

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

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

Het rapport vormt een onderdeel van het programma “Glastuinbouw 2020”, speerpunt “Kas als Energiebron”.

Programmateam speerpunt “Kas als Energiebron”

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

Dr. H.J. Huizing (InnovatieNetwerk)

Verwarmings-, koel- en ontvochtigingscapaciteit van Fiwihex warmtewisselaars

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 – 203 - 1

Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.

Rapportnr. 03.2.017 (serie achtergrondrapporten), Den Haag, november 2003

Voorwoord

Het “Concept voor een energieproducerende kas” (InnovatieNetwerk/SIGN rapportnr. 02.2.015) is zeer verrassend en uitdagend. Door een slimme combinatie van bestaande technologieën, die ten dele niet in de glastuinbouw bekend waren, lijkt het toekomstbeeld “kas als energiebron” ook nu al onder bepaalde omstandigheden haalbaar. Dit heeft InnovatieNetwerk en SIGN er toe gebracht een aantal vervolgstappen te zetten om preciezer het belang van de kern van het concept, de revolutionaire warmtewisselaar van FiwiHex, te kunnen afwegen. In de eerste plaats is aan IMAG BV opdracht gegeven een nauwkeurige beoordeling van de eigenschappen van de door FiwiHex geoptimaliseerde warmtewisselaar te maken. Als duidelijk zou zijn dat de eigenschappen en prestaties overeenkomen met hetgeen door FiwiHex werd geclaimd, dan zou een tweede stap worden gezet – namelijk een proefopstelling met een tuinbouwgewas in een kas.

In dit rapport geeft het IMAG een oordeel over de eigenschappen van de FiwiHex warmtewisselaar. De conclusies zijn zodanig dat de begeleidingscommissie op basis van dit rapport heeft geadviseerd de eerder genoemde kasproef uit te laten voeren.

De begeleidingscommissie was als volgt samengesteld:

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, beide te Den Haag)

Tevens namen deel aan de discussie:

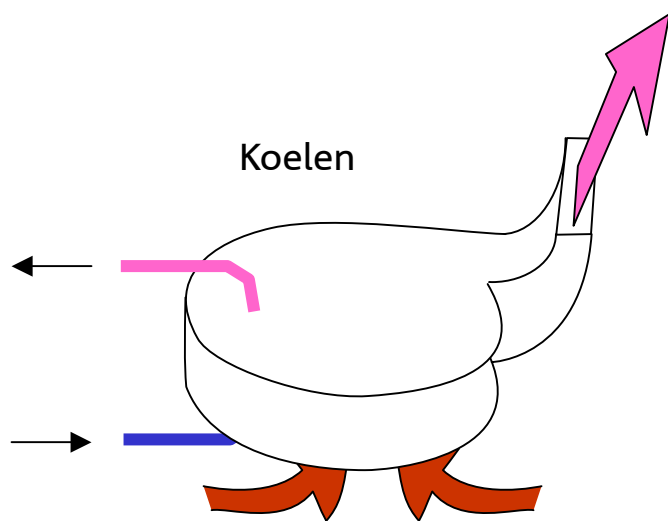
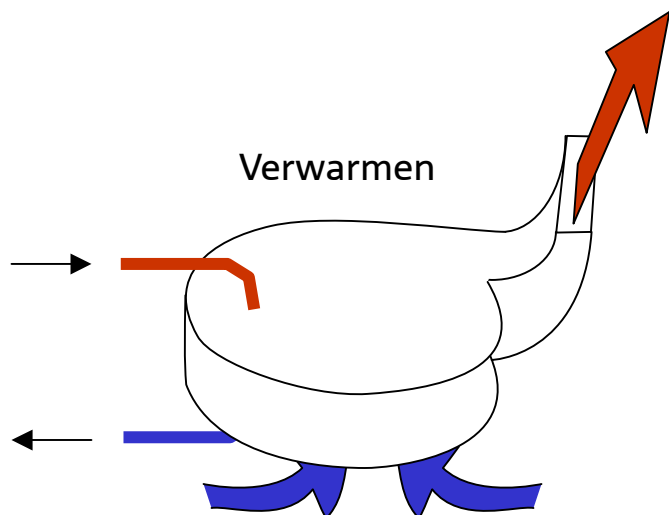
Dr.ir. F. de Zwart	(A&F, voorheen IMAG BV, te Wageningen)
Dr.ir. J. Bakker	(A&F, voorheen IMAG BV, te Wageningen)
Dr.ir. E. van Andel	(FiwiHex, te Almelo)
Dr.ir. E.E. van Andel	(FiwiHex, te Almelo)

Dr. G. Vos,
Directeur InnovatieNetwerk
Groene Ruimte en Agrocluster.

F.H. Hoogervorst,
Voorzitter Bestuur Stichting
Innovatie Glastuinbouw.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Inleiding	1
1. Theorie van het warmte-uitwisselingsproces	3
2. Metingen	6
3. Resultaten	10
3.1. Uitvoeringsvorm van FiWiHEX warmtewisselaars voor tuinbouw- toepassingen	10
3.2. Verwarmingsprestaties	11
3.3. Koelprestaties	14
4. FiwiHex warmtewisselaars in de tuinbouwpraktijk	16
5. Conclusies	20



Inleiding

Een tuinbouwkas heeft in de Nederlandse zomer te maken met een groot warmteoverschot. Traditionele kassen zetten daarom in de zomer de ramen wijd open. Ingevangen zonne-energie wordt daarmee weggegooid en er wordt veel CO₂ aan de kaslucht toegevoerd om de CO₂-concentratie te verhogen. Indien dit warmteoverschot zou kunnen worden overgedragen op een koelmedium, dan zou de zonne-energie opgeslagen kunnen worden voor later gebruik en zou bij een veel kleinere CO₂-doserings een veel hogere concentratie gerealiseerd kunnen worden.

Dit principe van de gesloten kas heeft zich bewezen, maar impliceert in de tot nu toe beproefde systemen een hoog elektriciteitsverbruik.

Door echter gebruik te maken van zeer efficiënte warmtewisselaars zou dit hoge elektriciteitsverbruik bij koeling kunnen worden vermeden. De door de firma Fiwihex ontwikkelde warmtewisselaars beloven volgens de gedocumenteerde specificaties, dat het elektriciteitsverbruik voor tuinbouwkundige toepassingen niet meer dan 2% van het koelvermogen hoeft te bedragen. Tevens kunnen dezelfde warmtewisselaars worden gebruikt om grote verwarmingscapaciteiten te realiseren bij relatief lage watertemperaturen. Ook hierbij is er sprake van een zeer laag elektriciteitsverbruik. De grote warmteoverdracht maakt het zelfs mogelijk kassen zonder gebruik van een warmtepomp te kunnen verwarmen.

Tenslotte is de Fiwihex warmtewisselaar zeer geschikt voor een decentrale opstelling, waardoor minimale aantallen luchtkanalen behoeven te worden gebruikt.

Koelen en verwarmen van tuinbouwkassen met deze warmtewisselaars belooft dus het klimatiseren van tuinbouwkassen met een zeer laag energieverbruik mogelijk te maken. Indicaties hieromtrent zijn naar voren gekomen in een quick scan van de tuinbouwkundige perspectieven van Fiwihex warmtewisselaars in het onderzoektraject "Kas als Energiebron", dat door InnovatieNetwerk Groene Ruime en Agrocluster in het voorjaar van 2002 is geëntameerd.

Alvorens echter de bevindingen van de quick scan in een experiment te verifiëren, worden in het voorliggend project de belangrijkste prestatieparameters van de warmtewisselaar in situaties zoals die in de tuinbouwpraktijk voorkomen bepaald. Deze parameters betreffen de warmte- en stofoverdrachtscoëfficiënt in relatie tot het ventilatortoerental.

In hoofdstuk 1 wordt een theoretische benadering van de warmtewisselaar gepresenteerd.

In hoofdstuk 2 wordt de meetopstelling beschreven waarmee het in hoofdstuk 1 beschreven model kan worden geverifieerd en worden de resultaten van die verificatie getoond.

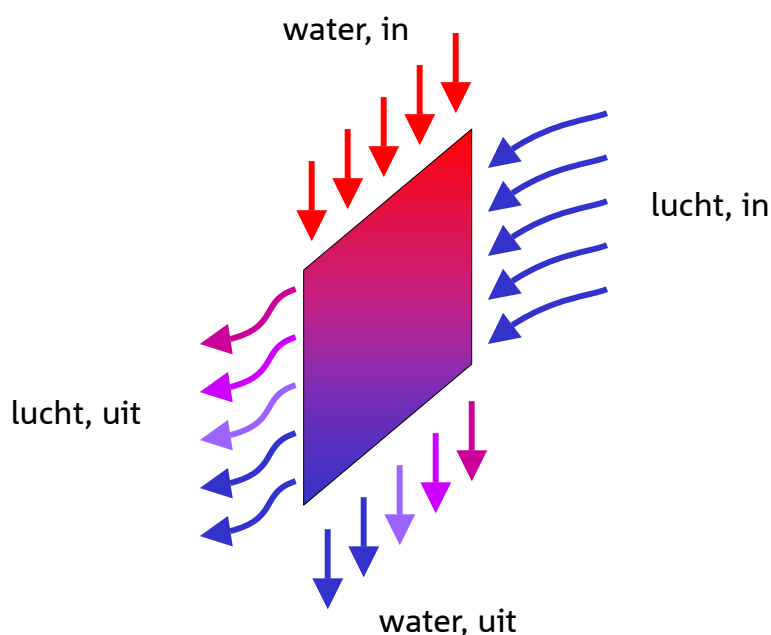
In hoofdstuk 3 worden de prestaties die met het gevalideerde model zijn berekend getoond, waardoor er gemakkelijk hanteerbare curves worden verkregen.

In hoofdstuk 4 wordt de betekenis van de eigenschappen zoals die in dit meetproject zijn bepaald tegen het licht van de klimatisering van een tuinbouwkas beschreven.

1. Theorie van het warmte- uitwisselingsproces

De Fiwihex warmtewisselaar is een cross-flow warmtewisselaar. De transportrichting van het water dat warmte opneemt of afgeeft staat namelijk haaks op de stromingsrichting van de lucht langs de warmte-uitwisselende oppervlakken.

Schematisch ziet de warmteoverdracht er dan dus uit zoals in de onderstaande figuur is getoond.



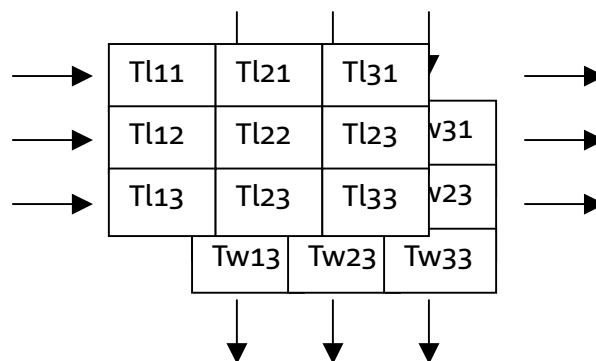
Figuur 1.1. Schematische weergave van de temperaturen in een kruisstroom warmtewisselaar, waarin de uitgaande temperaturen een mengsel zijn van veel en weinig veranderde temperaturen

De figuur laat zien dat door het kruisstroomkarakter de uitgaande water- en/of luchttemperatuur altijd een mengsel is van deelstromen die veel in temperatuur zijn veranderd, én die weinig in temperatuur zijn veranderd. Indien het waterdebiet klein is ten opzichte van het luchtdebiet, is de watertemperatuur aan de onderkant van het wisselend oppervlak vrij homogeen, maar wordt vooral het bovenste deel van de lucht in temperatuur veranderd. Het water wordt dan sterk uitgekoeld, maar de lucht zal niet veel in temperatuur stijgen. Is het luchtdebiet klein ten opzichte van het waterdebiet, dan zal de uitgaande lucht homogeen van temperatuur zijn (alle pijltjes rood), maar zal een belangrijke deelstroom van het water weinig in temperatuur veranderen. Bij relatief kleine luchtdebieten is de gemiddelde uitkoeling van het water dan ook

gering.

De beoogde toepassing van de Fiwihex warmtewisselaar ten behoeve van de klimatisering van tuinbouwkassen vereist een grote uitkoeling van het water. Het water dat voor de verwarming van de kas gebruikt moet worden ligt in het voorliggend concept immers op het lage temperatuurniveau van rond de 27 °C. Indien dit water met de warmtewisselaar tot 18 °C zou worden uitgekoeld is voor de afgifte van een verwarmingsvermogen van 100 W/m² een waterdebiet van 95 m³/ha per uur nodig. 100 W/m² is het verwarmingsvermogen waarmee een goed geïsoleerde kas ongeveer 20 tot 25 °C warmer dan de buitenlucht kan worden gehouden (dus rond de 17 °C als het buiten flink vriest).

Om het gedrag van de warmtewisselaar te kunnen bestuderen is een numeriek model voor een kruisstroom warmtewisselaar opgesteld. In het model wordt de warmtestroom door een matrix met luchttemperaturen en een matrix met watertemperaturen berekend, en de warmte-uitwisseling tussen deze massastromen beschreven. In onderstaand figuur is de globale werking van dit model geïllustreerd voor twee 3x3 matrices.



Figuur 1.2 .Modelmatige weergave van een kruisstroom warmtewisselaar in de vorm van water- en luchttemperatuur matrices

Het model weegt de warmtestromen in de beide richtingen en de warmteuitwisseling tussen water en lucht naar gelang de warmtecapaciteit van de water- en luchtstroom. In geval de warmtewisselaar als koeler gebruikt wordt speelt ook condensatie en de daarbij behorende latente warmteoverdracht een rol. Om dit proces te kunnen beschrijven wordt er behalve een matrix met luchttemperaturen ook een matrix met absolute luchtvochtigheden opgesteld, en wordt tussen water en lucht een scheidingsvlak aangebracht waarvan de temperatuur gelijk is aan de watertemperatuur op die plaats in de kruisstroom wisselaar. Door de verzadigde absolute luchtvochtigheid op die plaats te berekenen kan bepaald worden hoeveel vocht in de warmtewisselaar condenseert.

Met dit model kunnen de effecten van water- en luchtdebieten door de wisselaar op het overgedragen vermogen en de uitgaande lucht en watertemperaturen worden

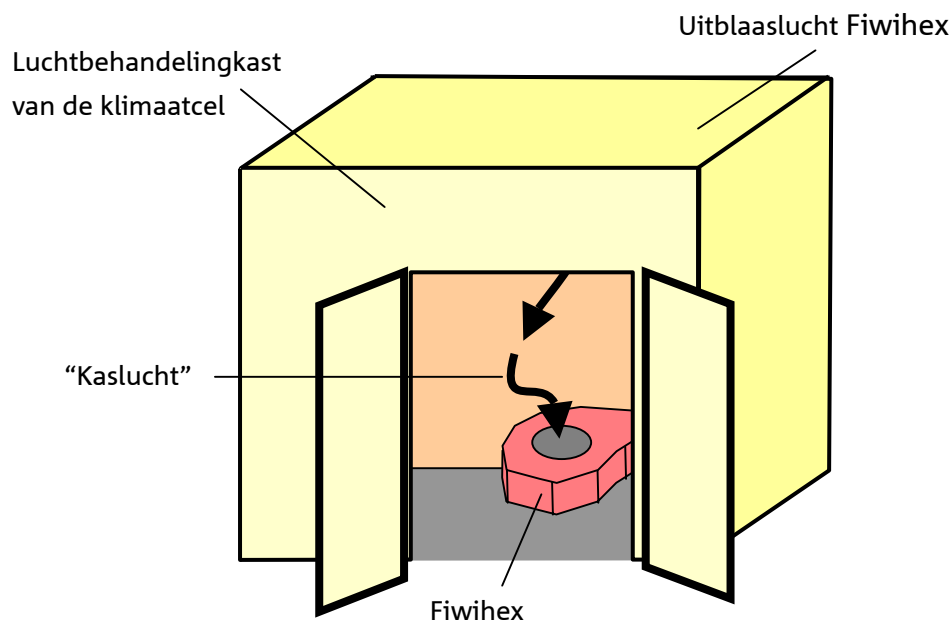
geanalyseerd.

Door nu het theoretisch model te valideren voor de FiwiHex warmtewisselaar kunnen de metingen aan de warmtewisselaar worden vertaald naar willekeurige omstandigheden en kan het volle perspectief van de warmtewisselaar voor de tuinbouw worden ingeschat.

In het volgende hoofdstuk wordt de toegepaste meetopstelling beschreven en worden de verkregen meetresultaten geanalyseerd.

2. Metingen

De Fiwihex warmtewisselaar zal worden gebruikt om de kaslucht in de winter te verwarmen en om de kaslucht in de zomer te koelen. Om de verwarmingsprestaties van de warmtewisselaar te bepalen is de warmtewisselaar in een klimaatcel geplaatst volgens onderstaande schets.



Figuur 2.1. Meetopstelling waarbij de verwarmingscapaciteit van de warmtewisselaar is beproefd

De luchtbehandelingkast van de klimaatcel creëert een instelbare “kaslucht”-conditie, zowel qua temperatuur als qua luchtvochtigheid. Ook de watertemperatuur naar de warmtewisselaar, en het lucht- en waterdebiet dat door de warmtewisselaar stroomt, kan worden ingesteld. Door een aantal combinaties van instellingen te kiezen is een breed spectrum aan meetpunten gecreëerd waarmee het in het voorgaande hoofdstuk beschreven model is gevalideerd.

In navolgende tabel zijn de meet- en modelresultaten van de metingen aan de warmtewisselaar in verwarmingsmode beschreven.

Tabel 2.1. Meet- en modelresultaten van de 10 metingen van de warmtewisselaar in verwarmingsmode

	Meting nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Input	T-lucht, in [°C]	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.7	18.7	18.7	18.6	18.5
	T-water, in [°C]	21.9	27.6	30.9	34.5	21.7	24.6	27.7	26.1	25.5	22.7
	Waterdebiet [kg/min]	7.4	7.3	7.5	7.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
	Ventilatorstand [-]	3	3	3	3	3	3	3	1	2	2
Gemeten	Verwarmingsverm. [W]	301	854	1238	1603	148	289	444	302	292	174
	Lucht, uit [°C]	19.7	21.9	23.2	24.6	19.1	19.7	20.3	20.3	19.9	19.3
	Water, uit [°C]	21.3	25.9	28.6	31.5	19.2	20.0	20.9	21.3	20.2	19.4
Berekend	Luchtdebiet [liter/s]	197	237	256	261	306	280	278	183	235	238
	Effect. w.overdr. [W/K]	114	128	138	140	94	94	93	73	81	80
Model resultaat	Verwarmingsverm. [W]	300	861	1237	1599	156	306	474	334	310	185
	Lucht, uit [°C]	19.7	21.9	23.2	24.6	19.2	19.7	20.4	20.5	20.0	19.3
	Water, uit [°C]	21.3	25.9	28.6	31.5	19.1	19.7	20.3	20.7	19.8	19.2

Het bovenste deel van tabel 2.1. toont de gemeten data. Het middelste deel geeft een aantal gegevens aan, die aan de hand van de metingen berekend zijn en het onderste deel toont modelresultaten.

De tabel laat zien dat de modelresultaten zeer goed overeenkomen met de meetresultaten. De berekende vermogens verschillen hooguit 10% ten opzichte van de gemeten vermogens, de uitgaande luchttemperatuur kloppen binnen 0.1 °C, en de uitgaande watertemperatuur wijkt maximaal 0.6 °C af (wat een directe verklaring is van de afwijking in de berekende vermogens, omdat dit vermogen geheel afhangt van de gemeten (en berekende) uitkoeling van het water.

Voor de metingen van het koelvermogen is in de klimaatcel niet alleen de temperatuur gevarieerd maar ook de luchtvochtigheid.

In tabel 2.2. zijn de resultaten van de metingen en simulaties in de koelmode beschreven. De opbouw van de tabel is gelijk aan tabel 2-1, maar het valt op dat er geen berekend luchtdebiet wordt gepresenteerd. Dit kan in de koelmode namelijk niet op dezelfde manier plaatsvinden als in de verwarmingsmode, waar het luchtdebiet kan worden berekend uit het temperatuurverschil tussen ingaande en uitgaande lucht, de warmtecapaciteit van lucht en het afgegeven vermogen. In de koelmode zou dit op basis van enthalpieverschil moeten plaatsvinden, maar dit zou zeer nauwkeurige luchtvochtigheidsmetingen vereisen (een kwaliteit waarin bij dit project niet was voorzien). Daarom is in de berekeningen van de koelcapaciteit uitgegaan van de stand van de regelschakelaar voor de ventilator en is het luchtdebiet gebruikt dat bij de verwarmingsexperimenten bij deze schakelstand gemiddeld berekend was.

Ook in tabel 2.2. is een grote mate van overeenstemming te zien tussen de metingen en de berekeningsresultaten.

Uit correspondentie tussen IMAG en FiwiHex kwam echter naar voren dat FiwiHex bij metingen onder omstandigheden met hoge luchtvochtigheden tot aanzienlijk hogere koelcapaciteiten kwam dan het IMAG onder vergelijkbare omstandigheden (meting 12, 13 18 en 19). De verwarmingsprestaties die het IMAG heeft gemeten stemden wel overeen met de metingen van FiwiHex.

Uiteraard is er uitgebreid gecorrespondeerd over mogelijke oorzaken voor deze verschillen. Mogelijk is er in de warmtewisselaar, ondanks zorgvuldige ontluchting aan het begin van het experiment toch een luchtbel komen te zitten, waardoor de effectiviteit van de warmtewisselaar is teruggelopen.

Gezien het krappe tijdsplan rond dit project is het echter niet mogelijk geweest deze verschillen middels een aantal additionele metingen op te lossen.

Alle grafieken in het volgende hoofdstuk zijn evenwel gebaseerd op de meetresultaten die het IMAG heeft gemeten.

In hoofdstuk 4, waar de tuinbouwkundige perspectieven worden besproken, wordt nog nader ingegaan op de consequenties van berekeningen met een wat hogere koelcapaciteit.

Tabel 2.2. Meet- en modelresultaten van de 17 metingen aan de warmtewisselaar in koel- en ontvochtigingsmode

	Meting nummer	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Input	T-lucht, in [°C]	29.3	27.2	27.0	26.0	25.4	30.0	26.0	30.5	30.6
	RV-lucht, in [%]	93	95	87	88	88	74	82	84	84
	T-water, in [°C]	20.1	19.2	19.6	19.9	20.4	20.2	17.3	18.6	17.5
	Waterdebiet [lit/min]	0.7	2.3	2.8	1.6	0.4	4.0	3.6	0.8	2.3
	Ventilatorstand [-]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Gemeten	Koelvermogen [W]	418	905	816	462	119	1117	1040	601	1376
	Lucht, uit [°C]	29.0	25.9	25.2	24.7	24.9	26.9	23.5	28.8	27.8
	Water, uit [°C]	29.1	25.0	23.7	24.0	24.9	24.2	21.4	28.8	26.1
Berekend	Effect. w.overdr. [W/K]	92	205	182	136	47	178	191	102	187
Model resultaat	Opgelegd luchtdebiet	259	259	259	259	259	259	259	259	259
	Koelvermogen [W]	397	905	760	457	128	952	939	603	1334
	Aandeel latent [%]	35	46	26	17	3	8	22	23	36
	Ontvochtiging [g/uur]	221	671	315	121	7	130	335	223	774
	Lucht, uit [°C]	28.4	25.5	24.9	24.6	24.9	26.7	23.3	28.7	27.4
	Water, uit [°C]	28.7	25.0	23.5	24.0	25.3	23.6	21.0	28.9	25.9

Tabel 2.2. Vervolg

	Meting nummer	20	21	22	23	24	25	26	27
Input	T-lucht, in [°C]	26.8	31.6	26.0	28.0	28.1	28.1	28.2	28.1
	RV-lucht, in [%]	79	60	58	47	44	40	40	39
	T-water, in [°C]	18.3	17.7	20.7	18.2	20.1	20.6	20.6	19.2
	Waterdebiet [lit/min]	0.6	2.4	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	3.1
	Ventilatorstand [-]	3	3	3	3	2	1	3	3
Gemeten	Koelvermogen [W]	297	1230	160	283	223	167	188	770
	Lucht, uit [°C]	25.2	27.5	24.7	26.1	26.3	26.4	26.8	24.9
	Water, uit [°C]	25.1	25.2	24.7	26.3	26.5	26.4	27.0	22.8
Berekend	Effect. w.overdr. [W/K]	69	152	61	59	57	45	51	139
Model resultaat	Opgelegd luchtdebiet	259	259	259	259	129	100	134	241
	Koelvermogen [W]	333	1102	192	319	228	179	195	729
	Aandeel latent [%]	2	1	0	0	0	0	0	0
	Ontvochtiging [g/uur]	12	10	0	0	0	0	0	0
	Lucht, uit [°C]	25.5	27.4	25.2	26.7	26.3	26.3	26.8	25.1
	Water, uit [°C]	25.9	24.4	25.6	27.4	26.7	26.8	27.3	22.6

3. Resultaten

Voor aanvang van het meetproject is geconstateerd dat de warmtewisselaars, alvorens in de praktijk toegepast te kunnen worden, voorzien zouden moeten zijn van een slakkenhuis en een uitblaasopening zodat de behandelde lucht gericht kan worden uitgeblazen.

Met de aldus aangepaste warmtewisselaar zijn de metingen uitgevoerd en met deze metingen is het in hoofdstuk 1 beschreven simulatiemodel gevalideerd.

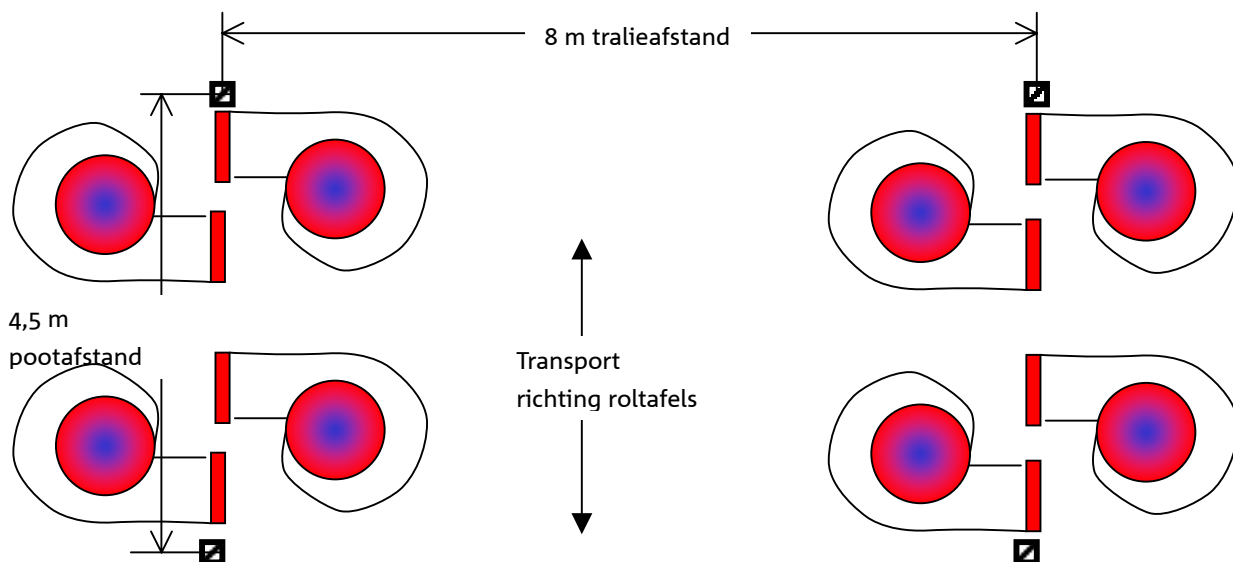
In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de keuzen die rond de maatvoering van het slakkenhuis zijn gemaakt en wordt daarna op de verwarmings-, koel- en ontvochtigingskarakteristieken van de warmtewisselaar ingegaan.

3.1. Uitvoeringsvorm van FiWiHEX warmtewisselaars voor tuinbouwtoepassingen

Wanneer de Fiwihex warmtewisselaars in kassen geplaatst worden, zullen deze ergens onder het gewas terecht moeten komen. Immers, bovenin de kas zouden de apparaten een aanzienlijke lichtonderschepping geven (watertoevoer en waterafvoer, en condenswaterafvoer).

Gezien de eerdere constatering dat de potplantenteelt de eerste subsector in de tuinbouw zou kunnen zijn waar het beoogde concept van een kas met ultra laag energieverbruik ingezet zou kunnen worden, is het teeltsysteem met roltafels of teeltgoten als randvoorwaarde gebruikt. Bij deze teeltsystemen zijn de enige volledig vrije doorgangen, waardoor de uitblaaskokers van de warmtewisselaars hun lucht naar boven zouden moeten blazen, de ruimten tussen de poten die de bovenbouw van de kas dragen.

In navolgende schets is aangegeven welke maatvoering hierin van toepassing is.



Figuur 3.1. Mogelijke lay-out van FiwiHex warmtewisselaars in een potplantenkas met roltafels. De warmtewisselaars worden in dit geval onder de roltafels geplaatst.

In figuur 3.1. zijn 4 warmtewisselaars op 36 m² geplaatst, maar een andere lay-out (bijvoorbeeld met langere afvoerkanalen) zou het aantal warmtewisselaars kunnen verhogen.

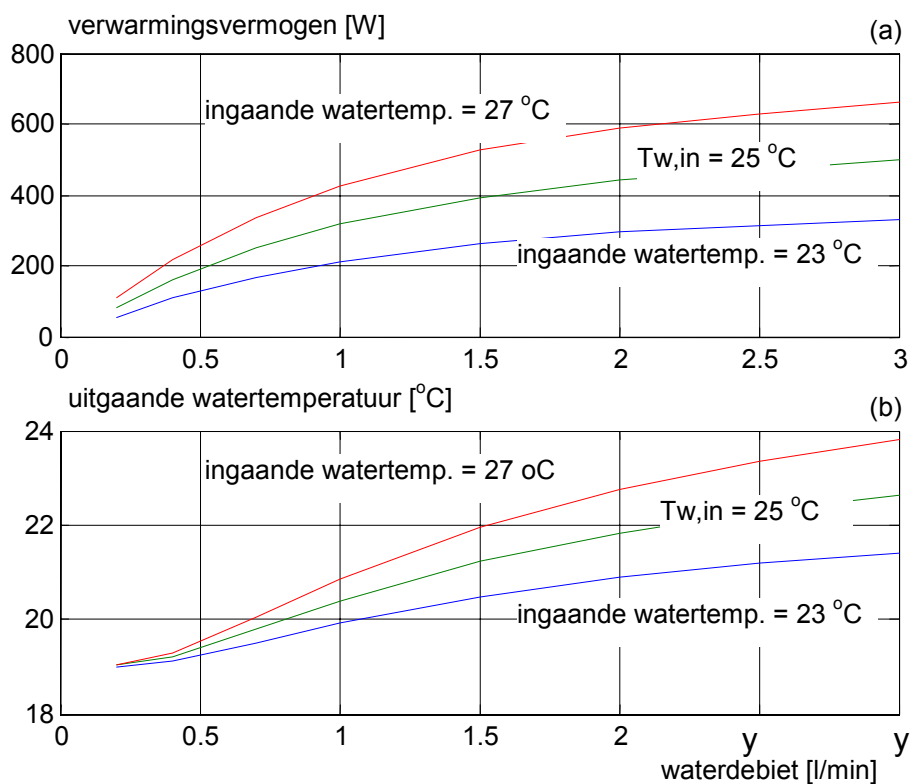
De uitloop is van de getekende slakkenhuizen is zodanig gedimensioneerd dat deze niet breder is dan de poten van de ondersteuning van de bovenbouw van de kas. Hierdoor hebben de roltafels, die langs de poten schuiven, geen hinder van de warmtewisselaars.

3.2. Verwarmingsprestaties

Met het gevalideerde model kan de verwarmingsprestatie van de warmtewisselaar onder iedere denkbare situatie worden berekend.

Het verwarmingsvermogen van een FiwiHex warmtewisselaar wordt bepaald door 4 grootheden, namelijk T-lucht, in (de kaslucht) en T-water, in (de temperatuur van het water uit de warme aquifer), het water- en het luchtdebiet. Van deze vier is de kasluchttemperatuur op ieder moment een gegeven. De ingaande watertemperatuur kan eveneens als een gegeven worden beschouwd, of in ieder geval als een maximum temperatuur. Verderop zal worden beargumenteerd waarom het geen zin heeft bij verwarmingsbehoefte de warmtewisselaar met een lagere dan de maximaal beschikbare temperatuur te voeden, zodat gesteld kan worden dat zowel de ingaande kasluchttemperatuur als de ingaande watertemperatuur een gegeven zijn.

In onderstaande figuren zijn een aantal curven getekend waarin het verwarmingsvermogen van de warmtewisselaar is aangegeven als functie van het waterdebiet (fig. 3.2.) en als functie van het luchtdebiet (fig. 3.3.)

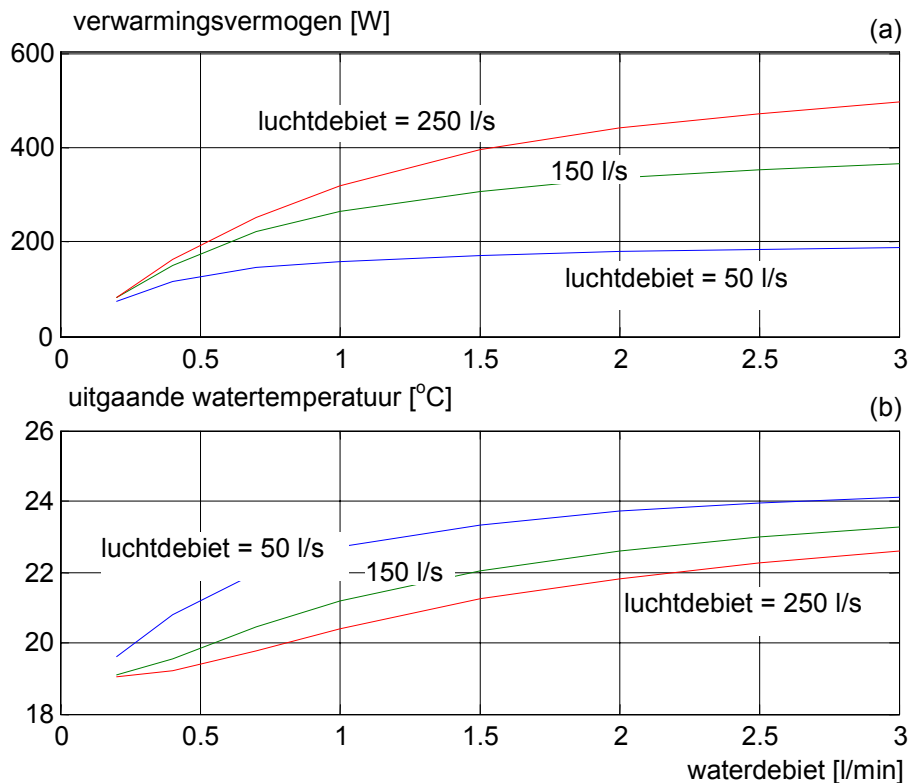


Figuur 3.2. Verwarmingsvermogen en uitgaande watertemperatuur van de Fiwihex warmtewisselaar als functie van het waterdebiet bij verschillende aanvoer water temperaturen. De ingaande luchttemperatuur is gesteld op 19 °C en het luchtdebiet is gesteld op 0,250 kg/s.

Uit de figuur blijkt dat het verwarmingsvermogen lineair oploopt met het temperatuurverschil tussen water- en luchttemperatuur. Vanwege dit feit geldt de vermogenscurve (het (a)-deel van de grafiek) die is getekend voor een temperatuur van 27 °C ook voor het verwarmingsvermogen van een Fiwihex warmtewisselaar waarmee lucht van 17 °C wordt verwarmd met water van 25 °C.

Figuur 3.2. laat ook zien dat de uitgaande watertemperatuur oploopt met het afgegeven vermogen. Dit betekent dat bij gebruik van de warmtewisselaar voor het verwarmen van kassen de temperatuur van het water dat uit de warmtewisselaar komt in de tijd zal variëren. Indien het water uit de warmtewisselaar direct in de 'koude' helft van het ondergrondse energieopslagsysteem geïnfiltererd zou worden, zou dit betekenen dat deze een mengtemperatuur zou krijgen van alle retourtemperaturen die gedurende de winter optreden. Hoge temperaturen hebben daarbij, zelfs indien ze weinig voorkomen, een belangrijk temperatuur opdrijvend effect omdat hoge temperaturen samengaan met hoge waterdebieten.

In figuur 3.3. wordt het effect van verschillende luchtdebieten door de warmtewisselaar op het verwarmingsvermogen en de uitgaande watertemperatuur getoond.



Figuur 3.3. Verwarmingsvermogen en uitgaande watertemperatuur van de Fiwihex warmtewisselaar als functie van het waterdebiet bij verschillende luchtdebieten. De ingaande luchttemperatuur is gesteld op 19 °C en de aanvoer watertemperatuur is gesteld op 25 °C.

De figuur laat zien dat de verlaging van het luchtdebiet het verwarmingsvermogen doet afnemen, maar ook de uitkoeling van het water. De warmteafgifte-efficiëntie van de warmtewisselaar loopt dus terug met de verlaging van het luchtdebiet van de ventilator.

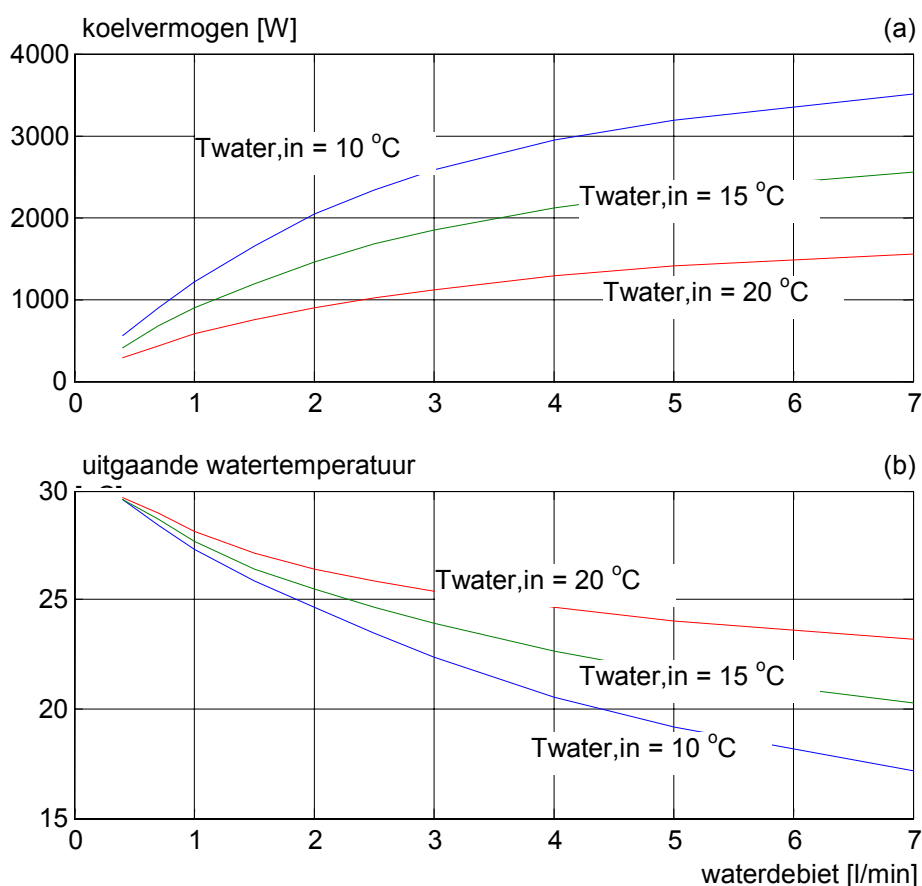
Het valt op dat het effect van het luchtdebiet niet lineair verloopt. De verlaging van 250 naar 150 l/s geeft een kleiner effect dan de volgende stap. Dit komt doordat een vermindering van het luchtdebiet niet alleen leidt tot een afname van de hoeveelheid lucht die opgewarmd wordt, maar ook de warmteoverdrachtscoëfficiënt doet afnemen.

3.3. Koelprestaties

Het gevalideerde simulatiemodel beschrijft niet alleen het verwarmingsvermogen, maar ook het koelvermogen van de warmtewisselaar. Bij het gebruik van de warmtewisselaar voor koeling wordt ook het condensatie-effect meegenomen. Hierdoor wordt naast voelbare warmte ook de latente warmtestroom verdisconteerd.

In figuur 3.4. is de koelcapaciteit getoond bij een ingaande luchttemperatuur van 30 °C met een luchtvochtigheid van 85%. De koelcapaciteit is weer afhankelijk gemaakt van het waterdebiet en er zijn drie ingaande watertemperaturen gebruikt.

In alle figuren is een luchtdebiet van 0,250 kg/s gehanteerd.



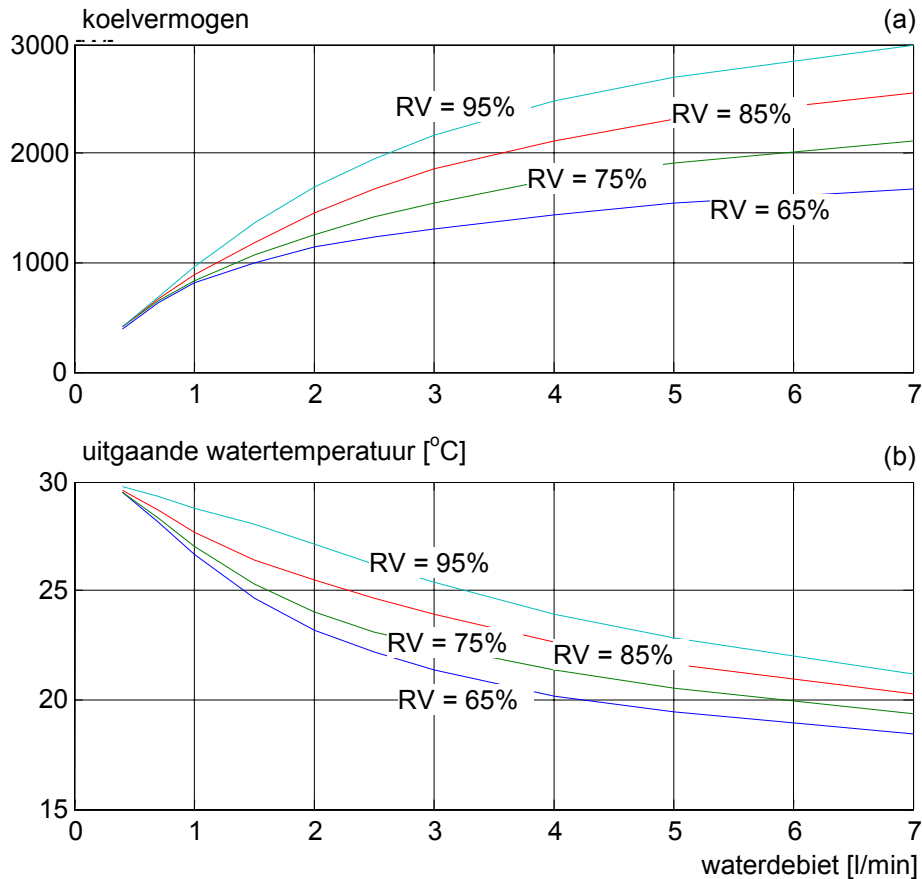
Figuur 3.4. Koelvermogen en uitgaande watertemperatuur van de Fiwihex warmtewisselaar als functie van het waterdebiet bij verschillende aanvoer water temperaturen. De ingaande luchttemperatuur is gesteld op 30 °C bij een luchtvochtigheid van 85% en het luchtdebiet is gesteld op 0,250 kg/s.

Uit de figuur blijkt dat het koelvermogen vrijwel lineair oploopt met het temperatuurverschil tussen water- en luchttemperatuur.

Figuur 3.4. laat ook zien dat de uitgaande watertemperatuur sterk afloopt met het toenemende koelvermogen en, natuurlijk, zeer sterk afhankelijk van de ingaande

watertemperatuur.

In figuur 3.5. laat het effect van de luchtvochtigheid zien op de koelcapaciteit. Om het aantal lijnen overzichtelijk te houden zijn deze curves voor slechts één aanvoertemperatuur gemaakt, en wel een temperatuur van 15 °C. De luchttemperatuur is weer 30 °C.



Figuur 3.5. Koelvermogen en uitgaande watertemperatuur van de Fiwihex warmtewisselaar als functie van het waterdebiet bij verschillende luchtvochtigheden. De ingaande luchttemperatuur is gesteld op 30 °C en de ingaande watertemperatuur is gesteld op 15 °C.

Figuur 3.5. laat zien dat de koelcapaciteit aanmerkelijk toeneemt naarmate de lucht vochtiger wordt. Bij dezelfde ingaande water- en luchttemperaturen is de warmte-onttrekking in vochtige lucht (95% RV) bijna 2 maal zo groot als in relatief droge lucht (65% RV). Gegeven het feit dat het gewas in een tuinbouwkas zorgt voor vochtige lucht betekent dit een voordeel voor de koelcapaciteit van de warmtewisselaar.

4. Fiwihex warmtewisselaars in de tuinbouwpraktijk

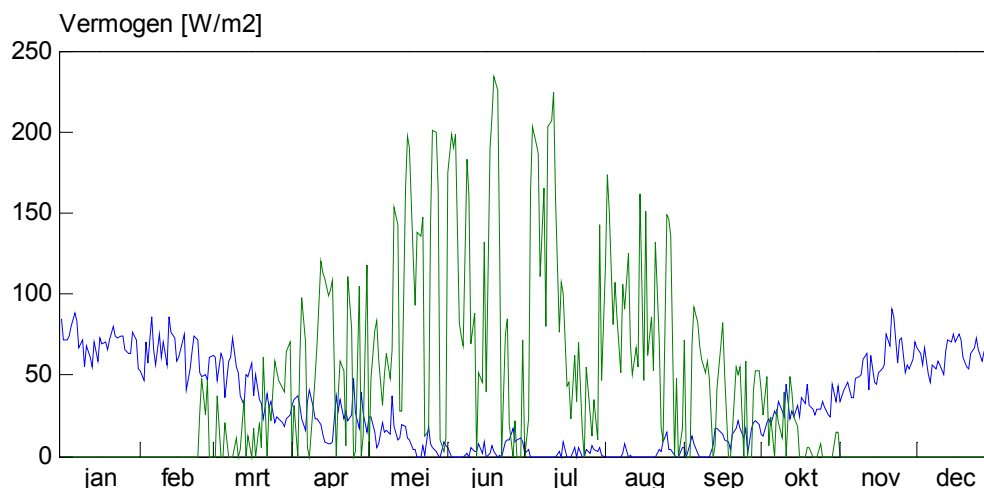
Uitgaande van de in het vorige hoofdstuk gepresenteerde eigenschappen, kan worden uitgerekend in welke mate de Fiwihex warmtewisselaars in staat zijn de verwarmings- en koelbehoefte van een tuinbouwkas in te vullen. Uiteraard hangt dit in hoge mate af van het aantal warmtewisselaars per oppervlakte eenheid. Naarmate het aantal toeneemt zal het benodigde verwarmings- en koelvermogen per warmtewisselaar afnemen.

Uit de grafieken die in het vorige hoofdstuk zijn gepresenteerd blijkt dat bij afname van het vermogen dat door de warmtewisselaar moet worden afgegeven of onttrokken, kleinere debieten per warmtewisselaar nodig zijn en de uitgaande watertemperatuur verder van de ingaande watertemperatuur komt te liggen. De benuttingsefficiëntie van water dat naar de warmtewisselaar stroomt wordt daarmee groter. In het gebruik van de Fiwihex warmtewisselaars voor de koeling en verwarming van kassen vindt dus een trade-off plaats tussen het aantal warmtewisselaars en de benuttingsefficiëntie van water in een seizoensopslagsysteem.

Teneinde een grove indicatie op te stellen van het effect van het aantal warmtewisselaars op de hoeveelheid water die van en naar een ondergronds energie opslagsysteem gepompt moet worden, is met behulp van het kasklimaatmodel KASPRO uitgerekend welke verwarmings- en koelvermogens nodig zijn om een goed geïsoleerde kas niet kouder dan 17 °C te laten worden en niet warmer dan 30 °C. Kortdurende afwijkingen ten opzichte van deze streeftemperaturen worden evenwel toegestaan.

Naast dit temperatuurcriterium is een luchtvochtigheids criterium aangehouden. Dit voorkomt dat de luchtvochtigheid boven de 90% RV stijgt.

In navolgende grafiek is getoond wat deze instellingen voor verwarmings- en koelbehoefte opleveren, beide als gemiddelde waarde per dag.



Figuur 4.1. Jaarverloop van de etmaalgemiddelde warmte- en koudevraag van een goed geïsoleerde kas, die zodanig verwarmd en gekoeld wordt dat deze niet kouder dan 17 °C en niet warmer dan 30 °C wordt. De RV wordt geregeld op maximaal 90%.

De in figuur 4.1. getoonde grafiek is samengesteld uit urregevens die de verwarmings- en koelbehoefte per m² aangeven. De jaarlijkse warmtevraag bedraagt bijna 1000 MJ/(m² jr) (waarvan 300 MJ voor de luchtvochtigheidsbeheersing) en de jaarlijkse koudevraag ruim 1300 MJ/(m² jr).

Aan de hand van deze vermogens kan door grafieken zoals figuur 3-2 en 3-4 in omgekeerde zin te gebruiken worden bepaald hoeveel water vanuit het ondergrondse opslagsysteem moet worden opgepompt om deze verwarmings- en koelbehoefte in te vullen. De verwarmingsgrafieken zijn daartoe opnieuw berekend met een kasluchttemperatuur van 17 °C en bij de koelgrafieken is uitgegaan van een ingaande watertemperatuur van 18 °C en 90% RV.

Omdat de grafieken zoals in figuur 3.2. en 3.4. per warmtewisselaar gelden en de urregevens per m² worden uitgedrukt moet een keus worden gemaakt ten aanzien van de hoeveelheid kasoppervlak die per warmtewisselaar wordt verwarmd.

Omdat een toename van het aantal warmtewisselaars per m² het vermogen per warmtewisselaar doet afnemen en daarmee de uitkoelingsefficiëntie doet verbeteren, is in navolgende tabel het effect van één warmtewisselaar op 2, 4 en 6 m² kas weergegeven.

Aantal m ² kas per warmtewisselaar	2	4	6	
m ³ voor verwarmen met 25 °C	30	35	38	
gemiddelde uitgaande watertemperatuur	17.2	18.1	19.2	
aantal uren met vermogenstekort		-	8	250
m ³ voor verwarmen met 27 °C	24	26	29	
gemiddelde uitgaande watertemperatuur	17.1	17.8	19.0	
aantal uren met vermogenstekort		-	-	50
m ³ voor koelen met IMAG koelcapaciteit	32	44	45	
gemiddelde uitgaande watertemperatuur	28.1	26.3	25.8	
aantal uren met vermogenstekort		-	131	331
m ³ voor koelen met FiwiHex koelcapaciteit	29	36	39	
gemiddelde uitgaande watertemperatuur	28.9	27.3	26.6	
aantal uren met vermogenstekort		-	48	112

Tabel 4.1. Totaal aantal m³ water dat per m² kas per jaar in de winter wordt afgekoeld en in de zomer wordt opgewarmd indien de klimatisering van de kas waarvan de verwarmings- en koelvraag in figuur 4.1. is getoond wordt gerealiseerd met één Fiwehex warmtewisselaar op 2, 4 en 6 m². In de berekeningen is er van uitgegaan dat voor de koeling water van 18 °C gebruikt kan worden. De resultaten bij de koeling zijn gegeven voor twee koelcapaciteiten. Het waterverbruik in de winter is berekend voor een beschikbare watertemperatuur van 25 °C en 27 °C. In alle gevallen is het luchtdebiet door de warmtewisselaar maximaal gehouden, namelijk 250 liter/sec.

In de eerste plaats laat de tabel zien dat een toename van het kasoppervlak dat met een warmtewisselaar moet worden bediend het aantal m³ water dat moet worden verpompt doet toenemen.

Een toename van de temperatuur van het water dat voor de verwarming kan worden gebruikt laat een vermindering van de hoeveelheid water die opgepompt moet worden zien.

Ook laat de tabel zien dat de gemiddelde temperatuur van het water dat uit de koeler komt (gewogen naar het debiet) hoger wordt naarmate er meer warmtewisselaars worden gebruikt.

Vanwege de in hoofdstuk 2 genoemde discrepantie tussen de door FiwiHex gemeten koelcapaciteit, en de door IMAG gemeten koelcapaciteit, zijn in de tabel de consequenties van deze verschillen in beeld gebracht. Het blijkt dat in geval de werkelijke capaciteit overeenkomt met die zoals die door het IMAG gemeten is, er meer warmtewisselaars nodig zijn dan wanneer de werkelijke capaciteit inderdaad hoger zou blijken te zijn. Bij hoge koelcapaciteit zou één warmtewisselaar per 5 m² nodig zijn, terwijl bij lagere capaciteit één warmtewisselaar ongeveer 3 m² kas zou kunnen

koelen.

Ongeacht de precieze capacite

it van de warmtewisselaar kan uit de tabel worden afgeleid dat de FiwiHex warmtewisselaars onder de beschreven kascondities ongeveer 36 m³ water van 18 °C naar 27 °C kunnen opwarmen. Dit is 10 m³ meer dan de kas nodig heeft voor verwarming in de winter, zodat dit een surplus is dat aan derden geleverd zou kunnen worden.

5. Conclusies

- De gedetailleerde berekeningen hebben aangegeven dat het mogelijk is om door middel van het gebruik van Fiwihex warmtewisselaars een goed geïsoleerde tuinbouwkas te klimatiseren tussen 17 °C en 30 °C. Hiervoor is één warmtewisselaar per 4 of 5 m² kasoppervlak nodig.
Voorwaarde is wel dat op warme dagen de luchtvochtigheid mag oplopen tot hoge waarden (rond de 90% RV).
- Het uitkoelen/ opwarmen van het water is dermate belangrijk dat het verlagen van het ventilatordebiet vrijwel nooit wenselijk zal zijn. Dit temeer daar het elektriciteitsverbruik van de ventilator, in de huidige uitvoeringsvorm, nauwelijks afneemt bij vermindering van het toerental.
- Indien tuinders mogelijkheden zien om met de geschetste klimatiseringsbeperkingen een goed gewas te telen is het verantwoord een experiment op beperkte schaal hieromtrent uit te voeren. Het meest voor de hand liggend is om dit te doen met een potplantengewas omdat deze in de regel goed gedijen in een warm en vochtig klimaat.
- Tabel 4.1. laat zien dat de kas per jaar 36 m³ water per m² per jaar op 27 °C kan brengen. Diezelfde kas gebruikt daarvan slechts 26 m³ water voor de verwarming in de winter. De kas biedt dus de mogelijkheid om 10 m³ water van 27 °C aan derden te leveren.