

OVER NATUURKUNDE EN DUURKUNDE

Door prof.dr.ir. Gerard P.A. Bot



WAGENINGEN UNIVERSITEIT

WAGENINGENUR

Afscheidsrede uitgesproken op 10 mei 2007 in de Aula van
Wageningen Universiteit.

Rede bij het afscheid van prof.dr.ir. G.P.A. Bot als hoogle-
raar Technische natuurkunde van Wageningen Universiteit

“Over Natuurkunde en Duurkunde”

Uitgesproken op 10 mei 2007 in de Aula van Wageningen
Universiteit

Mijnheer de Rector Magnificus, collega's, familie, vrienden
en verdere aanwezigen,

Op het eind van de negentiende eeuw was de algemene opi-
nie dat de natuurkunde af was en dat alleen nog enkele kleine
ongerijmdheden moesten worden weggewerkt. De geschiede-
nis heeft bewezen dat men zich hierin schromelijk vergiste.
Er wordt wel beweerd dat in Wageningen dingen soms wat
later gebeuren, maar een feit is dat men daar op het eind
van de twintigste eeuw dacht dat de natuurkunde voor
Wageningen af was. Toen de universiteit geconfronteerd
werd met ingrijpende bezuinigingen werd het aantal leer-
stoelen in etappes teruggebracht van 110 naar 75 waarbij in
de laatste etappe onder andere de leerstoel in de Technische
natuurkunde werd opgeheven vanuit de overtuiging dat
verder onderzoek op dit basisvakgebied in Wageningen
niet meer nodig was. De leerstoelgroep werd gesplitst in
een deel dat zich bezig hield met onderzoek op het gebied
van fysische meetmethoden en onderwijs in de algemene
natuurkunde en dit deel werd toebedeeld aan de leerstoel-
groep Biofysica. Het andere deel, dat zich bezig hield met
onderzoek en onderwijs op het gebied van de fysische
transportverschijnselen in brede zin, kreeg gastvrijheid

binnen de leerstoelgroep Meet-, regel- en systeemtechniek. Vanmiddag wil ik het vooral hebben over dit tweede deel, het eerste deel is onlangs gepresenteerd in de inaugurale rede over de Biofysica van collega Van Amerongen. Ik wil daarbij aantonen dat er ontwikkelingen zijn waarbij deze natuurkunde wel degelijk een rol speelt in puur Wageningse vakgebieden.

Ik heb de gewone leerstoel Technische natuurkunde vanaf mijn aanstelling in 1993 op deeltijdbasis ingevuld in fifty/fifty combinatie met mijn functie bij achtereenvolgens het IMAG, na reorganisatie en opheffing van het IMAG bij A&F, na de volgende reorganisatie en opheffing van A&F bij PRI en na de laatste reorganisatie, die gelukkig niet gepaard ging met opheffing van PRI, bij WageningenUR Glastuinbouw. U ziet dat we hier een zeer dynamische werkomgeving hebben. In deze WageningenUR avant le lettre combinatie hebben we steeds geprobeerd de technische natuurkunde in agrarische toepassingen te ontwikkelen waarbij de fundamentele aanpak op de universiteit en de marktgerichte aanpak bij de instituten elkaar aanvulden. Deze afscheidsrede gaat over het universitaire deel, ik hoop nog een paar jaar in het andere deel een bijdrage te kunnen leveren. In mijn verhaal zullen beide aspecten moeilijk te scheiden zijn. Het gaat voor de uiteindelijke toepasser in het veld niet om de natuurkunde an sich, de gebruiker is geïnteresseerd in de functionaliteit. Als eenvoudig voorbeeld kan ik de gebruiker van een centrale verwarmingsinstallatie opvoeren. Deze is geïnteresseerd in een aangenaam klimaat, daarvoor draait hij aan een thermostaatknop of aan een thermostaatkraan. Het is daarbij onzichtbaar dat die thermostaat onderdeel is van een complex systeem dat er voor zorgt dat er inderdaad gebeurt wat die gebruiker wenst. Als in dat systeem de laag

rendement centrale verwarmingsketel vervangen wordt door een hoog rendementsketel of door een micro warmtekrachteenheid merkt de gebruiker dat in principe niet als hij aan zijn knop draait maar pas veel later aan zijn energierekening. Ook kan de thermostaat zelf zijn voorzien van kennis over de te verwarmen ruimte en zijn omgeving waardoor het klimaat sneller en nauwkeuriger wordt geregeld. Ook dit is voor de gebruiker onzichtbaar als hij aan zijn knop draait, hij merkt wel dat de thermostaat beter werkt maar denkt natuurlijk dat dat aan zijn gelukkige hand van draaien ligt. In de complexe systemen waar we ons in Wageningen mee bezig houden, zit de natuurkunde in dat onzichtbare deel. Nieuwe inzichten in de natuurkunde zorgen er hierbij voor dat de efficiency en de werking van het totale systeem sterk verbetert of dat geheel nieuwe systemen mogelijk worden.

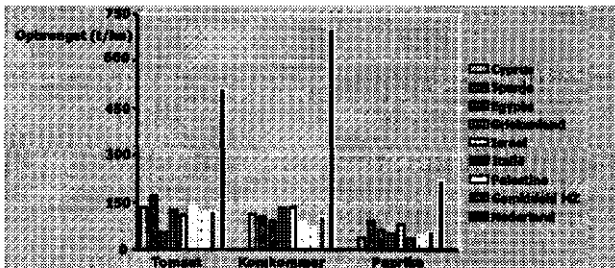
Met welke natuurkunde hebben we ons dan bezig gehouden? Sleutelement is daarin de fysische transportverschijnselen, hieronder wordt verstaan het transport van warmte, massa en impuls. Dat lijkt vrij abstract maar uzelf bent, zonder dat u zich dat bewust bent, ook elke dag bezig met fysische transportverschijnselen. Als u het te koud hebt of te warm trekt u iets aan of uit om uw warmteverlies te beperken of juist te verhogen, als u een maaltijd kookt voert u ook meer of minder warmte toe en laat water verdampen. U droogt uw kleren. Kortom u beoefent vele malen ook warmte- en stofoverdracht. Op de fiets merkt u ook best of u voor of tegen wind gaat door de impulsoverdracht van de mee- of tegenwind. Ik wilde vanmiddag niet het scala aan onderwerpen presenteren waarmee we ons de afgelopen jaren hebben bezig gehouden. Zoals het in projectgericht onderwijs hoort zal ik het onderwerp toelichten via cases, één over ontwikkelingen in de beschermde teelten en één daarop aanslui-

tend over warmte en arbeid en efficiënt gebruik van energie. Eigenlijk zou ik volgens de beginselen van het competentiegericht onderwijs daarna moeten testen of uw competenties in deze zijn toegenomen maar dat houdt u van mij nog te goed.

Ongeveer drie kwart van de Nederlandse agrarische productie vindt plaats in geconditioneerde binnenruimten en dit aandeel neemt nog steeds toe (Van Leeuwen, 2006) Dit past in een steeds hoogwaardiger Nederlandse agrarische sector met veel toegevoegde waarde en een hoge kennisintensiteit. Er wordt daarbij zeer efficiënt gebruik gemaakt van de beschikbare schaarse ruimte. De betere beheersing van de leefomgeving van zowel plant als dier maakt steeds hogere productie mogelijk van steeds betere kwaliteit die steeds beter kan worden gepland. Daarbij heeft de intensieve manier van produceren zijn keerzijde. Zo wordt ongeveer 90% van het energiegebruik in de agrarische sector gebruikt voor de conditionering van die binnenruimtes en het terugdringen van dit energiegebruik is een belangrijk speerpunt in het meer duurzaam maken van de sector. Het energiegebruik hangt nauw samen met de energiehuishouding van de betreffende gebouwen als kassen, stallen, kweekcellen en bewaarplaatsen. In deze energiehuishouding speelt het eerder genoemde transport van warmte, massa en impuls een cruciale rol zodat de natuurkunde waarover we het vanmiddag hebben kan worden verbonden met de kunde tot duurzaam maken, ofwel de duerkunde. Vandaar de titel van deze rede "Over natuurkunde en duerkunde".

In de case duurzame kastuinbouw is de eerste vraag natuurlijk: is duurzame kastuinbouw in Nederland wel mogelijk, is het niet veel duurzamer de kastuinbouw te verplaatsen naar

zuidelijker streken waarover de algemene opinie heerst dat het klimaat daar veel geschikter is. In de volgende figuur wordt de jaarrond productie van enkele kasgewassen vergeleken van landen rondom de Middellandse zee en Nederland (De Pascale, 2005).

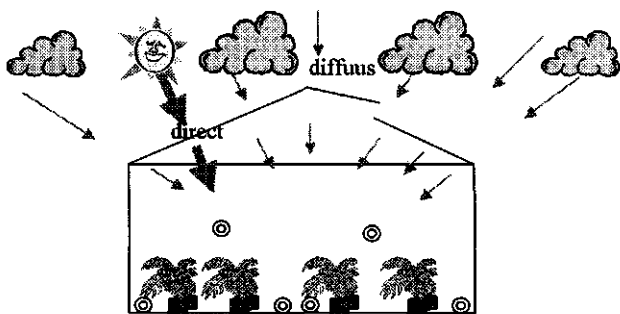


U ziet dat de productie in Nederlandse kassen toch redelijk hoger ligt dan die in de andere landen. De belangrijkste oorzaak is dat in Nederland wel en in de andere getoonde landen niet jaarrond geteeld kan worden. Onze grootste natuurlijke hulpbron in deze is dan ook ons gematigde klimaat met koele zomers en milde winters waardoor de hoge investeringen in beschermde teelten jaarrond ingezet kunnen worden. Daarbij komt dat door de betere conditionering ook ziekten en plagen veel beter beheerst kunnen worden zodat hiervoor in Nederland een factor 10 tot 30 minder chemische gewasbeschermingsmiddelen nodig zijn (Van der Velden et al, 2004). U ziet dus ook hier dat algemene opinies niet altijd kloppen.

In mijn inaugurale rede (Bot, 1994) gaf ik aan dat een kas beschouwd kan worden als een zonnecollector en dat deze zonnecollector efficiënter kan worden gebruikt ofwel een groter deel van de ingevangen zonne-energie kan worden

benut voor de conditionering om daarmee de benodigde fossiele energie te verlagen. Kort daarop (in 1996) kregen we de gelegenheid de denkbeelden over de kas als zonnecollector uit te werken in het door EET en LNV gefinancierde onderzoeksproject Zonnekas waarin we vanuit de leerstoelgroep Technische natuurkunde als initiatiefnemer en trekker optraden en samenwerkten met de leerstoelgroepen Agrarische bedrijfstechnologie en Meet-, regel- en systeemtechniek, met het onderzoeksinstituut IMAG en met de bedrijven Priva Hortimatic en Hyplast (Bot, 1996). Doel van dit project was het ontwerpen van een kassysteem waarin optimale gewasproductie zonder de inzet van fossiele energie mogelijk was. Een aantal jaren later werd dat door de sector als doelstelling geformuleerd voor nieuw te bouwen kassen vanaf 2020.

Uiteraard is de zon de duurzame energiebron voor een zonnecollector, tevens is het zonlicht de drijvende kracht voor gewasproductie.



Daarbij wordt minder dan 1% van de zonne-energie door het gewas gebonden door de fotosynthese, zodat dit in de energiehuishouding kan worden verwaarloosd.

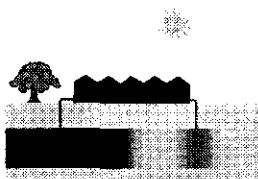
Omdat er altijd lichtverlies is aan de omhulling begint een kasteelt altijd met achterstand op een buitenteelt maar door de betere klimaatconditionering is de versgewichtproductie in een kas toch een factor 5 à 10 hoger. In het koudere deel van het jaar is er te weinig zonne-energie om de kas op een temperatuur te houden waarbij de gewasproductie optimaal is, hiervoor moeten we verwarmen ofwel warmte toevoeren, er is dan een warmtevraag. In het warmere deel van het jaar is er te veel zonne-energie en wordt de kastemperatuur daardoor te hoog, er is te veel warmte en deze surpluswarmte moet worden afgevoerd, op de klassieke manier door de ramen open te zetten. We toonden aan dat de hoeveelheid surplus zonne-energie redelijk groter was dan de warmtebehoefte. Een van de eerste opgaven in het Zonnekasproject was om dit zomersurplus aan duurzame warmte te benutten voor verwarming in de winter. Na een uitgebreide verkenning bleek dit alleen praktisch haalbaar door opslag in de poreuze watervoerende lagen van vele tientallen meters dik die in de natuur in de bodem onder de kas op de meeste plaatsen in het vlakke Nederland beschikbaar zijn. In de te warme perioden in de zomer moet warmte door koelwater aan de kas worden onttrokken bij een kastemperatuur van ca 25°C en dit kan dan bij een temperatuur van ca 20 °C worden opgeslagen in het aquifer. In de winter is deze watertemperatuur te laag om de kas te verwarmen, bovendien moet de watertemperatuur weer flink omlaag gebracht worden om als koelwater in de zomer weer warmte op te kunnen nemen. Uiteraard geldt daarbij ook dat een redelijk temperatuurverschil bij de opwarming en afkoeling van het aquiferwater nodig is om de hoeveelheid koelwater te beperken. Deze cyclus van koelen, opslag en verwarmen wordt in de volgende plaatjes zichtbaar gemaakt.

na de zomer met *Energiesurplus:*

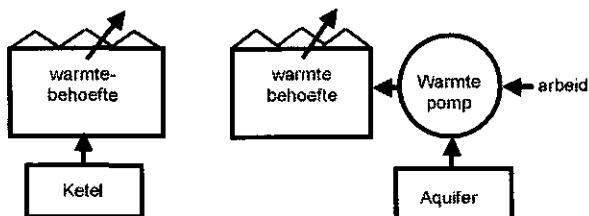
warm aquifer vol, koud aquifer leeg

na de winter met *warmteuraagt:*

warm aquifer leeg, koud aquifer vol



Om de opgeslagen zonne-energie met temperatuurniveau 20 °C, voor verwarming te benutten moet die naar een hoger temperatuurniveau worden gebracht. Dit gaat niet zonder meer. Normaliter stroomt warmte volgens de nulde hoofdwet van de thermodynamica van hoge naar lage temperatuur, zoals ook water van grote naar lage hoogte stroomt. Om water omhoog te laten stromen hebben we een waterpomp nodig die we aan moeten drijven, om warmte van lage naar hoge temperatuur te laten stromen hebben we een warmtepomp nodig en daarop moet volgens de 2^{de} hoofdwet van de thermodynamica arbeid worden verricht. Gelukkig hoeven we in energie-eenheden uitgedrukt minder arbeid te verrichten dan we warmte aan de kas toevoeren. Dit wordt in de volgende plaatjes duidelijk.



In plaats van geheel door de ketel (figuur links) wordt een deel van de warmte nu geleverd door het aquifer (dit is de

opgeslagen zonne-energie minus ca 30% verliezen), daarvoor wordt arbeid aan de warmtepomp geleverd en we voeren de som van aquiferwarmte en de arbeid op de warmtepomp toe aan het systeem kas om in de warmtebehoefte te voorzien. In energie-eenheden uitgedrukt is er winst, de warmtepomp heeft minder energie nodig om in de warmtebehoefte te voorzien omdat een deel nu geleverd wordt door de opgeslagen zonne-energie uit het aquifer. Maar hoewel warmte en arbeid beide een vorm van energie zijn, zijn ze helaas toch niet vrij inwisselbaar. Ik wil daarom eerst daarop wat verder ingaan.

De vervanging van menselijke en dierlijke arbeid door mechanische arbeid is in de loop van de geschiedenis een belangrijke motor voor welvaart gebleken. Op het ogenblik kan een redelijk verband worden aangetoond tussen de hoeveelheid aangewende mechanische arbeid en het welvaartsniveau in een land. Benutting van wind voor de aandrijving van molens die mechanische arbeid leveren was de aanjager van de eerste industriële revolutie in ons eigen land tijdens de Gouden Eeuw, dit kunnen we nu nog bewonderen op de Zaanse schans. Het benutten van verbrandingswarmte voor de levering van mechanische arbeid is al in de eerste eeuw na Christus door Heron van Alexandrië ontdekt, maar het principe werd pas verder ontwikkeld toen in de mijnbouw pompen nodig waren om de mijnen droog te houden. In streken met beschikbare waterkracht construeerde men hiervoor ingenieuze systemen met cascaden van waterreservoirs, waterlopen en watermolens, waarvan delen bewaard zijn gebleven bij bv het oude mijnbouwstadje Claustall-Zellerfeld in de Harz. In vlakkere streken was dit niet mogelijk en zorgde het menselijk vernuft voor een andere oplossing. Al in 1698 patenteerde Savery een primitieve

stoom aangedreven mijnpomp. Newcomen voegde hier in 1712 een cilinder aan toe om de stoom te laten expanderen en daardoor arbeid te laten leveren. James Watt verbeterde dit omstreeks 1765 in hoge mate door de introductie van een condensor zodat de stoom buiten de cilinder kon condenseren, hij voegde verder kort daarna het vliegwiel en de reguleur toe zodat vanaf het midden van de 18^{de} eeuw de stoommachine als aandrijver van de industriële revolutie kon gaan fungeren. De stoommachine effende het pad naar de inwendige verbrandingsmotor, de stoom- en gasturbine en dus ook de straalmotor. Het kernprobleem was om de hoeveelheid benodigde brandstof te minimaliseren ofwel zo veel mogelijk arbeid uit de verbrandingswarmte te winnen.

Het begrip dat warmte en arbeid equivalent zijn wordt uitgedrukt in de eerste hoofdwet van de thermodynamica die stelt dat warmte toegevoerd aan een geïsoleerd systeem voor een deel ten goede komt aan de opwarming, ofwel toename van inwendige energie, en voor het andere deel aan door het systeem verrichte arbeid.

James Watt wist in de 18^{de} eeuw door een typische ingenieursaanpak, namelijk logisch nadenken en hard werken, het omzettingsrendement van warmte in arbeid van minder dan 1% naar bijna 20% te verbeteren. In 1824 toonde Carnot aan dat er een theoretische grens is aan het omzettingsrendement van warmte naar arbeid en dat dit in een ideale kringloop, dan ook Carnotkringloop genoemd, kan worden bereikt. Met een kringloop bedoelen we de cyclus van comprimeren, verwarmen, expanderen en daarmee arbeid leveren en het weer afkoelen van het gas tot de beginsituatie zodat de cyclus zich kan herhalen. Helaas is een Carnot kringloop niet te realiseren omdat daarin omkeerbare toestandsveranderingen optreden waarbij de entropie constant

blijft en dit is alleen theoretisch mogelijk. De beste huidige inwendige verbrandingsmotoren presteren na een evolutie van ca 125 jaar ongeveer de helft van het Carnotrendement. Via de thermodynamica kan worden berekend dat het Carnotrendement op een eenvoudige en elegante manier afhangt van het verschil van de hoogste en laagste temperatuur in de kringloop en het hoogste temperatuurniveau:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_{hoog} - T_{laag}}{T_{hoog}} \quad (\text{met } T \text{ in Kelvin})$$

en deze afhankelijkheid geldt ook voor praktisch realiseerbare kringlopen.

$$\eta_{praktisch} = c_{pr} \frac{T_{hoog} - T_{laag}}{T_{hoog}} \quad (\text{met } c_{pr} < 1)$$

U merkt dit zelf bij inspanning in een koele omgeving: u zet meer verbrandingswarmte om in arbeid (en daarnaast kunt u de restwarmte ook nog beter kwijt). Bij het benutten van warmte speelt het omzettingsrendement in arbeid dus een centrale rol. Daarom is het begrip Exergie ingevoerd die de kwaliteit van de warmte uitdrukt. Het is gedefinieerd als de hoeveelheid arbeid die door de beschikbare warmte kan worden geleverd. Het is in duurzaamheidsanalyses dus niet de energie-inhoud die telt maar de Exergie-inhoud omdat arbeid nu eenmaal veel schaarser is dan warmte en daardoor veel meer waard. Als warmte dus bij een steeds hoger temperatuurniveau beschikbaar is neemt het temperatuurverschil sneller toe dan het temperatuurniveau waardoor er steeds meer arbeid kan worden geleverd: warmte die beschikbaar is bij een hoge temperatuur ten opzichte van zijn omgeving heeft dus een hoog omzettingsrendement en dus een hoge kwaliteit. Een laag temperatuurniveau is gekoppeld aan een

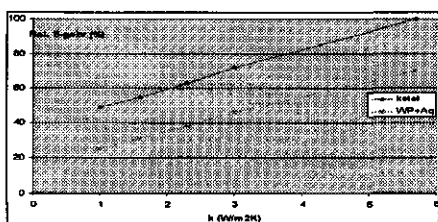
klein te overbruggen temperatuurverschil zodat warmte daarbij een lage kwaliteit heeft.

Keren we nu terug naar ons kassysteem. We hebben daar dus te maken met hoogwaardige aandrijfenergie voor de ketel of de warmtepomp en met opgeslagen zonne-energie bij lage temperatuur, dus laagwaardig. Om deze laagwaardige energie te benutten is hoogwaardige energie nodig. In het Zonnekasproject was uitgangspunt de benodigde dure hoogwaardige aandrijfenergie zo laag mogelijk te houden zodat dit zou kunnen worden geleverd door duurzame energie. Daarbij gingen we uit van een belangrijk principe bij energiebesparing. Dit begint bij het systeem zelf, dat moet inherent energievriendelijke eigenschappen hebben. Daarna moet dit systeem op een energievriendelijke manier worden bestuurd, dat wil zeggen dat de gewenste toestanden in het systeem op de meest energievriendelijke manier moeten worden gerealiseerd. Daarna moet de aandrijving van het systeem, ofwel de omzetting van primaire naar in het systeem bruikbare energie, zo efficiënt mogelijk zijn. Het energiegebruik van een auto illustreert dit: energiezuinigheid begint bij de eigenschappen van de auto die voor verschillende auto's gemeten kan worden door bij vastgestelde snelheden en vastgelegde buitencondities het brandstofverbruik te meten. Dit is niet het brandstofverbruik bij normaal gebruik, dit hangt sterk af van de manier waarop de bestuurder rijdt. De aandrijving kan energiezuiniger door een andere motor: een diesel is energie-efficiënter en verbruikt daardoor minder primaire energie dan een benzine-motor om dezelfde snelheid te leveren.

De systeemeigenschap die het inherente energiegebruik van een kassysteem bepaalt is de isolatiewaarde van de omhulling. De energie die verloren wordt naar de omgeving is

warmte en dus is er een warmtevraag om dit warmteverlies aan te vullen. Daarna komt de manier waarop de tuinder het systeem bestuurt, dus het klimaat dat hij wenst en de manier waarop dat wordt gerealiseerd en dit wordt bepaald door zijn denken over de relatie tussen kasklimaat en gewasproductie en de stuurbaarheid hiervan. Vervolgens is er de aandrijving van het systeem ofwel de manier waarop primaire energie wordt omgezet in de door het systeem gevraagde warmte. Een verwarmingsketel vervangen door de combinatie aquifer en warmtepomp betekent dus een andere aandrijving. Uiteindelijk leidt de warmtevraag dus tot een energievraag voor de ketel of de warmtepomp. Dit wordt in de volgende tabel en figuren geïllustreerd voor het jaarrond energiegebruik van een kasgewas.

Soort kasdek	k-waarde (W/m ² K)
enkel glas	5.7
Dubbel of 1+scherm	3.0
triple of 2+scherm	2.3
HR++*	1.6
Vacuüm glas*	1.0



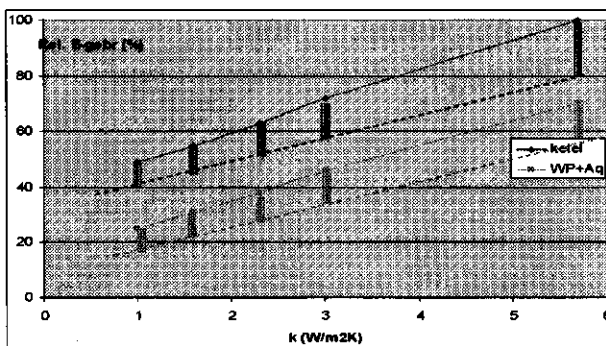
Relatief Energiegebruik kas met verwarmingsketel en kas met Warmtepomp+aquifer als functie van k-waarde (k-waarde vs soort kasdek zie links)

**nog niet voor kassen toepasbaar vanwege te lage lichtdoorlatendheid*

In de eerste en tweede kolom van de tabel wordt de soort kasdek met de daarbij horende k-waarde gegeven. De k-waarde geeft het energieverlies per vierkante meter bij een temperatuurverschil met buiten van 1K. Helaas gebruikt een kas per Kelvin meer energie door de gewasverdamping. Het jaarrond energiegebruik is voor een energievragend kas-

gewas uitgerekend met een betrouwbaar model en de bovenste lijn in de figuur geeft aan hoe de warmtevraag ofwel het energiegebruik voor een kas met verwarmingsketel, daalt met toenemende isolatiewaarde ofwel met afnemende k -waarde. In de tweede, lager gelegen lijn is zichtbaar dat bij een andere aandrijving, nl seizoensopslag van zomerwarmte en benutting via een warmtepomp, voor alle opties ca 30% minder energie nodig is om aan de warmtevraag te voldoen. Het geheel is uitgerekend met de nu best mogelijke gewassturing.

Het is denkbaar dat in elke conventionele optie door optimalisering (betere klimaatsturing, meer inzicht in gewasfysiologie) nog ca 20% energie extra bespaard kan worden. Dit is in onderstaande figuur als marge bij de bovenste lijn aangegeven.



Voor de aandrijving met aquifer-warmtepomp wordt geschat dat de marge wat groter is door de compleet nieuwe teeltomstandigheden waardoor een grotere ruimte voor optimalisatie aanwezig is. Het benutten van deze optimalisatieruimte vraagt bij iedere verbetering van het kassysteem veel hierop gericht onderzoek. De figuur vat de ontwikkeling in ener-

giebesparing samen: we zijn van rechts boven naar ongeveer het midden gevorderd, we moeten echter naar links onder om een echt lage warmtevraag en daardoor een echt laag energiegebruik mogelijk te maken. Voor de nu best mogelijke kas is een dubbel kasdek met energiescherm beschikbaar. Dan daalt de warmtevraag met ca 40% en is door de andere aandrijving met warmtepomp een energiebesparing mogelijk van ca 60%. Verdere besparing is mogelijk door kasdekken toe te passen met hogere isolatiewaarde waarbij een belangrijke bottleneck de lichtdoorlatendheid is, licht is immers de drijvende kracht voor gewasproductie! We werken bij WURGlastuinbouw dan ook aan doorbraken in de combinatie van hoge isolatiewaarde en hoge lichtdoorlatendheid zodat kassystemen mogelijk worden met een zeer lage warmtebehoefte en daardoor een zeer lage behoefte aan hoogwaardige aandrijfenergie.

Kan fossiele energie worden uitgebannen bij de nu realiseerbare meest energiezuinige optie waarbij 60% energie wordt bespaard? Als dit door energie uit verbranding van droge biomassa zou moeten worden gedekt is per ha kas gemiddeld toch nog ongeveer 30 ha biomassa nodig. Bij toepassing van biodiesel zou dan zelfs ongeveer 95 ha koolzaadteelt nodig zijn per ha kas. Voor een huidige kas zonder deze energiebesparing moet u deze getallen dus met 2.5 vermenigvuldigen, dus 75 ha biomassa of 240 ha koolzaad per ha kas.

Een andere optie is de inzet van windenergie voor de aandrijving van de warmtepomp. Uiteraard introduceert dit het probleem van de fluctuerende beschikbaarheid van aandrijfenergie maar laten we aannemen dat dit door buffering in het elektriciteitsnet oplosbaar is en dat het zomers opgewekte vermogen, wanneer de warmtepomp niet draait, ook in de winter gebruikt mag worden naast het dan opgewekte

vermogen. Er is dan voor de nu meest energiezuinige optie een nominaal windvermogen op land nodig van ongeveer 600 kW per ha. Als de deal met de elektriciteitsmaatschappijen niet te sluiten is om het in de zomer aan het net geleverde vermogen in de winter te mogen benutten, moeten de getallen met ongeveer twee worden vermenigvuldigd.

De onafhankelijkheid van fossiele energie die de sector in 2020 nastreeft vereist dus nog grote stappen richting lagere energiebehoefte door een ultra lage warmtevraag, dus kassen met een super isolerende omhulling. Daar zijn we nog ver van verwijderd en om deze te realiseren is heel veel gerichte inspanning nodig. Het jaartal 2020 waarin de sector als doelstelling heeft dat nieuw te bouwen kassen onafhankelijk zouden moeten zijn van fossiele energie komt wel snel dichterbij.

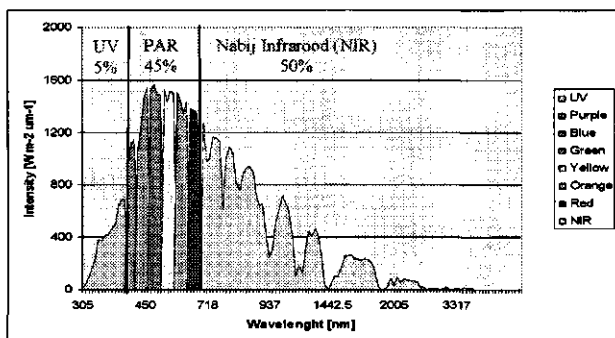
Het begrip kas als zonnecollector wordt nu in de sector breed geaccepteerd. Het is de basis voor de energieleverende kas, een concept dat vanuit het InnovatieNetwerk is ontwikkeld (Van Andel, 2002) en van de gesloten kas zoals door Innogrow op de markt is gebracht (Opdam et al, 2005). Er wordt immers in de zomer meer warmte opgevangen dan in de winter voor verwarming nodig is zodat bij de energieleverende kas het uitgangspunt is dat deze surpluswarmte aan derden geleverd kan worden. Het volledig wegkoelen van de surpluswarmte maakt ventilatie overbodig waardoor continue een hoog CO₂ niveau kan worden aangehouden met een opbrengsverhogend effect. Met de volledige klimaatconditionering is dit het grote pluspunt van de gesloten kas.

Het begrip energieleverende kas heeft veel positieve energie in de sector los gemaakt en is daarmee al energieleverend geworden, bovendien werkt het sterk imagoverbeterend

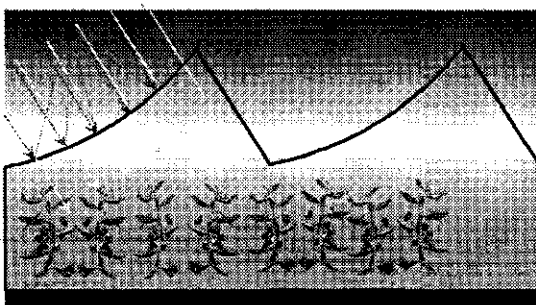
voor de kastuinbouw omdat het de ambitie aangeeft van energiegebruiker energieleverancier te willen worden. De eigen behoefte aan hoogwaardige aandrijfenergie blijft, zoals net aangetoond, wel afhangen van de warmtebehoefte en dus van de isolatiewaarde.

De ambitie energie te leveren moet gecombineerd worden met de ambitie om onafhankelijk van fossiele energie te willen worden. In plaats daarvan wordt tegenwoordig door de sector de term energieneutrale kastuinbouw gebezigd waarbij een ambitie wordt aangegeven om net zo veel laagwaardige energie te leveren als er hoogwaardige energie wordt gebruikt. Vanuit exergie-overwegingen kan de benodigde input van hoogwaardige energie voor aandrijving van de warmtepomp niet worden weggestreept tegen te leveren laagwaardige warmte. Om deze laagwaardige warmte te benutten is immers altijd weer hoogwaardige energie nodig! Het hanteren van de term energieneutrale kastuinbouw kan daarom de maatschappelijke verdenking oproepen dat men knollen voor citroenen wil verkopen.

In een ander concept energieleverende kas, zoals we bij WURGlastuinbouw hebben ontwikkeld, wordt het surplus aan zomerwarmte voor een redelijk deel direct omgezet in elektrische, dus hoogwaardige energie (Sonneveld et al, 2006). Hierin zijn een aantal fysische principes gecombineerd. Het is bekend dat planten alleen het zichtbare spectrale deel van het zonlicht benutten, de zogeheten Photosynthetic Active Radiation, ofwel PAR. In dit gedeelte van het spectrum wordt ongeveer de helft van de zonne-energie ingestraald, de andere helft is dus vooral warmtebelasting.



Via spectraal-selectieve materialen die in staat zijn het PAR licht door te laten en het NIR te reflecteren, wordt de warmtebelasting en dus de koellast van de kas met ongeveer de helft teruggebracht. De gereflecteerde NIR straling kan door een speciaal gebogen oppervlak met een factor 30 tot 100 worden geconcentreerd en in dit focus zet een klein oppervlak fotovoltaïsche cellen de gereflecteerde straling voor ongeveer 15% om in elektriciteit, het andere deel wordt door koeling van de cellen afgevoerd en kan op seizoensbasis worden opgeslagen. Hier ziet u een artist impression van dit kassysteem.



Het onderzoek is zo ver gevorderd dat we dit jaar een prototype bouwen.

Ik heb in het voorgaande natuurkunde en duurkunde geïllustreerd met beschouwingen over energiegebruik en energiebenutting in de innovatieve sector Glastuinbouw. Dit is gemakkelijk uit te breiden tot andere sectoren. De manier van denken blijft evenwel dezelfde, fysisch gezien zijn de beschrijvende vergelijkingen voor luchtstroming of energie- en massatransport in een kas, stal of andere binnenuimte dezelfde, alleen de randvoorwaarden zijn anders. Ook de benadering van energiebesparing is volledig analoog, zorg eerst voor inherent zuinige systeemeigenschappen, bestuur het systeem zo energiezuinig mogelijk en drijf het systeem energie-efficiënt aan met zo veel mogelijk gebruik van duurzame energie. In dierhouderijsystemen zijn bij duurzaam gebruik ook aspecten cruciaal als emissie van ammoniak en geur, dierenwelzijn en -gezondheid en niet te vergeten gezondheid van de diervorzorger. Ook dit heeft alles te maken met binnenklimaatprocessen zodat we ook hier in een aantal promotieprojecten onze bijdrage hebben kunnen leveren.

Het duurzaamheidsstraject voor de glastuinbouw illustreert dat de inzet van duurzame energie niet gemakkelijk is omdat er per oppervlakte-eenheid weinig kan worden ingevangen en omdat het aanbodpatroon niet gelijkvormig is aan het vraagpatroon. Als duurzaam gemakkelijk en goedkoop was zouden we nooit onze toevlucht tot fossiele energie hebben genomen. Het gebruik van fossiele energie is zo vanzelfsprekend geworden dat bij het denken aan het gebruik van duurzame energie wordt uitgegaan van vervanging van fossiele energie en het voortzetten van het huidige gebruikspa-

troon waarbij we vergeten dat dat stamt uit een tijd waarin fossiele energie nog goedkoop was. Bij het opraken van de fossiele energievoorraden zal hoogwaardige energie meer en meer uit duurzame bronnen moeten komen en schaarser en dus duurder worden. Het zal dan noodzakelijk worden deze zeer efficiënt te benutten om in onze vraag naar hoogwaardige energie te voldoen.

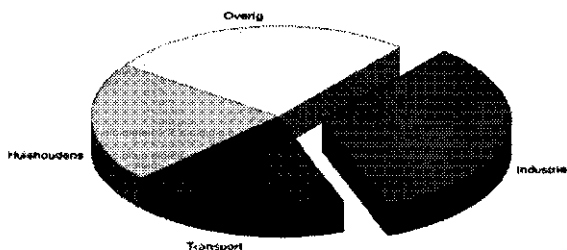
Bij het toepassen van duurzame energie moet je je afvragen wat de vraag naar energie eigenlijk inhoudt. Vanuit fysisch oogpunt gaat het dan in principe niet over de vraag naar energiedragers als benzine, dieselolie of aardgas maar over de vraag naar energievormen als:

- mechanische arbeid, zowel op vaste locatie voor de aandrijving van apparaten als mobiel om gemechaniseerd vervoer mogelijk te maken
- warmte voor procesvoering en klimaatconditionering van binnenruimten
- licht
- communicatie, info-tainment

Omdat cijfers over de verdeling van deze energievormen niet voor handen zijn kunnen we ze afleiden uit de verdeling van het nationale energiegebruik zoals dat in onderstaande figuur wordt gegeven (ECN, 2007) voor transport: 20%, huishoudens: 20%, industrie: 40% en overig: 20%, waarbij de agrarische sector behoort tot overig.

Laten we uitgaan van 100 eenheden energie en schatten hoeveel eenheden daarvan uit mechanische arbeid en laagwaardige warmte voor ruimteverwarming bestaan. De vraag naar licht en communicatie, info-tainment is in principe die

naar elektriciteit zodat die bij mechanische arbeid kan worden geteld.



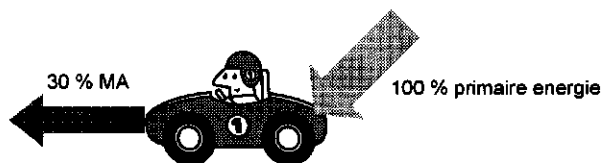
- In de transportsector wordt de energie aangewend om mechanische arbeid te verrichten. Het omzettingrendement van de in het transport gebruikte motoren is laag, ca 30% zodat de 20 eenheden energie worden aangewend voor een vraag naar 6 eenheden mechanische arbeid. Hierbij gaat de rest, 14 eenheden, als warmte verloren.
- De 20 energie-eenheden gebruikt in de huishoudens bestaan uit 4 eenheden mechanische arbeid (eigenlijk elektriciteit) en 16 eenheden ruimteverwarming.
- In de industrie wordt een flink deel van de fossiele brandstof gebruikt als grondstof voor bv de fabricage van kunststoffen. Verder wordt een deel aangewend als proceswarmte met hoog temperatuurniveau. Er kan worden afgeleid dat uiteindelijk 8 eenheden mechanische arbeid worden gevraagd en 4 eenheden voor ruimteverwarming.
- Voor overig is dit 7 eenheden mechanische arbeid en 13 eenheden warmte.

In totaal worden dus 19 (excl transport) of 25 (incl transport) eenheden mechanische arbeid gevraagd en 33 eenheden voor ruimteverwarming. Vooral de vraag naar warmte kan nog drastisch worden beperkt. Bij de omzetting van hoogwaardige energie in arbeid komt volgens de eerder genoemde eerste hoofdwet van de thermodynamica altijd warmte vrij. Buiten het transport wordt vrijwel alle mechanische energie uiteindelijk geleverd door de elektriciteitscentrales die primaire brandstof omzetten in elektriciteit met tegenwoordig een gemiddeld rendement van ca. 45% en waarbij het andere deel restwarmte is die voor het grootste deel naar de omgeving wordt geloosd. In een ideale situatie zou deze restwarmte bij een iets hoger temperaturniveau voor ruimteverwarming kunnen worden ingezet. Ten opzichte van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte levert dit een besparing op primaire energie op van ca 30%, een besparing die dus vergelijkbaar is met die door aquifer en warmtepomp.

Het probleem van grote centrales (ordegrootte 1000MW) is dat zoveel restwarmte beschikbaar is dat dit over een groot aantal gebruikers en dus over een groot gebied moet worden gedistribueerd. Decentrale opwekking brengt de restwarmte dicht bij de gebruiker en maakt distributie aantrekkelijker. De glastuinbouw is bij uitstek geschikt voor decentrale elektriciteitsopwekking en lokaal gebruik van de restwarmte en dit wordt dan ook al op grote schaal toegepast. Op ca 40% van het areaal wordt restwarmte gebruikt uit lokale decentrale opwekking, waarbij in de glastuinbouwsector nu al een vermogen is geïnstalleerd van 1700 MW met de verwachting dat dit doorgroeit naar 3000MW. Dit is duurzaam zolang alle restwarmte inderdaad wordt benut. Bij beter geïsoleerde kassen, dus een lage eigen warmtevraag, kan meer restwarmte op

een voor verwarming gunstig temperatuurniveau aan derden worden geleverd op relatief korte afstand. In deze zin kunnen we hier ook spreken van een energieleverende kastuinbouw. Bij de kas met aquifer en warmtepomp werd een warmtebehoefte omgezet naar een arbeidsbehoefte waarvoor altijd hoogwaardige energie nodig is en wordt laagwaardige warmte geleverd. Bij decentrale elektriciteitsopwekking voorzien we in een bestaande arbeidsbehoefte met de daarvoor benodigde inzet van hoogwaardige energie en vermijden we de inzet van hoogwaardige energie voor het voorzien in de warmtebehoefte. Als echter in de toekomst bij het opraken van de fossiele voorraden meer en meer arbeid direct geleverd wordt uit duurzame bronnen als zon en wind dan wordt het duurzaam om via een warmtepomp arbeid te gebruiken om in een warmtevraag te voorzien. Zolang er nog genoeg restwarmte is bij de opwekking van mechanische arbeid via hoogwaardige brandstof kan zon- en windenergie het meest efficiënt worden gebruikt om direct te voorzien in de mechanische arbeidsvraag en daardoor brandstof te sparen. In een eindplaatje met zeer schaarse brandstof en merendeels duurzaam opgewekte mechanische arbeid past dus het concept ultra energiezuinige kas met aquifer en warmtepomp.

Keren we terug naar ons energieoverzicht en de inzet van biobrandstof voor de transportsector. In de eerste plaats hebben de gebruikte motoren een omzettingsrendement van ca 30% op de toegevoerde primaire energie:



Veel inspanning is er op gericht fossiele motorbrandstoffen te vervangen door brandstoffen uit biomassa en de politiek heeft hiervoor doelstellingen geformuleerd. Biomassa legt zonne-energie vast met een netto rendement van ongeveer 0.5%. In Nederland komt de jaarlijkse ingestraalde zonne-energie per m² grondoppervlak vrijwel overeen met de energie-inhoud van 100 m³ aardgas, hiervan wordt dus netto 0.5 m³ in het gewas gebonden en die energie komt na droging en verbranding ongeveer weer vrij. De energie-inhoud van de biomassa, ofwel de verbrandingswaarde, kan gebruikt worden bij de elektriciteitsopwekking met een rendement van 45% en kan hierbij op energiebasis vrijwel één op één fossiele brandstof vervangen. Bovendien kunnen we dan in potentie de restwarmte benutten zodat het rendement dan naar 90% stijgt. Bij de omzetting naar biobrandstof voor motoren blijft ongeveer de helft tot een derde van de energie-inhoud van de primaire biomassa beschikbaar zodat het overall rendement zo'n 15% wordt. Er is dan dus circa zes maal zoveel biomassa nodig voor de vervanging van fossiele brandstof, dus een zeer inefficiënt gebruik van biomassa. De gemakkelijke hanteerbaarheid van de energiedrager heeft wel een verschrikkelijk hoge prijs en de vraag is of we ons die op de lange termijn vanuit de duurzaamheidsgedachte kunnen veroorloven.

Het opraken van fossiele grondstoffen zal onze maatschappij ingrijpend veranderen. Of CO₂ emissie nu wel of niet de oorzaak is van klimaatverandering doet er in dit verband niet zo veel toe, de fossiele voorraden zijn eindig en zullen opraken. De koolstof die we nu betrekken uit fossiele grondstoffen en gebruiken als brandstof of als basisgrondstof, zal op termijn uit andere bron moeten komen. Productie van biomassa is dan de weg terug waarbij we CO₂

met behulp van zonlicht weer omzetten tot een bruikbare koolstofvorm. Maar zoals u weet is deze bruikbare koolstofvorm ook onze voedselbron. Bij de productie van biomassa zijn andere schaarse hulpbronnen nodig als water en nutriënten en de mogelijkheden om het landbouwareaal op een duurzame manier met vele factoren te vergroten is niet aanwezig. Bovendien moet een nog steeds toenemende wereldbevolking worden gevoed. De uitdaging ligt in de ontwikkeling van landbouwproducten en -methoden met hoge toegevoegde waarde waarbij plantaardige en dierlijke producten in cascade van hoogwaardig naar laagwaardig worden benut, dus in cascade van voedsel, biograndstoffen en wat dan nog overblijft in bio-energie. WageningenUR is bij uitstek de instelling om die uitdaging aan te gaan en vele groepen hebben dat dan ook opgepakt. Het is dan ook aangewezen als een van de huidige WageningenUR speerpunten. Sleutelwoorden zijn grondstoffen, de verwerking daarvan door micro-organismen en enzymen, de opwerking met behulp van chemische en fysische principes, de maatschappelijke waarde van voedsel, grondstoffen en energie en efficiënte aanwending van duurzame grondstoffen en duurzame energie. Gezien de zeer grote energiebehoefte, met primair die naar mechanische arbeid, zal bio-energie slechts een bescheiden rol kunnen spelen in aanvulling op andere duurzame energiebronnen. Oplossingen zullen gevonden moeten worden in integratie van verschillende duurzame energievormen en door het zo efficiënt mogelijk aanwenden hiervan, een oplossingsrichting waar juist Wageningen sterk in is. Daarbij kan dat deel van de natuurkunde dat zich met duurzame energievormen en efficiënt energiegebruik bezig houdt niet gemist worden.

De noodzakelijke innovatie van een op fossiele grondstoffen gebaseerde samenleving, ofwel de Fossil-based Society, naar een op groene grondstoffen gebaseerde samenleving, ofwel een Bio-based Society, is zowel technologisch als maatschappelijk. De uitdaging ligt ook in het onderwijs. De inschatting is dat aankomende studenten sterk geïnteresseerd zijn in deze uitdaging. Daarom hebben we vorig jaar met een brede initiatiefgroep een studieprogramma Technologie voor een Bio-based Society (TBios) uitgewerkt. Dit nieuwe programma zou nu Technische Duurkunde kunnen heten. We richtten ons bij TBios op vier doelen:

- Voldoende kennis en inzicht verkrijgen in de exacte wetenschappen en in biologische materialen en systemen om deze toe te kunnen passen binnen het gebied van de TBios en daarbij de fysische technologie, de chemische technologie en de biotechnologie om processen en principes te begrijpen en kwantitatief te kunnen benaderen.
- Het leren denken vanuit systemen met zo veel mogelijk gesloten kringlopen die daarbij in cascaden op elkaar kunnen aansluiten met output van hoogwaardige naar laagwaardige producten, waarbij ook energie een product is.
- Het verkrijgen van voldoende kennis en inzicht in het functioneren van de samenleving en het bedrijfsleven en de rol en positie van technologie met daarbij het ontwikkelen van inzicht in het samenspel van technologie, bedrijfsleven en samenleving in innovatieprocessen.

Een belangrijk advies van de initiatiefgroep was om dit nieuwe thema goed zichtbaar te maken naar vooral nieuwe studenten en daarmee het aantal in technologie geïnteresseerde studenten in Wageningen te verhogen. Het bleek het hoogst haalbare om dit nieuwe studieprogramma als minor

in drie bestaande technologische studierichtingen op te nemen omdat het traject van een geheel nieuwe studierichting zeer moeizaam is. De zichtbaarheid voor nieuwe studenten zou ook in deze opzet kunnen worden gegarandeerd als iemand hiervoor over de studierichtingen heen verantwoordelijk zou kunnen worden gemaakt. Tot nu toe is dit niet gelukt zodat tot frustratie van de initiatiefgroep van de zichtbaarheid van dit nieuwe uitdagende studieprogramma nog weinig is terechtgekomen en nog geen rol heeft kunnen spelen bij de werving van nieuwe studenten. Innoveren blijkt ook binnen de eigen instelling, zelfs voor de door haar zelf aangewezen speerpunten, een moeizame zaak.

Concluderend durf ik te zeggen dat de natuurkunde in Wageningen niet af is maar dat Wageningen zowel in onderzoek als onderwijs nieuwe impulsen uit de natuurkunde nodig heeft. De kracht van Wageningen ligt in het integreren van verschillende vakgebieden, daaraan heeft de ontwikkeling van natuurkundige kennis bijgedragen. Een ketting is zo sterk als zijn zwakste schakel, bij het stagneren van ontwikkelingen op een basisvakgebied als natuurkunde zal integratie van kennis onevenwichtig worden. Dit zal niet alleen gelden voor nieuwe systemen waarin gebruik wordt gemaakt van geconditioneerde binnenruimtes, voor Nederland een speerpunt, maar ook voor de ontwikkeling naar een duurzame bio-based samenleving.

Ik zou niet willen afsluiten zonder enige dankwoorden uit te spreken. Ik heb, met onderbrekingen, vanaf 1 juni 1972 altijd met veel plezier bij Wageningen Universiteit gewerkt aan interessante onderwerpen die me op veel plaatsen ter wereld brachten. Jaap Schenk, mijn voorganger, heeft me naar Wageningen gehaald en ik ben dankbaar voor zijn

voorbeeld van nauwgezette wetenschapsbeoefening en de ruimte die hij bood voor eigen keuzes. Ik heb daarbij mogen samenwerken met tal van mensen zowel in onderwijs als onderzoek. In het onderzoek is dat zichtbaar door promoties en publicaties. Jos Metz had in zijn afscheidsrede van enkele weken geleden een goede manier gevonden om dat zichtbaar te maken en ik maak daar daarom dankbaar gebruik van. Hier ziet u de lijst met mensen bij wie dit zichtbaar is in gezamenlijke publicaties of in promoties:

Caterina Arcidiacono; Sjaak Bakker; Cees van Bavel; Björn Bjerg; *Dane Bicanic*; Alessandro. Bizarri; Thierry Boulard; Ton van Boxtel; Nico van de Braak; Hans Breteler; **Jouke Campen**; Hugo Challa; Mihai Chirtoc; Ileana Chirtoc; Nicu Dadarlat; Bill Day; Edward Dekker; Anja Dieleman; Maarten Dijkema; **Martijn Dirkse**; Jan van Dixhoorn; Cees Eerkens; *Anne Elings*; Burkhard von Elsner; *Matthieu Ernst*; **Jan Paul Favier**; Ger Flamand; Katja Gbiorcsyk; Theo Gieling; **Jörg Gigler**; Maarten Goedhart; Bob Gottschall; Jan Goudriaan; Henk Gude; *Johan Grasman*; Bert Hamelers; Ies van Haneghem; **Leo den Hartog**; **Mohamed Hasan**; Yashushi Hashimoto; Cees Helderma; Silke Hemming; Eldert van Henten; Sjaak van Heusden; Ep Heuvelink; Gerard van Holsteijn; Henk Jan Holterman; Bert Houter; **Impron**; Egon Janssen; **Tacke de Jong**; Wim de Jong; Frans Kampers; Frank Kempkes; **Kees van het Klooster**; Peter Knies; Oscar de Kuijer; Joop van Lenteren; *Gatze Lettinga*; Pim Lindhout; *Wilko van Loon*; Leo Marcelis; Nolli Marissen; **Hamed El-Mashad**; *Gerrit Meerdink*; Johan Meijer; *Jos Metz*; Wim van Meurs; **Antonio Miguel**; Oscar Minkenbergh; Antonis Mistriotis; **Gert Jan Monteny**; Matthijs Montsema; Willem-Pieter Mulder; Hiroshi Nonami; Elly Nederhoff; Hans Oldengarm;

Bert van 't Ooster; *Joost van Opheusden*; George Papadakis; Herman Peppelenbos; Paolo Picuno; Rudy Rabbinge; *JÖrg Reuss*; Theo Rieswijk; *Klaas van 't Riet*; Ernst van Rijssel; Wim Rossing; An Saye; David Samuels; Giacomo Scarascia-Mugnozza; Ad Schapendonk; *Jaap Schenk*; *Dennis Schulte*; *Ana Maria Silva*; *Ruud van der Sman*; *Bert Speelman*; Piet Sonneveld; Bas Speetjens; *Cecilia Stanghellini*; *Hans Stigter*; Gerrit van Straten; Gert-Jan Swinkels; Tadashi Takakura; Hans-Jurgen Tantau; Alexander Udink ten Cate; Inge Verlodt; Mat Vissers; Jan van de Vooren; **Kees Vriezinga**; Dries Waaijenberg; Martin Wagemans; **Victor van Wagenberg**; Tom van der Walle; Hans Wegh; Hans de Wild; *Grietje Zeeman*; Ben Zuidberg; **Feije de Zwart**;

Daar kunnen de **promovendi** worden uitgelicht, waarvan enkele nog aan het afronden zijn en die niet alleen hebben gewerkt aan kas- en stalklimaat en toepassing van duurzame energie maar ook aan meer fundamentele fysische onderwerpen. Natuurkunde is veelal in interactie met andere vakgebieden bedreven en dat is zichtbaar als ik de *medepromotoren* en de *copromotoren* uitlicht. Ik wil graag iedereen, ook degenen bij wie dat niet zichtbaar is op deze lijst of met wie ik in onderwijs heb samengewerkt graag hiervoor van harte bedanken. Gelukkig kan ik met velen van u de samenwerking voortzetten vanuit mijn verdere WURGlasterbouw activiteiten.

Mijn werk als fysicus in Wageningen werd zeer vergemakkelijkt doordat ik ben opgegroeid op een bollenbedrijf waardoor ik praktijkervaring opdeed onder het motto "niet zeuren maar aanpakken". Ik hoor mijn vader nog in de zomervakantie om half vijf op maandagmorgen roepen: "Jongens, er uit komen, het is overmorgen al woensdag en we hebben de hele week nog niks gedaan". Ik ben mijn ouders nog altijd

dankbaar dat ze me de vrije keuze hebben gelaten en me de mogelijkheden hebben geboden me in de wetenschap te ontwikkelen.

Tenslotte, maar niet in de laatste plaats, mijn gezin. Vera door jouw liefde en steun kon ik het werk aan waarbij mijn fifty/fifty baan toch samen meer bleek te zijn dan 100. Onze vele buitenlandse gasten gaf jij het gevoel hier thuis te zijn, jouw aandeel in goede internationale relaties is dan ook groot. Het verschil in tafelmanieren van de buitenlandse gasten gaf daarbij met onze kinderen wel eens hilarische taferelen. Ivo, Marjolein met Emeric en kleinzoon Julius, Heroen met Annette, Gerwin met Suzanne, aan jullie is de toekomst. Ik hoop met mijn werk daaraan te hebben bijgedragen.

Geachte aanwezigen, ik dank u voor uw aandacht.

Referenties

- Bot, G.P.A., 1994. Vanuit behoud naar beweging.
Inaugurale rede Wageningen Universiteit, 34 p
- Bot, G.P.A., 1996. De Zonnekas: gewasproductie met duurzame in plaats van fossiele energie. EET projectvoorstel 46 p
- De Pascale, S and A. Maggio, 2005. Sustainable protected cultivation at a Mediterranean climate. Perspectives and challenges.
Acta Horticulturae 691, p29-42
- ECN: <http://www.energie.nl/index2.html?stat/trends.html>
- Innovatienetwerk Groene ruimte en agrocluster en Stichting Innovatie
Glastuinbouw, Den Haag, 25 p
- Opdam, J.J.G., G.G. Schoonderbeek, E.M.B. Heller en A. de Gelder,
2005. Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture.
Acta Horticulturae 691, pp 517-524
- Sonneveld, P.J, G.L.A.M. Swinkels, F. Kempkes, J. van Campen , G.P.A. Bot,
2006. Greenhouse with an integrated NIR filter and a solar cooling system.
Acta Horticulturae, 719, p.589-596
- Van Andel, E., 2002. Concept voor een energieproducerende kas.
Startnotitie voor een innovatietraject.
- Van Leeuwen, M.G.A., 2006. Het Nederlandse agrocomplex 2006.
LEI, Den Haag, Rapport 5.06.10, 46 p

Van Loon, W.K.P (sect), G.P.A. Bot (vz), G. Hagelaar, J. Sanders, H. Scholten (OWI), 2006. Nieuwe Energie uit Wageningen. Onderwijs in Technologie voor een Bio-based Society aan de Wageningen Universiteit.

Rapport OWI commissie Technologie voor een bio-based society. Wageningen Universiteit, 24p

Van der Velden, N.J.A., J. Janse, R.C. Kaarsemaker en R.H.M. Maaswinkel, 2004. Duurzaamheid van vruchtgroenten in Spanje; Proeve van monitoring. LEI, Den Haag, Rapport 2.04.04; 52 p