1	Bronnen en putbehuizingen	350.000	260.000
2	Pompkamers, bronkoppen en leidingwerk in putbehuizingen (inclusief bronpompen en frequentieregelaars)	120.000	100.000
3	Transportleidingwerk (inclusief graafwerk)	130.000	90.000
4	Leidingwerk en appendages in technische ruimte (exclusief scheidingswarmtewisselaars)	20.000	20.000
5	Regeling en bekabeling	200.000	90.000
6	<b>Subtotaal 1</b>	<b>820.000</b>	<b>560.000</b>
7	Onvoorzien (10% over subtotaal 1)	80.000	60.000
8	<b>Subtotaal 2</b>	<b>1.020.000</b>	<b>620.000</b>
9	Aanvraag vergunning Grondwaterwet	PM	PM
10	Lozingsvergunning	PM	PM
11	Engineering en begeleiding door adviseur (10% over subtotaal 2)	100.000	60.000
12	<b>Totale investeringskosten</b>	<b>1.120.000</b>	<b>680.000</b>

Opmerkingen bij tabel 3.1:

- De post “aanvraag vergunning Grondwaterwet” omvat de aanvraag inclusief de effectenstudie die als bijlage bij de aanvraag hoort en de leges en publicatiekosten behorende bij de vergunning.
- In de investeringsraming zijn niet opgenomen:
  - lozingsvergunning;
  - fiscale regelingen en subsidies;
  - kosten van de benodigde bouwkundige voorzieningen;
  - elektrische voeding in de technische ruimte.

Op basis van deze ramingen valt af te leiden dat de specifieke investering voor een grondwatersysteem van 500 m<sup>3</sup>/h voor de ondiepe aquifer en de diepe aquifer circa € 2.250,= respectievelijk € 1.380,= per m<sup>3</sup>/h bedraagt. In tabel 3.2 zijn op basis van deze specifieke investeringen marges aangegeven voor een grondwatersysteem van 300 - 500 m<sup>3</sup>/h in de ondiepe en diepe aquifer.

Tabel 3.2: Indicatie van de investeringskosten van het grondwatersysteem met een debiet van 300 tot 500 m<sup>3</sup>/h.

Debiet grondwatersysteem		Ondiepe aquifer	Diepe aquifer
300 m <sup>3</sup> /h	€	675.000	410.000
400 m <sup>3</sup> /h	€	900.000	540.000
500 m <sup>3</sup> /h	€	1.120.000	680.000

### 3.2. Energieverbruik bronpomp

Het energieverbruik van een bronpomp wordt met name bepaald door de opvoerhoogte die benodigd is. Hieronder volgt een uiteenzetting van de *globale* berekening van de opvoerhoogte van een bronpomp voor een standaard grondwatersysteem bestaande uit één of meerdere onttrekkingsbronnen, transportleidingen en een technische ruimte eventueel met scheidings-TSA's en één of meerdere infiltratiebronnen.

Een bronpomp heeft in het beschreven grondwatersysteem een opvoerhoogte van ca. 350 - 400 kPa bij maximum debiet. Deze opvoerhoogte is als volgt opgebouwd:

	zonder scheiding door TSA	met scheiding door TSA
1. Weerstand bronnen	60 kpa	60 kpa
2. Leidingwerk nabij bronnen	100 kpa	100 kpa
3. Transportleidingen	80 kpa	80 kpa
4. Technische ruimte/kassen	50 kpa	100 kpa
5. Overdimensionering	60 kpa	60 kpa
Totaal (incl. overdimensionering)	350 kpa	400 kpa

- ad. 1: Het onttrekken en infiltreren van grondwater levert een bepaalde weerstand, afhankelijk van bronontwerp, bodemopbouw e.d.
- ad. 2: Grondwater bevat van nature opgeloste gassen. Een grondwatersysteem waarin het water ook weer geïnfiltreerd wordt, moet te allen tijde op overdruk gehouden worden om verstopping van de infiltratiebron door ontsnapte gassen te voorkomen. Daarvoor wordt in het leidingwerk een injectieventiel opgenomen dat ervoor zorgt dat het grondwater onder druk blijft. Hierdoor is de weerstand van het leidingwerk nabij de bronnen relatief hoog.
- ad. 3: Bij een systeem van 300 - 500 m<sup>3</sup>/h liggen de verschillende bronnen enkele honderden meters uit elkaar. De weerstand in het leidingwerk zal dan aanzienlijk zijn. Uitgangspunt is een stroomsnelheid van ca. 2 m/s in de transportleidingen.
- ad. 4: In de technische ruimte/kassen is leidingwerk opgenomen naar de Fiwihex wisselaars (weerstand circa 10 kPa). Indien wordt uitgegaan van extra scheiding



door TSA's treedt er extra weerstand op. Uitgangspunt is dat de weerstand van de TSA ca. 60 kPa is bij 300 - 500 m<sup>3</sup>/h (meerdere TSA's parallel aangesloten).  
ad.5: De overdimensionering van ca. 15 % wordt voorzien om bij verslechtering van de bronnen nog het gevraagde debiet te kunnen leveren.

Uitgaande van bovenstaande opvoerhoogte is het energieverbruik voor het verplaatsten van 1 m<sup>3</sup> water berekend. Dit bedraagt bij een hydraulische weerstand van 350 kPa ongeveer 0,7 MJ (= 0,194 kWh<sub>e</sub>). Voor de bronpomp is uitgegaan van een motorrendement van circa 80% (incl. frequentieregelaar) en een pomp rendement van circa 60%; in totaal dus een rendement van 50%.

Bij een temperatuurverschil van 10 °C tussen aanvoer en retour wordt er met 1 m<sup>3</sup> water 11,6 kWh<sub>t</sub> verplaatst. De COP van het grondwatersysteem, gedefinieerd als de bruikbare energie gedeeld door de benodigde energie, bedraagt dan ongeveer COP = 60 (11,6 kWh<sub>t</sub>/ 0,194 kWh<sub>e</sub>).



## 4. Conclusies en aanbevelingen

- In de meeste gebieden in Nederland zijn binnen 200 à 300 m-mv één of meerdere watervoerende pakketten (aquifers) aanwezig die gebruikt kunnen worden voor opslag van enige omvang. Een uitzondering hierop zijn delen van Twente, de Achterhoek en Zuid-Limburg. De keuze van de opslagaquifer is afhankelijk van de technische en juridische mogelijkheden op de locatie en de kosten. Doordat dit sterk afhankelijk is van de geohydrologische situatie op de locatie, zal voor elke locatie een afweging gemaakt moeten worden.
- De technische mogelijkheden voor opslag in een watervoerende pakket worden bepaald door de:
  - bodemopbouw en bodemeigenschappen;
  - waterkwaliteit (zoet/zout, redox, verontreinigingen);
  - grondwaterstroming;
  - grondwatertemperatuur.
- De juridische mogelijkheden voor opslag worden bepaald door:
  - aanwezigheid van reserverings- of grondwaterbeschermingsgebieden. In deze gebieden zijn er door de provincies restricties opgelegd t.a.v. het onttrekken van grondwater;
  - invloed op andere grondwatergebruikers en belanghebbenden (dient aangetoond te worden bij een vergunningaanvraag);
  - specifieke vergunningsvoorwaarden voor koude-/warmteopslag, zoals energiebalans in de bodem, maximale infiltratietemperatuur en scheiding van grondwater en het bovengrondssysteem.
- Uit 15 jaar ervaring met koude-/warmteopslag in Nederland blijkt dat op de meeste locaties in Nederland aquiferopslag mogelijk is, mits een aquifer aanwezig is en de locatie niet in een beschermingsgebied valt. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat technische en juridische belemmeringen een belangrijke invloed kunnen hebben op de kosten van het opslagsysteem. Daarom wordt aanbevolen om eerst een studie uit te voeren naar de technische en juridische mogelijkheden en de investeringskosten van het opslagsysteem, voordat gestart wordt met het ontwerp van het opslagsysteem.
- Op basis van de investeringsraming voor het grondwatersysteem van 500 m<sup>3</sup>/h kan geconcludeerd worden dat toepassing van koude-/warmteopslag in een ondiepe aquifer hogere kosten met zich meebrengt dan toepassing in een diepe aquifer. Dit verschil wordt met name veroorzaakt door de hogere kosten voor de aanleg van 12

bronnen (in plaats van 4 bronnen), het complexe leidingwerk en de uitgebreide bekabeling en regeling.

- Indien er interesse is om het Fiwihex-concept uit te werken voor een specifieke locatie wordt aanbevolen om voor het grondwatersysteem de volgende aspecten uit te werken:
  - energie- en waterhoeveelheden en temperatuurniveaus bepalen;
  - onderzoeken van technische en juridische mogelijkheden voor opslag op de locatie;
  - het kiezen van de meest geschikte opslagaquifer en het bepalen van de mogelijkheden voor de bronlocaties;
  - technische discussie over de inpassing van koude-/warmteopslag in het totale energieconcept.

# **Deelstudie 3**

## **Energieproducerende kas**

### **Koeling en luchtstroming**

Dr.ir. E. van Andel  
Fiwihex  
Almelo



# 1. Koelproef

Onzeker is het gedrag van een Fiwihex-koeler die laag in de kas is opgesteld, zodat hij geen schaduw veroorzaakt op de teelt. Om de koude lucht goed te mengen in de hoge kasruimte, moet die in een straal omhoog worden geblazen. Bovendien was het effect van condensatie op de performance van de warmtewisselaar nog niet goed bekend.

We hebben besloten dit experimenteel in één keer aan te pakken.

Het resultaat is dat de waarden die gebruikt zijn in de modelberekening, representatief zijn voor een condenserende warmtewisselaar met een slakkenhuis en een omhooggerichte luchtstraal. De anisothermie van de kas in verticale zin is binnen 3,5 °C.

## 1.1. Meetopstelling

In het laboratorium van Fiwihex hebben we een ruimte afgeschermd van 2,5 x 6 m en 3,5 m hoog; één zijde heeft een raam van 3,5 x 3,5 m op de zuidkant. In de ruimte is een 2 x 2 m doek opgehangen, dat bevoeid wordt met water van 45 °C. Wanneer de ruimte niet wordt gekoeld en de zon schijnt, halen we een temperatuur van 40 °C en een vochtigheid van > 85%. De temperatuur is een sterke functie van de hoogte in de ruimte.

We hebben gemeten hoe de temperatuur van de hoogte afhangt wanneer de ruimte gekoeld wordt tot onder 30 °C, en gedroogd tot onder 85%  $r_H$ , met een standaard warmtewisselaar-fan. De fan is voorzien van een slakkenhuis, om de gekoelde lucht tot een straal te vormen, die min of meer omhoog gericht kan worden, om zo de temperatuurgelaagdheid te breken.

## 1.2. Warmtewisselaar

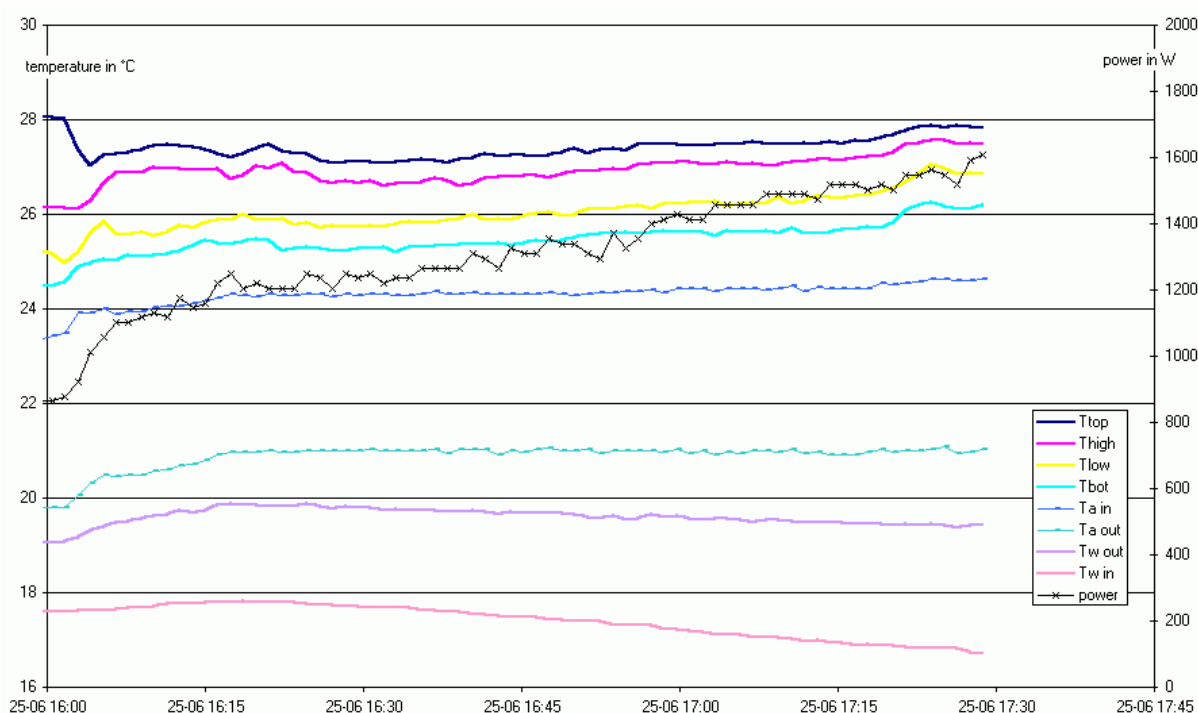
Voor de eerste warmtewisselaar hebben we dat exemplaar genomen dat sinds juli 1998 in een kasje heeft proefgedraaid en niet is schoongemaakt, om zo goed mogelijk de performance na te bootsen die men in de praktijk kan halen. De warmtewisselaar die in een slakkenhuis is ingebouwd, is van een later en kleiner type.

### 1.3. Meetresultaten

#### Horizontale luchtstraal, met condensatie

Onderstaande grafiek geeft de resultaten wanneer de luchtstraal **niet** omhoog is gericht, en zonder slakkenhuis vrij horizontaal uitstroomt. De temperatuursensoren bevinden zich op de volgende hoogten van de vloer:

Tbot 175 cm, Tlow 225 cm, Thigh 275, Ttop 325 cm, Ta in 116 cm. De laatste is de temperatuur van de lucht die de warmtewisselaar instroomt. De luchtvochtigheid is gemeten op 90 cm hoogte, doch varieert niet noemenswaardig met de hoogte. Het koelwater is koud leidingwater, langzaam dalend in temperatuur (Tw in) van 17,8 tot 16,8 °C, waardoor ook het koelvermogen toeneemt van 1150 tot 1500 W. Dit vermogen is berekend uit het waterdebiet, vermenigvuldigd met de warmtecapaciteit en het temperatuurverschil Tw uit – Tw in. Het elektrische vermogen is hier 58 W.



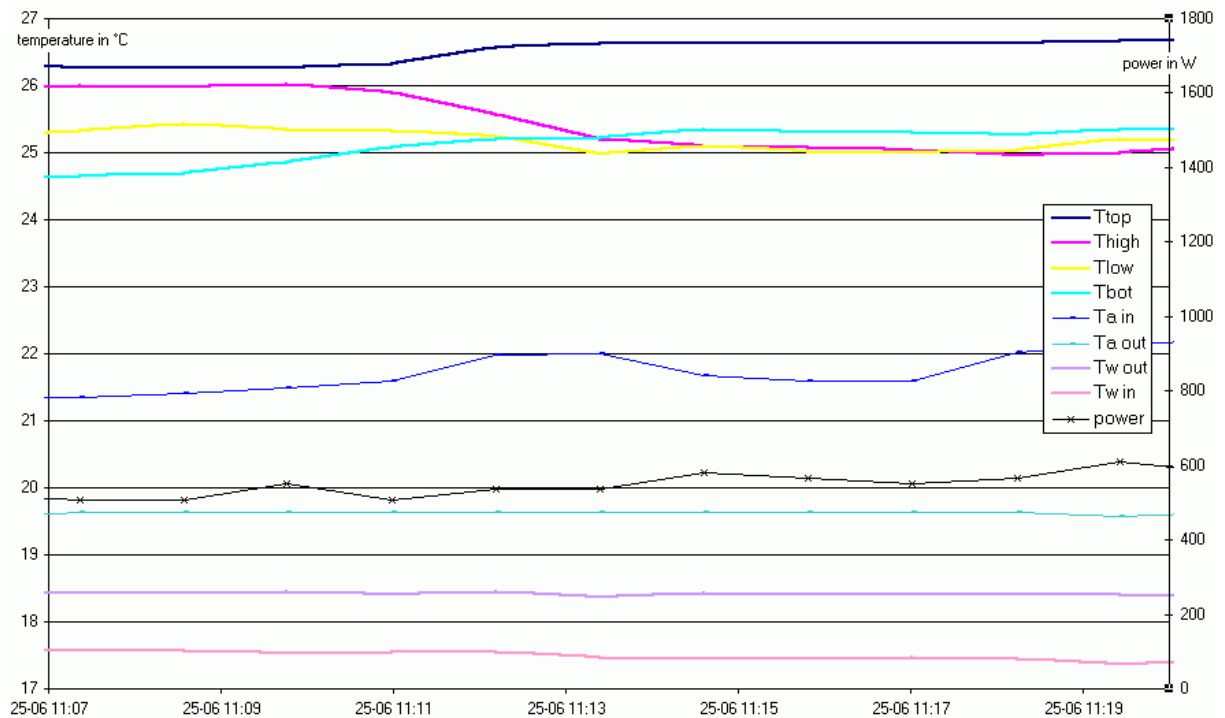
We zien dat we een warmteoverdracht halen onder representatieve condities van 1500 W / (Ta in – Tw gemiddeld) = 1500 / (24,4-18,3) = 246 W/K. Betrekken we de warmteoverdracht op de gemiddelde kasttemperatuur, dan wordt het 1500 / (26,4-18,3) = 185 W/K. Dit komt overeen met de 170 W/K bij 59 W fanvermogen die als capaciteit in de IMAG-simulatie is ingevoerd.

Tevens blijkt dat wanneer de lucht beter gemengd zou kunnen worden, 246 W/K in plaats van 170 ingezet zou kunnen worden. Deze waarde moet nog eens precies gemeten worden, met watertemperaturen die de optimale situatie van een grondwateropslag weergeven, bijvoorbeeld 18-26 °C.



## Invloed van een omhooggerichte straal

In de volgende figuur zien we wat het effect is van een verdraaiing van de fan, nu voorzien van een slakkenhuis, van horizontaal naar 30 ° naar boven, op het tijdstip 11.10 uur. We zien dat om 11.14 uur de inversie gebroken is, behalve vlak aan het plafond (Ttop). Overigens kunnen we in de praktijk het slakkenhuis niet draaien omdat daar, in de schaduw onder de planten, geen ruimte voor is. We moeten het dus horizontaal houden, en alleen de straal naar de verticale richting ombuigen.



## Horizontaal slakkenhuis, omhooggerichte straal, met condensatie

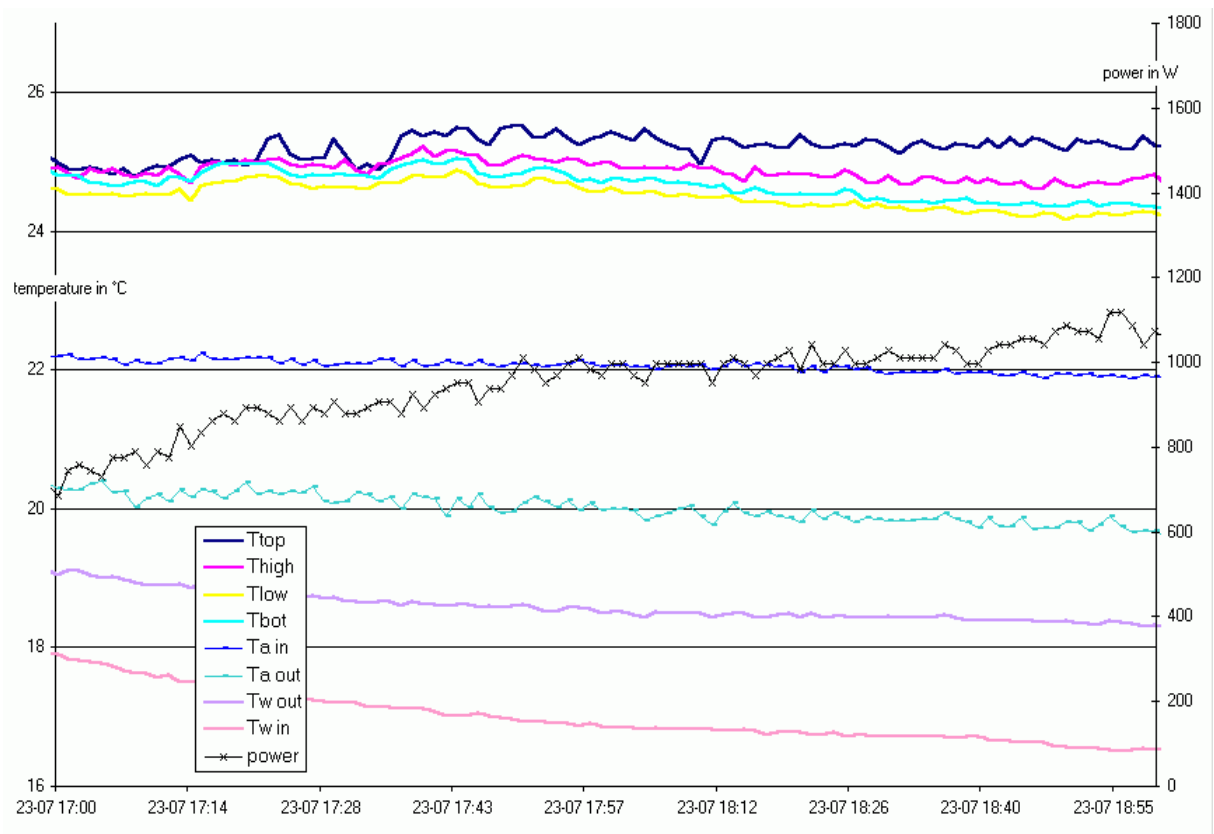
Dit is te zien in de laatste grafiek, waar dit is gerealiseerd. We zien dat de temperaturen nu dichterbij elkaar liggen, en dat de warmteoverdracht nu is:

$900 / (22,2-17,8) = 205 \text{ W/K}$  bij 49 W fan, betrokken op de luchtinlaattemperatuur, en

$900 / (25-17,8) = 125 \text{ W/K}$  bij 49 W fan, betrokken op de gemiddelde kasttemperatuur.

Hier is weer sprake van condensatie, de vochtigheidsgraad is 92 %.

De "kas"-temperatuur is minder hoog, omdat we geen warme zonnige dag konden vinden voor de uitvoering van het experiment.



## 2. Conclusie

We kunnen concluderen dat, hoewel deze eerste experimenten van een eenvoudige aard zijn, we in een situatie die zo goed mogelijk met de tuinbouwkas overeenkomt, en met een relatieve vochtigheid die representatief is, de capaciteit van een koelende warmtewisselaar laag in de ruimte hebben kunnen meten. De meetresultaten zijn beter dan datgene wat in de modelberekeningen is aangenomen.

De volgende stap is het plaatsen van een prototype van een warmtewisselaarpaar met een slakkenhuis in een kas met planten, met de watertemperaturen die optimaal zijn voor een opslag.