

Concept voor een energieproducerende kas

*Startnotitie voor een innovatietraject, opgesteld door:
Dr.ir. E. van Andel, Fiwihex, Almelo*

Deze startnotitie is opgesteld in opdracht van InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster en Stichting Innovatie Glastuinbouw (SIGN) en vormt een onderdeel van het programma "Glastuinbouw 2020".

Programmteam speerpunt "Kas als energiebron":
Dr.ir. H.J. van Oosten (InnovatieNetwerk en SIGN)
Dr. H.J. Huizing (InnovatieNetwerk)

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 – 158 - 2

Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.

Rapportnr. 02.2.015 (serie achtergrondrapporten), Den Haag, oktober 2002

Ten geleide

InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster en de Stichting Innovatie Glas-tuinbouw (SIGN) hebben het initiatief genomen om samen een ambitieus thema tot ontwikkeling te brengen: "Glastuinbouw 2020: naar een vitale, duurzame en gerespecteerde glastuinbouw". Na een eerste fase van toekomstverkenningen is gewerkt aan het opstellen van een concrete actieagenda. In verschillende brainstormsessies met opinion leaders uit het glastuinbouwcluster zijn thema's geïnventariseerd die individuele spelers overstijgen en waarin gezamenlijk zou moeten worden geïnvesteerd. Eén van die thema's is energie.

De glastuinbouw is een grote gebruiker van fossiele energie en daarmee gaat gepaard een grote uitstoot van CO₂. In veel beleidsdiscussies (o.a. over klimaatsverandering) spelen beide aspecten een grote rol. De glastuinbouw is zich daarvan bewust en investeert nu al, samen met de overheid, om het energiegebruik en de CO₂-uitstoot te verminderen. SIGN en Innovatienetwerk zijn van mening dat een trendbreuk nodig is om ingrijpende veranderingen in het energiegebruik in de glastuinbouw te realiseren. Vanuit de gedachte dat er in Nederland veel meer energie door de zon wordt ingestraald dan er gebruikt wordt is gekozen voor een nieuw perspectief, dat leidt tot een andere manier van denken en handelen: de glastuinbouw niet beschouwen als een grootgebruiker van fossiele energie maar als een potentiële bron van energie. Dit heeft geleid tot het krachtige en aansprekende beeld en metafoor "Kas als energiebron", met klassieke of wellicht nieuwe tuinbouwproductiefuncties.

SIGN en InnovatieNetwerk hebben verschillende personen gevraagd het toekomstbeeld "kas als energiebron" in een essay of startnotitie uit te werken.

Deze rapportage bevat een startnotitie van Dr.ir. E. van Andel (tot voor kort directeur R&D van Akzo Nobel te Arnhem, thans directeur van FiwiHex te Almelo). De heer van Andel heeft een nieuwe, zeer efficiënte warmtewisselaar ontwikkeld. De combinatie van deze technologie met andere technieken is een opmerkelijk concept ontstaan dat een duurzame energiehuishouding in de glastuinbouw verrassend snel dichtbij kan brengen.

SIGN en InnovatieNetwerk hopen met deze ideeën een impuls te geven aan het "anders" of vanuit een nieuw perspectief denken over tuinbouw en energie en daarmee een ingrijpende systeemvernieuwing in de glastuinbouw in gang te zetten.

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

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

Inhoudsopgave

Ten Geleide	i
Kernpunten van de aanpak en het concept “energieproducerende kas”	1
1. Startnotitie “Concept voor een energieproducerende kas”	3
1.1. Samenvatting	3
1.2. Conclusies en aanbevelingen	3
1.3. Inleiding	4
1.4. Fysische overwegingen	5
1.4.1. Warmtebalans	5
1.4.2. Energie-overschot	5
1.4.3. Vochtigheidsgraad	6
1.4.4. Koolzuurgas	6
1.5. Ontwerp van de kas	6
1.5.1. De beglazing	6
1.5.2. De warmteoverdracht van kas naar bodem	7
1.5.3. Haalbaar minimum in hulpenergie	8
1.5.4. De warmteopslag in de bodem	10
1.5.5. Bronbemalingstechnologie	11
1.5.6. Maatschets van de kas	12
1.5.7. Schets van de huidige warmtewisselaarprototypen	12
1.6. Mathematisch model	13
2. Vragen voortkomend uit een expertmeeting over de startnotitie	15
3. Resultaten van de quick scan	17
3.1. Inleiding	17
3.2. Samenvatting	18
3.3. Terms of reference	19
3.4. Conclusies	21
3.5. Samenvatting resultaten modelberekeningen IMAG	22
3.6. Samenvatting bevindingen IF-technology	23
3.7. Samenvatting resultaten koelexperiment met de warmtewisselaar door Fiwihex	23
Bijlage 1: Deelnemers expertmeeting “Energieproducerende kas” d.d. 24 mei 2002	25

Kernpunten van de aanpak en het concept “energieproducerende kas”

- 1. Door het creëren van een nieuw perspectief op een duurzame energiehuishouding in de glastuinbouw ontstond er ruimte voor een nieuw beeld: Kas als energiebron.**

De glastuinbouw staat bekend als een grootgebruiker van aardgas en is mede verantwoordelijk voor het gebruik én uitstoot van CO₂. De sector verricht op basis van een convenant met de overheid grote inspanningen om het energiegebruik terug te dringen en de CO₂-uitstoot te beperken. De beleidsdoelen zijn recent verscherpt vanwege de vermeende effecten van bepaalde gassen (waaronder CO₂) op klimaatsverandering. Het lijkt niet mogelijk om de beleidsdoelen op dit gebied te halen door optimaliseren van bestaande technologieën. Er is een trendbreuk nodig in denken én doen. Er is een inspirerend nieuw beeld nodig voor een duurzame energiehuishouding in de glastuinbouw van de toekomst (2020 – 2040).

Startpunt voor discussies over een nieuw perspectief was het feit dat in Nederland per m² oppervlak veel meer duurzame energie beschikbaar is dan er gebruikt wordt, zij het dat deze energie op jaarbasis onregelmatig verdeeld is en moeilijk is te bewaren. Op grond hiervan is een perspectiefwijziging voorgesteld: de glastuinbouw zal in de toekomst niet langer een grootgebruiker van fossiele energie zijn maar een potentiële bron van (duurzame) energie: de kas als energiebron.

- 2. In een creatief proces met energie-experts en tuinbouwondernemers is de basis gelegd voor een opmerkelijk concept: een energieproducerende kas.**

Met energie-experts en tuinbouwondernemers is op basis van de “Trias energetica” is gebrainstormd over nieuwe kasconcepten, bedrijfsprocessen en bouwmaterialen. Uitgangspunt bleef dat de kas gezien moest worden als een eenheid waarin bedrijfsmatig gewassen geproduceerd konden worden. In één traject (waarover in dit rapport verslag wordt gedaan) is op basis van fysische inzichten een concept ontwikkeld dat het doel “kas als energiebron” binnen bereik kan brengen binnen afzienbare tijd. Dit systeemconcept maakt gebruik van een combinatie van technologieën: een nieuw type hoog-efficiënte warmtewisselaar, verbeterde isolatie van de kas door gebruik van kanalenplaat, en opslag van warm water (tot 25 °C) in een aquifer. De nieuwe warmtewisselaar is in 1997-1999 met medewerking van Novem ontwikkeld, speciaal met het doel ruimten te klimatiseren met een minimum aan hulpenergie.

3. Theoretische modelberekeningen geven als uitkomst dat met dit concept op jaarbasis energie in de vorm van warmte overblijft.

Daarmede wordt het denkbaar dat nabij gelegen tuinbouwbedrijven, woningen of bedrijfspanden van warmte kunnen worden voorzien. Dat biedt verrassend genoeg mogelijkheden voor een integrale gebiedsbenadering waarbij warmte in een “energy ebruikers kan worden uitgewisseld.

4. Dit concept kan de basis vormen voor een inspirerende pilot.

De pilot biedt mogelijkheden om het theoretische concept op kleine schaal in de praktijk te testen. Het is duidelijk dat, ondanks de beloftes, nog een uitvoerig ontwerp-ontwikkelingstraject is te gaan. De uitdaging is groot. Het concept opent nieuwe wegen in het denken over én realiseren van een duurzame energiehouding in de glastuinbouw.

5. Een technologische vernieuwing in een maatschappelijke context.

De glastuinbouw speelt met het krachtige beeld “kas als energiebron” als sector zeer alert in op maatschappelijke uitdagingen. Maar het is duidelijk dat dit pas de beginfase is van een langdurig ontwikkelingstraject. Dit traject bevat niet alleen teelttechnische en technologische componenten om een nieuwere kas te laten ontstaan (het bedrijfsniveau). Alleen al het idee van potentiële uitwisseling van energie tussen tuinbouwbedrijven onderling, met woningen of bedrijven (zogenaamde energy webs) maakt het idee rijker maar ook gecompliceerder (het regio- of gebiedsniveau). Voor de verdere ontwikkeling van ideeën daarover zullen meerdere stakeholders (overheden, energiebedrijven, maatschappelijke organisaties, kennisbronnen) worden betrokken.

1. Startnotitie “Concept voor een energieproducerende kas”

1.1. Samenvatting

Dit rapport is een startnotitie om te komen tot het ontwerp van een tuinbouwkas die voor de temperatuurbeheersing geen brandstof meer gebruikt. Het overschot aan warmte wordt in de zomer in de ondergrond van de kas opgeslagen, om in de winter te dienen als verwarming. Dit is mogelijk door een nieuw type warmtewisselaar, die met een zeer laag temperatuurverschil en met zeer weinig elektrische hulpenergie die warmte tussen kas en bodem kan uitwisselen. Er is over het jaar een netto overschot aan warmte, dat na enige tijd, wanneer een reserve is opgebouwd, kan worden geëxporteerd, bijvoorbeeld voor ruimteverwarming in de naaste omgeving. De besparing op primaire energie ligt boven de 93%.

1.2. Conclusies en aanbevelingen

Met een nieuw type dunne-draad warmtewisselaars is het economisch mogelijk een tuinbouwkas te ontwerpen die de kas het gehele jaar door binnen een marge van 20–15 °C op temperatuur houdt. De extra investering in warmtewisselaars betaalt zich in 3–7 jaar terug met de aardgasbesparing als die 60 m³ per m² kasgrond per jaar is met een prijs van €0,15 per m³. Er is een investering nodig om de warmtewisselaars in voldoende serie te kunnen vervaardigen. De netto primaire energiebesparing ligt rond de 95%.

Gezien het belang van technologie om in de glastuinbouw brandstof te sparen, en gezien de economisch relevante terugverdientijden, verdient het aanbeveling te beginnen met het voorbereiden van het realiseren van een proefproject. Daarvoor moeten we een marktonderzoek doen naar een geschikte locatie, ondernemer, partners, en een geschikt gewas. De productie van een eerste serie Fine Wire Heat Exchangers moet daarvoor worden opgezet, waartoe de investering moet worden vastgesteld.

1.3. Inleiding

Er lopen op dit moment in Nederland vele projecten om brandstof te sparen in de glastuinbouw, die per jaar goed is voor 140 PJ. De meest geavanceerde gaan uit van warmte-opslag in de bodem onder de kas, om de aquifer te regenereren, c.q. te laden, als warmtebron voor een warmtepomp die deze warmte weer van grondniveau naar kasniveau brengt. Hiermee kan tot 30-40% van de primaire energie voor de verwarming worden bespaard. De warmte wordt in watervoerende zonnepanelen opgewekt, en niet uit de kas zelf onttrokken, omdat de thans verkrijgbare warmtewisselaars tussen lucht en water een temperatuurverschil van minstens 25 °C nodig hebben, willen ze economisch kunnen worden ingezet. Het is dus met deze "plate-fin" warmtewisselaars niet mogelijk, het grondwater met kaslucht zodanig te verwarmen, dat regeneratie mogelijk is, laat staan het grondwater zo hoog te verwarmen, dat een warmtepomp niet meer nodig is om de kas te verwarmen met het grondwater. De hoofdreden dat deze "plate-fin" warmtewisselaars deze taak niet aankunnen, is dat bij hetzelfde warmtetransport en een ΔT van 3 °C er 8 x zoveel lucht door de warmtewisselaars moet worden geblazen, omdat de lucht per pass niet 20, maar slechts 2,5 °C opwarmt. De elektrische hulpenergie die daarvoor nodig is, is niet economisch op te brengen, c.q. doet de besparing aan primaire energie weer te niet.

Wat we nu dus zien, is dat water in een zonnepaneel opwarmt, in plaats van de kas zelf als zonnepaneel te gebruiken, en dat water van 40-50°C wordt rondgepompt in een buizenstelsel in de kas, waar natuurlijke trek ervoor zorgt dat de warmte aan de lucht wordt afgestaan, c.q. watervoerende buizen in de teeltgrond worden begraven om die te koelen of te verwarmen.

In een Novem-project (1997-1999) is een geheel nieuw type warmtewisselaar ontwikkeld, de dunne-draad warmtewisselaar. Die werkt nog economisch bij een temperatuurverschil van 3–5 °C, zodat de maximale en minimale kastemperatuur slechts 15–20 °C uit elkaar kunnen liggen. Dit type maakt het voor het eerst economisch mogelijk een brandstofneutrale tuinbouwkas te ontwerpen.

Ik beperk me in deze notitie tot de warmtehuishouding, en de elektrische energie die voor die temperatuurregeling nodig is. Verlichting om de fotosynthese te bevorderen komt niet ter sprake. Er is overigens een kasareaal van 2000 ha. onbelichte groenteteelt in Nederland.

1.4. Fysische overwegingen

1.4.1. Warmtebalans

De kas wordt zo groot gezien dat de rand geen invloed meer heeft. We beschouwen dus alleen het dak- en het bodemoppervlak bij de warmtebalans. Door het dak naar binnen komt straling van de zon, en door het dak naar buiten is er warmteoverdracht als de temperatuur in de kas hoger is dan die daarbuiten.

a. Instraling van de zon

De verdeling over de tijd van de warmtestraling van de zon op een horizontaal oppervlak in Nederland vinden we in C. A. Velds, "Zonnestraling in Nederland" ISBN 90-5210-140-X. Voor deze startnotitie nemen we de interval tabel op p.66, die het jaargemiddeld aantal uren weergeeft waarin de zoninstraling in een bepaald interval ligt.

b. Warmteverlies door het dak

Voor het dak nemen we kanalenplaat, waarvan de warmtetransmissie en de warmteoverdracht zijn gegeven. Als de eisen voor het warmteoverschot minder hoog zijn, kan ook enkel glas worden genomen. Dit heeft een hogere lichttransmissie.

c. Warmteopslag in de ondergrond van de kas

Het is evident dat in de zomer een warmteoverschot moet worden opgeslagen, dat in de winter moet worden gebruikt om de kas op temperatuur te houden. Hiervoor is een grote massa nodig, en de enige mogelijkheid is, hiervoor de grond onder de kas te gebruiken. We doen dit door het grondwater op te pompen, hiermee te koelen cq te verwarmen, en het dan weer in de grond te laten vloeien. Bestaat de bodem uit ondoorlaatbare klei, dan moet een waterdoorlaatbare laag worden aangeboord om dit voor elkaar te krijgen.

1.4.2. Energie-overschot

De jaarsom van de globale straling in de Bilt varieert tussen 900 en 1100 kWh/m², en is gemiddeld 980 kWh/m²-jaar. De warmteoverdracht van een kasdak ligt rond 5 W/m²·K, dus als deze zonnestraling gelijkmatig over 365 dagen van 24 uur verdeeld zou zijn, en voor 86% binnendringt, en er geen uitwisseling met de grond is, dan zou de kas een temperatuur van $0.86 \cdot 980 \cdot 3 / 365 / 24 / 5 = 19^\circ\text{C}$ boven de buitentemperatuur, gemiddeld 10 °C, bereiken. Een temperatuur van 29°C is niet nodig voor de groei van planten, dus we hebben een overschot aan warmte, zij het op een nauwelijks bruikbaar temperatuurniveau.

We kunnen in principe dit overschot ook zien als een overschot aan licht door het dak, en dat kunnen we omzetten in elektrische energie door op momenten van een teveel

aan zonlicht fotovoltaïsche folie over een deel van het dak uit te rollen. Die elektrische energie kunnen we, via het elektriciteitsnet als buffer, gebruiken als hulpenergie voor de temperatuurregeling van de kas. PV folie is thans voor dit doel nog niet goedkoop genoeg. Shell en Akzo Nobel werken aan een proces voor flexibele fotovoltaïsche folie dat een veel lagere kostprijs belooft, voldoende om dit te zijner tijd in te zetten voor dit doel.

1.4.3. Vochtigheidsgraad

Planten moeten water kunnen verdampen voor hun stofwisseling, en de relatieve vochtigheid mag dus niet steeds 100% zijn. Als de kas gekoeld wordt, condenseert er water op de koelers, en als de kas wordt verwarmd, condenseert er water op de binnenkant van het dak. Maar als de kas gesloten is, en er niet gekoeld of verwarmd hoeft te worden, is het toch vaak nodig water uit de lucht af te voeren door op enkele plaatsen te koelen om water te condenseren; ergens anders kan dan worden verwarmd indien nodig. We moeten dus steeds beschikken over zowel koud, als warm grondwater.

1.4.4. Koolzuurgas

De kas blijft gesloten, omdat we in de zomer de warmte willen opslaan en dus niet door ventilatie willen kwijtraken. Er moet dus CO₂ worden gesuppleerd. Overigens heeft het sluiten van de kas ook voordelen, zoals het verminderen van besmetting van buiten met ziektekiemen en naar buiten met gewasbeschermingsmiddelen.

1.5. Ontwerp van de kas

De kas moet dus zo ontworpen worden dat als de zon schijnt, en de maximale temperatuur van de kas wordt bereikt, de kas wordt gekoeld met grondwater. Zakt de temperatuur onder de minimale kastemperatuur, dan moet dit grondwater de kas verwarmen.

1.5.1. De beglazing

a. Enkel glas

Normaal tuinbouwglas met een helling van 25° heeft een zontransmissie van 92% en een warmteoverdrachtscoëfficiënt van binnen naar buiten van 6,92 W/m²·K.

b. Kanalenplaat

Als we een groter warmteoverschot wensen, nemen we het materiaal dat voor dit doel al decennia in de handel is; bijvoorbeeld Lexan Thermoclear Dripgard Sheet van

General Electric Plastics in Bergen op Zoom. Voor de transmissie van zonnewarmte en voor de warmteoverdracht van binnen naar buiten worden door de fabrikant de volgende waarden opgegeven:

Type	2RS	3TS	2NS	4RS	5RS
Transmissie (%)	86	82	82	80	75
Warmteoverdracht ($W/m^2 \cdot K$)	3.46	2.38	2.9	2.1	1.76

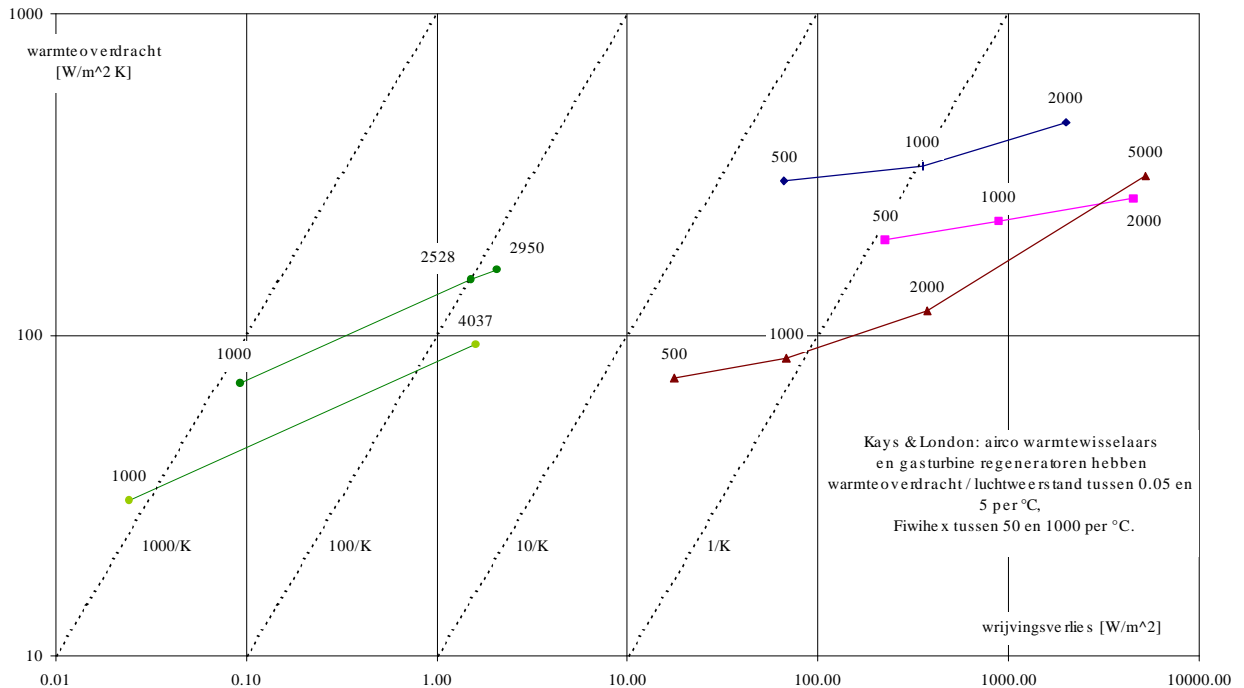
Het blijkt dat van deze typen alleen 2RS in aanmerking komt, omdat de warmteoverdracht laag genoeg, en de 4% hogere lichttransmissie een belangrijk voordeel is.

1.5.2. De warmteoverdracht van kas naar bodem

De enige praktisch haalbare techniek is het oppompen van grondwater, het uitwisselen van de warmte hierin met de lucht in de kas, en het weer terugbrengen van het grondwater op een andere plaats in de bodem. Daarvoor moeten een batterij warmtewisselaars worden geïnstalleerd, en wel onder de planten, omdat anders teveel licht zou worden weggenomen.

a. Warmtewisselaars

De gangbare typen warmtewisselaars voor water-lucht zijn zgn. plate-fin-tube warmtewisselaars in autoradiatoren en airconditioners. Deze werken bij een temperatuurverschil van 20–80 °C, hebben een veel te hoge luchtweerstand en zijn dus voor ons doel onbruikbaar. In een Novem-project (1997-1999) is een geheel nieuw type warmtewisselaar ontwikkeld, de dunne-draad warmtewisselaar. Dit type maakt het voor het eerst economisch mogelijk een brandstofneutrale tuinbouwkas te ontwerpen. Het blijkt dat de Fiwihex warmtewisselaars een factor 30 zuiniger met hulpenergie zijn dan de huidige typen. Met de bestaande typen zou het elektriciteitsverbruik 30 x zo hoog zijn, en zou er geen netto besparing meer overblijven.



Bovenstaande figuur geeft een vergelijking tussen dunne-draad warmtewisselaars (groene lijn) en de gebruikelijke plaat-vin warmtewisselaars gepubliceerd in Compact Heat Exchangers, 3rd reprint edition, Krieger, 1998, introduction, p. 4. De getallen bij de lijnen zijn Reynoldsgetallen, een maat voor de luchtsnelheid x kanaalopening door de warmtewisselaar.

b. Luchtbeweging

De belangrijkste hulpenergie die voor de warmteoverdracht tussen grond en lucht nodig is, is het ventilatorvermogen. Een autoradiateur of een airco werkt bij een een luchtdrukverschil van 150–400 Pa. De Fiwihex warmtewisselaar werkt bij een drukverschil van 10 Pa en heeft dus slechts een fractie van de elektrische energie nodig om een zelfde hoeveelheid warmte over te dragen. Overigens is een luchtbeweging ook buiten de warmtewisselaars van belang, omdat tijdens koeling de warmte van onder het dak naar beneden moet worden gebracht. Daarvoor moet een verticale luchtsnelheid van 3 m/s worden ingesteld, equivalent met 5 Pa, om een thermische inversie van 30 °C over 4 m hoogte te breken. De uittreesnelheid van de huidige typen ligt in die orde.

1.5.3. Haalbaar minimum in hulpenergie

In Kays & London, "Compact Heat Exchangers" (1997) wordt uitvoerig ingegaan op de verhouding tussen warmteoverdracht ($W/m^2 \cdot K$) en wrijvingsenergie (W/m^2) van lucht aan een vaste wand. Het is evident dat met stijgende brandstofkosten deze verhouding steeds hoger moet komen te liggen. Dit komt ook doordat bij een veel lager

temperatuurverschil, en dus een veel lager energieverlies, tussen de twee media, bij dezelfde warmtestroom een veel grotere hoeveelheid lucht vervoerd moet worden, omdat de lucht per keer maar enkele °C wordt opgewarmd.

a. Theoretisch

Theoretisch geldt als maximum voor de verhouding tussen warmteoverdracht ($W/m^2 \cdot K$) en wrijvingsenergie (W/m^2) van lucht de Chilton-Colburn relatie: $j_H = St \cdot Pr^{2/3} = f/2 = \tau/\rho v^2$, waar het Stantongetal de verhouding aangeeft tussen overgedragen en meegevoerde warmte, het Prandtlgetal de verhouding is tussen warmtetransport en impulstransport in lucht, en f de verhouding tussen de schuifspanning τ aan de wand en de kinetische druk van de lucht. Deze theorie berust op het feit dat de impuls-transport en het warmtetransport in een ideaal gas op hetzelfde mechanisme berust. $J_H = f/2$ laat zich vertalen, wanneer we f onafhankelijk van v veronderstellen, in een verhouding tussen warmteoverdracht ($W/m^2 \cdot K$) en wrijvingsenergie (W/m^2) van lucht van $(1500/v^2) K^{-1}$, waarin v de lichtsnelheid is.

b. Praktisch

De hulpenergie/warmte verhouding van de warmtewisselaarontwerpen in Kays & London liggen tussen $0.2/v^2$ en $1/v^2 K^{-1}$, bij gangbare typen warmtewisselaars, zgn. plate-fin-tube warmtewisselaars in autoradiateurs en airconditioners is die verhouding ook ca. $1/v^2/K$.

De Fiwhex warmtewisselaars halen op zich wel $1000/v^2$ per Kelvin, maar inclusief de efficiency van de huidige electromotor en de waaier en de meegegeven kinetische energie aan de lucht wordt dit $26/v^2 K^{-1}$, dus een factor 30 "zuiniger" dan de thans commerciële typen.

c. Technologie van 2002

Het thans in ontwikkeling zijnde Fiwhexproduct heeft bij maximale lichtsnelheid een warmteoverdracht tussen instromend water en instromende lucht van $170 W/K$, kost voor een serie van 10.000 stuks, voldoende voor 3 hectare kas, $\text{€}/(W/K)$, en gebruikt een elektrisch vermogen van 58 Watt bij volle lichtsnelheid, en dit vermogen is evenredig met $v^{2.2}$. Hiermee is een brandstofbesparing van 95% mogelijk op de gebruikelijke $60 m^2$ aardgas per jaar voor verwarming.

Een prototype met deze eigenschappen is sinds zomer 1998 geïnstalleerd in een $12 m^2$ minikasje om de duureigenschappen na te gaan. Vervuiling van de warmtewisselaar is nog niet te zien, de kas wordt tussen 1 en $30^\circ C$ gehouden met een elektriciteitsgebruik van $40 kWh/jaar$ en het water van een zwembad als warmteopslag.

d. Technologie van 2020

Het is te verwachten dat het hulpenergiegebruik nog een factor 3 kan dalen als elektronisch gecommuteerde permanent magneetmotoren worden ingezet. Hiervoor zijn grotere series nodig, want deze motoren moeten voor dit doel worden ontwikkeld. Ook zal het dan mogelijk zijn om de zoninstraling te regelen met het uitrollen van PV folie over het kasdak, waardoor het energie-overschot verkocht kan worden.

1.5.4. De warmteopslag in de bodem

We moeten per m² kasoppervlak ca. 400 MJ warmte opslaan om in de winter de kas op minimum temperatuur te houden. De warmtecapaciteit van het voor Nederland karakteristieke zand onder de grondwaterspiegel is 3MJ/m³K. Laten we de grond 10 °C in temperatuur wisselen, dan hebben we dus een $400/3/10 = 13$ meter hoog grondpakket nodig, bij 5 °C wordt het 26 m; we kunnen dan een nauwere band tussen minimum- en maximumtemperatuur handhaven.

We gaan in deze startnotitie nog niet in op de exergetisch optimale sturing van de temperatuurverschillen in de grondopslag. Dat vereist veel meer kennisinbreng van de teelt, de nodige verschillen tussen de kaslucht en het groeisubstraat (Freesia's!) en van de optimale combinatie van zoninstraling en temperaturen. Maar het is evident dat steeds met zo warm mogelijk water moet worden gekoeld, en met zo koud mogelijk water verwarmd, om zo weinig mogelijk exergie te verliezen. Bij het vermijden of uitstellen van knopvorming bij bolgewassen is het zelfs denkbaar dat we in de winter enig grondwater met buitenlucht tot 10 °C moeten koelen, om (zonder warmtepomp!) voldoende koelvermogen te hebben om de bollen koud te houden; en tevens, om ook een plaats met grondwater van boven 30°C te hebben, om de bloeiperiode te kunnen bepalen.

a. Diepe aquifers

Er zijn thans in Nederland enkele honderden projecten gerealiseerd waarbij een diepe (50–100 m) aquifer is aangeboord met telkens een "koude bron" en een "warme bron" om dit water te circuleren over de klimaatinstallatie van een groot gebouw dat gekoeld en verwarmd moet worden. De temperaturen variëren hierbij van 90°C tot 5°C, en zijn zover buiten de normaal voorkomende grondtemperatuur, dat de natuur schade zou kunnen ondervinden. Daarom wordt een diepe aquifer aangeboord. Deze gaten kosten tienduizenden euro's, en zijn daarom voor ons doel niet economisch.

b. Direct onder de kas: het freatische vlak

Wij kunnen in dit ontwerp met zeer krachtige warmtewisselaars buffertemperaturen gebruiken tussen 10 en 25 °C, juist in de range van natuurlijk voorkomende

grondtemperaturen. Bovendien behoeven we niet buiten het kasoppervlak te reiken, omdat we met een pakket van 10–20 m diepte voldoende massa hebben. En in de kas is van natuurlijke begroeiing geen sprake. We hebben nu te maken met boringen die 50 € per stuk kosten. Bij een goed gekozen bron- en putconfiguratie kan storende invloed op het grondwaterpeil worden uitgesloten. Ook is er bij gebruik van het freatische water geen vergunningprobleem; men kan in Nederland koeiendrinkputten nu eenmaal bezwaarlijk verbieden. We kunnen bij 25°C ook werken met PVC verbuizing en hebben geen ontkalkingsinstallatie nodig. Wel moet zuurstof worden uitgesloten, het grondwater is bijna altijd anaeroob en bevat opgelost Fe^{II}, dat neerslaat als Fe(OH)₃ op alle wanden als er lucht bij komt.

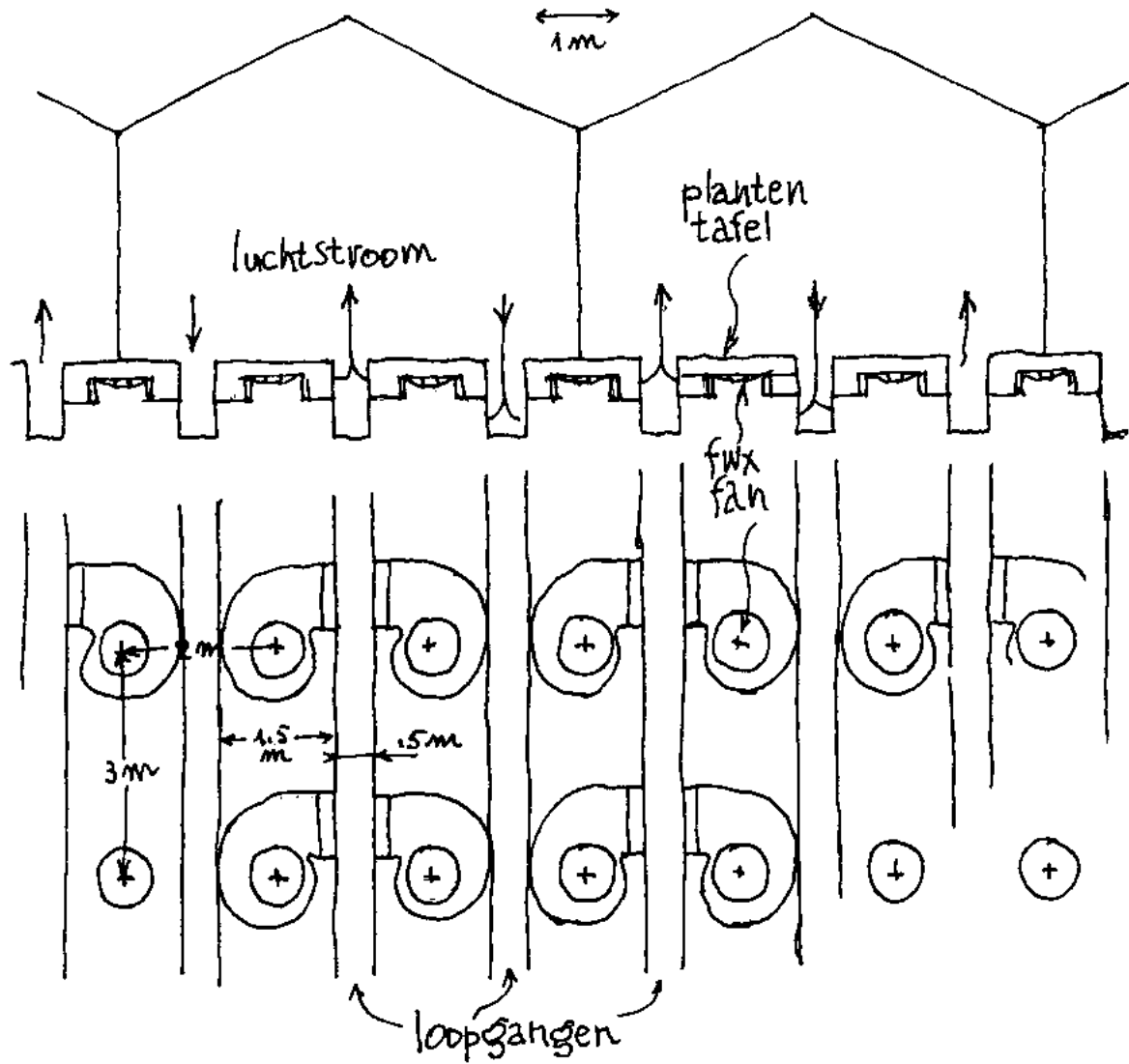
c. Warmteverlies naar de omgevende grond

In het freatische vlak hebben we bovendien het voordeel dat we geen warmte verliezen naar boven, omdat in Nederland de grondwaterspiegel meestal niet dieper dan 2 m zit, en de laag tussen het bufferpakket en de kas binnen een jaar op temperatuurevenwicht is. Bij een kasoppervlak van >1 hectare kunnen we de verliezen door de randen van het pakket verwaarlozen. Wel verliezen we warmte naar onderen. Dit verlies is te berekenen met de theorie van warmtepenetratie in een half-oneindig medium. De temperatuurvereffeningscoëfficiënt van natte zandgrond is $a = \lambda / C_p \rho = 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. De momentane warmteoverdrachtscoëfficiënt is $(\lambda \cdot C_p \cdot \rho / \pi t)^{1/2}$, of $581/t^{1/2} \text{ W/m}^2\text{K}$, en de gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt over de periode tot t is tweemaal zo groot, of $1162/t^{1/2} \text{ W/m}^2\text{K}$. We hebben in de kas een warmte-overschot van $1 \text{ GJ/m}^2\text{-jaar}$ of 32 W/m^2 . Als we het grondpakket 10 °C opwarmen is er een gemiddeld warmteverlies tot het tijdstip t na de start van $1162 \cdot 10 / t^{1/2}$. Dit is dus gelijk aan het overschot als $t^{1/2} = 11620/32 \text{ s}^{1/2}$ of $t = 37 \text{ uur}$. Na 1 maand is het 7 Watt, na 4 maanden 3,6 W, 11% van het overschot. Dit verlies is op den duur te verwaarlozen. Wel moeten we de 12 m^3 grond onder onze m^2 kas 10 °C opwarmen, en dat kost 400 MJ. Maar ook dat is binnen één seizoen gebeurd met een overschot van $1 \text{ GJ/m}^2\text{-jaar}$.

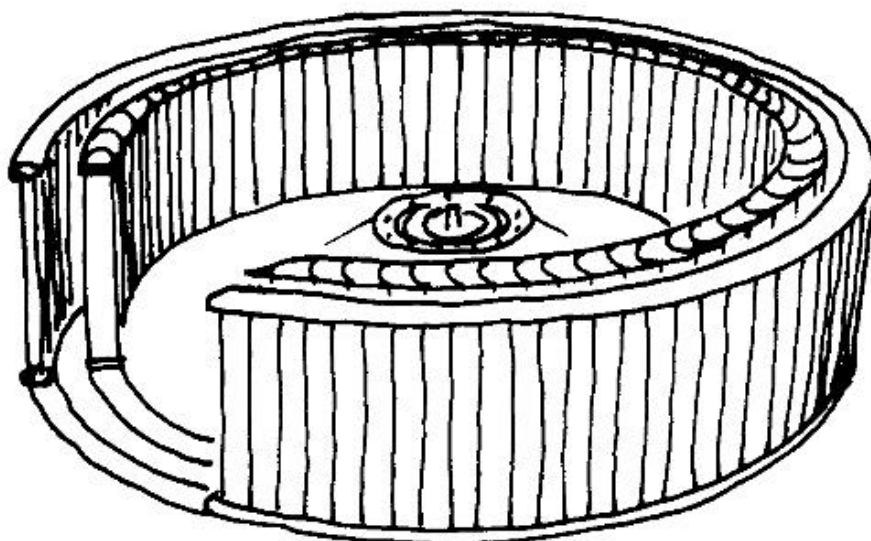
1.5.5. Bronbemalingstechnologie

Een manier om de verplaatsing van grondwater door een zandpakket onder de kas te houden is, om aan de twee tegenoverliggende (lange) zijden van de kas een rij gaten te spuiten, zoals gewoonlijk bij een bronbemaling om een bouwput wordt gedaan, en de ene rij als bron, de tegenoverliggende rij als put te schakelen. We kunnen dan van een bestaande technologie gebruik maken. Bij een goed doorlaatbare zandbodem (Almelo) kunnen we met 10 cm grondwaterniveaunderschil per 70 mm Ø gat 10 kW leveren of bergen, is mijn ervaring. Is de bodem slecht doorlaatbaar zodat te grote grondwaterspiegelverschillen ontstaan, dan moet een patroon van gaten worden gekozen, waarbij bron en put elkaar afwisselen.

1.5.6. Maatschets van de kas



1.5.7. Schets van de huidige warmtewisselaarprototypen



1.6. Mathematisch model

Ik heb in Excel een model gemaakt van deze kas met als input het aantal uren per jaar met zoninstraling in een interval van 0.2 MJ/uur; 15 intervallen; tabel 4.8 van C.A. Velds als vaste parameter.

Geval	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Enkel glas	x	x	x	x	x					
6 mm Th.clear kanalenplaat						x	x	x	x	x
T kas max °C	40	40	30	30	30	40	40	40	40	30
T kas min °C	10	10	10	10	18.8	10	10	20	20	15
T grondopslag °C	19	14	13	16	21	12	16	26	24	19
Electr. Energie kWh/m ²	3.4	6.3	8.7	6.4	47	7	3.7	7.8	10.6	9.9
Brandstofbesparing, %	98.4	97	96	97	87	96.7	98.2	96.3	95	95.3
Payout tijd, jaar	3.2	2.7	4.7	5.6	17	2.7	3.0	5.3	4.8	7.4
Max vorst, °C	46	23	27	51	42	23	54	96	64	83
Warmte-overschot kWh _{th} /m ²	190	19 3	31 7	31 4	5	411	407	232	235	416

We zien, dat wanneer we met <40 en >10 °C kastemperatuur genoeg nemen, we met enkel glas kunnen werken: geval 1 en 2. Moeten we koelen tot 30 °C, dan heeft glas zelfs een kortere terugverdientijd dan kanalenplaat, omdat door de grotere warmtelek naar buiten minder in warmtewisselaars geïnvesteerd hoeft te worden. Maar bij >18,8 °C houdt het op, het warmteoverschot wordt 0 en de terugverdientijd 17 jaar; onacceptabel.

Met kanalenplaat is >20 °C goed te halen, zij het met een terugverdientijd van 5 jaar, omdat het grondwater ter koeling niet zo koud kan zijn.

Bij de twee gevallen met dezelfde maximale en minimale kastemperatuur is het ene geval dat met de grondtemperatuur die de minimale pay-out tijd geeft, het andere resp. met de maximale energiebesparing.

In alle gevallen behoudens geval 5 is het energetisch haalbaar om in perioden met felle zon de kas af te schermen met PV folie, de opgewekte elektriciteit te gebruiken voor het bergen van de warmte in de grond, en het overschot in het net terug te voeren. Daarmee kan de kas zijn warmteoverschot omzetten in een gemakkelijker te exporteren elektriciteitsoverschot. Oprolbare PV folie heeft een rendement van ca. 5 %, in geval 2 leidt een bedekking in een periode van 400 uur tot een warmteoverschot = 0 en een elektriciteitsproductie van 14 kWh/m², dus een overschot van 7.7 kWh/m². In de andere gevallen dan geval 5 is dit overschot groter. Economisch is dit (nog) niet, de 7.7 kWh brengen thans 0.77 € per m² jaar op, en PV folie kost nu €300/m².

De pay-out tijd is de investering in warmtewisselaars ca. 1€(W/K) gedeeld door de netto energiebesparing: de aardgaskosten per jaar met 60 m³ gas/m²kas ca. 0.15 €/m³ minus de extra elektriciteitskosten ca. 0.1€/kWh.

De extra kosten van de dakbedekking in het geval van kanalenplaat zijn dus niet meegenomen.

In geval 8 is de temperatuur van de grondopslag zo hoog dat de warmte ook gebruikt kan worden om nabijgelegen woningen of industrieën te verwarmen. Een kas van 10000 m² heeft dan 10000x 232 kWh = 8350 GJ = 260000 m³ aardgas aan warmte over, wat voor ruimteverwarming tot 20°C aangewend kan worden met dunne-draad warmtewisselaars.

2. Vragen voortkomend uit een expertmeeting over de startnotitie

Het essay van Dr.ir E. van Andel over een "Concept voor een Energieproducerende kas" is op 24 mei 2002 besproken met een aantal experts (bijlage). Het concept werd erg interessant en uitdagend genoemd met enkele verrassende nieuwe invalshoeken.

De conclusie was dat, voor een betere beoordeling van de kansrijkheid van (delen van) het concept het nodig is gedetailleerdere berekeningen uit te voeren en meer inzicht te geven in de mogelijkheden van ondiepe en diepe aquifers in Nederland.

De in de bespreking genoemde aspecten zijn:

1. Het maken van een massa (energie) balans in een kas.
2. Houdt ook rekening met de bufferende werking van het gewas o.i.v. van het watergehalte van de opstand (dit kan >80% van het versgewicht bedragen).
3. De invloed van de al of niet noodzakelijke mate van geslotenheid van de kas (kunnen b.v. onder extreme condities toch de luchtramen worden opengezet? In hoeverre bepaalt dat de dimensionering van de warmtewisselaars? Zijn mengvormen denkbaar, b.v. in de vorm van half-gesloten kassen?
4. De CO₂-behoefte van planten gedurende de verschillende seizoenen binnen een jaar (is er een patroon zichtbaar?).
5. De wijze van energieopwekking (centraal of decentraal).
6. Bekijken van de toelaatbare maximale en minimale temperaturen van verschillende gewassen.
7. Meenemen van de luchtvochtigheid jaarrond.
8. De reden waarom ondiepe grondwaterlagen niet gebruikt worden voor opslag van warmte maar uitsluitend de diepere grondwaterlagen.
9. Wat zijn de wettelijke (on)mogelijkheden voor het gebruik van ondiep (liggend vlak onder het freatisch vlak) grondwater? In hoeverre is thermische vervuiling een remmende factor? (over welke temperatuurschommelingen hebben wij het dan?)
10. Het belang van circulatie of luchtbeweging voor een goede temperatuurverdeling in de kas.
11. Het belang van verschillen tussen de tomaat, de roos of de potplant als model-gewas (in het laatste stadium pas deze verfijning aan brengen).
12. Probeer een inzicht in de grootte van de investering te krijgen.
13. Gebruik praktijkgegevens voor de diverse berekeningen.

De heer Van Andel is vervolgens gevraagd op genoemde punten een aanvullende quick scan uit te voeren en daarbij externe experts in te schakelen (IMAG te Wageningen en IF-technology te Arnhem).

3. Resultaten van de quick scan

3.1. Inleiding

Begin 2002 is in de kring van InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster en de Stichting Innovatie Glastuinbouw een zoektocht begonnen om het concept "Kas als ontwikkelen. Een van de gedachten was om een ontwerp te maken gebaseerd op basis van een gedurfde combinatie van technologieën. Aan Dr. E. van Andel werd de vraag voorgelegd voor zo'n concept een startnotitie te maken. Eén van de basiselementen daarvoor was een fundamenteel nieuw type "Fiwihex" warmtewisselaar. Dit apparaat, in 1997-1999 ontwikkeld met steun van Novem, combineert een hoge warmteoverdracht met een lage hulpenergie en een goede condensaat-afvoer, en is bedoeld om met een temperatuurverschil van slechts 3–5 °C tussen water en lucht economisch te werken. Daardoor kan de kas gesloten blijven, de warmte in de zomer worden afgevoerd naar het grondwater, dat dan weer 's winters wordt gebruikt om de kas op temperatuur te houden. In sommige situaties zou hiermee zelfs zonder warmtepomp een kas jaarrond geklimatiseerd kunnen worden.

De startnotitie met de eerste berekeningen van een energieproducerende tuinbouwkas werden besproken op een expert meeting in een tuinbouwkas te Waddinxveen. Het gepresenteerde concept resulteerde in een brandstofbesparing rond 95 % en een energieoverschot van 20–30 m³ aardgasequivalent per jaar per m² kasoppervlak, in de vorm van water van 25 °C.

Deze bijeenkomst resulteerde in een aantal vragen (zie hoofdstuk 2). In deze quick scan zijn deze als terms of reference gegeven, belangrijk was de eerste berekeningen te toetsen en de mogelijkheden voor diepe en ondiepe aquifers te onderzoeken. Met behulp van de kenniscentra IMAG (Wageningen UR, met expertise op gebied van glastuinbouw, energie en klimaatbeheersing) en IF-technology (Arnhem, expertise op het gebied van warmteopslag in aquifers), en met aanvullende metingen in het Fiwihex laboratorium is getracht de aanvullende vragen zo volledig mogelijk te beantwoorden. De rapportages van IMAG, IF-technology en het eigen onderzoek zijn in een apart werkdocument ondergebracht (InnovatieNetwerk-rapport, nr. 02.2.017, 2002).

3.2. Samenvatting

De simulatie met het programma "KASPRO" van IMAG toont aan dat:

- de kas het gehele jaar voor wat betreft de koeling gesloten kan blijven, maar dat de ontvochtiging het beste met buitenlucht kan plaatsvinden;
- de temperatuur grosso modo tussen 15 en 30 °C gehouden kan worden, mits een dubbel kasdek wordt ingezet;
- de vochtigheidsgraad beneden de 92 % r_H gehouden kan worden;
- beide grenzen nog verbeterd kunnen worden door een betere schakeling van de grondwaterputten c.q. optimalisatie van de watertemperaturen;
- de gewasproductie kan toenemen door de mogelijkheid om bij een beperkte dosering toch een hogere CO₂-concentratie te handhaven;
- Het resterende energiegebruik ongeveer 5 m³ per jaar per m² is;
- dat er een equivalent van 20 m³ aardgas per m² kas per jaar aan energie overschiet op een temperatuurniveau van 25 °C. Dit kan in principe voor verwarming van andere ruimten ingezet worden.

De studie van IF-technology toont aan dat:

- in bijna alle kastuinbouwgebieden de gevraagde warmteopslag in diepe of ondiepe aquifers realiseerbaar is;
- opslag in diepe aquifers voordeliger is dan in ondiepe;
- in een vroeg stadium met de vergunningprocedure aangevangen moet worden;
- de warmteopslag vooralsnog maatwerk is, omdat de grondwateromstandigheden ter plaatse sterk verschillend kunnen zijn. Daardoor zijn de kosten hoger dan tijdens de brainstorm geschat.

De aanvullende metingen bij Fiwihex tonen aan dat:

- de koeling van de tuinbouwkas met laagliggende, condenserende dunne-draad warmtewisselaars goed te doen is, wanneer de koele lucht in een straal naar boven wordt geblazen;
- het blijkt, dat condensatie leidt tot een hoge warmteoverdracht;
- het condensaat kan goed worden opgevangen, waardoor het als make-up water voor het bewateringscircuit gebruikt kan worden, juist als dit nodig is, c.q. als de planten veel verdampen.

3.3. Terms of reference

Dit rapport is geschreven in opdracht van InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster en de Stichting Innovatie Glastuinbouw.

In deze paragraaf worden de gestelde vragen systematisch behandeld.

In cursief is het antwoord samengevat.

- Het maken van een massa (energie) balans in een kas
De KASPRO-simulatie van IMAG maakt elk uur van het jaar een energiebalans op basis van de ingestraalde warmte, de warmteoverdracht tussen grondwater en kaslucht, en de temperatuur van het grondwater. De resultaten zijn samengevat in zgn. jaarbelastingduurkrommen van temperatuur en luchtvochtigheid. Ook de aquifertemperaturen zijn als functie van het seizoen weergegeven.
- Houdt ook rekening met de bufferende werking van het gewas onder invloed van het watergehalte van de opstand (dit kan >80% van het versgewicht bedragen).
De IMAG-simulatie houdt rekening met de "canopy" van planten, die afhankelijk van de temperatuur, de lichthoeveelheid en de tijd van de dag, water verdampen. Van de ingestraalde warmte wordt ca. 2/3 in verdamping omgezet. Dat betekent dat ook 2/3 door condensatie moet worden afgevoerd. Dit condensaat kan direct voor de planten als bewatering worden ingezet.
- De invloed van de al of niet noodzakelijke mate van geslotenheid van de kas (kunnen b.v. onder extreme condities toch de luchtramen worden opengezet? In hoeverre bepaalt dat de dimensionering van de warmtewisselaars? Zijn mengvormen denkbaar, b.v. in de vorm van half-gesloten kassen?
De IMAG-simulatie gaat ervan uit dat vochtoverschotten die niet tijdens koeling via condensatie worden afgevoerd door middel van ventilatie worden afgevoerd. Een andere mogelijkheid is, te koelen met condensatie en tegelijk verwarmen. Daarvoor zijn niet meer warmtewisselaars nodig; maar wel een extra bronpaar dat in de winter moet worden teruggekoeld tot 10 °C.
- De CO₂-behoefte van planten gedurende de verschillende seizoenen binnen een jaar (is er een patroon zichtbaar?)
Binnen de ons gestelde tijd hebben we dit probleem niet kunnen behandelen. Hiervoor zijn publicaties van TU-Delft gebruikt, die aangeven dat de produktievermindering door een groter verschil tussen minimale en maximale kas-temperatuur overgecompenseerd worden door de mogelijkheid, in een gesloten kas de CO₂-spiegel op optimale waarde te houden. In het vervolg moet hier meer aandacht aan worden besteed.
- De wijze van energieopwekking (centraal of decentraal)
Het energiegebruik beperkt zich tot de elektrische energie die nodig is om

grondwater en kaslucht door de warmtewisselaars te voeren. Dit kan gewoon uit het elektriciteitsnet worden betrokken.

- Bekijken van de toelaatbare maximale en minimale temperaturen van verschillende gewassen

Dit is nog niet gedaan; voor het gewas geldt dat de gemiddelde etmaaltemperatuur belangrijker is dan het verschil tussen minimale en maximale temperatuur, mits die niet verder dan 15 °C uiteen liggen.

- Meenemen van de luchtvochtigheid jaarrond

De IMAG simulatie geeft op elk moment de luchtvochtigheid. Het blijkt dat die binnen de gestelde grenzen kan worden gehouden.

- De reden waarom ondiepe grondwaterlagen niet gebruikt worden voor opslag van warmte maar uitsluitend de diepere grondwaterlagen

Het rapport van IF-technology geeft aan dat in de meeste locaties de diepe aquifer te prefereren is boven de ondiepe, omdat per gat veel meer debiet kan worden gerealiseerd.

- Wat zijn de wettelijke (on)mogelijkheden voor het gebruik van ondiep (liggend vlak onder het freatisch vlak) grondwater? In hoeverre is thermische vervuiling een remmende factor? (over welke temperatuurschommelingen hebben wij het dan?)

Het rapport van IF-technology geeft aan dat er een water- en een warmtebalans moet worden gehandhaafd, en tevens dat milieu-effecten op de omgeving moeten worden vermeden; bovendien is de maximale infiltratietemperatuur rond 25 °C, en in de IMAG simulatie en in de Fiwihex metingen is daarmee ook rekening gehouden. Het warmte-overschot moet worden weggekoeld. Bij gebruik van ondiep grondwater zijn de milieu-invloeden op de omgeving dikwijls onacceptabel.

- Het belang van circulatie of luchtbeweging voor een goede temperatuursverdeling in de kas

De metingen bij Fiwihex laten zien dat een verticaal gerichte luchtstroom, met de snelheid die goed bereikbaar is met een slakkenhuis rond de warmtewisselaar, goed in staat is de kastemperaturen in verticale zin bijeen te brengen. Bovendien blijkt dat condensatie de warmteoverdracht sterk bevordert. Dit resultaat is nog niet in de IMAG-simulatie meegenomen. Het moet nog nader worden gekwantificeerd.

- Het belang van verschillen tussen de tomaat, de roos of de potplant als model-gewas (in het laatste stadium pas deze verfijning aan brengen)

De opinie van IMAG is dat deze temperatuurbeheersing voor de potplantenteelt in ieder geval voldoende is. Onbelichte groenteteelt kan ook met dit systeem werken. Belichte teelten kennen een dermate hoog warmteoverschot dat deze niet in aanmerking komen voor systemen waarin zomerse warmteoverschotten in de winter worden gebruikt.

- Probeer een goed inzicht in de grootte van de investering te krijgen
Het is in dit stadium niet goed mogelijk de investeringen goed in te schatten. De reden is dat het erg afhangt van de fysische parameters die in de model-berekeningen zijn gebruikt. Daarom is het beter eerst verdere experimenten af te wachten alvorens hier een schatting te geven.
- Gebruik praktijkgegevens voor de diverse berekeningen
Dit is zoveel mogelijk gedaan voor alle onderdelen. De volgende slag moet worden gemaakt met een proefopstelling van een warmtewisselaarpaar in een kas, met de juiste watertemperaturen, om de warmteoverdracht in een praktijksituatie zo goed mogelijk te meten.

Een belangrijke vraag is waarom de genoemde energiebesparing nu wel en tot voor kort niet kon worden gerealiseerd. Naast de bijdragen aan het systeem van het voorgestelde kasomhulsel (GE kanalenplaat) en de diepe aquifer voor warmteopslag is dit vooral mogelijk door het gebruik van de nieuwe zeer efficiënte warmtewisselaar.

Kort samengevat :

- De warmtewisselaar is gebaseerd op een andere techniek (dunne draden).
- Warmteoverdracht aan een dunne draad is een factor 10 – 20 efficiënter dan aan een vlakke plaat, zoals bij de thans commerciële typen.
- De condens heeft op een dunne draad steeds een druppelvorm, zoals de dauw op een spinnenweb, en stoort de warmteoverdracht dus niet.
- De verhouding warmteoverdracht – wrijvingsenergie is een factor 30 groter dan bij de thans gebruikelijke typen. Het is dit getal dat de energiebesparing mogelijk maakt.
- De uitvoering is geheel symmetrisch, waardoor bij elke watergang eenzelfde temperatuurverschil kan worden gehandhaafd. Dit temperatuurverschil is gelijk aan het verschil in temperatuur tussen de warme aquiferbron en de koude. Hierdoor kan in theorie het verschil tussen maximale en minimale kas temperatuur beperkt blijven tot dit temperatuursverschil. Om te grote investeringen te vermijden hebben wij de ruimte tussen de kastemperaturen wat groter gemaakt dan die tussen de aquiferbrontemperaturen.

3.4. Conclusies

De algemene conclusie is dat de aannamen, die op de expert meeting op 24 mei 2002 zijn gedaan, door deze quick scan worden bevestigd. Het is mogelijk, een energieproducerende tuinbouwkas te bouwen met gebruikmaken van grondopslag, en Fine Wire Heat exchangers. Het energiegebruik dat rest, is de elektriciteit die nodig is om het grondwater en de kaslucht door de warmtewisselaars te leiden. Dit is, uitgedrukt

in aardgasequivalenten, rond de 5 m³ per m² kas per jaar. Het energieoverschot is equivalent aan 20 m³ aardgas per m² kas per jaar, c.q. 188 woningequivalenten per hectare kas. Dit kan alleen aangewend worden voor de verwarming van dichtbijgelegen ruimten die zijn uitgerust met extreem lage-temperatuur warmtewisselaars, zoals vloer- of wandverwarming of Fine Wire luchtverwarmers. Ook is een energieoverschot alleen te realiseren in een kasomvang van 1 hectare of meer.

3.5. Samenvatting resultaten modelberekeningen IMAG¹

In de modelberekeningen van IMAG wordt de feasibility aangetoond van een door grondwater gekoelde en verwarmde kas. Met de installatie van 50 W/m²K, ofwel 1 Fiwihex fan per 3,5 m² grondoppervlak, kan de kas 90 % van de tijd binnen de 30 °C en 15 °C, en beneden de 92% relatieve vochtigheid worden gehouden. Het warmteoverschot is dan ca. 650 MJ/m² per jaar, voldoende om met een hectare kas 188 Novem referentiewoningen te verwarmen met 35 GJ of 1100 "m³ aardgas" per woning per jaar.

Het aquifersysteem moet nog worden geoptimaliseerd, waardoor de eisen van ontvochtiging en verwarmen / koelen beter op elkaar kunnen worden afgesteld. Nakoelen van een deel van de aquifer met koude buitenlucht in de winter, en zorgvuldige regeling van de temperatuur van het warme water dat in de grond wordt opgeslagen zijn daarvan elementen. Hiervoor was in deze quick scan geen tijd of budget.

Een punt is nog het hoge energiegebruik van de aquiferpompen, 1 MJ/m³ verpompt water. Navraag bij IF-technology leert, dat dit standaardgetal geldt voor een kantoorgebouw met 40 m opvoerhoogte. Voor een tuinbouwkas is 3 m opvoerhoogte voldoende, zodat met een ander soort pompen 65 kJ/m³ bereikbaar is.

Het totale elektriciteitsverbruik wordt dan 12 kWh/m²-jaar, equivalent aan 3 m³ gas per m² kas per jaar, d.w.z. ca. 95 % primaire brandstofbesparing. Wanneer de geëxporteerde warmte wordt vertaald in aardgasequivalenten, is dat 20 m³ gas per m² kas per jaar. Zo zou dus het gasverbruik van zeg 60 m³/m² kas per jaar gaan naar minus 17 m³ per m² kas per jaar.

Natuurlijk moet hier wel heel wat voor gebeuren, nl. een woonwijk annex de kas gebouwd worden, waarvan de woningen met een extreem laag-temperatuur verwarming, zoals vloer-, wand- of Fiwihex-luchtverwarming zijn uitgerust.

Het simulatieprogramma "KASPRO" is niet in staat om uit de grotere temperatuurwisseling tussen koude en warme perioden de negatieve invloed uit te rekenen op de

¹ Zie InnovatieNetwerk-rapport, nr. 02.2.017, 2002.

groei van de teelt. In *van Paassen, Reudink, van de Braak, Klimaatbeheersing 21, # 6, juni 1992, p. 171*, zijn de opbrengstverschillen van tomaten van 12 proefvelden vergeleken, waarbij blijkt dat de opbrengst 10 % toeneemt als de mechanische ventilatie de temperatuur tussen 19 en 26 °C houdt, vergeleken met natuurlijke ventilatie (kasramen) tussen 16 en 30 °C. Deze toename in temperatuurafstand tussen minimale en maximale temperatuur is goed te vergelijken met de toename die het gevolg is van de overgang naar een warmtepomploos grondwatersysteem. Maar bij dit grondwatersysteem kan de kas gesloten blijven, en daardoor kan de optimale CO₂-concentratie blijvend gehandhaafd worden. Voor de lopende experimenten met de gesloten kas wordt een productietoename van 10% verwacht. We kunnen dus concluderen, dat het reëel is te veronderstellen dat het voorgestelde systeem productieneutraal is.

3.6. Samenvatting bevindingen IF-technology²

Het belangrijkste resultaat in dit rapport is dat voor elke locatie een aangepast systeem moet worden ontworpen, omdat de ondergrond plaatselijk sterk kan verschillen. Bovendien zijn de vergunningsregels mogelijk voor elke locatie verschillend, omdat de verlener rekening houdt met de invloed op nabijgelegen gronden. Het is dus het beste, overleg omtrent de vergunningverlening vooraf te laten gaan aan de locatiekeuze. Een warmteoverschot moet worden afgevoerd of teruggekoeld, en bij een te kleine installatie kan door de grondwater stroming een warmtebalans zoals in de vergunning zou kunnen worden voorgeschreven, niet worden verwezenlijkt. Het blijkt, dat de aanname, dat een ondiepe of zelfs freatische aquifer goedkoper is dan een diepe niet klopt. Dit komt doordat het maximale waterdebiet in de in Nederland voorkomend diepe aquifers zoveel groter is dat het de moeite waard is dieper te boren. De kosten voor het grondwatersysteem zijn evenwel veel hoger dan aanvankelijk geschat. Hier moet dan ook zeker meer aandacht aan worden besteed.

3.7. Samenvatting resultaten koelexperiment met de warmtewisselaar door Fiwihex²

Bij de berekening die tijdens de brainstorm is gepresenteerd, is uitgegaan van de warmteoverdrachtsgetallen die in droge toestand in een woonruimte zijn gemeten. Bij een kas moeten de koelers onder de planten gesitueerd worden, omdat schaduw een

² Zie InnovatieNetwerk-rapport, nr. 02.2.017, 2002.

direct negatieve invloed heeft op de productie. Daardoor wordt de koeling bemoeilijkt, omdat er zonder extra maatregel een groot temperatuurverschil ontstaat tussen bovenin en onderin de kas. Bovendien treedt er onder deze omstandigheden condensatie van water op, omdat in een tuinbouwkas de ingestraalde warmte voor het grootste deel in waterverdamping wordt omgezet. We hebben dus experimenten uitgevoerd met een warmtewisselaar, die onderin een ruimte is gezet, die op 30 °C en 85–90 % relatieve vochtigheid wordt gehouden.

Het blijkt, dat de waarden, die in de brainstorm zijn gepresenteerd in de praktijk-situatie nog worden overtroffen. De reden daarvoor is dat onder condenserende omstandigheden de warmteoverdracht hoger blijkt te zijn. De berekeningen die met het simulatiemodel KASPRO zijn uitgevoerd hebben dit effect reeds meegenomen. Een echte kwantitatieve meting moet nog gebeuren, met name de warmteoverdracht als functie van het elektrisch vermogen en met de optimale aquifer opslag water-temperaturen. Het is het beste, dit dan ook in een kas met planten te doen. Deze precieze gegevens over de fysische eigenschappen van de warmtewisselaars moeten dan in tweede instantie weer in "KASPRO" worden ingevoerd.

Bijlage 1: Deelnemers expertmeeting

“Energieproducerende kas”

d.d. 24 mei 2002 te Waddinxveen

Prof.dr.ir. H.E.A. van de Akker	TU-Delft
Dr.ir. E. van Andel	Fiwihex Almelo
Dr.ir. J.C. Bakker	Priva Hortimation B.V. De Lier
Ir. C.H.M.G. Custers	Novem Utrecht
De heer S. Huisman	Tuinbouwondernemer Bergerden
Dr. H.J. Huizing	InnovatieNetwerk
Prof.dr. C. Kleijn	TU-Delft
Dr.ir. J. van Liere	KEMA Nederland B.V. Arnhem
De heer J. van de Nouweland	Tuinbouwondernemer Waddinxveen
Dr.ir. H.J. van Oosten	InnovatieNetwerk/SIGN
Dr. S. Santen	Shell Global Solutions Int. B.V. Den Haag