



Verneveling en waterbehoefte in de glastuinbouw

Voorstudie op basis van energiebalansen

Marcel Raaphorst

© 2007 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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 Wageningen UR Glastuinbouw.

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



Dit project is gefinancierd door het energieprogramma van het ministerie van LNV samen met het Productschap Tuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1 Bleiswijk
: Postbus 20, 2265 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317-485606
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Samenvatting

In de zomer kan op warme dagen het kasklimaat zo warm en droog worden dat telers soms spreken van een woestijnklimaat. Ongeveer 60% van de kaskoeling wordt veroorzaakt door gewasverdamping, maar als het erg droog is kunnen niet alle gewassen voldoende water aanvoeren en ontstaat droogtestress. Omdat droogtestress de opname van CO_2 verlaagt wordt dan ook op steeds meer bedrijven met een vernevelingsinstallatie de kas gekoeld en de luchtvochtigheid op peil gehouden. Bijkomend voordeel hierbij is, dat hiermee ook de luchtramen minder ver hoeven te worden geopend en meer CO_2 in de kas kan worden gehouden.

Voor verneveling is water nodig. Om een indruk te krijgen om hoeveel water het gaat en wat de invloed hiervan is op de kastemperatuur en de planttemperatuur zijn in opdracht van het energieprogramma van LNV en het Productschap Tuinbouw berekeningen gedaan met behulp van simulatiemodellen.

Deze simulatiemodellen zijn opgebouwd uit energiebalansen. Hierbij wordt uitgegaan van het feit dat dezelfde hoeveelheid energie die in de kas of op de plant komt ook weer aan de buitenlucht respectievelijk de kaslucht moet worden afgestaan. Dit afstaan van energie bestaat voornamelijk uit uitstraling, reflectie, convectorie en verdamping. Door de uitstraling, reflectie en de convectorie van de kas of de plant te bepalen kan de benodigde verdamping worden berekend.

Door gebruik te maken van de energiebalansmodellen is ook de invloed van verneveling op het waterverbruik berekend. Afhankelijk van de instellingen en de capaciteit van de vernevelingsinstallatie vergt verneveling maximaal $\pm 200 \text{ kg/m}^2\cdot\text{jaar}$. Hierbij komt de maximale vernevelingsbehoefte zelden boven de $400 \text{ gr/m}^2\cdot\text{uur}$. Verder kan met de energiebalansmodellen worden bepaald dat dichte kassen met een bepaalde kastemperatuur de meeste verdamping genereren in gebieden met een hoge instraling en waar de kas zijn warmte moeilijk kwijt kan door een hoge temperatuur en weinig wind.

Met vernevelen kunnen drie doelen worden nagestreefd: een lage kastemperatuur, een laag ventilatievoud (ofwel een hoge CO_2 -concentratie), en/of een lage gewasverdamping. Hiervan lijkt de hoge CO_2 -concentratie meer voordeel te bieden dan een lage kastemperatuur. Berekend is dat bij een hoge streefwaarde van de CO_2 -concentratie de waarde van verneveling hierdoor kan oplopen tot meer dan 4 €/m^3 . Op sommige momenten zal de lage kastemperatuur meer van belang zijn dan de CO_2 -concentratie en wordt verneveld met de ramen wijd open. De gewasverdamping hoeft niet altijd te worden verlaagd. Als bij een goed verdampend gewas wordt verneveld zal de kastemperatuur weliswaar dalen, maar wordt de gewasverdamping verlaagd. Hierdoor zal de planttemperatuur stijgen ten opzichte van de kastemperatuur en blijft het temperatuurverlagingseffect beperkt.

Pas als een gewas zijn huidmondjes dreigt te sluiten om uitdroging te voorkomen, is verneveling pas echt effectief. Het bepalen van het moment dat huidmondjes gaan sluiten vergt echter betrouwbare metingen en gewasafhankelijke modelleringen.

Om te voldoen aan de extra waterbehoefte voor maximale verneveling zullen bedrijven in Zuid Holland hun bassin tot $\pm 3700 \text{ m}^3/\text{ha}$ moeten vergroten en bovendien moeten zorgen voor tot $200 \text{ kg/m}^2\cdot\text{jaar}$ additionele watervoorziening. Deze hoeveelheden liggen in het binnenland nog hoger.

Inhoudsopgave

	pagina
1 Inleiding	3
1.1 Probleem- en doelstelling	3
1.2 Aanpak / material & methode	3
2 Resultaten	4
2.1 Gewasverdamping en de energiebalans van een gewas	4
2.1.1 Huidmondjesweerstand en grenslaagweerstand	7
2.1.2 Berekening gewasverdamping	8
2.2 Verdamping en de energiebalans van een kas	10
2.3 Efficiënt vernevelen	13
2.4 Rendement van vernevelen	15
2.5 Benodigde waterkwaliteit	16
2.6 Neerslag in Nederland	16
2.6.1 Neerslag	16
2.6.2 Match tussen neerslag en waterbehoefte	17
2.7 Regionale verschillen	18
3 Conclusies en aanbevelingen	19
3.1 Discussie	19
3.2 Conclusies	19
3.3 Aanbevelingen	20

1 Inleiding

De laatste jaren gebruiken steeds meer glastuinbouwbedrijven een vernevelingsinstallatie. Vernevelen kan worden ingezet voor meerdere doelen:

- Het verlagen van de kastemperatuur door de verdampingskoeling te verhogen
- Het verhogen van de enthalpie (energie-inhoud) van de kaslucht, zodat minder hoeft te worden geventileerd om dezelfde hoeveelheid warmte af te voeren. Hierdoor kan de CO₂ concentratie in de kas hoog blijven.
- Het verlagen van de verdampingsbehoefte van het gewas, zodat uitdroging wordt voorkomen en de bladeren minder snel hun huidmondjes hoeven te sluiten.

1.1 Probleem- en doelstelling

Het is de vraag in welke mate deze verneveling invloed heeft op de verdamping van het gewas en in welke mate de behoefte aan kwalitatief hoogwaardig water kan veranderen. Dit roept weer vragen op voor de gietwatervoorziening. Moeten de bassins door verneveling groter worden of niet? En verschilt de additionele waterbehoefte voor verneveling per regio?

Om deze vragen te kunnen beantwoorden wordt in dit rapport de energiebalans van zowel de kas als de plant beschouwd. Met de energiebalansmethode wordt ervan uitgegaan dat de verdamping in een kas het gevolg is van het overschot aan warmte in de kas en dat de verdamping van een gewas een gevolg is van het overschot aan warmte in het gewas.

Het project is uitgevoerd in het kader van het energie onderzoeksprogramma van LNV (BO-03-006) en PT.

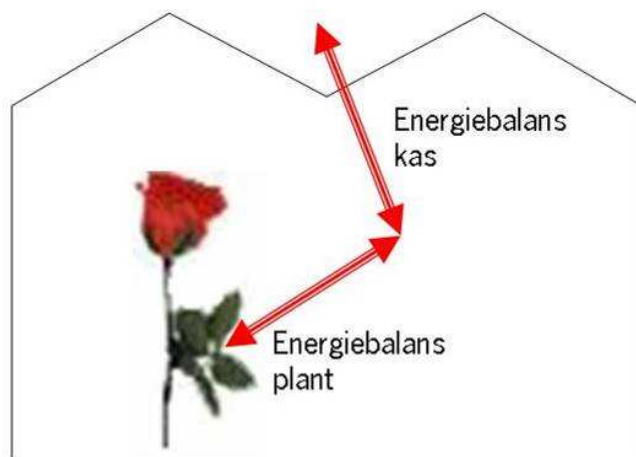
1.2 Aanpak / material & methode

Op basis van een literatuurstudie over gewasverdamping wordt een energiebalans model gebouwd. Met dit model en buitenklimaat gegevens van PPO Naaldwijk en het KNMI worden een aantal scenario's doorgerekend voor het gewas tomaat. Uit deze scenarioberekeningen blijkt dan in hoeverre verneveling invloed heeft op de gewasverdamping en het totale waterverbruik en in hoeverre telers dan in hun eigen waterbehoefte kunnen voorzien.

Bovendien wordt met behulp van een energiebalansmodel voor kassen berekend in welke mate verneveling de benodigde CO₂-dosering kan verminderen.

2 Resultaten

Door gebruik te maken van energiebalansen kan worden berekend hoeveel water nodig is om door verdamping warmte af te voeren. In dit hoofdstuk worden twee energiebalansen behandeld: één voor het gewas en één voor de kas (zie Figuur 1). Als bij de plant of bij de kas de energie-inhoud niet verandert, dan is de toegevoerde energie gelijk aan de afgevoerde energie. Door de min of meer bekende energiestromen te meten kunnen met energiebalansen de onbekende energiestromen en daarmee de verdamping worden berekend.



Figuur 1 - Energiebalansen

Vervolgens wordt beschreven hoe het klimaat (neerslag en straling) verloopt over de seizoenen in Nederland, en in hoeverre dit klimaat per regio verschilt. Ten slotte wordt uitgelegd hoe de invloed van het buitenklimaat op de verdamping wordt berekend.

2.1 Gewasverdamping en de energiebalans van een gewas

In hoeverre beïnvloedt de luchtvochtigheid de gewasverdamping? Hier zijn al vele onderzoeken naar gedaan. Toch hebben deze onderzoeken nog geen eenduidig antwoord kunnen geven. Dit komt ook deels doordat vele verdampingsbeïnvloedende factoren moeilijk te meten zijn. Hieronder worden een aantal verdampfingsmodellen beschouwd.

Om telers een richtlijn te geven hoeveel water per dag moet worden gegeven om de verdamping te compenseren heeft het Proefstation voor Tuinbouw onder glas een richtlijn [De Graaf en Spaans, 1989] opgesteld. Hierin is aangegeven dat de verdamping evenredig is met de globale straling en het verschil tussen buistemperatuur en kastemperatuur. Later is hier aan toegevoegd, dat bij een zeer lage luchtvochtigheid buiten (<50%), deze verdamping naar boven moet worden bijgesteld. De RV van het buitenklimaat heeft in dit model dus alleen in extreme omstandigheden invloed op de verdamping. De kasRV, die beïnvloed wordt door de globale straling wordt niet direct meegenomen in het model. Het model gaat er ook niet van uit dat de verdamping kleiner wordt onder eventuele stress-omstandigheden.

De formule luidt als volgt:

$$\text{Formule 1 } E = (a * R + b * G) * p * (175 - 1.5 * \min(RV, 50) / 100)$$

Hierbij is E de verdamping (l/m²), R de globale straling buiten (J/cm²), G het verschil tussen de buistemperatuur en kastemperatuur (graaduren), p een plantgroottefactor (%) en RV de luchtvochtigheid van de buitenlucht (%). a en b

zijn gewasafhankelijke factoren, die voor tomaat op respectievelijk $1,78 \cdot 10^{-3}$ en $1,32 \cdot 10^{-3}$ zijn gesteld. Volgens Formule 1 verhoogt een lagere luchtvochtigheid de verdamping alleen als de RV van de buitenlucht lager is dan 50%.

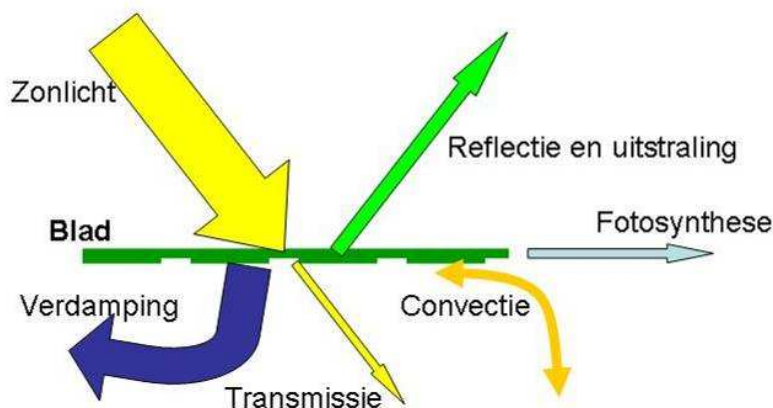
Doordat de belangrijkste variabelen (straling, buistemperatuur, kasttemperatuur) goed te meten zijn, is bovenstaand model uitstekend geschikt voor toepassing in de praktijk. Empirische modellen zoals formule 1 kunnen goed werken omdat in natuurlijke omstandigheden er een grote correlatie tussen (zonne)straling en vochtigheid is. Die correlatie wordt “verwerkt” in de empirische coëfficiënten a en b. Door verneveling wordt de natuurlijke verband (correlatie) tussen straling en vocht verbroken en is er geen reden om te verwachten dat zulke empirische modellen nog goed kunnen gelden. Daarom worden hieronder ook modellen beschouwd die uitgaan van de energiebalans van een gewas. Hiermee is de verdamping het resultaat van het verschil tussen de aangevoerde energie en de hoeveelheid afgevoerde energie in een gewas.

Het toevoeren van energie aan een gewas stimuleert de verdamping. Deze gewasverdamping wordt door de plant enigszins geregeld met behulp van huidmondjes. Bij de meeste gewassen staan de huidmondjes open als er licht op valt, zodat via de huidmondjes CO_2 kan worden opgenomen en fotosynthese in het blad kan plaatsvinden. In het donker is geen fotosynthese mogelijk en heeft het gewas geen reden meer om de huidmondjes open te houden. De verdamping blijft dan tot een minimum beperkt. Wanneer het licht wordt gaan de huidmondjes weer open en stijgt de verdamping met de hoeveelheid licht. Door verdamping koelt het blad af en bij veranderende klimaatomstandigheden zal telkens naar nieuw evenwicht worden gezocht tussen aangevoerde energie en afgevoerde energie.

De zon en de verwarmingsbuizen voeren energie aan en reflectie, uitstraling en verdamping voeren energie af. Door convectie wordt alleen energie afgevoerd als de bladtemperatuur hoger is dan de luchttemperatuur. Door fotosynthese wordt een deel van de zonne-energie ook nog chemisch vastgelegd. Gemiddeld is in een situatie overdag de afvoer van energie door een blad als volgt verdeeld [Bakker, 1993]:

- fotosynthese 5%
- reflectie 10%
- uitstraling 10%
- convectie 15%
- verdamping 60%

Naast deze factoren speelt ook de transmissie van het blad een rol.



Deze genoemde percentages zijn slechts gemiddelden en zijn afhankelijk van meerdere factoren. Het aandeel van de warmte dat door fotosynthese wordt onttrokken zal kleiner worden als er minder CO₂ beschikbaar is, als de huidmondjes sluiten. Bij veel zonlicht wordt dit minder efficiënt besteed aan fotosynthese dan bij weinig zonlicht. De reflectie en transmissie van het blad is afhankelijk van het gewas en de golflengte. De uitstraling van het blad is afhankelijk van de bladtemperatuur ten opzichte van zijn omgeving. Als de bladtemperatuur stijgt met 1°C dan stijgt de uitstraling met 5-6 W/m². Dit is een relatief kleine invloed. Om de invloed van de luchtvochtigheid op de verdamping te bepalen wordt daarom hier dieper ingegaan op de factoren die de convectie (H) en de verdamping (E) beïnvloeden. Over deze verhouding zijn vele verschillende theorieën beschreven [Monteith, 1965] [Jarvis, 1981], [Stanghellini, 1987] [Nederhoff, 1994]. Voor de eenvoud wordt hieronder kort het model van Monteith uitgelegd, zoals ook door Cecilia Stanghellini beschreven in [De Gelder et.al, 2004].

$$\text{Formule 2} \quad E = 2 * LAI * 2450 * \frac{\chi_s - \chi_a}{r_s + r_b} \quad (\text{W/m}^2)$$

$$\text{Formule 3} \quad H = 2 * LAI * 1200 * \frac{T_s - T_a}{r_b} \quad (\text{W/m}^2)$$

$$\text{Formule 4} \quad R_n = E + H \quad (\text{W/m}^2)$$

Hierin is E de verdampingsenergie, en H de convectie-energie. χ_s en χ_a zijn het vochtgehalte (in g/m³) van respectievelijk het huidmondje (stomata) en de kaslucht (air). r_s en r_b zijn respectievelijk de huidmondjesweerstand en de grenslaagweerstand. T_s en T_a stellen respectievelijk de bladtemperatuur en de kastemperatuur voor. De energie die door fotosynthese wordt afgevoerd is in dit model verwaarloosd. De factor 2*LAI is omdat de opgevangen zonnearmte aan twee zijden van het blad kan worden afgevoerd.

R_n is de straling die door het blad wordt opgevangen, ofwel de globale straling boven het gewas, minus de reflectie en de transmissie van het gewas. Deze netto straling (R_n) wordt geschat met formule 5, waarbij I_{sun} staat voor de globale straling boven het gewas.

$$\text{Formule 5} \quad R_n = 0.86(1 - \exp(-0.7 LAI)) I_{sun}$$

Door Formules 2-3 met elkaar te combineren en de vochtgehalten χ_s en χ_a te berekenen uit de temperatuur en de luchtvochtigheid (RV) kan de verdamping worden benaderd met formule 6:

$$\text{Formule 6}$$

$$E = \left(\frac{2 * LAI}{(1 + 0.7584 * e^{0.0518 * T_a}) * r_b + r_s} \right) * \left[\frac{100 - RV}{100} * 5,5638 * e^{0.0572 * T_a} + \frac{0.7584 * e^{0.0518 * T_a} * r_b * \frac{R_n}{2450}}{2 * LAI} \right]$$

(g/m².s¹)

Voordat de invloed van de luchtvochtigheid op de verdamping wordt berekend wordt nu eerst ingegaan op de huidmondjesweerstand (r_s) en de grenslaagweerstand (r_b).

2.1.1 Huidmondjesweerstand en grenslaagweerstand

Over de beïnvloeding van de huidmondjesweerstand r_s is veel geschreven. In een eenvoudig model [Marcelis, 1987] wordt gesteld dat de stomataire weerstand alleen afhankelijk is van de straling boven het gewas. Bij 0 tot 5 W/m² is de huidmondjesweerstand maximaal bij 1000 s/m terwijl deze proportioneel afneemt tot 50 s/m bij 100 W/m². In een complexer model [De Gelder et al., 2004] staat beschreven, dat r_s vooral afhankelijk is van straling en de temperatuur en kan worden berekend met Formule 7, welke is uitgewerkt in Tabel 1.

$$\text{Formule 7} \quad r_s = 82 * \frac{\frac{R_n}{2 * LAI} + 4.30}{\frac{R_n}{2 * LAI} + 0.54} * (1 + 0.023 * (T_a - 24.5)^2) \text{ (s/m)}$$

Bij Formule 7 moet worden aangetekend dat deze geldt voor tomaat. Bij komkommer en aubergine kan de huidmondjesweerstand 50% lager zijn [Bakker, 1991]. Bij paprika is de huidmondjesweerstand hoger. Uit Formule 7 kan worden herleid dat de huidmondjesweerstand hoger wordt bij een lage geabsorbeerde straling (R_n) en een hoge LAI.

Tabel 1 – Huidmondjesweerstand (r_s) in s/m afhankelijk van straling (W/m²) en kasttemperatuur (°C).

		Kasttemperatuur (°C)		
		20	25	30
Straling	0	957	657	1107
boven	10	412	283	476
gewas	50	201	138	233
(W/m ²)	100	163	112	188
	200	142	97	164
	500	129	89	149

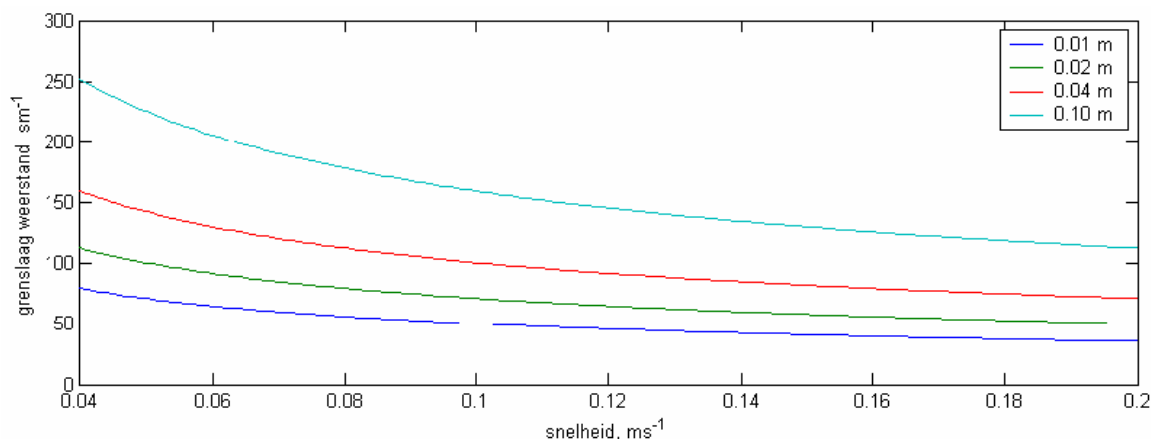
Naast de straling en de temperatuur is de huidmondjesweerstand ook afhankelijk van de CO₂ concentratie. Dit komt tot uiting in een 15-20% lagere verdamping als de CO₂ concentratie stijgt van 300 naar 800-1200 ppm [De Graaf, 1991] bij paprika. Volgens [Nederhoff, 1994] zou een 10% lagere verdamping in dit gebied zijn veroorzaakt door meer dan twee keer zo veel weerstand (huidmondjes + grenslaag). Formule 7 voor berekening van de huidmondjesweerstand houdt geen rekening met de CO₂ concentratie. Ook houdt het geen rekening met eventuele stressfactoren, zoals een zeer lage luchtvochtigheid, een gebrek aan water of een zeer hoge EC in het voedingswater. Indien hier wel rekening mee zou worden gehouden dan moet de huidmondjesweerstand op die (stress) momenten hoger worden ingeschat, wat neerkomt op een lagere geschatte verdamping.

De grenslaagweerstand r_b wordt voornamelijk bepaald door de vorm van de bladeren en door de luchtsnelheid. Bij een lage luchtsnelheid en grote (behaarde) bladeren kan de grenslaagweerstand oplopen tot meer dan 300 s/m, terwijl deze bij een hoge luchtsnelheid (1 m/s) en kleine bladeren (± 4 cm diameter) rond de 30 s/m kan liggen. Een formule voor het berekenen van de grenslaagweerstand [Vesala, 1998] is:

$$\text{Formule 8} \quad r_b = \frac{1}{0.6 * D} \sqrt{\frac{\mu * A}{\rho * v_{\infty}}}$$

Hierbij is D de diffusiecoëfficiënt van waterdamp in lucht ($\pm 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), μ de dynamische viscositeit ($\pm 0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). A de straal van het blad, ρ de dichtheid van lucht ($\pm 1,2 \text{ kg/m}^3$) en v_∞ de luchtsnelheid ver van het blad. Formule 8 houdt geen rekening met de vorm of ruwheid van het blad.

Volgens Marcelis et al. (2005) is in een kas met een lage luchtsnelheid de grenslaagweerstand voor tomaat, paprika en komkommer respectievelijk 200, 300 en 400 s/m.



Figuur 2 - Weergave van de grenslaagweerstand als functie van de luchtsnelheid (m/s) bij verschillende bladdiameters (m)

2.1.2 Berekening gewasverdamping

Met de formules 6 en 7 kan de verdamping worden berekend op basis van de globale straling, de kas RV , de kastemperatuur en de grenslaagweerstand. Deze berekeningen zijn weergegeven in Tabel 2. Hierbij wordt uitgegaan van een kasdek met een lichtdoorlatendheid van 70%.

Tabel 2 - Gewasverdamping (mm/uur) afhankelijk van de globale straling buiten (W/m^2) en de kasluchtvochtigheid (%) bij een kastemperatuur van 22 of 27 °C en een grenslaagweerstand van 30 of 300 s/m, bij een LAI van $3 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

		$r_b=30$			$r_b=300$		
		60	75	90	60	75	90
T=22°C	0	0.20	0.12	0.05	0.10	0.06	0.02
	100	0.75	0.48	0.21	0.20	0.14	0.09
	200	0.84	0.55	0.25	0.25	0.19	0.14
	400	0.94	0.63	0.32	0.35	0.30	0.24
	700	1.04	0.72	0.41	0.51	0.45	0.39
	1000	1.13	0.82	0.50	0.66	0.60	0.55
T=27°C	0	0.26	0.16	0.06	0.11	0.07	0.03
	100	0.92	0.58	0.25	0.22	0.16	0.10
	200	1.02	0.66	0.30	0.28	0.21	0.15
	400	1.13	0.75	0.38	0.39	0.33	0.26
	700	1.25	0.87	0.48	0.56	0.49	0.43
	1000	1.36	0.97	0.59	0.72	0.66	0.60

De berekende verdamping bij een grenslaagweerstand van 30 s/m en een hoge straling is zeer hoog. Veel hoger dan wat in de praktijk wordt gemeten. Daarom zijn hier de meest onwaarschijnlijke data gearceerd weergegeven. Het rekenmodel is dan ook niet gevalideerd voor situaties met grenslaagweerstand lager dan 100 s/m. Deze lage weerstanden komen in kassen ook nauwelijks voor. Mogelijk spelen bij een lage grenslaagweerstand ook andere factoren een rol bij verdamping, zoals het eerder sluiten van de huidmondjes en het hiermee verhogen van de huidmondjesweerstand in stress situaties.

Uit Tabel 2 blijkt wel dat een hoge luchtvochtigheid de verdamping verlaagt. Dit geldt met name bij een lage grenslaagweerstand en bij weinig straling.

Door in Tabel 2 de verdampingsenergie van de inkomende stralingsenergie af te trekken kan met behulp van de bekend veronderstelde grenslaagweerstand het verschil tussen plant- en kasttemperatuur worden berekend, waarbij de convectie-energie als sluitpost wordt beschouwd. Dit is weergegeven in Tabel 3. Hieruit blijkt dat de planttemperatuur in de meeste gevallen lager ligt dan de kasttemperatuur. Alleen bij een hoge luchtvochtigheid, een hoge grenslaagweerstand en veel warmtestraling komt de planttemperatuur boven de kasttemperatuur te liggen. Overigens dient hier worden aangetekend dat het hier gaat om de gemiddelde planttemperatuur. In de praktijk wordt de planttemperatuur meestal boven op het gewas gemeten. Daar vangen de bladeren relatief meer warmtestraling en zullen overdag daardoor ook warmer zijn dan onderin het gewas.

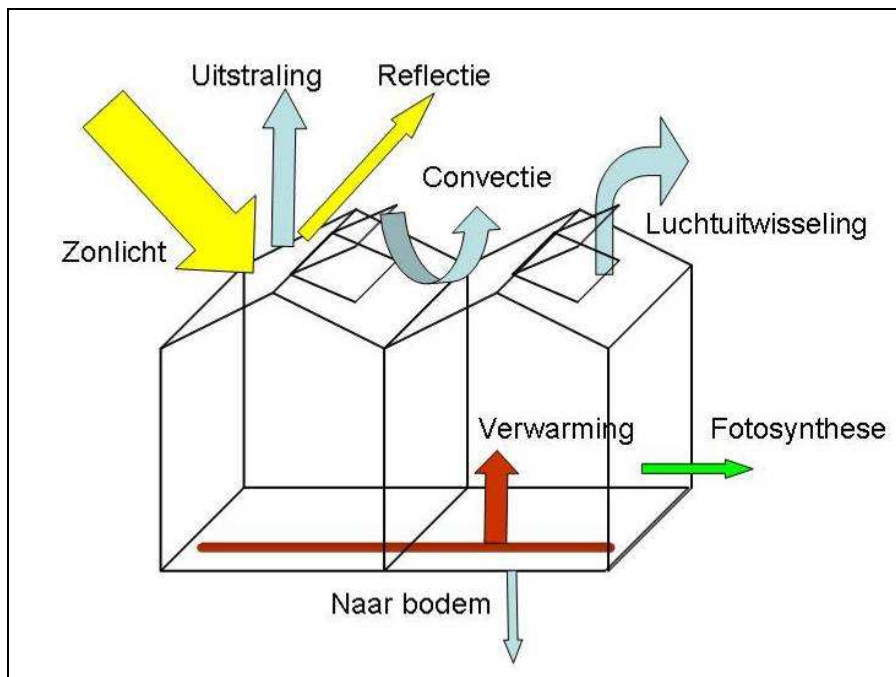
Tabel 3 - Verschil tussen de planttemperatuur en de kasttemperatuur (°C) afhankelijk van de globale straling buiten (W/m^2) en de kasluchtvochtigheid (%) bij een kasttemperatuur van 22 of 27 °C en een grenslaagweerstand van 30 of 300 s/m, bij een LAI van 4 m^2/m^2 .

		$r_b=30$			$r_b=300$		
		60	75	90	60	75	90
T=22°C	0	-0.6	-0.3	-0.1	-2.7	-1.7	-0.7
	100	-1.8	-1.1	-0.4	-3.4	-1.9	-0.3
	200	-1.9	-1.1	-0.3	-2.9	-1.3	0.3
	400	-1.8	-1.0	-0.1	-1.6	-0.1	1.5
	700	-1.5	-0.7	0.2	0.2	1.8	3.4
	1000	-1.2	-0.3	0.6	2.1	3.7	5.3
T=27°C	0	-0.7	-0.5	-0.2	-3.2	-2.0	-0.8
	100	-2.3	-1.4	-0.5	-4.1	-2.4	-0.6
	200	-2.4	-1.4	-0.4	-3.6	-1.9	-0.1
	400	-2.4	-1.3	-0.3	-2.6	-0.8	1.0
	700	-2.1	-1.1	0.0	-1.0	0.8	2.6
	1000	-1.8	-0.8	0.3	0.6	2.4	4.2

De verdamping is niet bij elk gewas even hoog. Een paprikagewas bijvoorbeeld verdampt bijna 25% minder dan een komkommernewas [De Graaf en Spaans, 1989]. Dit ligt aan verschillende factoren, zoals de mate van lichtabsorptie, de maximale huidmondjesgeleidbaarheid en de grenslaagweerstand.

Ook de conditie van het wortelgestel en de extreemheid van het kasklimaat hebben invloed op de verdamping. Als een plant moeite heeft om voldoende water aan te voeren voor de benodigde verdamping, dan zullen de huidmondjes zich sluiten, zodat minder water via de huidmondjes kan verdampen. Hierdoor stijgt de bladtemperatuur en zal relatief meer warmte worden afgevoerd door convectie en uitstraling.

2.2 Verdamping en de energiebalans van een kas



Figuur 3 – Energiestromen in en om de kas

De verdamping van een kas (met gewas en/of verneveling) wordt voor een groot deel bepaald door de netto hoeveelheid energie die aan de kas wordt toegevoerd. De zon levert in Nederland op jaarbasis $\pm 3500 \text{ MJ/m}^2$ aan energie op de kas. Een ketel met een gasverbruik van $35 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{jaar}$ en een stookrendement van 100% levert 1100 MJ/m^2 aan warmte in de kas. Van de toegevoerde energie treedt een deel niet binnen door reflectie en wordt een deel afgevoerd middels stralingsemissie, convectie en luchtuitwisseling. Ook wordt een kleine hoeveelheid warmte naar de bodem afgevoerd en wordt een deel van de zonne-energie via fotosynthese omgezet in drogestof. Door luchtuitwisseling wordt voelbare warmte en de te berekenen latente warmte (=verdampingswarmte) afgevoerd.

- De reflectie van het zonlicht is afhankelijk van het kastype of het gebruik van coatings, schermen of krijt. Ook het gewas en de bodem kunnen warmtestraling naar buiten reflecteren. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een vaste reflectiecoëfficiënt¹ van 20% op zonnestraling, ofwel 700 MJ/m^2 .
- De stralingsemissie per oppervlakte-eenheid (P/A) wordt bepaald door de temperatuur van het kasdek en de hemeltemperatuur en berekend met de wet van Stephan-Boltzmann:

$$\text{Formule 9} \quad \frac{P}{A} = e * \sigma * (T_k^4 - T_h^4) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

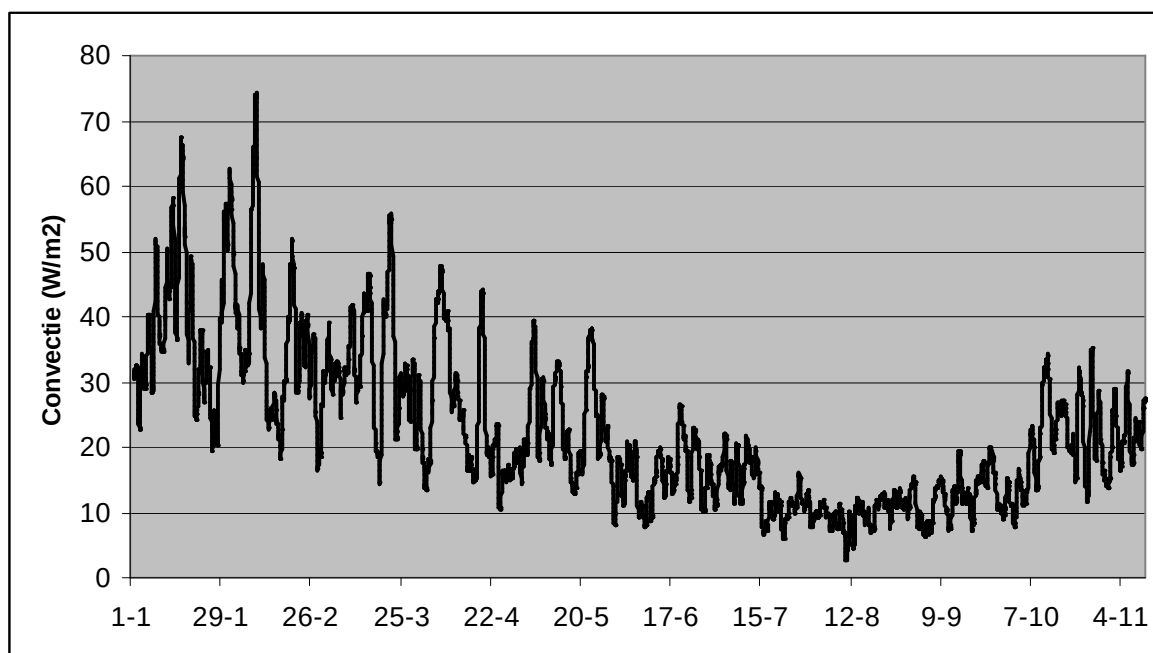
Hierbij wordt de emissiecoëfficiënt e van het kasdek geschat op 0,95 en is σ gelijk aan $5,6 * 10^{-8}$. De temperaturen van het kasdek T_k en de hemel T_h hebben de eenheid Kelvin. Voorbeelden: bij een kasdektemperatuur van 10°C ($=283 \text{ K}$) en een hemeltemperatuur van -20°C ($=253 \text{ K}$) is de stralingsemissie gelijk aan $0,95 * 5,6 * 10^{-8} * (64 * 10^8 - 41 * 10^8) = 122 \text{ W/m}^2$. Uitgaande van het seljaar (een veelgebruikt selectiejaar voor het buitenklimaat) en met een kastemperatuur van 20°C zonder gebruik van een energiescherm komt de jaarlijkse stralingsemissie neer op 1800 MJ/m^2 . Bij gebruik van een energiescherm of bij een lagere kastemperatuur blijft het kasdek kouder en zal de jaarlijkse stralingsemissie ook lager zijn. Zo zal met een energiescherm het kasdek lager zijn dan 10°C en kan de stralingsemissie dalen tot 1350 MJ/m^2 .

- De convectieverliezen van een kasdek naar de buitenlucht worden bepaald door de windsnelheid en het verschil tussen de kasdektemperatuur en de buitentemperatuur. Voor lage snelheden geldt:

$$\text{Formule 10} \quad \text{Convectie} = 1.09 * (2.8 + 1.2 * \text{WINDSN}) * (T_{\text{kasdek}} - T_{\text{buiten}}) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

¹ Een reflectie van 20% betekent dat de lichtdoorlaat van het kasdek lager is dan 80%, doordat een deel van de globale straling wordt geabsorbeerd door het kasdek of de kasonderdelen onder het kasdek. Deze globale straling wordt omgezet in warmte.

De temperatuur van het kasdek (T_{kasdek}) wordt in een kas zonder energiescherm benaderd door de buitentemperatuur plus een derde van het verschil tussen kas- en buitentemperatuur. Bij een kas met een energiescherm geldt een kasdektemperatuur gelijk aan de buitentemperatuur plus een vijfde van het verschil tussen kas- en buitentemperatuur. Als de zon schijnt wordt het kasdek verwarmd door absorptie van zonlicht. Glas absorbeert ongeveer 2% van het zonlicht. Hierdoor stijgt de temperatuur van het kasdek. Verondersteld wordt, dat deze absorptie volledig via convectie wordt afgevoerd. Uitgaande van de kastemperatuurgegevens en de buitenklimaatgegevens van een standaard tomatenbedrijf met energiescherm blijkt de gemiddelde convectie per etmaal in de winter op te kunnen lopen naar meer dan 80 W/m² terwijl in de zomer de convectie rond 10 W/m² gemiddeld per etmaal ligt (zie Figuur 4). Op jaarbasis wordt de convectie geschat op 700 MJ/m².



Figuur 4 Gemiddelde convectie per etmaal van het kasdek naar de buitenlucht voor een tomatenbedrijf met energiescherm

Verder verliest de kas een kleine hoeveelheid warmte (± 100 MJ/m².jaar) via de bodem en wordt een deel van de binnenkomende energie in assimilaten opgeslagen. Dit komt neer op ± 150 MJ/m².jaar. Uitwisseling van kaslucht en buitenlucht via lekkage en via de luchtramen zorgt voor de rest van de warmteafvoer.

Een overzicht van de ingaande en uitgaande energiestromen wordt weergegeven in Tabel 4. Hieruit blijkt dat de luchtuitwisseling (sluitpost) neerkomt op ongeveer 1600 MJ/m² warmteafvoer per jaar.

Tabel 4 – Energiebalans van een kas op jaarbasis

Ingaande energiestroom	Hoeveelheid (MJ/m ² .jaar)	Uitgaande energiestroom	Hoeveelheid (MJ/m ² .jaar)
Zonlicht	3500	Reflectie	700
Verwarming	1100	Uitstraling	1350
		Convectie	700
		Naar bodem	100
		Fotosynthese	150
		Luchtuitwisseling	1600
Totaal	4600	Totaal	4600

Warmteafvoer door luchtuitwisseling bestaat uit voelbare warmte en latente warmte (waterdamp). De verhouding tussen latente en voelbare warmte is afhankelijk van de temperatuur en de luchtvochtigheid in en buiten de kas. Enkele voorbeelden van het aandeel van het latente warmteverlies in de luchtuitwisseling is weergegeven in Tabel 5.

Hoe groter het verschil tussen kastemperatuur en buitentemperatuur, hoe kleiner het aandeel van latente warmte is. Hoe groter het verschil tussen de luchtvochtigheden binnen en buiten, hoe groter het aandeel van latente warmte is.

Tabel 5 – Aandeel van het latente warmteverlies bij luchtuitwisseling van verschillende temperaturen en luchtvochtigheden binnen en buiten.

		RV binnen	90	75	75	60	60
		RV buiten	60	75	45	60	45
Kastemp	Buitemp						
30	25		91%	80%	90%	76%	85%
25	15		82%	73%	80%	69%	74%
25	10		78%	71%	75%	66%	69%
20	15		85%	70%	83%	65%	76%
20	10		78%	68%	75%	69%	68%

Uit Tabel 5 blijkt dat bij een gemiddelde kastemperatuur van 20°C en een gemiddelde buitentemperatuur van 10°C ongeveer $\pm 70\%$ van de energiestroom via de luchtuitwisseling naar buiten bestaat uit (latente) verdampingswarmte. Voor deze verdampingswarmte is in dit voorbeeld $70\% \cdot 1600 / 2400 = 0,47 \text{ m}^3/\text{m}^2$, ofwel 470 mm water nodig. Bovendien vindt in de kas ook condensatie plaats tegen het kasdek, wat via gootjes wordt afgevoerd. De hoeveelheid condens tegen het kasdek is afhankelijk van de kasdektemperatuur, de kasluchttemperatuur en de luchtvochtigheid. Uitgaande van een constante kas-RV van 85% en een kastemperatuur van 20°C zonder scherm komt de jaarlijkse condensatie neer op 160 mm. Bij een lagere kas-RV zal de condensatie ook lager zijn. Een scherm heeft zowel een positieve als een negatieve invloed op de condensatie. Enerzijds verhoogt het scherm de diffusieweerstand van vocht richting het kasdek, waardoor minder condenseert. Anderzijds verlaagt het scherm de temperatuur van het kasdek, zodat deze verder onder het dauwpunt komt te liggen en dus bij het gebruik van schermkieren meer condenseert.

Om het vochtverlies via de luchtramen en de kasdekcondensatie te compenseren zou ongeveer $470 + 160 = 630$ mm per jaar moeten verdampen. De energiebalansmethode is echter te grof om de exacte verdamping te berekenen. Wel kan de methode worden gebruikt als discussiemodel. De energiebalans geeft bijvoorbeeld aan welke acties en welk buitenklimaat het waterverlies vanuit een kas kunnen doen verlagen:

Acties om het waterverlies (via waterdamp) vanuit een kas te verlagen

- Verhogen van de zonlichtreflectie (minder input van warmte) [Hemming et.al. 2005]
- Verlagen van de verwarming (minder input van warmte) [Stanghellini & Kempkes, 2004]
- Verlagen van de ventilatie. Hiermee wordt de kasluchttemperatuur hoger (verschuiving van latente naar voelbare warmteuitwisseling met buitenlucht).
- Niet vernevelen

Discussie

Het verhogen van de zonlichtreflectie wordt al veel toegepast door te krijten en te schermen. Selectieve filters zoals NIR-scherm of -krijt, kunnen het voor de plant op dat moment wel bruikbare PAR deel wel doorlaten en het voor de warmtebelasting negatieve NIR deel wegfilteren [Hemming et.al, 2005]. Een hogere absorptie van warmtestraling in het kasdek zal de verdampingbehoefte ook verminderen, zij het minder dan met reflectie.

Het koelen van het kasdek verlaagt de convectie en de uitstraling van warmte naar de buitenlucht en is daardoor minder effectief dan het koelen in de kas.

*Ook de vraag of een buitenscherm effectiever is dan een binnenscherm kan met de energiebalansmethode worden bediscussieerd (zie ook Hemming et.al. 2005). Voor een scherm dat veel PAR en NIR **reflecteert** zal het niet veel uitmaken of het onder of boven het kasdek is bevestigd. Een groot deel van de gereflecteerde straling zal ook bij een binnenscherm weer door het kasdek naar buiten gaan. Een scherm dat veel PAR en NIR **absorbeert** is buiten wel effectiever dan binnen. Het scherm zal door absorptie warm worden, wat meer uitstraling en convectie naar de buitenlucht geeft als er geen kasdek tussen zit.*

Het verlagen van de ventilatie zal ook leiden tot meer condensatie tegen het kasdek (zie Tabel 6). Dit condenswater is herwinbaar en wordt daarom niet als waterverlies gezien.

Tabel 6 - Condensatie tegen het kasdek ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$) bij een RV van 90%, afhankelijk van de kastemperatuur in de nok en de buitentemperatuur.

		Kastemperatuur in de nok ($^{\circ}\text{C}$)		
		15	20	25
Buitentemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)	5	20	46	84
	10	5	25	58
	15	0	7	32

Buitenklimatefactoren die het waterverlies uit de kas verlagen

- Weinig zonlicht
- Een lage hemel- of buitentemperatuur
- Veel wind
- Een hoge luchtvochtigheid

Discussie

Ook bij de buitenklimatefactoren moet worden aangetekend dat zij het waterverlies alleen kunnen verlagen mits zij de stookbehoefte niet verhogen. In de winter betekenen weinig zonlicht, een lage temperatuur en veel wind namelijk een hoge warmtevraag, zodat meer moet worden gestookt en alsnog de verdamping wordt gestimuleerd. Gevoelsmatig zouden een lage buitentemperatuur en veel wind juist moeten leiden tot meer verdamping. Zo zou een gure oostenwind tot meer verdamping leiden. Met de modelberekening is echter uitgegaan van een zeer dichte kas, zodat meer wind nauwelijks leidt tot meer luchtuitwisseling maar wel tot meer convectie langs het kasdek. Door deze convectie hoeft minder latente warmte te worden afgevoerd om de temperatuur niet te ver op te laten lopen. Bij een gure oostenwind zal de hier vaak mee gepaard gaande lage luchtvochtigheid en hogere zoninstraling of extra verwarmingsbehoefte leiden tot meer verdamping, maar in principe leidt de convectie langs het kasdek tot minder waterverlies uit de kas.

2.3 Efficiënt vernevelen

Een middel om te voorkomen dat de plant vanwege droogtestress zijn huidmondjes gaat sluiten is verneveling. Verneveling heeft twee effecten: het verlagen van de kastemperatuur en het verhogen van de luchtvochtigheid. Door het verlagen van de kastemperatuur, wordt de planttemperatuur ook lager. Het verhogen van de luchtvochtigheid verlaagt de verdamping (zie Tabel 2) en verhoogt hiermee de planttemperatuur ten opzichte van de kastemperatuur (zie Tabel 3). Per saldo zal verneveling de planttemperatuur minder snel doen dalen dan de kastemperatuur. Hoe veel minder is afhankelijk van de gewastoestand. Een goed verdampend gewas zal minder profijt hebben van verneveling dan een gewas met droogtestress.

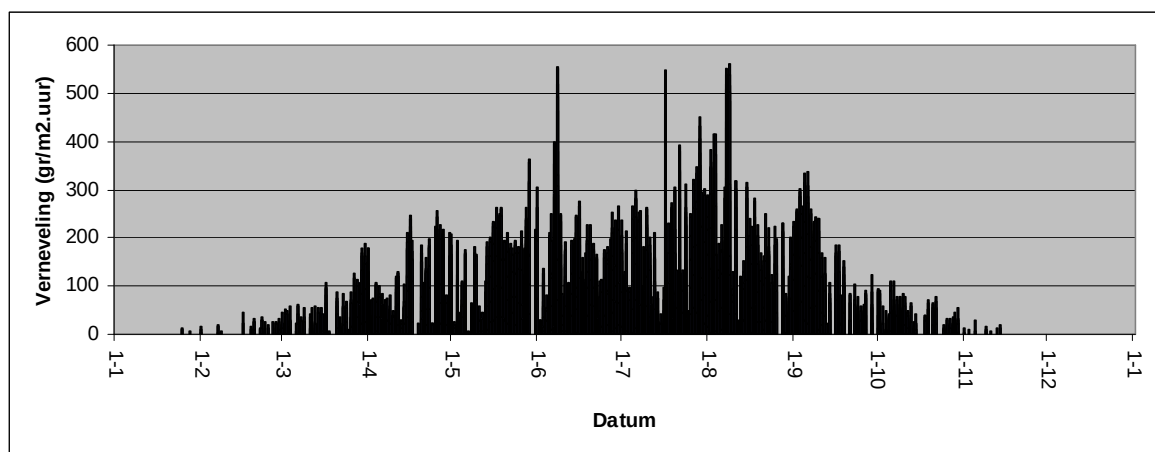
Verneveling van de kaslucht leidt dus tot een lagere planttemperatuur, maar daar is meer water voor nodig dan als het gewas zichzelf voldoende door verdamping kan koelen. De meest efficiënte vernevelingsregeling zorgt er dan ook voor dat er alleen verneveld wordt op de momenten dat het gewas onvoldoende kan verdampen, bijvoorbeeld als de huidmondjes gaan sluiten. Telers stellen echter niet alleen de efficiëntie van het watergebruik als doel, maar ook de effectiviteit van het watergebruik op het kasklimaat. Door overdag zo veel mogelijk te vernevelen (bijvoorbeeld totdat de luchtvochtigheid boven een bepaalde waarde uitkomt) wordt de kastemperatuur of het ventilatievoud laag gehouden. Om dit te realiseren is veel water nodig. Als het hele jaar door een luchtvochtigheid van 90% in de kas wordt aangehouden bij een ventilatietemperatuur van 27°C , dan zal de waterbehoefte ten opzichte van een onverneveld tomatenteelt ($\pm 690 \text{ mm}$ verdamping) op jaarbasis (buitenklimaat van Naaldwijk 2004) met 210 mm stijgen naar 900 mm . Hoe groot de benodigde extra waterbehoefte per jaar moet zijn als andere kastemperaturen en luchtvochtigheden worden aangehouden, wordt weergegeven in Tabel 7. Hoe lager de temperatuur waarbij wordt geventileerd, hoe meer vocht er via de ramen kan verdwijnen en hoe meer er kan worden verneveld. In een extreme vorm (bijv. als wordt geventileerd bij een kastemperatuur van 15°C en verneveld tot 90% RV), kan de extra waterbehoefte oplopen tot 670 mm/jaar .

Tabel 7 – Berekende extra waterbehoefte in mm/jaar afhankelijk van de na te streven kasttemperatuur en RV

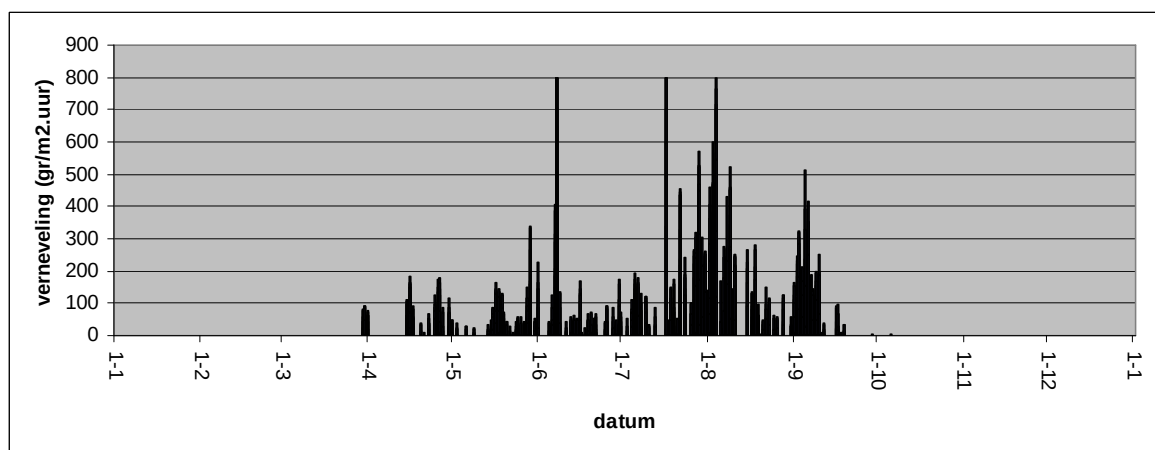
		Relatieve luchtvochtigheid		
		60%	75%	90%
Kas- temperatuur	23°C	106	216	277
	25°C	93	160	232
	27°C	70	128	210

De verdeling van de verneveling per uur wordt voor twee klimaatregimes weergegeven in Figuur 5 en Figuur 6. Om bij een hoge buitentemperatuur voldoende vocht af te voeren moet veel worden geventileerd. Met deze hoge ventilatie komt warme buitenlucht naar binnen, waardoor nog meer moet worden verneveld om de lage kasttemperatuur vast te houden. Op die momenten is het dan ook maar de vraag of de benodigde uitwisseling van kaslucht met buitenlucht via de luchtramen kan worden behaald. In de praktijk zullen op die momenten de kasttemperatuur en de luchtvochtigheid oplopen.

Uit Figuur 5 en Figuur 6 blijkt overigens dat de vernevelingsbehoefte slechts zelden uitkomt boven de 300 g/m².uur en in grofweg 80% van de tijd niet boven de 200 g/m².uur. De behoefte is dus sterk afhankelijk van de mate waarin de kasttemperatuur mag oplopen.



Figuur 5 – Verdeling van de verneveling per uur over het jaar bij een kasttemperatuur van maximaal 27 °C en een RV van minimaal 90%.



Figuur 6 – Verdeling van de verneveling per uur over het jaar bij een kasttemperatuur van maximaal 25 °C en een RV van minimaal 60%.

Voorbeeld met veel luchtuitwisseling

In Tabel 8 staat een voorbeeldsituatie waarin de temperatuur en vochtigheid van de kaslucht en de buitenlucht zijn beschreven. Het enthalpieverschil tussen de kaslucht en de buitenlucht is $14,4 \text{ kJ/m}^3$. Bij een globale straling van 900 W/m^2 komt $\pm 80\%$ hiervan (720 W/m^2) in de kas en moet weer worden afgevoerd om het kasklimaat gelijk te houden. Dus moet $720/14,4 = 50 \text{ liter/m}^2 \cdot \text{s}$ ofwel $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ luchtuitwisseling plaatsvinden bij een vochtafvoer van $180 \cdot (17,3-10,3) = 1260 \text{ g/m}^2 \cdot \text{uur}$. Ongeveer de helft van deze vochtafvoer wordt aangevoerd middels gewasverdamming. De overige $600 \text{ g/m}^2 \cdot \text{uur}$ moet met verneveling worden aangevoerd.

Tabel 8 – Voorbeeld kasklimaat en buitenklimaat

	Temperatuur	RV	Vochtgehalte
Kaslucht	25 °C	75%	17,3 g/m ³
Buitenlucht	27 °C	40%	10.3 g/m ³

Als bij weinig wind of een kleine raamopening de benodigde luchtuitwisseling van $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ niet kan worden behaald, dan zal het enthalpieverschil tussen de kaslucht en de buitenlucht stijgen. Dit komt tot uiting in een hogere kastemperatuur en/of een hogere luchtvochtigheid in de kas.

2.4 Rendement van vernevelen

Vernevelen biedt de volgende voordelen:

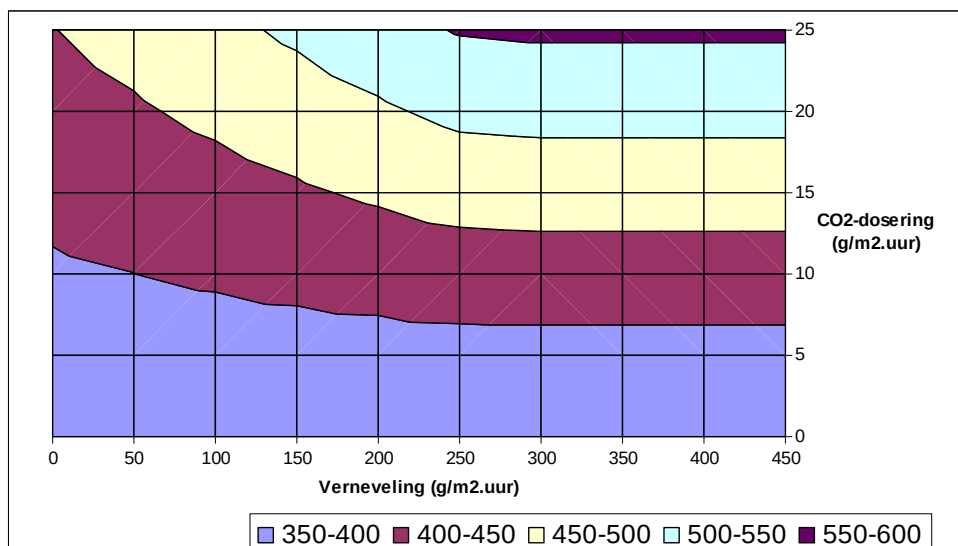
1. Door de extra verdamping **verlaagt de kastemperatuur**, wat de teler een extra stuurmiddel geeft om de vraag naar assimilaten (afhankelijk van temperatuur) af te stemmen op de hoeveelheid aangemaakte assimilaten (fotosynthese). Dit voordeel is sterk gewasafhankelijk.
2. Op momenten met een hoge instraling is het mogelijk dat de plant onvoldoende water vanuit de wortels aan kan voeren om zichzelf te koelen. Verneveling kan de plant dan ontlasten, zodat de **huidmondjes open** blijven en CO_2 op blijven nemen. Dit voordeel is nog niet gekwantificeerd en is waarschijnlijk ook zeer gewasafhankelijk.
3. Het verhogen van de kasluchtvochtigheid verhoogt de enthalpie van de kas. Hierdoor hoeft minder geventileerd te worden en kan **meer CO_2** in de kas blijven. Dit voordeel zal te allen tijde de competitie aan moeten gaan met het eerste voordeel (verlaging van de kastemperatuur). De teler zal regelmatig de afweging moeten blijven maken tussen een lagere kastemperatuur en/of minder ventilatie [Raaphorst et al., 2007].

Het voordeel van de lagere ventilatie en de hogere CO_2 -concentratie door verneveling wordt weergegeven in Figuur 7. Hierin is voor een situatie met 600 W/m^2 globale straling, een kastemperatuur van 26°C , een buitentemperatuur van 25°C en een buiten RV van 45% berekend hoe hoog de CO_2 -concentratie kan worden gehandhaafd bij verschillende hoeveelheden van verneveling en CO_2 -dosering. Zonder verneveling wordt de kas RV 61% met $138 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ luchtuitwisseling. Met $260 \text{ g/m}^2 \cdot \text{uur}$ verneveling stijgt de RV naar 90% en daalt de luchtuitwisseling naar $58 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$. Als meer wordt verneveld zal de RV oplopen tot meer dan 90%, wat voor de meeste gewassen als ongewenst wordt geacht.

Uit de figuur blijkt dat als bijvoorbeeld wordt gestreefd naar een CO_2 -concentratie van 450 ppm dit kan worden bereikt met $25 \text{ g CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ zonder verneveling, of met $12,5 \text{ g CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ met $220 \text{ g/m}^2 \cdot \text{uur}$ verneveling. In deze situatie is de waarde van 1 kg verneveling $(25-12,5)/260 = 1/21^e$ van de waarde van 1 kg CO_2 . Als ervan wordt uitgegaan dat $\text{CO}_2 \pm 0,10 \text{ €/kg}$ kost, dan is de waarde van verneveling $0,10/21 \cdot 1000 = 4,8 \text{ €/m}^3$, wat meer is dan de huidige kostprijs van water ($\pm 1 \text{ €/m}^3$).

In Figuur 7 is ook te zien dat, indien in die situatie genoeg wordt genomen met een CO_2 -concentratie van 400 ppm de waarde van verneveling lager is, namelijk $(12-7)/260 \cdot 1000 \cdot 0,10 = 1,92 \text{ €/m}^3$. De waarde van verneveling is in deze situatie hoger dan $4,8 \text{ €/m}^3$ als gestreefd wordt naar een hogere CO_2 -concentratie dan 450 ppm.

Dus hoe hoger de gewenste CO_2 -concentratie, hoe hoger de waarde van verneveling.



Figuur 7 – CO_2 -concentratie afhankelijk van de mate van dosering en ventilatie bij een globale straling van 600 W/m^2 , een kasttemperatuur van 26°C , een buitentemperatuur van 25°C en een buiten RV van 45%.

Ook zal de waarde van ventilatie lager worden als er minder wordt geventileerd dan in het voorbeeld van Figuur 7. Er zal minder hoeven te worden geventileerd bij een lagere globale straling of een groter verschil tussen de kasttemperatuur en de buitentemperatuur. De waarde van ventileren zou dus op ieder moment apart moeten worden berekend. Bij bovenstaande berekening is overigens nog geen rekening gehouden met een eventueel “huidmondjesvoordeel” van ventilatie. Dit voordeel kan de waarde van ventileren nog sterker verhogen. Anderzijds wordt bij een gelijke kasttemperatuur en een hogere luchtvochtigheid het kasklimaat benauwder en zal de planttemperatuur hoger worden, wat negatief kan uitwerken op de arbeidsproductiviteit en de gewasgezondheid.

2.5 Benodigde waterkwaliteit

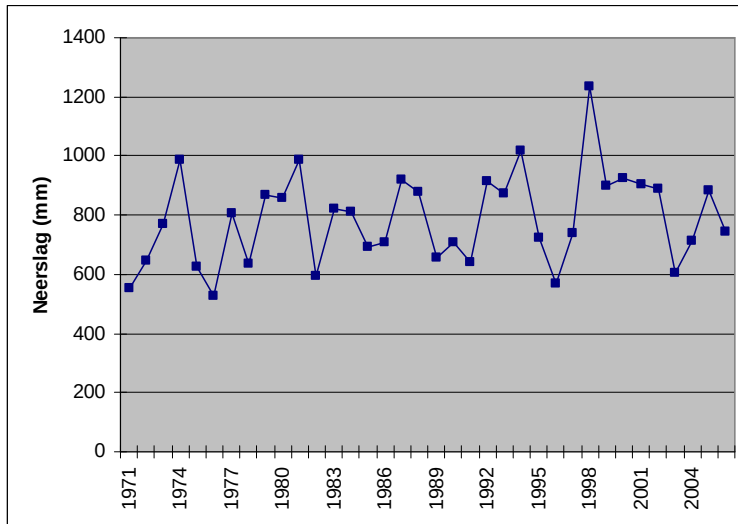
De benodigde waterkwaliteit voor ventilatie is mede afhankelijk van de vereiste druppelgrootte. Om veel te kunnen ventileren is een fijne druppelgrootte gewenst, wat kan worden bewerkstelligd met fijne nozzles. Hiervoor zijn hoge-drukinstallaties nodig van $\pm 100 \text{ bar}$. Om er voor te zorgen dat de fijne nozzles niet vervuild of verstopt raken, is water nodig met zo min mogelijk vervuiling. In principe kan met vele typen water worden ventilerd (zelfs oppervlaktewater wordt toegepast), maar het meest gangbare is gefilterd regenwater. Voor alle typen water geldt dat zij moeten worden gefilterd (ultrafiltrage of omgekeerde osmose) en/of onthard (bijv. bij leidingwater) of ontijzerd (bijv. bij bronwater).

2.6 Neerslag in Nederland

Het waterverbruik door gewasverdamping komt in Nederland voor de meeste gewassen neer op 500 tot 900 mm per jaar. Ook zal het gewas water opnemen voor de productie (20-80 mm). Door ventilatie kan de waterbehoefte oplopen tot 1250 mm per jaar. Het meeste water zal afkomstig moeten zijn van regenwater dat in bassins of ondergrondse watervoerende zandlagen wordt opgevangen. In deze paragraaf wordt aangegeven in hoeverre de neerslag in Nederland in de waterbehoefte kan blijven voorzien.

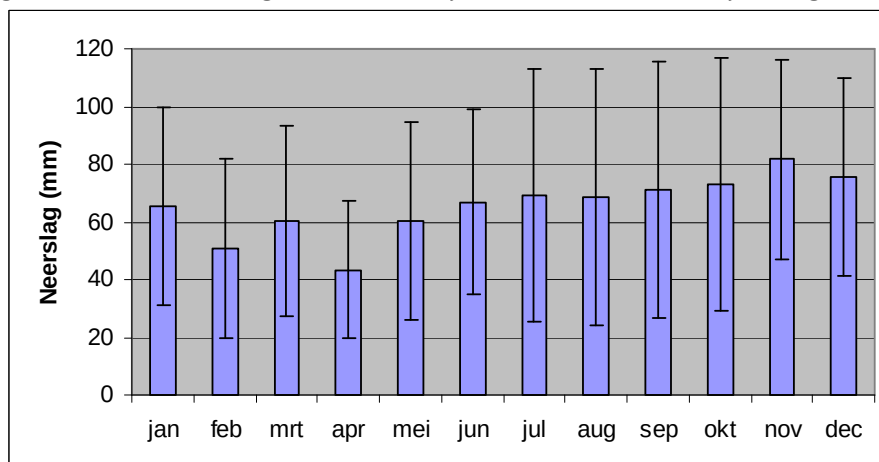
2.6.1 Neerslag

De neerslaghoeveelheid per jaar in De Bilt schommelt tussen 600 en 1000 mm met enkele uitschieters zoals 1234 mm in 1998. De hoeveelheid neerslag is de laatste decennia iets toegenomen. Dit wordt ook bevestigd door het KNMI.



Figuur 8 Neerslaghoeveelheid per jaar in mm in De Bilt tussen 1971 en 2006 [Bron: KNMI]

De neerslag is niet gelijkmatig over het jaar verdeeld. In Figuur 9 is over de periode 1971 tot 2006 de verdeling van de neerslag per maand plus en minus de standaard deviatie weergegeven. In de grafiek is te zien dat in het voorjaar gemiddeld minder neerslag valt dan in het najaar, maar dat ook in het najaar droge maanden kunnen voorkomen.



Figuur 9 Gemiddelde en standaarddeviatie van de neerslag per maand tussen 1971 en 2006 [Bron: KNMI]

2.6.2 Match tussen neerslag en waterbehoefte

De neerslaghoeveelheid in Nederland is in de meeste jaren net niet voldoende om aan de waterbehoefte (gewasverdamping en product) te voldoen. Als hierbij ook moet worden verneveld, wordt dit tekort alleen maar nijpender. Daarbij komt ook nog dat de neerslag het grootst is in het najaar, terwijl de waterbehoefte het grootst is in de zomer. Dit betekent dat water moet worden opgeslagen in bassins. De economische grootte van de bassins is voor 9 cases zoals genoemd in Tabel 7 berekend en weergegeven in Tabel 9. Het verloop van de bassinvulling door het jaar voor deze cases staan beschreven in Bijlage 1 en de benodigde hoeveelheid additioneel water is beschreven in Tabel 10.

Tabel 9 – Berekende economische bassingrootte in m³/ha afhankelijk van de na te streven kasttemperatuur en RV

		Relatieve luchtvochtigheid		
		60%	75%	90%
Kas- temperatuur	23°C	3250	3600	3700
	25°C	3200	3500	3650
	27°C	2900	3350	3600

Het bassin moet ongeveer 25% groter worden om gedurende het hele jaar te kunnen streven naar een kasttemperatuur van 23°C en een luchtvochtigheid van 90% ten opzichte van 27°C en 60%.

Tabel 10 – Berekende behoefte aan additioneel leidingwater in mm/jaar afhankelijk van de na te streven kasttemperatuur en RV, rekening houdend met de bassingroottes in Tabel 9.

		Relatieve luchtvochtigheid		
		60%	75%	90%
Kas- temperatuur	23°C	18	155	214
	25°C	0	76	162
	27°C	23	38	138

De verschillen in de behoefte aan leidingwater liggen voor alle cases iets lager dan de hoeveelheden in Tabel 7.

Discussie

Voor verneveling is niet per definitie regenwater nodig. Aangezien verneveld water niet natriumarm hoeft te zijn zou zelfs in theorie spuiwater kunnen worden gebruikt, al zullen de uitgedampte mineralen dan wel op het gewas neerslaan, of rond de nozzles op kunnen hopen. In de praktijk wordt ook wel oppervlaktewater gebruikt voor verneveling. In hoeverre de zouten en eventuele andere vervuilingen in dit water de levensduur van de nozzles beïnvloedt (in verband met verstopping) is nog niet onderzocht. Wel is in de praktijk gebleken dat bijvoorbeeld ijzerhoudend bronwater voor verstoppingsproblemen kan zorgen bij toepassing voor verneveling.

2.7 Regionale verschillen

In Nederland geldt dat in het binnenland op jaarbasis 5% minder licht is ten opzichte van Naaldwijk (zie bijlage 2). Ook is de windsnelheid in het binnenland bijna 50% lager en is de referentieverdamping $\pm 10\%$ lager. Hier tegenover staat dat de maximum temperatuur in het binnenland gemiddeld 1,5-2,0°C hoger ligt dan in Naaldwijk, zodat telers aldaar meer moeten ventileren om de kasttemperatuur voldoende laag te houden. Hoe meer geventileerd wordt, hoe meer ruimte er is om te vernevelen. Hoewel in het binnenland dus minder gewasverdamping plaatsvindt, zal verneveling daar meer invloed hebben op de waterbehoefte dan wat berekend is voor Naaldwijk. De jaarlijkse hoeveelheid neerslag kan sterk per gebied verschillen, al is hierover niet te eenduidig te bepalen of in het binnenland meer of minder neerslag is.

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Discussie

In dit rapport is in de meeste rekenvoorbeelden uitgegaan van een kas met een volgroeid tomatengewas. Hoewel ieder gewas een ander patroon geeft voor wat betreft verwarmingsbehoefte, belichtingsbehoefte en verdampingskarakteristieken, wordt verwacht dat in grote lijnen van de resultaten en conclusies ook voor andere gewassen opgaan.

3.2 Conclusies

Door te vernevelen kan een glastuinbouwbedrijf de teeltomstandigheden verbeteren en CO_2 -verlies beperken. Als gevolg van vernevelen kan de waterbehoefte per jaar sterk toenemen. In extreme vorm kan de waterbehoefte zelfs verdubbelen. Deze verhoogde waterbehoefte is in sterke mate afhankelijk van de instellingen. Als pas wordt verneveld wanneer de kasluchtvochtigheid daalt onder de 60% dan is de vernevelingsbehoefte 2 tot 3 keer lager dan wanneer een luchtvochtigheid van 90% wordt nagestreefd. Daarnaast wordt de vernevelingsbehoefte bepaald door de mate van ventilatie. Als al volop wordt geventileerd en verneveld bij een kastemperatuur van 23°C is de vernevelingsbehoefte 30 tot 50% hoger dan als pas volop wordt geventileerd en verneveld bij 27°C .

De behoefte is dus sterk afhankelijk van de mate waarin de kastemperatuur mag oplopen.

Door veel te vernevelen stijgt de waterbehoefte op een glastuinbouwbedrijf in de meeste jaren boven de hoeveelheid beschikbare neerslag. Deze waterbehoefte zal volgens de berekeningen vooral stijgen in het binnenland omdat daar vanwege de hoge buitentemperatuur meer wordt geventileerd.

Telers die vernevelen zullen moeten zorgen voor een aanvullende watervoorziening.

De verdamping en het watergebruik kunnen worden beperkt door minder te ventileren, door absorptie of reflectie van warmtestraling van de zon en door kaskoeling.

Met verneveling kan de kastemperatuur worden verlaagd mits met voldoende luchtuitwisseling het verdampte water de kas kan verlaten. Als boven 25°C wordt geventileerd en verneveld, dan stijgt de benodigde vernevelingscapaciteit slechts zelden boven de $400 \text{ gram/m}^2\text{.uur}$. Dit kan wel gebeuren als bij hoge instraling zo veel wordt geventileerd dat de kastemperatuur door verdampingskoeling onder de buitentemperatuur komt te liggen.

Door de luchtvochtigheid te verhogen van 60% naar 90% zal de gewasverdamping onder normale omstandigheden met 20-60% dalen. De planttemperatuur van een gewas zonder droogtestress zal dan 1 tot 3°C stijgen ten opzichte van de kastemperatuur.

Verneveling kan worden ingezet om het ventilatievoud te verlagen bij een gelijkblijvende kastemperatuur. Hiermee kan het doseren van CO_2 worden verlaagd bij een gelijkblijvende CO_2 -concentratie, of de productie verhoogd bij een gelijkblijvende CO_2 -dosering. Bij een hoge gewenste CO_2 -concentratie ($>450 \text{ ppm}$) en een hoge luchtuitwisseling ($>100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{.uur}$, ofwel ongeveer een raamstand van meer dan 50% bij 5 m/s windsnelheid) ligt de waarde van verneveling ver boven de kostprijs van verneveld water.

De berekeningen van de potentiële en de benodigde hoeveelheid verneveling zijn uitgevoerd op basis van energiebalansen en verdampingsmodellen. Over deze verdampingsmodellen bestaat nog te veel kennistekort om een betrouwbare schatting hiervan te kunnen geven. Aangezien vernevelen een van de componenten is van het geconditioneerde telen zal de komende jaren nog veel ervaring moeten worden opgedaan in relatie tot koeling en luchtbeweging om tot een betrouwbaarder berekening te kunnen komen.

3.3 Aanbevelingen

Verdampingsmodellen geven inzicht in de invloeden van verneveling, kaskoeling en luchtbeweging op de verdamping en het energiestromen in de kas. Toch geven in extreme situaties (veel globale straling in combinatie met een hoge luchtsnelheid en een lagere luchtvochtigheid in de kas) de verdampingsmodellen een hogere verdamping aan dan wat in de praktijk wordt gemeten. Het verdient aanbeveling om te onderzoeken waardoor in extreme situaties de afwijkingen tussen de werkelijke en de berekende verdamping worden veroorzaakt. Een belangrijk onderdeel hiervan is de huidmondjesweerstand. Met de kennis hierover zou stress bij plant beter kunnen worden voorspeld en verneveling effectiever worden ingezet.

Door een model op te stellen dat on-line de invloed van verneveling op de CO₂-concentratie berekent, kan verneveling efficiënter worden ingezet.

Literatuur

Alleblas, J.T.W. en M. Mulder. (1997) Kansen voor kassen. Landbouw Economisch Instituut, 's-Gravenhage

Bakker, J.C. (1991) Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. Dissertation, Wageningen.

Bakker, J.C. (1993) Blad geeft vooral via verdamping warmte af. Brochure luchtvochtigheid. Informatiereeks no 104. PTG Naaldwijk.

Dieleman, Anja, Frank Kempkes & Tom Dueck (2006) 'Activeren of stilzetten' op donkere dagen. Nota 423. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen

Gelder, Arie de, Jouke Campen, Anne Elings, Cecilia Stanghellini en Esther Meinen (2006) Luchtcirculatie en productie. Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, Naaldwijk. Nummer 41616052.2.

Graaf, R. de en L. Spaans (1989) Automatisering watergeven bij teelten op substraat met behulp van een watergeefrekenmodel. Intern verslag nr. 33. PTG Naaldwijk.

Graaf, R. de (1991) Hoog CO₂-gehalte remt verdamping. Groenten & Fruit/Glasgroenten 4:70-71.

Hemming, Silke, Frank Kempkes, Vida Mohammadkhani, Nico van de Braak, Tom Dueck, Raymond Jongschaap & Nollie Marissen (2005) Het effect van NIR-filterende kasdek- en schermmaterialen op kasklimaat, energieverbruik en gewasproductie. Rapport nr 505 Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen

Jarvis, P.G. (1985) Stomatal conductance, gaseous exchange and transpiration. In: J. Grace, E.D. Ford & P.G. Jarvis (Eds). Plants and their atmospheric environment. Blackwell Scientific Publications, Oxford. p. 175-203.

Marcelis, L.F.M., (1987) Simulatie van de waterhuishouding en de fotosynthese van kasgewassen. Doctoraalverslag Theoretische Teeltkunde, Landbouwuniversiteit, Wageningen, 72 pp.

Marcelis, Leo, Kees Grashof, Wolter van de Zwerde, Frank Kempkes & Cecilia Stanghellini (2005) Reductie van verdamping door verhoging van bladweerstand middels anti-transparanten. Plant Research International, Wageningen.

Monteith, J.L. (1965) Evaporation and the environment. In: State and movement of water in living organisms. 19th Symp. Soc. Exp. Biol.: 205-234.

Nederhoff, E.M. (1994) Effects of CO₂ concentration. Dissertation Wageningen.

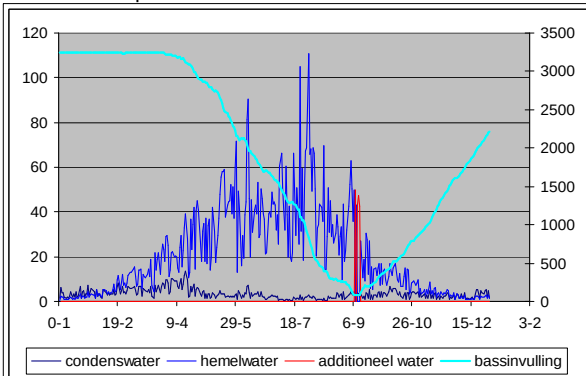
Raaphorst, Marcel, Frank Kempkes, Anne Elings, Anja Dieleman (2007) Energiezuinige teeltstrategie in voorjaar en zomer. Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, Naaldwijk. Nummer 32420024.

Stanghellini, Cecilia & Frank Kempkes (2004) Energiebesparing door verdampingsbeperking via klimaatregeling. Rapport nr 309. Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen

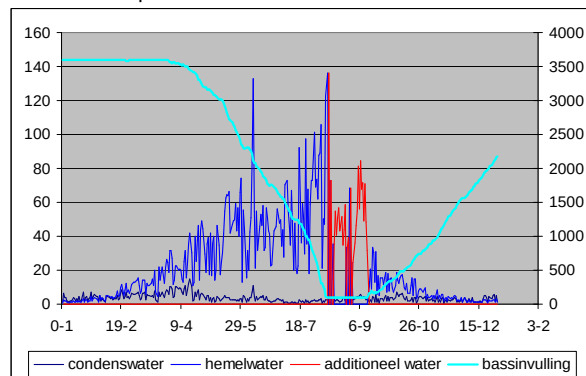
Vesala T. (1998). On the concept of leaf boundary layer resistance for forced convection. J. theor. Biol. 194 91_100

Bijlage 1 Verloop waterhuishouding bij verneveling

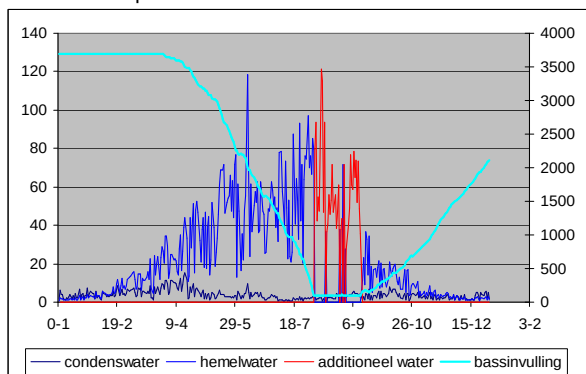
23°C kasttemperatuur en 60% RV



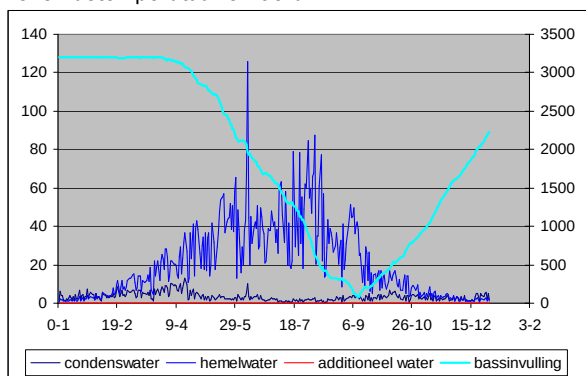
23°C kasttemperatuur en 75% RV



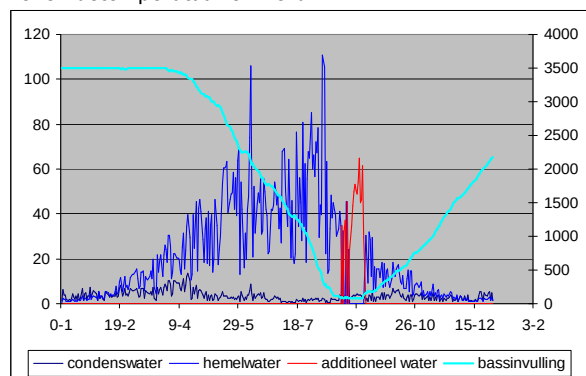
23°C kasttemperatuur en 90% RV



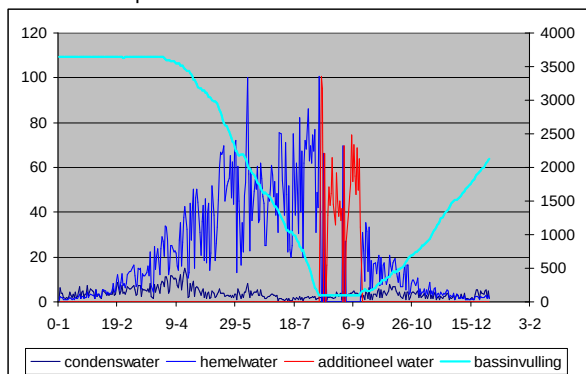
25°C kasttemperatuur en 60% RV



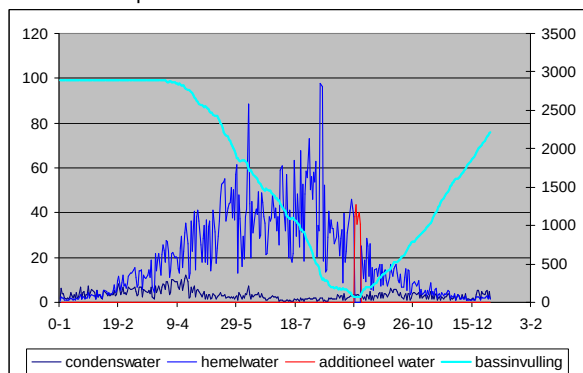
25°C kasttemperatuur en 75% RV



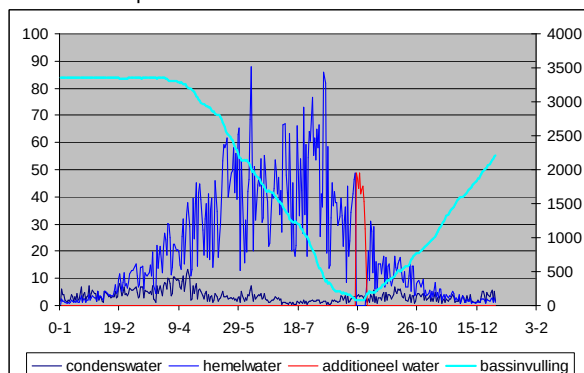
25°C kasttemperatuur en 90% RV



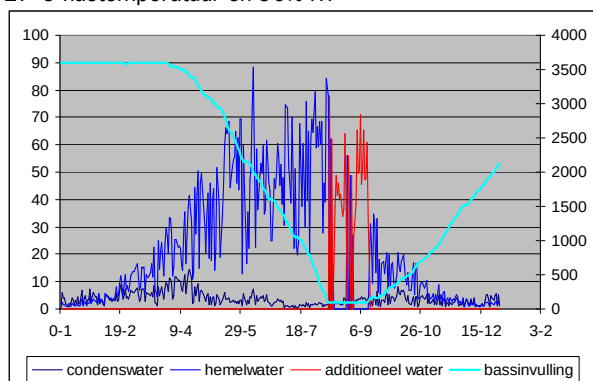
27°C kasttemperatuur en 60% RV



27°C kasttemperatuur en 75% RV



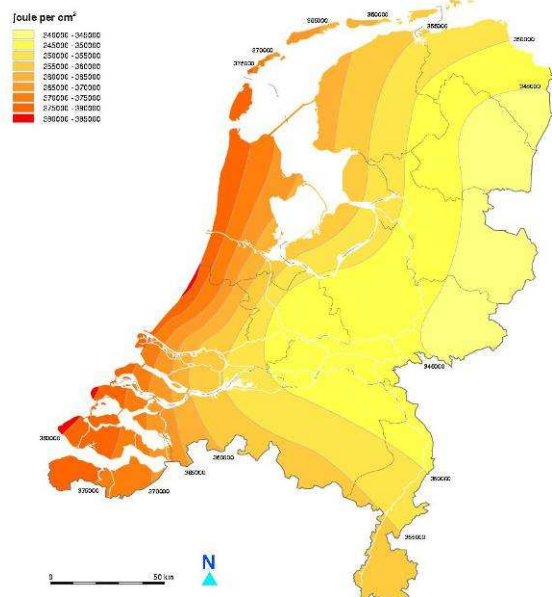
27°C kasttemperatuur en 90% RV



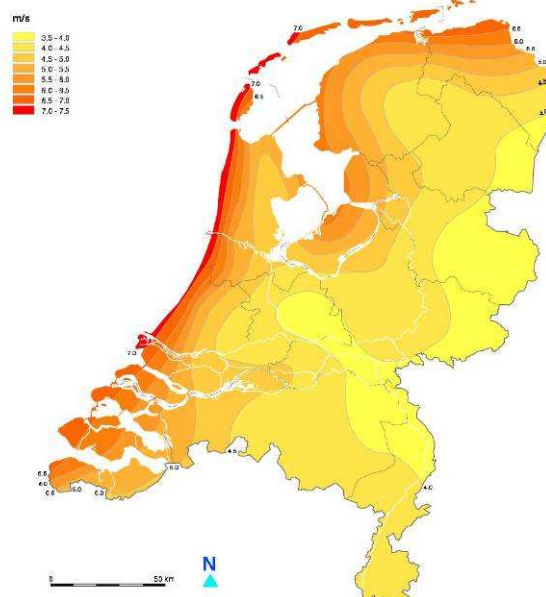
Bijlage 2 Klimaatkaarten Nederland

Bron: www.knmi.com

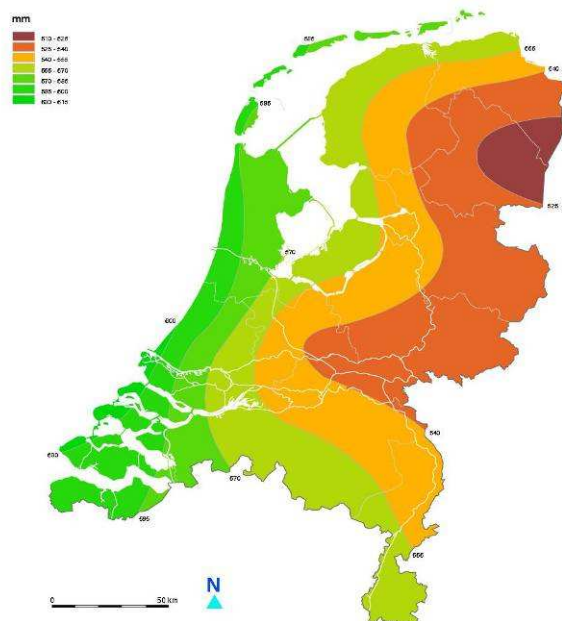
Globale straling



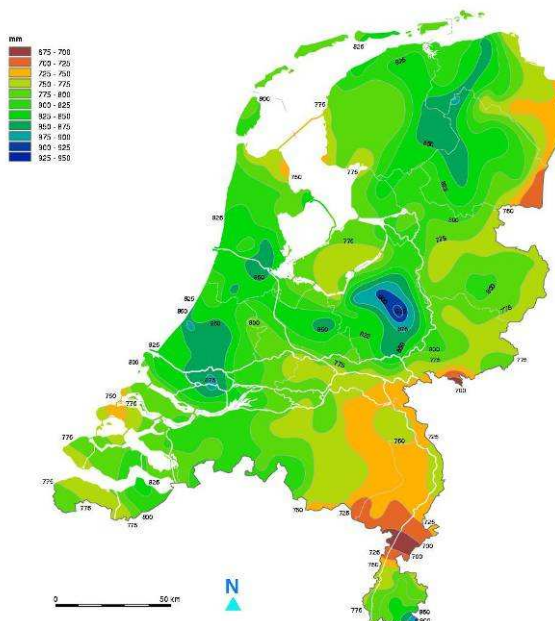
Windsnelheid



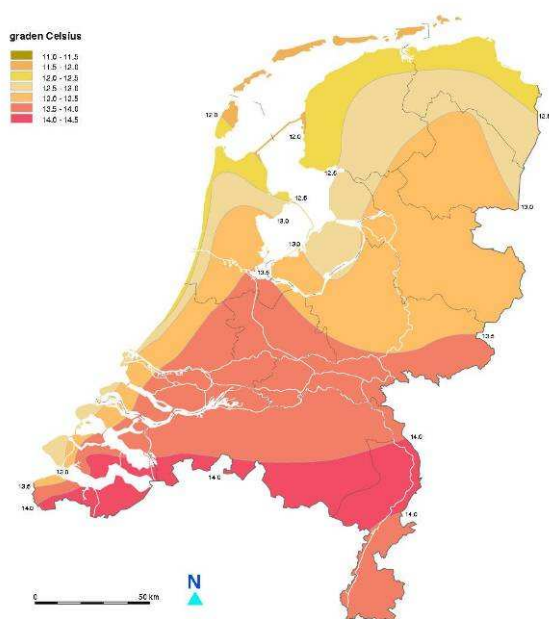
Referentieverdamping



Neerslag



Gemiddelde maximum temperatuur



Gemiddelde minimum temperatuur

