
Strategieverkenning verdamping

Verlaagde verdamping als middel om energie te besparen

Cecilia Stanghellini (IMAG)
Chris Blok (PPO)
Marleen Esmeijer (PPO)
Frank Kempkes (IMAG)

januari 2003

IMAG Nota P 2003-02

PPO Publicatie GT13056

Onderzoek in het kader van het
Convenant Glastuinbouw en
Milieu

Gefinancierd door:



IMAG



**PRAKTIJKONDERZOEK
PLANT & OMGEVING**

Strategieverkenning verdamping

Verlaagde verdamping als middel om energie te besparen

Cecilia Stanghellini (IMAG)
Chris Blok (PPO)
Marleen Esmeijer (PPO)
Frank Kempkes (IMAG)

januari 2003

IMAG Nota P 2003-02

PPO Publicatie GT13056

© 2003 Naaldwijk, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

© 2003 Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze publicatie mag elders worden vermeld, of vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG of de opdrachtgever. Bronvermelding zonder de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying or otherwise, without the prior written permission of IMAG.

Voorwoord

In het kader van het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI) hebben de overheid (ministeries van LNV en EZ) en de glastuinbouwsector (LTO-Nederland) afspraken gemaakt over de maatschappelijke randvoorwaarden, met als horizon 2010. Als doelstellingen zijn geformuleerd:

“Het terugbrengen van het fossiele energiegebruik per eenheid product tot 35 % ten opzichte van dit gebruik in 1980” en “Het aandeel duurzame energie moet toegenomen zijn tot 4 %.” De overheid heeft hier recent aan toegevoegd dat de glastuinbouw haar bijdrage moet leveren aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot.

Het binnen grenzen houden van de luchtvochtigheid draagt voor 10 tot 25 % bij aan het totale energieverbruik van kassen en is daardoor een goede kandidaat voor energiebesparing door verhoogde efficiëntie. Het LEI geeft aan dat vochtbeheersing en verlaging van de verdamping samen op zeer korte termijn een energiebesparing van meer dan 5% kunnen opleveren. (Ravensbergen, 2002). Tegen deze achtergrond zijn in de periode van januari 2002 tot en met november 2002 door het IMAG te Wageningen en PPO–Naaldwijk, in opdracht van het ministerie voor LNV en het Productschap Tuinbouw twee voorstudies uitgevoerd:

- Energiebesparing door vochtintegrerende regeling (PT project nr. 10970); IMAG Rapport P2002–73
- Verlaagde gewasverdamping; PPO Rapport GT565

Bij de afronding van deze studies hebben de opdrachtgevers uitgesproken, behoefte te hebben aan een “Strategieverkenning” waarbij de mogelijke middelen om gewasverdamping te verlagen zouden worden geëvalueerd t.a.v. effectiviteit, energiebesparing en potentieel voor implementatie.

Deze verkenning is uitgevoerd in een samenwerkingsverband van PPO-Naaldwijk en IMAG bv onder PT projectnummer 11338. De resultaten kunnen worden gebruikt om richting te geven aan het onderzoek naar energiebesparing door beïnvloeding van de gewasverdamping.

Inhoud

Voorwoord.....	5
Inhoud.....	7
Samenvatting.....	9
1 Inleiding	11
2 Stand van zaken	12
3 Processen.....	13
3.1 Wijze waarop verdamping kan worden verlaagd (mechanismen)	14
3.2 Wijze waarop verlaging van de verdamping het energieverbruik verlaagt.....	19
4 Maatregelen die de verdamping beïnvloeden	22
4.1 Kas.....	22
4.1.1 Isolerend dekmateriaal.....	22
4.1.2 Schermen.....	22
4.1.3 Belichting	23
4.2 Klimaat	23
4.3 Gewas	23
4.3.1 Teeltmaatregelen	24
4.3.1.1 De bladoppervlakte.....	24
4.3.1.2 Teeltperiode.....	25
4.3.1.3 Antitranspiranten	25
4.3.2 Wortelmilieu	26
4.3.2.1 Substraateigenschappen	26
4.3.2.2 Waterhuishouding	26
4.3.2.3 De osmotische potentiaal (EC) van het substraat	28
4.3.2.4 Wortelweerstand.....	28
5 Beoordeling.....	30
6 Discussie	32
6.1 Besparingsperspectieven per gewasgroep.....	33
6.2 Voorbeeld: Herfstteelt tomaat	34
7 Conclusies en aanbevelingen	36
7.1 Conclusies.....	36
7.2 Aanbevelingen	36
Literatuur	38

Samenvatting

Gewasverdamping in een kas is het verplaatsen van water van het wortelmilieu naar de buitenlucht en/of een condensatieoppervlakte. Om dit proces in gang te zetten moeten er én water én energie voor het verdampingsproces aan het bladoppervlak beschikbaar zijn (“bron”). Daarnaast, om de water-waterdampstroom in gang te houden, moet de waterdamp afgevoerd worden uit de kaslucht, door ventilatie en/of condensatie (“afvoer”).

Na een korte review van de huidige praktijk m.b.t. vochtthuishouding in kassen, hebben wij gekeken naar de effectiviteit van middelen om de gewasverdamping te verlagen (§ 3.1). Hierbij is een indeling in twee klassen gemaakt, met betrekking tot de manier waarop ze een effect hebben op de verdamping (op de bron dan wel de afvoer van waterdamp). Bij de eerste groep (bron) hoort: stoken, belichten, schermen, minder blad, gewasweerstand en beheersing van het wortelmilieu. Bij de tweede (afvoer) hoort: ventilatie, isolatie van het kasdek, schermen en kieren. Het is gebleken dat de efficiëntie (hoe sterk een middel moet worden ingezet om een significante verlaging van de verdamping te veroorzaken) heel sterk afhangt van welke proces (aanvoer van water en/of energie, dan wel afvoer van vocht) de limiterende factor is. Kort samenvattend, acties die een invloed hebben op de waterdamp “bron” kunnen het best worden gebruikt in de winter, terwijl acties met een effect op de afvoer van waterdamp het meest efficiënt zijn in het voor- en najaar. Echter, zelden zijn omstandigheden zo zwart/wit, en in de meeste gevallen zal een combinatie van acties het meest effectief zijn. Daarnaast (§ 3.2) is er gekeken naar de energiebesparing die een verlaging van de verdamping kan opleveren. Ook deze is afhankelijk van de situatie. Als de verdamping in gang wordt gehouden door toevoer van gratis zonenergie, valt er natuurlijk niets te besparen. Aan het andere extreem, als de verdamping in gang wordt gehouden door afvoer van warme vochtige lucht vanuit de kas, is er naast de potentiële besparing van verdampingswarmte ongeveer evenveel besparing te behalen aan voelbare warmte. De meeste energie valt er te besparen door de afvoer te verschuiven van ventilatie naar condensatie. Dit hoeft niet per sé de verdamping te verlagen, maar kan onder voorwaarden een gewenste bijkomstigheid zijn. De “waterdamp bron” verkleinen (bron acties) om energie te besparen is het meest efficiënt in de winter en het vroege voorjaar. Als ventilatie vrijwel de enige afvoermethode is (warmere perioden in het voor en najaar), dan kan het verlagen van de verdamping door een kleinere ventilatie heel veel energie besparen. Dit kan echter resulteren in een (te) hoge luchtvochtigheid, gepaard met een verhoogd risico van (schimmel)ziekten. In dit geval kan het nuttig zijn om de reductie van de ventilatie te koppelen aan een reductie van wateraanvoer naar de bladeren. Daarnaast, omdat vrijwel altijd een combinatie van processen een rol spelen, zal in de meeste gevallen de energie-optimale verlaging van de verdamping in een combinatie van acties resulteren.

De maatregelen om reductie van de verdamping te bereiken zijn in hoofdstuk 4 de revue gepasseerd. M.b.t. mogelijke kas/klimaatmaatregelen blijkt dat bij een optimale inzet hiervan er rekening gehouden moet worden met variërende weersomstandigheden in combinatie met teelteisen. V.w.b. wateraanvoer is geconcludeerd dat maatregelen met een langdurig effect op de weerstand voor watertransport (antitranspiranten, substraten met een hoge hydraulische weerstand, hogere elektrische geleidbaarheid (EC)) waarschijnlijk een grotere verlaging van de productie dan van de verdamping

veroorzaken. Daarnaast, is verdamping vrij ongevoelig voor het regelen van wateropname door EC en/of voedingsgift, tenminste in een EC-bereik dat niet (te) nadelig is voor de productie. Selectief bladplukken (of het inzetten van variëteiten met minder blad) en de wateropname beïnvloeden door worteltemperatuur en/of wateraanvoer lijken de meest perspectiefvolle mogelijkheden in dit veld.

Geconcludeerd kan worden dat de beste maatregel om de verdamping te beperken dan wel het vocht “energetisch” optimaal af te voeren, afhankelijk is van de combinatie van momentane weersomstandigheden met specifieke teelteisen. Toch kunnen wij twee grote groepen van ingrepen onderscheiden, waarmee veel winst te halen valt:

- De juiste combinatie van maatregelen, waarvoor een gereedschap ontwikkeld moet worden om de momentaan beste maatregelen aan elkaar te koppelen tot een optimale vocht- en verdampingsstrategie. Een dergelijk gereedschap ingebouwd in de klimaatcomputer vormt een geavanceerde “vocht- en verdampingsregelaar” die optimaal gebruik maakt van alle beschikbare middelen van de klimaatregeling, om zowel de energietoevoer als de waterdamp afvoer te beheersen. Het optimalisatieproces moet rekening houden met zowel weersomstandigheden als ook met kas- en gewaseigenschappen.
- Beperken van de waterdampafgifte van het gewas, zo mogelijk zonder nadelige consequenties voor de productie en kwaliteit. Dit kan gebeuren door ten eerste na te gaan in hoeverre het mogelijk is om de verdamping te verlagen door meer blad te plukken in de beruchte “vochtproblemen” perioden. Daarnaast, is er behoefte aan een evaluatie op effectiviteit van “snelle” middelen om de watertoevoer naar de bladeren te beheersen (zoals wateraanvoer en/of worteltemperatuur). Bij voldoende perspectief, moet een strategie (dat is het afwegen van winst t.o.v. mogelijke productieverlies) ontwikkeld worden voor het inzetten van wortelmilieu-beheersingsmiddelen.

De meeste (technische) middelen zijn aanwezig om een snelle implementatie in de praktijk, en een aanzienlijke energiebesparing op sectorniveau binnen 5 jaar te waarborgen. Echter, voordat het zo ver is, moeten enkele lacunes in de aanwezige kennis worden weggewerkt. Het gaat met name om:

- Lacunes t.a.v. teelttechnische randvoorwaarden (voorkomen van natslaan, fysiologische problemen) voor een optimale vochtregeling.
- De effectiviteit van combinaties van middelen om de gewasverdamping “via de plant” te verlagen, moet zowel in scenariostudies geëvalueerd worden als in experimenten getoetst worden.
- De relatie bladoppervlakte en productie, voor wat betreft identificatie van “overbodige” bladeren.
- Gebrek aan kennis rond het effect van beperkte watertoevoer op de productie.
- Behoeft aan het ontkoppelen van voeding en water toediening.

1 Inleiding

De vochtregeling (het binnen grenzen houden van luchtvochtigheid) draagt voor 10 tot 25 % bij aan het totale energieverbruik van kassen en is daardoor een goede kandidaat voor energiebesparing als de efficiëntie ervan kan worden verhoogd. In het onlangs verschenen LEI-rapport “Richtingen voor het Glami energieonderzoek gezien vanuit onderzoeksoptiek” (Ravensbergen, 2002) wordt gespeld dat vochtbeheersing en verlaging van de verdamping samen, een energiebesparingpotentieel van boven de 5% op zeer korte termijn hebben. Mede op basis hiervan zijn in 2002 door IMAG bv te Wageningen en PPO–Naaldwijk, in opdracht van het ministerie voor LNV en het Productschap Tuinbouw twee studies uitgevoerd:

- Energiebesparing door vochtintegrerende regeling (PT project nr. 10970); IMAG Rapport P2002–73
- Verlaagde gewasverdamping; PPO Rapport GT565.

De focus van de eerste voorstudie was om de energiebesparing te bepalen die kan worden behaald als men de nu gangbare vochtregeling vervangt door een te realiseren minimale “verdampingssom”, over een bepaald tijdsinterval, waarbij de energie input wordt geminimaliseerd. De belangrijkste conclusie was dat betere regelaars voor vochtregeling een heel groot potentieel voor energiebesparing hebben, mits men een (zij het beperkte) verlaging van het verdampingsniveau aanvaardt.

De tweede voorstudie was gericht op het beperken van de gewasverdamping en het energieverbruik in een tomatenteelt door manipulatie van het drainagepercentage en de EC van de watergift. De beoogde instellingen konden niet gerealiseerd worden, waardoor onduidelijk bleef of drainagepercentage en EC van de watergift bruikbare grootheden zijn om energie te besparen. Wel bleek het bladoppervlakte af te nemen als de drainpercentages werden verlaagd van 30% naar 0-10%.

Tijdens het bespreken van de eindverslagen van bovengenoemde projecten, hebben de opdrachtgevers de behoefte uitgesproken aan een “Strategieverkenning” waarbij de mogelijke middelen om gewasverdamping te verlagen zouden worden geëvalueerd t.a.v. effectiviteit, energiebesparing en potentieel voor implementatie. Dit rapport omvat de resultaten van deze strategieverkenning.

2 Stand van zaken

Meerdere praktijkproeven hebben in de jaren '90 aangetoond dat de verdamping in de teelt van verschillende vruchtgroenten 10-30% verlaagd kon worden, zonder opbrengst in te leveren (meerdere auteurs, samengevat in Esmeijer, 1998). Het loslaten van de minimumbuisinstellingen leidde op praktijkbedrijven tot gemeten energiebesparingen van 10-20% in bruikbare perioden wat ongeveer 5% op jaarbasis was (De Graaf, 2001). Uit het bovenstaande en de in hoofdstuk 1 genoemde voorstudies is gebleken dat er een sterke relatie is tussen de gewasverdamping en het energieverbruik.

In de huidige praktijk wordt wel op vocht geregeld, maar wordt niet bewust de verdamping gestuurd met het oogmerk energie te besparen. De huidige vochtregeling behelst in het kort het afvoeren van waterdamp middels ventilatie indien de luchtvochtigheid een gegeven setpoint overschrijdt. In de praktijk kan dat op twee manieren:

- De ramen worden geopend waardoor waterdamp en warmte uit de kas verdwijnen. Als de temperatuur daardoor te veel daalt komt de verwarming bij.
- De buistemperatuur wordt afhankelijk van het vochniveau verhoogd, waardoor de kasluchttemperatuur boven de ventilatietemperatuur stijgt en de ramen worden geopend, met als gevolg dat waterdamp en warmte uit de kas verdwijnen.

Het laatste wordt ook wel vochtafhankelijke minimumbuisinstelling genoemd en wordt in toenemende mate gebruikt.

In het algemeen zijn de tuinders niet snel bereid om een scherpere regeling met lagere minimumbuistemperaturen te proberen. De risico's worden te groot geacht.

Onder bepaalde omstandigheden, wordt wel geprobeerd om de verdamping van het gewas te stimuleren door bijvoorbeeld een minimumbuistemperatuur in te stellen.

Ventileren zonder compenserende verwarming en vochtafvoer door condensatie worden bijna nooit in de strategie opgenomen.

Gezien de sterke relatie tussen gewasverdamping en energiegebruik is er wel behoefte aan een goede strategie om de gewasverdamping op een efficiënte wijze te verlagen. Ook bij leveranciers van klimaatcomputers is er belangstelling voor een betere aanpak van de vochtregeling.

Er zijn in principe veel middelen om de gewasverdamping te beïnvloeden: via de wortels (aanvoer van water); via de teelt ("gemak" waarmee het water vrijkomt) en via het kasklimaat ("verdampingsvraag"). Deze strategieverkenning heeft dan ook ten doel:

- Het ontwikkelen van een methode om de vele maatregelen die de gewasverdamping kunnen verlagen, te kunnen beoordelen op energie-efficiëntie.
- Het identificeren van uitvoerbare en effectieve combinaties van middelen om via verlaging van de gewasverdamping het energieverbruik te verlagen.

In hoofdstuk 3 volgt een procesbeschrijving met de wijze waarop verdamping kan worden verlaagd (hoe werken de mechanismen) en de manier waarop een vermindering van de verdamping het energieverbruik verlaagt. In hoofdstuk 4 is een opsomming gegeven van de maatregelen die de tuinder kan nemen om de gewasverdamping te beïnvloeden. Als laatste volgt er in hoofdstuk 5 een beoordeling van de besproken maatregelen (teelt, wortel en klimaat), met betrekking tot werkwijze (mechanisme); toepassingsperiode en perspectieven ten aanzien van te verwachten implementatie in de praktijk.

3 Processen

Gewasverdamping is het verplaatsen van water, aanwezig in de wortelzone, naar de [kas]lucht, in de vorm van waterdamp. Er moet dus een waterstroom in de plant ontstaan, die gelijk is aan het waterverlies door de bladeren. Het laatste is het resultaat van twee deelprocessen: ten eerst de aanvoer van voldoende energie om het verdampingsproces (omzetten van water in waterdamp) te laten gebeuren, en als tweede de afvoer van de waterdamp weg van het bladoppervlak. Bij onvoldoende (lokale) afvoer wordt het luchtlaagje rondom het bladoppervlak (grenslaag) verzadigd, en dan verdampt er evenveel vocht als er condenseert.

In een kas neemt de dampconcentratie van de lucht toe als er meer waterdamp vrijkomt dan afgevoerd wordt, tot verdamping en vochtafvoer in evenwicht zijn. In gangbare Nederlandse kassen, is de gewasverdamping verreweg de grootste bron van waterdampaanvoer en de -afvoer gebeurt (tot nu toe) alleen door ventilatie of condensatie aan koude kaselementen (meestal het dek). In formule:

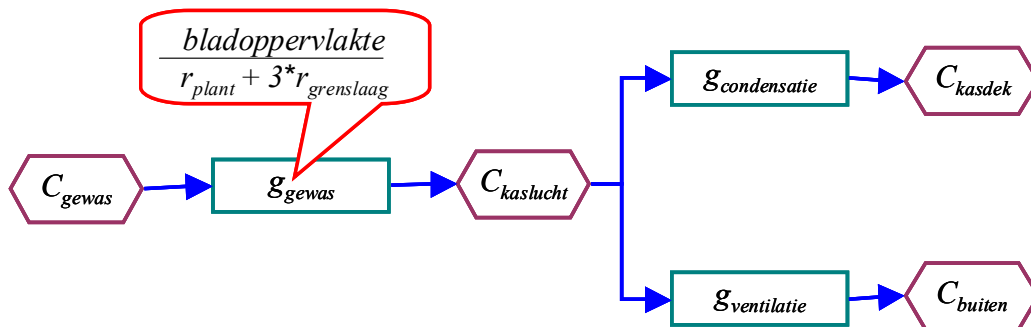
$$\text{gewasverdamping} = \text{ventilatie} + \text{condensatie} \quad \text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (1)$$

Zoals bekend, is bij alle transportprocessen de massastroom evenredig met het dichtheidverschil tussen de bron en de bestemming.

$$\text{stroom} = g * (C_{\text{bron}} - C_{\text{bestemming}}) \equiv (C_{\text{bron}} - C_{\text{bestemming}}) / r \quad \text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (2)$$

De evenredigheidsconstante g of *geleiding* wordt vaak ook aangegeven als de reciproke van de weerstand r ($1/r$) en geeft aan hoe “gemakkelijk” de stof zich kan verplaatsen. Bij de gewasverdamping dient de kaslucht als “bestemming” voor de waterdamp, terwijl bij condensatie en ventilatie de kaslucht de “bron” is van waterdamp.

Figuur 1 Schematische weergave van de waterdampstromen (blauwe pijlen) in een kas. C

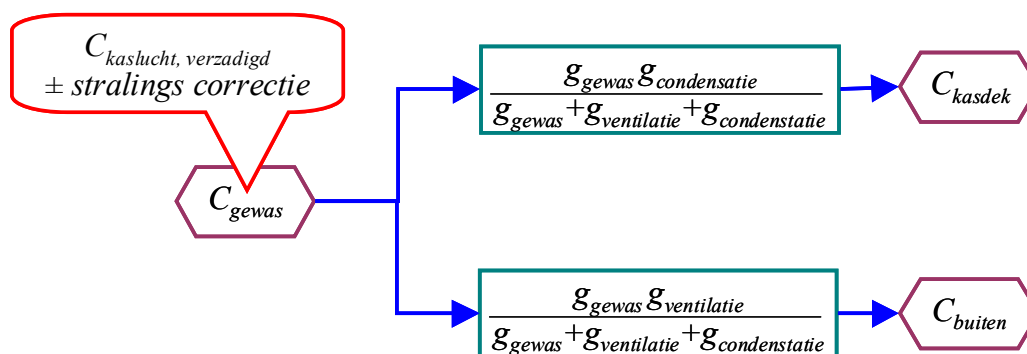


betekent “waterdamp concentratie” en g betekent “geleiding”. De gewasverdamping is de stroom vanuit het gewas naar de kaslucht, en deze is gelijk aan de som van de ventilatie en condensatiestromen. De formule voor de gewasgeleiding t.o.v. de plant- en grenslaagweerstand (r) is verklaard door Stanghellini, 1995. Onder C_{kasdek} en C_{gewas} moet men verstaan de concentratie van het verzadigde luchtlaagje in contact met het oppervlak. Het laagje heeft bij benadering dezelfde temperatuur als het oppervlak.

Figuur 1 maakt duidelijk dat de kaslucht alleen maar een schakel is tussen de dampbron (het gewas) en de echte dampafvoer (condensatie en/of ventilatie). Daarbij neemt de

vochtinhoud van de kaslucht de waarde aan waarbij de stromen in evenwicht zijn (vergelijking 1). De dampconcentratie van de kaslucht is dus geen onafhankelijke variabele, maar wordt bepaald door een combinatie van concentraties en geleidingen, zoals in Figuur 2 is weergegeven.

Figuur 2 Schematische weergave van de gewasverdamping in een kas, zoals in Figuur 1, hier is echter rekening gehouden met het feit dat de dampconcentratie van de kaslucht geen



onafhankelijke variabele is, maar bepaald wordt door de hier aangegeven combinatie van concentraties en geleidingen. De formule voor de verdamping en de afleiding daarvan is gegeven in Stanghellini & Kempkes, 2002.

De waterdampconcentratie van het gewas wordt bepaald door de energietoevoer aan de bladeren, en is gelijk aan de verzadigde concentratie bij de luchttemperatuur, plus een “stralingscorrectie” (Stanghellini, 1995). Alleen bij uitstraling (zoals bij een ongeschermd gewas in een koude, heldere nacht) is de correctie negatief. De orde van grootte van de drie geleidingen is aangegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Drie belangrijke geleidingen die de gewasverdamping beïnvloeden

Geleiding	Jaargemiddelde (mm/s)	Min (mm/s)		Wanneer
		Max (mm/s)		
g_{gewas}	2-4 (gewasafhankelijk)	0.02		Kleine gewassen , s'nachts
		5-10 (gewasafhankelijk)		Zonnige middag, groot gewas
$g_{\text{condensatie}}$	2-3 (geen dubbeldek)	0		Goed geïsoleerd kasdek
		5		Zeer koud kasdek
$g_{\text{ventilatie}}$	3-4	0.03		Ramen+scherm dicht
		50		Ramen open, veel wind

De geleiding voor ventilatie is te berekenen door middel van modellen, zoals De Jong voor Venlo kassen heeft gedaan, (De Jong, 1990). Deze is gelijk aan het ventilatiedebiet per vierkante meter kasoppervlakte

3.1 Wijze waarop verdamping kan worden verlaagd (mechanismen)

Een tuinder die de verdamping wenst te verlagen heeft een aantal aangrijpingspunten om dat te bereiken, zoals uit Figuur 1 en Figuur 2 gelezen kan worden. Ten eerste de

concentratieverschillen kleiner maken (vergelijking 2), door óf de C_{gewas} kleiner te maken. Omdat C_{gewas} vrijwel altijd groter is dan C_{kasdek} betekent dit óf de C_{gewas} kleiner maken, óf C_{kasdek} (d.w.z. de kasdektemperatuur) groter maken; aan de waterdampconcentratie van de buitenlucht kan een tuinder (helaas) niet tornen. Ten tweede door de geleidingen te verlagen. Hoe dat allemaal bereikt kan worden is in Tabel 2 weergegeven.

Tabel 2 Aangrijpingspunten / acties om de gewasverdamping te verlagen; eerste kolom: grootheden die een effect hebben op de gewasverdamping (de richting van de pijl in de tweede kolom geeft aan of deze grootheid omhoog of omlaag moet worden gebracht om de verdamping te verlagen); derde kolom: beïnvloedbare variabelen (vierde kolom benodigde richting van deze variabele) en vijfde kolom: mogelijke acties om deze variabelen te beïnvloeden.

Grootheid	Hoe	Variabele	Hoe	Mogelijke acties
C_{gewas}	↓	Kastemperatuur	↓	• minder stoken
		Zoninstraling	↓	• geen belichting gebruiken • dubbeldek gebruiken • scherm gebruiken
		Warmte-uitstraling	↑	• enkeldek gebruiken • geen energiescherm gebruiken
C_{kasdek}	↑	Kasdekisoleriewaarde	↑	• dubbeldek gebruiken • energiescherm gebruiken
		Schermkier	↑	• grotere kier gebruiken
g_{gewas}	↓	Plantweerstand	↑	• EC verhogen • water aanvoer verlagen • antitranspiranten aanbrengen • worteltemperatuur verlagen
		Grenslaag weerstand	↑	• geen ventilatoren • geen luchtverwarming
		Bladoppervlakte	↓	• (meer) blad plukken • gewas met minder blad
$g_{\text{condensatie}}$	↓	Vochtkier	↓	• kleinere kier gebruiken
$g_{\text{ventilatie}}$	↓	Raamstand	↓	• kleinere raamstand

Als we de laatste kolom van Tabel 2 bekijken, dan zien we daar acties staan die de tuinder kan ondernemen om de gewasverdamping te verlagen. Zonder al te veel in detail te treden, kunnen we acties onderscheiden die te maken hebben met ingrepen op het gewas (teeltmaatregelen), op het kasklimaat(klimaatmaatregelen) en op de kasuitrusting (investeringsbeslissingen). Tabel 3 is, vanuit dit oogpunt, een verwerking van Tabel 2.

Tabel 3 Overzicht van acties op kas, klimaat en gewas met de daarbij behorende gevolgen op de verdamping. Eerste kolom: belangrijkste kas/klimaat en gewas acties die invloed hebben op de gewasverdamping; tweede kolom: welke klimaat- dan wel gewasvariabele wordt hiermee beïnvloedt (de richting van de pijl in de derde kolom geeft aan hoe deze variabele verandert); vierde kolom: welke voor de verdamping relevante grootheid wordt door de variabele beïnvloedt en in welke richting (vijfde kolom); en laatst, wat is het gevolg hiervan voor de gewasverdamping (verhoging of verlaging).

	Mogelijke acties	Variabele	Richting	Grootheid	Richting	Verdamping
Kas	Dubbeldek	Zoninstraling	↓	C_{gewas}	↓	↓
		Warmte-uitstraling	↓	C_{gewas}	↑	↑
		Kasdekisoleriewaarde	↑	C_{kasdek}	↑	↓
	Scherm	Zoninstraling	↓	C_{gewas}	↓	↓
		Warmte-uitstraling	↓	C_{gewas}	↑	↑
		Kasdekisoleriewaarde	↑	C_{kasdek}	↑	↓
Belichting	Instraling	↑	C_{gewas}	↑	↑	
Klimaat	Stoken	Kastemperatuur	↑	C_{gewas}	↑	↑
	Ventileren	Raamstand	↑	$g_{\text{ventilatie}}$	↑	↑
	Vochtkier (t.o.v. dicht scherm)	Warmtetransport	↑	C_{kasdek}	↑	↓
		Vochttransport	↑	$g_{\text{condensatie}}$	↑	↑
	Ventilatoren	Lucht beweging	↑	g_{gewas}	↑	↑
	Luchtverwarming	Lucht beweging	↑	g_{gewas}	↑	↑
Gewas	(meer) blad plukken	Bladoppervlakte	↓	g_{gewas}	↓	↓
	Antitranspiranten	Plantweerstand	↑	g_{gewas}	↓	↓
	Water aanvoer verlagen	Plantweerstand	↑	g_{gewas}	↓	↓
	Druppel EC verhogen	Plantweerstand	↑	g_{gewas}	↓	↓
	Wortelkoeling	Plantweerstand	↑	g_{gewas}	↓	↓

Dat de zaken niet altijd eenduidig zijn, is b.v. te zien aan het feit dat een scherm, of ook een kier in het scherm meerdere variabelen beïnvloeden, die conflicterende gevolgen kunnen hebben voor de verdamping (Tabel 3). Echter, zoals impliciet door Figuur 2 wordt aangegeven, is de effectiviteit van elke actie afhankelijk van de omstandigheden: b.v. als de meeste waterdamp wordt afgevoerd door condensatie, heeft het weinig zin om aan de raamstand te gaan sleutelen. Of om antitranspiranten te gaan toepassen als de grenslaagweerstand al groot is (zie Figuur 1).

Het effect op de gewasverdamping van een variabele, kan bepaald worden door de afgeleide van de verdamping t.o.v. die variabele te berekenen (d.w.z. berekenen hoe de verdamping varieert als gevolg van een kleine verandering in de waarde van die variabele). Omdat het effect vrijwel altijd afhangt van de omstandigheden, zullen in de formule van een afgeleide, vaak (de) andere variabelen voorkomen.

Wij zullen zien dat een veel voorkomende factor in vrijwel alle afgeleiden de “versterkings-factor” is:

$$V = \frac{g_{\text{condensatie}} + g_{\text{ventilatie}}}{g_{\text{gewas}} + g_{\text{condensatie}} + g_{\text{ventilatie}}} \quad - \quad (3)$$

Er zijn slechts twee mogelijke gevallen waarbij V tot 1 nadert: een heel kleine g_{gewas} t.o.v. de andere twee (b.v. koude nachten met een klein gewas) óf een heel groot ventilatiedebiet (ramen wijd open bij redelijk veel wind). De gevallen waarbij V tot 1 nadert, zullen wij “bron beperkt” noemen, d.w.z. er zou meer waterdamp afgevoerd kunnen worden dan er geproduceerd wordt. Andersom, V is heel klein als de “afvoer”geleidingen ($g_{\text{condensatie}}$ en $g_{\text{ventilatie}}$) veel kleiner zijn dan g_{gewas} (het vermogen van het gewas om waterdamp te produceren). Deze gevallen zullen wij “afvoer beperkt” noemen. Alle andere gevallen (en dat zijn ook de meeste), zijn in het brede “grijze gebied” waar zowel aanvoer als afvoer een rol spelen. Dit wordt nog eens bevestigd omdat bij de gemiddelde waarden van alle drie de geleidingen (rond 3 mm/s, Tabel 1), V gemiddeld rond 0.6 is en daarmee in het middengebied zit.

Zo kan aangetoond worden (basisformules zijn te vinden in Stanghellini & Kempkes, (2002), dat b.v. het effect op de gewasverdamping (E) van een variatie in straling is:

$$\frac{\Delta E}{E} = V \frac{\Delta \text{Straling}}{\text{Straling}} \quad - \quad (4)$$

D.w.z. een variatie in 10% in de straling geeft een (altijd kleinere) variatie van $V * 10\%$ in de verdamping. In de “bron beperkte” omstandigheden, heeft een variatie in de straling de grootste invloed. Vergelijkbaar is het effect van g_{gewas} :

$$\frac{\Delta E}{E} = V \frac{\Delta g_{\text{gewas}}}{g_{\text{gewas}}} \quad - \quad (5)$$

Als het gaat om mogelijke acties om g_{gewas} te verlagen om de verdamping tegen te gaan (zie Tabel 2 en Tabel 3), moet men echter rekening houden met het feit dat zulke acties alleen één van de componenten van g_{gewas} beïnvloeden, b.v. de plantweerstand of de bladoppervlakte, waardoor een andere factor, kleiner dan 1 wordt toegevoegd. Zo is bijvoorbeeld het effect van een variatie in de plantweerstand:

$$\frac{\Delta E}{E} = -V \frac{\Delta r_{\text{plant}}}{3r_{\text{grenslaag}} + r_{\text{plant}}} \quad - \quad (6)$$

Waarbij het min teken aangeeft dat verhogen van de weerstand een verlaging van de verdamping geeft en andersom. Als de grenslaagweerstand ongeveer even groot is als de plantweerstand, heeft een variatie van b.v. 20% in de plantweerstand een effect van slechts $V * 5\%$ op de gewasverdamping. Een hoge grenslaag weerstand is vaak het geval bij kasgewassen door de beperkte luchtbeweging rondom de bladeren.

Bladoppervlakte heeft een functie als bron van waterdamp, maar ook als ontvanger van straling. Er kan berekend worden dat:

$$\Delta E = V \cdot g_{\text{gewas}} (C_{\text{kaslucht, verzadigd}} - C_{\text{kaslucht}}) \frac{\Delta \text{bladoppervlakte}}{\text{bladoppervlakte}} \quad \text{g m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (7)$$

Bijvoorbeeld, verminderen van de bladoppervlakte met 20%, in het geval dat $V=0.6$, $g_{\text{gewas}}=1 \text{ mm s}^{-1}$ en het verzadigingsdeficit van de kaslucht 5 g m^{-3} is, verlaagt de verdamping met $2 \text{ g m}^2 \text{ h}^{-1}$, wat ongeveer 10% is van de gangbare verdamping van een volgroeid tomatengewas, in een voorjaarsnacht. Hierbij is er van uitgegaan dat elk blad evenveel bijdraagt aan de verdamping van de plant.

Een andere variabele die te maken heeft met de aanvoer van energie voor de verdamping is de kasluchttemperatuur. In plaats van procentuele variaties, zullen wij hier het effect van het verlagen/verhogen van de temperatuur met een graad analyseren. Dat is:

$$\frac{\Delta E}{\Delta T_{\text{kas}}} = V \cdot K_T \cdot g_{\text{gewas}} \quad \text{g m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (8)$$

waarbij K_T een evenredigheidsconstante is (ongeveer $1 \text{ g m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ bij 18°C). Vergelijking (8) laat zien dat het verlagen van de luchttemperatuur pas effect heeft op de gewasverdamping als niet alleen $V \gg 0$ (afvoer niet beperkend), maar ook g_{gewas} voldoende groot is (dus geen kleine bladoppervlakte; stilstaande lucht of hoge plantweerstand).

Het effect van het verhogen van de temperatuur van het kasdek kan ook berekend worden

$$\frac{\Delta E}{\Delta T_{\text{kasdek}}} = -(1-V) \cdot K_T \cdot g_{\text{condensatie}} \quad \text{g m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (9)$$

Uit vergelijking (9) is te zien dat de temperatuur van het kasdek in alle gevallen invloed heeft waarbij:

- Vochtafvoer wel de beperkende factor is ($V \ll 1$) en
- Waterdampbeweging naar het dek ($g_{\text{condensatie}} \gg 0$) niet geremd wordt (zoals b.v. door een scherm)

Echter, er zijn maar twee manieren om de temperatuur van het kasdek te beïnvloeden: de één is "permanent", d.w.z. het toepassen van een dekmateriaal met hoge isolatiewaarde, de andere is het selectief toepassen van vochtkieren in een scherm. Een vochtkier is een middel om $g_{\text{condensatie}}$ te beïnvloeden. Het effect van variatie hiervan (aannemend dat $g_{\text{condensatie}}$ kan variëren zonder effect te hebben op de dektemperatuur) op de gewasverdamping kan ook berekend worden:

$$\frac{\Delta E}{\Delta g_{\text{condensatie}}} = (1-V)(C_{\text{kaslucht}} - C_{\text{kasdek}}) \quad \text{g m}^3 \quad (10)$$

Omdat de kasdektemperatuur “meegaat” met $g_{condensatie}$ maar het effect op de verdamping andersom is (vergelijking 9), is het gevolg van een vochtkier niet in een simpele formule te vatten. IMAG (Kempkes et al., 2000) hebben aangetoond dat d.m.v. een adaptieve regeling, een vochtkier een goed middel is om de luchtvochtigheid in een kas te beheersen. Daarbij werd aangetoond dat er een “optimale” breedte (afhankelijk van andere variabelen) is waarbij de kier het meest effectief is. Alhoewel in die proef de gewasverdamping niet waargenomen werd, is dit resultaat een impliciete bevestiging van vergelijkingen (9) en (10).

Bij bovengenoemde formules geldt de volgende kanttekening: vrijwel alle acties hebben ook een secundaire effect (b.v. stoken verhoogt niet alleen de luchttemperatuur maar ook de straling op het gewas, of belichten verhoogt niet alleen de straling maar ook de luchttemperatuur), waarmee in deze analyse geen rekening is gehouden, omdat het veelal afhangt van de combinatie kas/klimaat/gewas. Simulatiemodellen zijn het meest voor de hand liggende middel om het gevolg van een actie onder specifieke omstandigheden te bepalen, maar door de hier gegeven analyse kan men wel een gevoel krijgen van de potentie van verschillende middelen om de gewasverdamping te verlagen, en de omstandigheden die een invloed hebben op de grootte van hun effect.

Als laatste is het mogelijk om te berekenen wat de invloed is van de meest voor de hand liggende en belangrijkste vochtafvoer methode, de ventilatie:

$$\frac{\Delta E}{\Delta g_{ventilatie}} = (1 - V)(C_{kaslucht} - C_{buiten}) \quad \text{g m}^{-3} \quad (11)$$

Bijvoorbeeld: bij een verschil in dampconcentratie tussen binnen en buiten van 5 g m^{-3} en een V van 0.5 (afvoer beperkte verdamping), laat een variatie van 1 luchtverversing per uur de verdamping variëren met ongeveer 9 g m^{-2} per uur, wat b.v. de helft is van de verdamping van een ontwikkeld tomatengewas in een voorjaarsnacht.

Resumerend, het effect van alle mogelijke ingrepen op de verdamping wordt “gedempt” óf door een factor V (bron gerelateerde ingrepen: straling, gewasgeleiding, kasluchttemperatuur) óf $1 - V$ (afvoer gerelateerde maatregelen: kasdektemperatuur, vochtkier en ventilatie). V is relatief groot bij “bron beperkte” omstandigheden.

3.2 Wijze waarop verlaging van de verdamping het energieverbruik verlaagt

Zoals eerder gezegd, gewasverdamping is het resultaat van energieaanvoer aan de bladeren, en vochtafvoer uit de kas. De benodigde energie (latente warmte) voor de verdamping van 1 kg water is: $\approx 2.5 \text{ MJ}$. Bij een nachtverdamping van $20 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ is dat ongeveer 16 m^3 gas per ha kas, per uur (energie inhoud van aardgas is ongeveer 32 MJ per m^3). Altijd als er gestookt wordt, wordt een deel van de stookenergie gebruikt voor de verdamping. Zolang het verwarmen van de kas het enige doel van het stoken is, is energiebesparing door verlaging van de gewasverdamping slechts mogelijk door het beperken van de dampbron (bladoppervlak en/of gewasweerstand). Als er (vrijwel) niet

gestookt hoeft te worden (bron beperkte gevallen in de zomer), geeft het verlagen van de verdamping natuurlijk geen energiebesparing.

Heel anders is het geval dat de afvoer van waterdamp de beperkende factor is. Wij hebben gezien dat er twee afvoermiddelen zijn: condensatie en ventilatie. Bij ventilatie komt bij de energie voor het verdampingsproces ook de energiekosten om de waterdamp uit de kas te krijgen. Dit kan als volgt geschat worden: laat het gemiddelde verschil in waterdamp concentratie tussen de kas- en buitenlucht $\approx 5 \text{ g.m}^{-3}$ zijn. Om dan b.v. 20 g m^{-2} per uur water af te voeren, moeten er 4 kubieke meter lucht per m^2 kas per uur weg geventileerd worden (dit is ongeveer één verversing per uur). Laat het gemiddelde temperatuurverschil tussen binnen en buiten $\approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$ zijn. De specifieke warmte van lucht is $\approx 1200 \text{ J.m}^{-3}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. De voelbare warmte-inhoud van de afgevoerde lucht is dan: $10 \text{ }^\circ\text{C} \times 1200 \text{ J.m}^{-3}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ wat ook nog eens 15 m^3 gas per ha kas per uur is. Dit betekent dat de verdamping van een tomatengewas in een voorjaarsnacht zo'n 30 m^3 gas per ha per uur kost.

Condensatie is een veel efficiënter middel om waterdamp af te voeren: bij condensatie wordt een gedeelte van de latente warmte terugverdiend (deels aan de kaslucht, deels aan het dek) en is er geen verlies aan voelbare warmte. Er valt dus veel energie te besparen door de condensatie zo groot mogelijk te maken (de vochtafvoer verschuiven van ventilatie naar condensatie) en dit hoeft niet persé de verdamping te verlagen. De energiebesparing die kan worden gehaald door de verdamping te verminderen, is dus sterk afhankelijk van de omstandigheden. Een korte samenvatting ervan is in 4 en 5 weergegeven.

Tabel 4 *Energiebesparing door verdamping te verminderen met een gegeven hoeveelheid, in de bronbeperkte situatie, afhankelijk van de warmtebehoefte. L is de verdampingsenergie (latente warmte) van de hoeveelheid water die anders wel verdampt zou zijn (dit komt overeen met ongeveer $0,08 \text{ m}^3$ gas per liter water).*

Bron beperkt ($V \approx 1$)	bespaarde Energie
Stoken	L
niet stoken	Geen

Tabel 5 *Energiebesparing door verdamping te verminderen met een gegeven hoeveelheid, in de afvoerbepaalde situatie, afhankelijk van overheersende ventilatie of condensatie. L is de verdampingsenergie (latente warmte) van de hoeveelheid water die anders wel verdampt zou zijn (dit komt overeen met ongeveer $0,08 \text{ m}^3$ gas per liter water).*

Afvoer beperkt ($V \ll 1$)	Bespaarde Energie
$g_{\text{condensatie}} \gg g_{\text{ventilatie}}$	$\approx 0.5 \text{ L}$
$g_{\text{condensatie}} \ll g_{\text{ventilatie}}$	$\approx 2 \text{ L}$

Een maat voor de mogelijke energie besparing van een actie gericht op het verminderen van de verdamping, is het product van de efficiëntie waarmee de verdamping wordt verlaagd (vergelijkingen 4 t/m 11), en de energie besparing verbonden aan het verlagen van de verdamping (4 en 5). Dit is in 6 samengevat. Zoals al eerder gezegd, moet men zich realiseren dat in Tabel 6 de extremen in kaart worden gebracht, terwijl de meeste gevallen zullen voorkomen in het gebied tussen deze twee extremen.

Tabel 6 Efficiëntie van energiebesparing van een actie gericht op verlaging van de gewasverdamping, afhankelijk van de omstandigheden (bron dan wel afvoer beperkt) en het type actie (manipulatie van de bron dan wel afvoer). De getallen 2 en 0.5 zijn bij benadering en niet exact. De exacte waarde hangt van omstandigheden af.

	Bron beperkt ($V \approx 1$)	Afvoer beperkt ($V \ll 1$)	
<u>“bron” acties:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Straling • g_{gewas}^* • T_{kas} 	V x L	$g_{\text{condensatie}} \gg g_{\text{ventilatie}}$	≈ geen
		$g_{\text{condensatie}} \ll g_{\text{ventilatie}}$	≈ V x 2 L
<u>“afvoer” acties:</u> <ul style="list-style-type: none"> • T_{kasdek} • $g_{\text{condensatie}}$ • $g_{\text{ventilatie}}$ 	(1 - V) x L	$g_{\text{condensatie}} \gg g_{\text{ventilatie}}$	≈ (1 - V) x 0.5 L
		$g_{\text{condensatie}} \ll g_{\text{ventilatie}}$	≈ (1 - V) x 2 L

*) bij g_{gewas} moet men rekening houden met het feit dat vaak slechts één van de componenten ervan wordt beïnvloed, en dus de variatie van g_{gewas} vaak (veel) kleiner is dan de variatie in de component.

Om energie te besparen is dus de “waterdamp bron” verkleinen (bron acties) het meest efficiënt in bron-beperkte omstandigheden (winter en vroege voorjaar). In afvoer beperkte omstandigheden (voor- en najaar) en als ventilatie vrijwel de enige afvoermethode is, dan kan het verlagen van de verdamping door een kleinere ventilatie heel veel energie besparen. Dit kan echter resulteren in een (te) hoge luchtvochtigheid, gepaard met verhoogd risico van (schimmel)ziekten. In dit geval (en als V niet te klein is) kan het nuttig zijn om de reductie van de ventilatie te koppelen met een reductie van de waterdampbron.

4 Maatregelen die de verdamping beïnvloeden

4.1 Kas

4.1.1 Isolerend dekmateriaal

In hoofdstuk 3 (Tabel 3) zijn de verschillende en soms tegenovergestelde effecten van een dekmateriaal met hoge isolatiewaarde aangegeven. Omdat dit een “once in a lifetime” keuze voor de tuinder is en de eigenschappen van zo’n dek niet “te regelen” zijn, laten wij de gevolgen hiervan in deze context kort de revue passeren. Wij zullen ons beperken tot de moderne materialen (zoals Lexan®) waarbij de hoge isolatie is bereikt zonder “lichtverlies”. Dat betekent dat qua (zon)lichthuishouding een Lexan® kas niet verschilt van een “gewone” kas. Voor wat betreft de lang-golvige (thermische) straling, door het relatief warmere dek zou je verwachten dat het gewas (met name s’nachts) iets warmer zou zijn. Echter, de verlaagde stookbehoefte heeft door minder stralingswarmte van het verwarmingssysteem het tegenovergestelde gevolg, dus, al met al is te verwachten dat dit type kasdek weinig invloed heeft op de gewastemperatuur. Omdat de kastemperatuur wordt geregeld, kan gesteld worden dat aan de “brankant” (dat is C_{gewas} – d.w.z. kastemperatuur en straling – en g_{gewas}) er weinig verandert.

Heel anders is het verhaal m.b.t. de afvoer: vrijwel geen waterdamp wordt nu afgevoerd door condensatie. Afhankelijk van hoe groot het condensatie-aandeel is, (b.v. bij ongeschermden tomaten veel groter dan bij geschermden paprika’s) betekent dit een verlaging van de verdamping in alle omstandigheden waarbij de afvoer de beperkende factor was. Berekeningen met KASPRO uitgevoerd door het IMAG, laten inderdaad zien dat in een Lexan® kas vrijwel zonder vochtregeling, de jaarlijkse verdamping van een tomatengewas toch nog 93.5% is van de verdamping in een gangbare kas met minimumbuis en RV-regeling. Dit, terwijl het energieverbruik wordt teruggebracht tot 46.5%.

Natuurlijk, een verkleinde afvoer, met vrijwel dezelfde bron, kan alleen betekenen dat de luchtvochtigheid hoger wordt. Rekening houdend met het verhoogde risico van ziekten, betekent dit dat enige vorm van vochtregeling (gericht op de gewastemperatuur en niet op het “stimuleren” van de verdamping) ook in zo’n kas moet plaatsvinden, waardoor de uiteindelijke energiebesparing niet zo hoog kan zijn als de getallen hierboven ons laten hopen. Om dit beter in te kunnen schatten is een uitgebreidere simulatiestudie nodig dan was voorzien in de beperkte scope van deze verkenning.

4.1.2 Schermen

Een dicht scherm, niet doorlatend voor vocht, heeft precies hetzelfde effect: d.w.z. dat het oppervlak waar vocht zou kunnen condenseren (in dit geval de onderkant van het scherm) relatief warm is, waardoor de condensatie stroom (en dus de vochtafvoer, en de verdamping) kleiner wordt. Zoals hierboven gezegd, in de mate dat vocht toch wordt afgevoerd, is de energiebesparing door het toepassen van een scherm gedeeltelijk te niet gedaan. Echter schermen bieden de mogelijkheid om met kieren te kunnen “spelen”, waarbij gebruik wordt gemaakt van het feit dat de dakoppervlak “achter” het scherm heel koud is, en een kier wel vocht doorlaat ($g_{\text{condensatie}}$). Door een grote kier wordt $g_{\text{condensatie}}$ groter, maar het kasdek wordt ook warmer, wat weer het omgekeerde effect heeft op de condensatie stroom. Men kan dus wel beseffen, dat voor alle omstandigheden er een “optimale” grootte van de kier is waarbij de condensatie stroom gemaximaliseerd wordt.

4.1.3 Belichting

Belichting vergroot de energie toevoer naar het bladoppervlak, waardoor de verdamping dus vergroot wordt. Dat gaat via het verhogen van de temperatuur van het gewas, en dus van de waterdampconcentratie aan het bladoppervlakt. Inderdaad, zoals bekend, zetten tuinders die een belichting systeem hebben, deze in op basis van redeneringen die niets te maken hebben met vocht huishouding. Echter, de aanwezigheid van zo'n systeem biedt toch mogelijkheden hiervoor: b.v. de kans van condensatie op het gewas, wordt door het aanzetten van belichting kleiner (gewas temperatuur gaat omhoog), hetgeen in bepaalde omstandigheden minder energie zou kunnen kosten dan vocht af te voeren door ventilatie.

4.2 Klimaat

Het is nu vrijwel algemeen aanvaard dat het mogelijk is via het beheersen van het klimaat (energie toevoer en/of damp afvoer) de gewasverdamping te sturen (Stanghellini & De Jong, 1995; Esmeijer, 1998). Dit is bij voorbeeld aangetoond door een serie experimenten bij het IMAG (Li et al., 2001) waarbij de gewasverdamping werd teruggebracht tot 2/3 van de controle behandeling, slechts door het on-line beheersen van de luchtvochtigheid.

Het antwoord op de vraag wat een tuinder nu precies moet doen om via een ingreep op het klimaat de verdamping te beïnvloeden, is niet zomaar te geven. Wat gedaan moet worden, wanneer en in welke mate, zoals uit hoofdstuk 3 (m.n. tabel 3) blijkt, is meestal een combinatie van een aantal maatregelen, sterk afhankelijk van de momentane omstandigheden. De bedrijven die het goed doen, hebben het gedeeltelijk in de "groene" vingers. De meeste echter, hebben te weinig kennis van en/of inzicht in de processen om op momentane omstandigheden op een "energie" efficiënte wijze te reageren met de klimaatregeling om de verdamping te beïnvloeden. .

4.3 Gewas

In hoofdstuk 3 hebben wij gezien dat er ook omstandigheden zijn waarin het voor de efficiëntie van energiebesparing dan wel de risico's voor schimmelziekten, het wenselijk kan zijn om de dampproductie "via de plant" te verlagen. Omdat veel minder bekend is over de mogelijkheden hiervoor (en er in de praktijk veel minder mee wordt gedaan), zullen wij in dit hoofdstuk de middelen om de verdamping te verlagen "via de plant" op een rij zetten.

Zoals eerder gezegd, om de gewasverdamping op gang te houden moet er een waterstroom vanuit de wortelzone in de plant ontstaan, die gelijk is aan het waterverlies door de bladeren. Het beperken van deze stroom komt overeen met het beperken van de "bron" waterdamp. Alle middelen die de waterstroom beperken komen, in de analyse van hoofdstuk 3, tot uiting als een verhoging van de gewasweerstand (of een verlaging van g_{gewas}). Uit Figuur 1 is te lezen dat g_{gewas} een samenvoeging is van plantweerstand, grenslaagweerstand en bladoppervlakte. De reactie van de gewasverdamping naar een variatie van g_{gewas} is gedempt met een factor V , die altijd kleiner is dan 1.

Plantweerstand is een maat voor hoe gemakkelijk water vrijkomt aan het verdampende oppervlak (het bladoppervlak). Het is dus de totale weerstand langs de weg vanuit de wortelzone tot en met de huidmondjes. D.w.z. de weerstand van het wortelmedium; de

weerstand van het wortelmembraan en de huidmondjesweerstand (meestal is de weerstand langs de vaten verwaarloosbaar). Het beperken van de wateraanvoer om de verdamping te remmen mag niet leiden tot het ontstaan van watertekort in de plant omdat dat laatste groeiremming tot gevolg heeft..

Daarnaast, moet men wel beseffen dat een variatie van de plantweerstand een (veel) kleinere variatie van g_{gewas} betekent (en dus nog kleiner van de verdamping), zoals bij vergelijking (6) aangegeven. De plantweerstand is in feite een serie van weerstanden. Het verhogen van een van de componenten (b.v. de substraateigenschappen) hoeft lang niet altijd een waarneembaar effect op de verdamping te hebben.

Men kan ook de andere twee componenten van g_{gewas} beïnvloeden, namelijk de grenslaagweerstand en de bladoppervlakte. De grenslaagweerstand is evenredig met de wortel van de bladbreedte gedeeld door de lichtsnelheid (Stanghellini, 1995). Omdat de laatste, laag en constant is in een kas, heeft de grenslaagweerstand vrijwel alleen te maken met de grootte van de bladeren. De grenslaagweerstand van een komkommengewas is b.v. ongeveer het dubbele van de grenslaagweerstand van een tomatengewas. Naast bladplukken, kan men de bladoppervlakte variëren door de gewaskeuze en de teeltperiode. Mogelijk dat op termijn veredelen op kleiner bladoppervlak een bijdrage kan leveren aan een beperkte verdamping. Hierna volgt een opsomming van de middelen waarbij een tuinder de gewas “geleiding” kan variëren. Wat het resultaat hiervan is op de waterdampbron, en dan ook op de gewasverdamping en uiteindelijk op het energieverbruik, hebben wij besproken in § 3.

4.3.1 Teeltmaatregelen

4.3.1.1 De bladoppervlakte

Met bladplukken wordt de gewasweerstand, g_{gewas} , vergroot. De bovenste bladeren verdampen, evenredig met de onderschepte straling, veruit het meest. Bij komkommer verdampt de bovenste 45 cm van de plant 50% van het opgenomen water. Een LAI van 3.0 bleek in onderzoek vaak optimaal, mits het blad zo door de ruimte verspreid is dat het licht optimaal onderschept wordt. Bij de teelt van paprika wordt een hogere LAI aangehouden om de lichtonderschepping te verbeteren. Bij de teelt van roos wordt een hogere LAI gekozen om na het plukken van een tak voldoende verdampend oppervlak over te houden. Bij de teelt van tomaat wordt tevens blad geplukt om de rijpende trossen vrij te krijgen. Omdat de bladstrekking eind juli vaak sterk terugloopt, kan het gebeuren dat rond deze tijd de LAI bij tomaat richting een suboptimale 1.5 gaat. Veel maatregelen die de verdamping verlagen, leiden na enige tijd tot een afname in het bladoppervlakte. De nieuw gevormde bladeren worden, kleiner als het vochtdeficiet van de kaslucht gedurende langere tijd klein is, als de worteltemperatuur laag blijft en als er zuurstofstress optreedt. Een uitzondering hierop is komkommer en mogelijk zijn er meer gewassen waar dit geldt maar die nog niet onderzocht zijn. Maatregelen die de uitgroei van blad beïnvloeden werken echter traag. Als het bladoppervlakte onder een LAI van 3 daalt, kan dat leiden tot productieafname. Voor de totale fotosynthese (en verdamping) is van belang hoeveel licht die bladeren onderscheppen. Een beter beheer van verdamping en productie is mogelijk op basis van lichtonderschepping. Voor lichtonderschepping kan gedacht worden aan een lichtmeting op bodemniveau of een lichtreflectiemeting boven het gewas.

Bladplukken van de onderste bladeren heeft in het algemeen weinig invloed op de verdamping. Omdat de invloed van bladoppervlakte op de verdamping vrij direct is (vergelijking 7), kan een vorm van bladplukken in voorjaar en herfst toch een rol spelen. Het kan dan een ondersteuning zijn van andere maatregelen zoals condensafvoer.

4.3.1.2 Teeltperiode

De verdamping van een gewas wordt voor een deel bepaald door het stadium van het gewas. De verschillen in verdamping tussen een pas geplant gewas en een volop groeiend of oud gewas zijn groot. Dit bepaalt mede of het mogelijk is om de verdamping te beperken ten einde energie te besparen. De meeste grote groentegewassen worden geteeld in een vaste jaarcyclus; planten in december en slopen in november. Dit heeft tot gevolg dat in voor- en najaar een groot verdampend oppervlak in de kas aanwezig is. In het voor- en najaar zijn de mogelijkheden tot energiebesparing bij een beperkte gewasverdamping het grootst. Door te kiezen voor b.v. een jong gewas in de herfst in plaats van een oud gewas, behoeft er minder vocht afgevoerd te worden waardoor energiebesparing mogelijk is.

Een aantal kleinere gewassen wordt min of meer jaarrond geteeld, zoals bijvoorbeeld de bladgewassen. Het moment van planten en groeien bepaald in grote lijnen de mogelijkheden om de verdamping te beperken en daarmee de te bereiken energiebesparing. Voor veel continu geteelde siergewassen – zoals bijvoorbeeld chrysant en potplanten - is de teeltperiode van minder belang. Als gevolg van de gekozen teeltstrategie komen alle stadia tegelijk in de kas voor. Omdat ook vaak sprake is van een grote ruimte met verschillende stadia van het gewas door elkaar, zijn de mogelijkheden om via temperatuur en teeltsturing de verdamping te beperken gering. Wat voor het ene stadium goed is kan voor een ander funest zijn.

In een verschoven teelt staat een volgroeid gewas in de donkerste maanden in de kas. In vergelijking met een standaard teelt neemt de productie af. In de maanden daarvoor kan energie bespaard worden. Bij een jong gewas in de herfst hoeft minder vocht afgevoerd te worden en er is een hogere buitentemperatuur bij het plantstadium met de grootste warmtevraag. Of de energiebesparing opweegt tegen het productieverlies is niet bekend maar leent zich voor een bedrijfseconomische berekening. Om een uitspraak te doen over de gevolgen voor de verdamping van een volgroeid gewas in de wintermaanden is onvoldoende kennis beschikbaar.

4.3.1.3 Antitranspiranten

Antitranspiranten vormen een dunne film over het blad. Ze vormen een fysieke barrière voor waterdampvrijlating door de huidmondjes. Er is geen ervaring met antitranspiranten als energie besparende maatregel. Wel zijn er in de potplantenteelt groeiremmers in gebruik die de verdamping vaak drastisch verlagen.

Een groot nadeel van antitranspiranten is de belemmering voor de uitwisseling van zuurstof en koolzuurgas, waardoor de fotosynthese verlaagd wordt. Sterker nog, door de terugkoppeling in de waterdampcyclus (de “dempings” factor V in vergelijking 5) is de relatieve reductie in verdamping altijd kleiner dan de reductie in fotosynthese. Een bijkomende nadeel is dat dit middel ook werkt als dat niet gewenst is, namelijk ook in alle omstandigheden waarbij reductie van de verdamping niet zou leiden tot energiebesparing. Dit alles, samen met het feit dat de gewasverdamping vrij ongevoelig is voor een verhoging van de huidmondjesweerstand (vergelijking 5), lijkt het potentieel

van dit middel voor energiebesparing zeer beperkt. De verdamping kan met antitranspiranten snel en ingrijpend worden verlaagd. Maar dit is niet altijd gewenst.

4.3.2 Wortelmilieu

Een andere mogelijkheid om de watertoevoer aan de bladeren te verkleinen, is de wateropname door de wortels te beperken. Dit kan gebeuren door: grotere hydraulische weerstand van het wortelmedium; verlaagde waterpotentiaal van het substraat (osmotische en/of matrix potentiaal, d.w.z. EC en/of watergehalte); en verhoogde weerstand (verlaagde doorlatendheid) van het wortelmembraan.

4.3.2.1 Substraateigenschappen

De vochtretentiekarakteristiek en de hydraulische weerstand zijn twee substraateigenschappen die de wateropname door de wortels (en dus de verdamping) beïnvloeden. De vochtretentie staat voor de zuigkracht waarmee een substraat water vast houdt, de hydraulische weerstand bepaalt hoe snel water na verbruik aan het worteloppervlak aangevuld kan worden. Deze eigenschappen zijn van elk substraat bekend en kunnen in principe gewijzigd worden door de producenten. Tijdens de teelt kunnen deze eigenschappen alleen via het watergehalte beïnvloed worden.

De zuigkracht waarmee water in een substraat wordt vastgehouden is afhankelijk van de porie-grootteverdeling. Uit de bodemkunde is bekend dat hoe fijner de poriegrootte is, hoe groter de zuigkracht. Hiermee wordt verklaard dat gewassen op kleigrond trager groeien en minder gevoelig zijn voor klimaatschommelingen dan gewassen op zandgrond. Steeds vaker wordt gewezen op de hydraulische weerstand van wortelmedia als een factor die invloed heeft op de groei. Dit betekent dat een substraat met gelijk watergehalte maar een hogere hydraulische weerstand, de verdamping van planten kan remmen (Caron et al, 2001). Dit zou betekenen dat de osmotische en water potentiaal op microschaal aanzienlijk afwijken van de waarden die op macroschaal worden gemeten. De plant zou dus reageren op de waarden op microschaal. Dit zou kunnen verklaren waarom in sommige onderzoeken een meetbaar effect werd gevonden van het drainagepercentage op de verdamping.

De fotosynthese staat tot op zekere hoogte los van de verdamping. Zolang de CO₂ opname intact blijft en de voedingsopname voldoende is, is er geen invloed op de productie te verwachten.

De plantweerstand is in feite een serie van weerstanden. Het verhogen van een van de componenten (b.v. de substraateigenschappen) hoeft lang niet altijd een waarneembaar effect op de verdamping te hebben.

4.3.2.2 Waterhuishouding

De bodemwaterpotentiaal is opgebouwd uit de waterpotentiaal en de osmotische potentiaal. De waterpotentiaal is tijdens de teelt te beïnvloeden door het matwatergehalte te regelen, Dit kan door het aanpassen van het patroon van watergiften over een dag en door aanpassen van de totale wateraanvoer per dag. De osmotische potentiaal is te beïnvloeden door de EC van de gietbeurten te veranderen (§ 4.3.2.3). In de huidige praktijk zijn watergift en voedingsgift echter niet los van elkaar instelbaar. Een interessante ontwikkeling is een door Grodan ontwikkeld systeem waarbij na een gift

substraatwatergehalten door afzuiging terug geregeld worden naar een instelbare waarde. Dit betekent dat gewassen met grote plantverschillen zoals roos toch op bij gelijke watergehalten geteeld kunnen worden.

De gebruikelijke drukhoogten in substraat zijn 2-50 cm, voor grondteelten is dat 10-100 cm. De drukhoogten komen overeen met 1-10 kPa. Normaal gesproken zijn zouteffecten (§ 4.3.2.3) zoveel groter dan zuigkrachtverschillen door watergehalteverschillen, dat de laatste verwaarloosbaar zouden moeten zijn (Blok en Mathias, 2002). Niettemin, zijn veel telers van mening dat bij kasgewassen de wateropname op korte termijn beïnvloed kan worden door een aangepaste watergift.

Dit duidt eerder op een indirect effect van hydraulische weerstand dan op een zuigkrachteffect (§ 4.3.2.3, § 4.3.2.3) en is nader onderzoek waard.

Als de wateraanvoer wordt gebruikt om de verdamping van een gewas te sturen, zal een hiervoor geëigende regeling gemaakt moeten worden. Het gaat hier over de software die nodig is om wateraanvoer en waterpotentiaal en hydraulische weerstand te beïnvloeden. In de praktijk wordt het moment van de gift bepaald door een eenvoudig verdampingsmodel (De Graaf & Spaans, 1989) beveiligd met een watergehalte meting (startbak of FD-sensor). Telers hanteren een aantal watergiftstrategieën. Bij het planten wordt tot 200% watergegeven om de wortels door het substraat te "spoelen". Daarna wordt enkele weken met nauwelijks drainage geteeld om de wortels te stimuleren in het substraat te vertakken. In de teelt wordt vaak gestreefd naar een lager watergehalte van de mat in de nacht, door het aanhouden van een nachtperiode waarin niet gedruppeld wordt. Tenslotte wordt het watergehalte in de zomer hoger gekozen dan in het voorjaar en de herfst.

Proeven met paprika en komkommer lieten zien dat onder bepaalde omstandigheden het gewas 20-30% minder gaat verdampen als de gift per dag laag is (Van Gurp, 1999). Deze invloed van aanbod op de gewasverdamping geldt voor lager dan gebruikelijke drainwaterpercentages, namelijk 5-15% in plaats van 30-40%. Bij paprika neemt het aantal zij scheuten en de lengtegroei af. De productie van paprika en komkommer blijft binnen 2% van de normale productie. Een mogelijke verklaring is dat bij de gebruikelijke drainwaterpercentages extra consumptie van nitraat de vegetatieve groei doet toenemen. De gedoseerde voedingsgehalten moesten na enige tijd verhoogd worden, een gevolg van gelijkblijvende opname bij verminderde aanvoer.

Voor optimale groei lijken minimaal 6-12 beurten per dag nodig te zijn.

Er zijn verschillende onderzoeken naar de invloed van starttijd op de groei gedaan (Van Gurp en Dik, 1996). Vroeger starten geeft een hogere versgewicht productie maar ook een verhoogde kans op zwelscheuren bij tomaat. Dit pleit ervoor in de nacht water te geven, iets waar de meeste telers afwijzend tegenover staan, maar wat veel onderzoek nooit nadelig is gebleken (Heuvelink & Stanghellini, 2001; Blok en Dik, 2001).

De fotosynthese staat tot op grote hoogte los van de verdamping. Zolang de huidmondjes open blijven en de voedingsopname voldoende is, is er geen invloed op de productie te verwachten.

De plantweerstand is in feite een serie van weerstanden. Het verhogen van een van de componenten (b.v. de substraateigenschappen) hoeft lang niet altijd een waarneembaar effect op de verdamping te hebben.

4.3.2.3 De osmotische potentiaal (EC) van het substraat

Door de opgeloste zouten rond de wortels ontstaat er een osmotische zuigkracht die op de wortel inwerkt. Deze osmotische zuigkracht te regelen door de EC van het voedingswater (en het drainage deel) aan te passen.

Voor EC waarden tot 10 dS/m geldt de aanname dat 1 dS/m overeenkomt met 35 kPa. Een zuigkracht van 1-10 cm waterkolom, heel gebruikelijk in steenwol, komt overeen met 0.1-1.0 kPa. Potentiaal verschillen bij de wortel in steenwol worden dus vooral veroorzaakt door EC verschillen, die gemakkelijk 1.0 dS/m kunnen bedragen. Een hogere EC is daarom in principe een middel om de verdamping te verlagen. Hoe gevoelig een gewas hiervoor is, hangt af van het gewas. In de praktijk wordt de voedingsgift niet direct bepaald. Er wordt geregeld op de EC. Omdat de watergift sterk fluctueert, zal, bij gelijke EC-gift, ook de aanvoer van voeding in gram per vierkante meter, sterk fluctueren. De EC wordt soms geregeld met het lichtniveau. Dit ondervangt al heel wat problemen met een plotseling oplopende of snel lager wordende EC. Een stabielere regeling lijkt mogelijk als naar analogie van de verdamping, het voedingsverbruik van de plant met een eenvoudig model wordt geschat. Dit kan alleen veilig als onder en bovengrenzen van EC in de mat bewaakt worden, zoals het watergehalte wordt bewaakt met een startbak of FD-sensor. Op het moment dat water wordt gegeven waarvan de osmotische potentiaal afwijkt van de waterpotentiaal rond de wortels kan er een potentiaalschok in de plant volgen. Dit verschijnsel is bekend als worteldruk. Door worteldruk kan water aan de randen van de bladeren naar buiten geperst worden. Ook kan water door wondcallus gedrukt worden waardoor de gevoeligheid voor schimmelziekten wordt vergroot. Ook kan de waterhoeveelheid in de vrucht toenemen waardoor naast groei ook scheuren kunnen ontstaan (Li et al., 2002). Een regeling van de gift EC moet hier eigenlijk rekening mee houden.

Productieverlies is bij vrijwel alle kasgewassen al waar te nemen bij EC's veel lager dan 6 dS/m (Sonneveld, 2000). Dus resulteert een verhoogde EC eerder in productieverlies dan in verdampingverlaging en een langdurige verhoging van de EC is dan ook geen optie. In principe is het wel mogelijk de EC van enkele giften te verhogen zonder het daggemiddelde van de EC in de mat aanzienlijk te verhogen. Of de verdamping hier tijdelijk op reageert is de vraag: er zit immers een hele grote buffer in het substraat. Wel is het waar dat bij sommige gewassen een verhoogde EC leidt tot hogere productkwaliteit: dit heeft b.v. veroorzaakt dat de aanbevolen EC voor tomaten in de laatste jaren wel omhoog is gegaan.

Li et al. (2001) hebben aangetoond dat bij kastomaat de verdamping per eenheid bladoppervlakte niet afneemt tot een EC van 10 dS/m. Wel werd er een afname van bladoppervlak (en dus verdamping) bij EC's boven de 6 dS/m waargenomen (Li & Stanghellini, 2001).

4.3.2.4 Wortelweerstand

Worteltemperatuur

De worteltemperatuur wordt meestal verlaagd door water dat door koelsslangen onder of in het substraat wordt geleid. Het verlagen van de worteltemperatuur verlaagt de porositeit van het wortelcelmembraan. Hierdoor neemt de wortelweerstand voor wateropname toe (McMichael and Burke, 1998). Ook het omgekeerde is waar. Door de wortels te verwarmen, neemt de weerstand af, en dus de waterstroom toe. In ongunstige omstandigheden kan dit leiden tot kwaliteitsproblemen als vruchtscheuren.

De permanente minimum-worteltemperatuur waarbij nog geen groeiremming optreedt is voor tomaat 15 °C. Een relatief korte periode met hogere worteltemperatuur is echter genoeg om groeiremming door een lagere temperatuur teniet te doen. Er is dus een groot gebied waarbinnen de worteltemperatuur geregeld kan worden zonder invloed op de productie.

De "water use efficiency" in relatie met worteltemperatuur is onderzocht. De water use efficiency in ml/g droog gewicht was constant tussen 20 en 36 °C. De worteltemperatuur heeft dus theoretisch tussen de 15 en 20 °C een verlagend effect op verdamping zonder de opbrengst te verlagen. In bekende onderzoeken naar wortelkoeling van paprika is niet op de verdamping gelet. De plantweerstand is in feite een serie van weerstanden. Het verhogen van een van de componenten (b.v. de worteldoorlatendheid) hoeft lang niet altijd een waarneembaar effect op de verdamping te hebben.

Zuurstof rond de wortel

Het zuurstofgehalte rond de wortels is omgekeerd evenredig aan het watergehalte. Met het watergehalte kan de zuurstofaanvoer dus ingesteld worden. Omdat gastransport 10.000 keer sneller verloopt door lucht dan door water, is het nauwkeurig regelen van zuurstoftoevoer via watergehalte niet eenvoudig.

In proeven met kunstmatig stabiel gehouden zuurstofaanvoersnelheden bleek de zuurstofaanvoersnelheid (en daarmee het resulterende evenwichtszuurstofgehalte in het substraat) gecorreleerd te zijn met lengte, bladoppervlakte, vers gewicht en droog gewicht (Blok en Cassamassimo 2001, Gerard en Blok, 2002).

Het zuurstofgehalte rond de wortels heeft grote invloed op de verdamping, zowel direct door een verandering van de wortelweerstand tegen watertransport, als op langere termijn door een lagere bladoppervlakte. Echter, omdat zuurstoftoevoer al snel limiterend voor de groei wordt, lijkt sturen met zuurstofgehalte rond de wortel geen veilige optie.

5 Beoordeling

In de voorgaande hoofdstukken, zijn veel acties genoemd die een verlaagde verdamping als gevolg kunnen hebben. Ook is aangegeven of zulke acties wel of niet efficiënt zijn, (qua energiebesparing) afhankelijk van de omstandigheden. Heel kort samenvattend, komt het erop neer dat acties die een invloed hebben op de waterdamp “bron” het best kunnen worden gebruikt in de winter, terwijl acties met een effect op de afvoer van waterdamp het meest efficiënt zijn in het voor- en najaar. Echter, in vele gevallen is er een scala van acties mogelijk, en meestal zullen combinaties van verschillende acties het meest effectief zijn. Daarnaast, beperken van de afvoer kan soms leiden tot een hoger risico van (schimmel)ziekten. In dit geval kan het nuttig zijn om de reductie van de ventilatie te koppelen met een reductie van de waterdampbron.

Wij beseffen wel dat dit geen “tuinderstaal” is. Een tuinder weet welke middelen hij tot zijn beschikking heeft en heeft een redelijke gevoel m.b.t. de gevolgen (zeker b.v. bij luchtvochtigheid) van het toepassen van zulke middelen. Om toch gebruik te kunnen maken van voorgaande analyse, is het noodzakelijk om te weten of een bepaalde actie werkt aan de bron dan wel aan de afvoer van waterdamp, en dan of er een mismatch is tussen de periode waarin een bepaald middel wordt toegepast en de periode waar het effect op energiebesparing het grootst is. Dit hebben wij gespecificeerd in 7 (een uitgebreidere versie van Tabel 3), waarin de mogelijke maatregelen om de verdamping te beperken gegroepeerd zijn op een intuïtieve wijze: d.w.z. teeltmaatregelen, wortelmilieumaatregelen en klimaatmaatregelen.

Van elke maatregel wordt met de symbolen J (wel) of N (niet) aangegeven welke voor de gewasverdamping relevante grootheden worden beïnvloed (groep “procesparameter”) en of dat “effect” heeft op de bron dan wel de afvoer van waterdamp, en met letters wordt de periode aangegeven waarin de actie in de praktijk wordt toegepast. Daarnaast, wordt er een schatting gemaakt van de kans dat zo’n maatregel algemeen wordt toegepast, om te leiden tot een significante energiebesparing voor de hele sector. Onder Tabel 7 is een verklaring van de in Tabel 7 gebruikte symbolen opgenomen.

Tabel 7 Uiteenzetting van middelen om de gewasverdamping te beperken

Groep	Middel	Proces parameter				Effect			Consequenties				
		Gewasweerstand	Instraling	Uitstraling	Vochtverschil	Bron	afvoer	Periode van belang	Penetratie	tijdshorizon	Risico's voor teler	Investeringsbehoefte	Aanwezige kennis
Teelt	Bladoppervlakte	J	J	J	N	J	N	v/n	B	1	G	-	O
	Teeltperiode	J	J	N	N	J	N	jr	B	2	H	s	V
	Gewasgroep	J	N	N	N	J	N	jr	B	5	G	e	O
	Antitranspiranten	J	N	N	N	J	N	w	A	2	H	e	O
	Substraat	J	N	N	N	J	N	jr	B	5	G	e	O
Wortel	Watergehalte	?	N	N	N	?	N	v/n	A	1	H	s	V
	EC	J	N	N	N	J	N	v/n	A	2	H	S/e	O
	Worteltemperatuur	J	N	N	N	J	N	v/n	A	5	G	S/e	O
	Zuurstofgehalte	J	N	N	N	J	N	v/n	B	2	H	s	O
	Watergift	?	N	N	N	?	N	v/n	A	1	H	s	V
	Voedingsgift	J	N	N	N	J	N	v/n	A	2	H	S/e	O
	Plantbalans	J	N	N	N	J	N	v/n	A	2	H	s	V
	Wateraanvoer	?	N	N	N	?	N	v/n	A	1	H	s	V
Klimaat	Voedingsaanvoer	J	N	N	N	J	N	v/n	A	2	H	S/e	O
	Belichting	J	J	J	J	J	N	jr	B	2	G	e	V
	Schaduw scherm	J	J	N	J	J	J	z	A	1	G	S/e	V
	Energiescherm	N	J	J	J	J	J	w/v/n	A	1	G	S/e	V
	Vochtscherm	N	J	J	J	J	J	w	A	1	G	S/e	V
	Vochtkier	N	N	N	J	N	J	w/v/n	A	1	G	S/e	O
	Raamstand	N	N	N	J	N	J	jr	A	1	G	-	O
Isolerende kasdek	N	N	N	J	N	J	jt	B	10	H	e	O	

Verklaring van de in Tabel 7 toegepaste codering

Proces param.	Gewasweerstand	J	N				J/N = wordt beïnvloed/wordt niet beïnvloed
	Instraling	J	N				
	Uitstraling	J	N				
	Vochtverschil	J	N				
Effect	Bron	J	N				
	Afvoer	J	N				
	Periode van belang	w	v	z	n	jr	
Consequentie	Penetratie	A	B				A/B = algemeen/beperkt
	Tijdshorizon	1	2	5	10		Jaren voor algemene implementatie
	Risico's voor teler	H	G				H/G = hoger dan nu/gelijk aan nu
	Investeringsbehoefte	-	s	e			-/s/e = geen investering/aanschaf van software/aanschaf van equipment
	Aanwezige kennis	V	O				V/O = voldoende/onvoldoende

6 Discussie

In Tabel 8 is een overzicht weergegeven van de beste strategieën in de twee extreme omstandigheden (bron- dan wel afvoer beperkte verdamping) om energie te besparen door beperking van de verdamping.

Tabel 8 Samenvatting van de beste strategie om energie te besparen door beperking van de verdamping, gesplitst naar de twee extreme omstandigheden.

Bron beperkte verdamping (meestal winter)		
Doel:	Bron beperken	Afvoer beperken
<u>“bron” acties:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Straling ↓ • g_{gewas} ↓ • T_{kas} ↓ 	kan productie verlagen blad oppervlakte ↓ en/of plantweerstand ↑ (kan productie verlagen) kan productie verlagen	
<u>“afvoer” acties:</u> <ul style="list-style-type: none"> • T_{kasdek} ↑ • $g_{\text{condensatie}}$ ↓ • $g_{\text{ventilatie}}$ ↓ 		schermen dicht (in zover geen straling beperking) geen ventilatie
Afvoer beperkte verdamping (meestal voor en najaar)		
Doel:	Maximaliseren condensatie Minimaliseren ventilatie	Als risico ontstaat van condensatie op het gewas
<u>“afvoer” acties:</u> <ul style="list-style-type: none"> • T_{kasdek} ↓ • $g_{\text{condensatie}}$ ↑ • $g_{\text{ventilatie}}$ ↓ 	schermen vochtier geen ventilatie	raamstand aanpassen
<u>“bron” acties:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Straling ↑ • g_{gewas} ↓ • T_{kas} ↑ 		Belichting blad oppervlakte ↓ en/of plantweerstand ↑ Stoken

Uiteraard zullen de meeste gevallen er tussenin zitten (V is noch 0, noch 1) en de beste strategie zal ook wat “genuanceerder” worden. Daarom hebben wij ook het beperken van de afvoer in bron beperkte omstandigheden opgenomen. Aangezien “bron acties” een risico van productieverlies hebben, zogauw als er geen sprake is van zuiver bron beperking (dus $V < 1$) kunnen “afvoer acties” ook helpen, zij het met een lage efficiëntie. Dit is maar een voorbeeld om aan te geven dat in de meeste gevallen juist een combinatie van acties tot de beste strategie zal leiden. Met andere woorden, de beste strategie hangt af van de situatie. Toch zijn er groepen van ingrepen te definiëren waar winst te halen valt:

1. Het optimaal gebruik maken van alle beschikbare actuatoren van de klimaatregeling (buis, raam en scherm), niet alleen rekening houdend met (buiten)klimaat

omstandigheden, maar ook met kas/gewas eigenschappen om het vocht (verdamping en afvoer) te reguleren. Zo'n optimale "vocht"regelstrategie zal afzonderlijke "vochtregelingen" zoals een vaste minimumbuis instelling overbodig maken.

2. Beperken van de waterdamp afgifte van het gewas (bladoppervlakte omlaag en/of plantweerstand omhoog), zo mogelijk zonder nadelige consequenties voor de productie.

Wij hebben eerder gezien dat de invloed van bladoppervlakte op de verdamping vrij direct is (vergelijking 7), dus is het zeker de moeite waard om na te gaan in hoeverre het mogelijk is om de verdamping te verlagen door meer blad te plukken in de beruchte "perioden met vochtproblemen", zonder nadelige gevolgen voor de lichtinterceptie en dus de productie.

Daarnaast, hebben wij ook gezien dat het effect van plantweerstand op de verdamping vrij klein is en afhangt van de omstandigheden en van de grootte van de grenslaagweerstand. Bovendien hebben wij gezien dat de plantweerstand in feite een serie van weerstanden is (langs het waterpad tussen wortelmedium en bladoppervlak) en het verhogen van een van de componenten (b.v. door antitranspiranten of verhoogde EC in het wortelmedium) hoeft niet persé een waarneembaar effect op de verdamping te hebben. Dit zorgt ervoor dat vrij permanente middelen om de gewasweerstand te verhogen waarschijnlijk meer nadelen (voor de productie) hebben dan voordelen (significante verlaging van de verdamping).

"Snelle" middelen, waarbij men kan inspelen op de omstandigheden, zonder langdurige effecten zijn (Tabel 7): wateraanvoer, watergehalte van de mat en worteltemperatuur, bij substraatteelten. EC-regeling kan een snel middel zijn in substraten zonder buffer, zoals NFT. Of het plaatselijke effect van een incidenteel hogere EC-gift ook tijdelijke invloed op de verdamping heeft, is wel de vraag. Het is van belang om de effectiviteit van deze middelen te bepalen en, bij voldoende perspectief een strategie te ontwikkelen voor de beheersing ervan. Dit kan ten eerste d.m.v. scenario's. Echter, gezien de hoge risico's voor de productie is het niet te verwachten dat zulke maatregelen door de praktijk zullen worden overgenomen zonder voldoende experimentele bewijzen van het uitblijven van productieverlies.

6.1 Besparingsperspectieven per gewasgroep

Alle gewassen en teeltsystemen zijn anders, en in de voorgaande pagina's hebben wij laten zien dat alles van alles afhangt. Het is dan ook niet eenvoudig om de beste koers aan te geven voor een willekeurige gewas. Dit kan het best worden gedaan door middel van een gericht scenariostudie. Niettemin, zijn er grote groepen te herkennen, met betrekking tot de mogelijke toepassing van de besproken middelen om de verdamping te verlagen.

1. Substraatteelten versus grondteelten:
 - Substraatteelten. Optimale mogelijkheid om wateraanvoer via de plant te regelen. De substraateigenschappen zijn bij fabricage soms instelbaar.
 - Grondteelten. De verdamping uit de grond kost in winter, voor- en najaar extra energie. Afdekken met folie of een dampremmende laag levert altijd besparing op. Bij grondteelten wordt volvelds, meestal bovenlangs, water gegeven. Het droogstoken van een nat gewas is in winter, voor- en najaar

- energetisch onaantrekkelijk. Onderdoor water geven zou hier verbetering in kunnen brengen, maar is niet toepasbaar zonder nieuw te ontwikkelen technieken.
2. Belichte teelt versus onbelicht:
 - Door verschuiving van de belichtingsperiode kan de belichting ingezet worden om het gewas uit de condensatiegevaarzone te halen waardoor het gebruik van een minimumbuis niet nodig is.
 - In onbelichte teelten is de regelruimte voor maatregelen om de verdamping te beperken groter dan bij belichte teelten. Bij belichte teelten is de kans op vochtproblemen kleiner.
 3. Schermen en niet schermen:
 - Vochtkier. Optimaal gebruik maken van de mogelijkheid van een vochtkier.
 - Daarnaast biedt het energiescherm extra mogelijkheden voor vocht- en temperatuurintegratie. Tot de temperatuurondergrens zijn schermen en temperatuurintegratie al bekende en toegepaste maatregelen. Temperatuurintegratie aangepast naar lichtsom wordt op dit moment onderzocht. Een mogelijke verdere verscherping van de regeling is het toestaan van kortdurende onderschijdingen van de temperatuurondergrens.
 4. Groeipunt:
 - Eén hoofdgroeipunt (vruchtgroentegewassen, gerbera). Na een vast aantal bladeren wordt een vrucht of vruchtgroep gevormd. Voor de hoogste producties is een evenwicht nodig tussen generatieve en vegetatieve delen. Reductie van bladoppervlakte zonder productieverlies mogelijk alleen door plukken van oude bladeren.
 - Meerdere groeipunten (roos). Elke tak vormt een bloem en het geoogst product betreft zowel bloem als blad. Telers sturen op maximale vegetatieve groei. Hier bladplukken mogelijk (en wellicht effectief) op de geëigende tijden.
 5. Open versus gesloten gewas.
 - Bij gesloten gewassen is de luchtbeweging tussen het gewas kleiner. Daardoor is de vochtafvoer tussen het gewas beperkt. Binnen het gewas is dus meer kans op koude of natte plekken. Dit gegeven beperkt de regelruimte waardoor de mogelijkheden voor energiebesparing afnemen.

6.2 Voorbeeld: Herfstteelt tomaat

Dit voorbeeld laat zien hoe deze strategieverkenning globaal kan worden toe gepast.

Een gebruikelijke regeling is stoken en dan luchten. Een scherm wordt niet toegepast. Met het ondernet wordt de kastemperatuur boven de 15 graden gehouden. Daarboven wordt 1 uur voor zonsopgang een minimumbuis van 40 graden ingebracht waarmee de ramen open gestookt worden. Dat kan omdat de ventilatietemperatuur maar 0.5 graad boven de stooktemperatuur staat. Na 3-4 uur verdwijnt de minimumbuis door afbouw op straling. Vanaf een RV 80 wordt de minimumbuis verder verhoogd. De minimumbuis fungeert hier als een veiligheidsmaatregel die problemen met vocht voorkomt maar energie-inefficiënt is.

Een nieuwe regeling begint eveneens met het ondernet om de kas op temperatuur te houden. Een scherm wordt gebruikt om het warmteverlies in de nacht te beperken. In de nanacht wordt met een kier geprobeerd afvoer via condens te realiseren. Als dit is

onvoldoende, berekent de regeling de benodigde raamstand om nog vocht af te voeren. Stoken (minimumbuis) komt alleen in als de risico van natslaan desondanks te hoog wordt. De temperatuur in de nanacht en vroege ochtend zal lager dan gebruikelijk zijn, de temperatuur in de voornacht hoger. Om de juiste temperatuursom te realiseren (vanuit de temperatuurintegratie regeling) kan het wenselijk zijn pas later in de nacht te gaan schermen, hierdoor wordt de voornacht kouder. De minimumbuis fungeert in deze regeling als noodstop en komt pas in als de andere mogelijkheden uitgeput zijn.

Tabel 9 **Vergelijking van twee regelingen**

	Gebbruikelijk	Nieuw
1	Ondernet voor basis temperatuursom	Scherm spaart energie
2	Minimumbuis	Ondernet voor basis temperatuursom (meer integratieruimte)
3	Vochtverhoging op de minimumbuis	Kier in scherm op RV
4	Ventilatielijn dicht op stooklijn in nanacht en ochtend	“Minimale” raamstand wordt berekend
5	Lichtafbouw op de minimumbuis	“Minimale” buistemperatuur wordt berekend
6		Zon warmt de lucht boven het scherm op

Er is geen rekening gehouden met bladplukken of verhogen van de plantweerstand door EC, worteltemperatuur of watergehalte in het substraat. Ook de rol van de buffer en het doseren van CO₂ zijn niet meegewogen maar worden wel beïnvloed door de veranderde regeling. Hier blijkt al dat bij zo'n optimalisatie heel veel factoren tegelijk beschouwd moeten worden en dat risicodragende proeven in onderzoekskassen en experimenten in de praktijk nodig zijn.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Gewasverdamping in een kas is het verplaatsen van water van het wortelmilieu naar de buitenlucht en/of een condensatieoppervlakte. Om dit proces in gang te zetten moeten er én water én energie voor de verdamping aan het bladoppervlak beschikbaar zijn. Dit hebben wij de “bron” genoemd. Daarnaast, om de water-waterdampstroom in gang te houden, moet de waterdamp afgevoerd worden uit de kaslucht, door ventilatie en/of condensatie. Dit hebben wij de “afvoer” genoemd. Er zijn vele middelen om de gewasverdamping te verlagen.

Algemene conclusies:

- Het effect van een maatregel hangt af van het moment van toepassen en wordt bovendien beïnvloed door andere maatregelen. Geïntegreerde kennis is noodzakelijk om optimaal te kunnen regelen.
- Acties die een invloed hebben op de waterdamp “bron” zijn het meest efficiënt in bron-beperkte omstandigheden, zoals de winter.
- Acties met een effect op de afvoer van waterdamp zijn het meest efficiënt in het voor- en najaar (afvoer-beperkte omstandigheden).

Echter, in de meeste gevallen kan blijken dat een combinatie van maatregelen (zij het met verschillende efficiëntie) tot de grootste energie besparing kan leiden. Bovendien:

- Beperken van de bron (water en/of energie toevoer aan het gewas) is vaak gekoppeld aan een risico van productieverlies, waardoor toepassen van andere maatregelen om de verdamping te verlagen aantrekkelijker kan worden.
- Beperken van de afvoer kan soms leiden tot een hoger risico van schimmelziekten en fysiologische problemen. In dit geval kan het nuttig zijn om de reductie van de ventilatie te koppelen met een reductie van de waterdampbron.

De beoordelingstabel laat zien dat de (technische) middelen aanwezig zijn voor een snelle implementatie in de praktijk om een aanzienlijke energiebesparing op sectorniveau, binnen 5 jaar, te waarborgen.

Specifiekere conclusies;

- Condensatie is energie-efficiënter dan ventilatie.
- Een minimumbuis die inkomt op RV is pas zinvol als laatste maatregel na uitputting van alle andere middelen.
- Bladplukken is met name in de herfst een ondersteunende maatregel.

7.2 Aanbevelingen

Een vergelijking tussen de beoordelingstabel en de voorgaande analyse, maakt het mogelijk om de middelen te identificeren met het beste perspectief. De twee grote groepen van ingrepen waar de meeste winst te halen valt zijn klimaatmaatregelen en gewasmaatregelen.

Klimaatmaatregelen

Het ontwikkelen van een “vocht”strategie die optimaal gebruik maakt van alle beschikbare middelen van de klimaatregeling, om zowel de energietoevoer als de waterdamp afvoer te beheersen. Het optimalisatie proces moet rekening houden met

zowel (buiten)klimaat omstandigheden als ook met kas- en gewaseigenschappen. Zo'n vocht strategie moet alle gangbare "vocht"regelingen vervangen door een algoritme die wordt geïmplementeerd in klimaatcomputer.

- Er wordt bepleit verschillende maatregelen tegelijk toe te passen. Hierdoor wordt een steeds groter aantal interacties mogelijk. Het ontwikkelen van veilige algoritmen begint met scenario studies, maar vraagt ook om het testen en bijstellen in grensverkenkende proeven in onderzoekskassen en begeleide praktijkteelten.
 - om teelttechnische kennislacunes op te merken
 - om de juiste prioritering en instelling van regelingen te vinden
- Aan de wortelkant worden voeding en water nog afhankelijk van elkaar gedoseerd. Om wateraanvoer of voedingsaanvoer als regeling in te zetten is het nodig ze onafhankelijk van elkaar te maken. Anders kan een regeling van watergehalte tot problemen met de mat-EC leiden en omgekeerd.

Hierbij gaat het voornamelijk om de combinatie van grotendeels bestaande kennis (t.a.v. individuele actuatoren) in een optimaliserende algoritme. De randvoorwaarden voor de (energetische) optimalisatie zijn van teelttechnische aard. Er zijn nog kennislacunes rond het telen bij hogere vochtigheid.

Gewasmaatregelen

- Beperken van de waterdamp afgifte van het gewas, zo mogelijk zonder nadelige consequenties voor de productie en kwaliteit. Dit kan gebeuren door, ten eerste na te gaan in hoeverre het mogelijk is om de verdamping te verlagen door meer blad te plukken in de "beruchte" perioden met verhoogde kans op vochtproblemen.
- Er is onvoldoende kennis aanwezig t.a.v. de relatie bladoppervlakte en productie. Aangezien bladbeperking meestal productieverlies als gevolg heeft, is dit middel wellicht niet jaarrond te gebruiken. Het afwegen van de gaswinst tegen het productieverlies moet resulteren in een blauwdruk om "optimaal" blad te plukken, afhankelijk van het type gewas.
- Soortgelijke overwegingen (t.a.v. zowel effect op verdamping als mogelijk productieverlies) gelden ten aanzien van "snelle" middelen om de watertoevoer naar de bladeren te verminderen (zoals wateraanvoer en/of worteltemperatuur).
- Om wateraanvoer of voedingsaanvoer als regeling in te zetten, is het nodig water en nutriënten toediening onafhankelijk van elkaar te maken.

Literatuur

- Blok, C., Mattias, M.C., 2002. Verlaagde gewasverdamping. PPO rapport 565, Naaldwijk, Holland.
- Caron, J., Morel, P., Riviere, L.M., 2001. Aeration in growing media containing large particle size. Acta Hort. 548, 229-231.
- De Graaf, R., Spaans, L., 1989. Automatiseren watergeven bij teelten op substraat met behulp van een watergeefrekenmodel. Intern verslag 33, PBG, Naaldwijk, Holland.
- De Graaf, R., 2001. Energiebesparing met een aangepaste minimumbuisregeling. Rapport 341, PPO, Naaldwijk, Holland.
- De Jong, T., 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Esmeijer, M.H., 1998. Minimale transpiratie in relatie tot energieverbruik, productie en kwaliteit van glastuinbouwgewassen. PBG, Rapport 154, Naaldwijk, Holland.
- Heuvelink, E. en C. Stanghellini, 2001. Drastische Dränabschwächung. Taspo-Gartenbau, 9: 30-32.
- Kempkes, F.L.K., N.J. van de Braak, A.T.M. Zwinkels en G. Houter, 2000. Schermkieren in de praktijk, onderzoek naar verbeterde regeling, temperatuurverschillen en gewasontwikkeling bij paprika. IMAG rapport P2000-30, 44pp.
- Li, Y.L., C. Stanghellini & H. Challa, 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum*, L.). Scientia Horticulturae, 88: 11-29.
- Li, Y.L. en C. Stanghellini, 2001. Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. Scientia Horticulturae, 89: 9-21.
- Li, Y.L., C. Stanghellini en H. Challa, 2002. Response of tomato plants to a step-change in root-zone salinity under two different transpiration regimes. Scientia Horticulturae, 93: 267-279.
- McMichael, B.L., Burke, J.J., 1998. Soil temperature and root growth. HortScience 33(6), 947-951.
- Ravensbergen, P., 2002. Richtlijnen voor Glami energieonderzoek gezien vanuit onderzoeksoptiek. Eindverslag PT project 11220, 25pp.
- Sonneveld, C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. PhD dissertatie, Wageningen Universiteit, 151 pp.
- Stanghellini, C., 1995. Vapour balance. In: J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. v.d. Braak (Eds.), Greenhouse Climate Control: an integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen: 141-150.
- Stanghellini, C. en T. de Jong, 1995. A model of humidity and its application in greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, 76: 129-148.
- Stanghellini, C. en F.L.K. Kempkes, 2002. Energiebesparing door vochtintegrerende regeling, IMAG rapport P2002-73, 51pp.
- Van Gorp, H., 1999. Watermanagement komkommer 1999. PPO Rapport Z-29, Horst, Holland.
- Van Gorp, H., Dik, A., 1996. Lang druppelen geeft meer botrytis. G+F, 5 jan., 22-23.