



Effecten van luchtvochtigheid op groei en ontwikkeling van tomaat

Anja Dieleman





Effecten van luchtvochtigheid op groei en ontwikkeling van tomaat

Anja Dieleman

© 2008 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

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
1 Inleiding	5
2 Luchtvochtigheid	7
3 Effecten van luchtvochtigheid op het gewas	9
3.1 Verdamping	9
3.2 Huidmondjesopening	11
3.3 Fotosynthese	12
3.4 Strecking	13
3.5 Calciumopname	14
3.6 Assimilatenverdeling en productie	16
4 Effecten op plantgezondheid en kwaliteit	19
4.1 Plantgezondheid	19
4.2 Vruchtkwaliteit	19
5 Effecten van luchtbevochtiging	21
6 Conclusies en aanbevelingen	23
7 Literatuur	25

Voorwoord

Sinds enkele jaren staat het telen in geconditioneerde kassen volop in de belangstelling. In deze kassen is het klimaat beter te sturen dan in traditionele open kassen, door de toepassing van koeling en verneveling. Deze ontwikkelingen hebben geleid tot hernieuwde aandacht voor luchtvochtigheid als klimaatfactor in de kas. Er is met de nieuwe technische mogelijkheden meer mogelijk op het gebied van sturing van luchtvochtigheid, maar er zijn nog veel vragen over welke effecten luchtvochtigheid precies heeft op gewasgroei en ontwikkeling. Deze vragen richten zich zowel op de bovengrens van de luchtvochtigheid, als op de effecten van luchtbevochtiging op het gewas.

Dit was voor de landelijke tomatencommissie aanleiding om WUR Glastuinbouw te vragen een literatuurstudie uit te voeren naar de effecten van luchtvochtigheid op tomaat. Dit onderzoek is gefinancierd door Productschap Tuinbouw en door het Systeminnovatieprogramma beschermde teelten van het Ministerie van LNV.

Ik wil Jan Janse, Cecilia Stanghellini en Leo Marcelis (WUR Glastuinbouw) bedanken voor hun kritische, opbouwende en deskundige inbreng in dit rapport.

Anja Dieleman
Februari 2008

Samenvatting

In de afgelopen jaren zijn nieuwe semi-gesloten kasconcepten ontwikkeld waarin een verbeterde sturing van het kasklimaat centraal staat. In deze kassen wordt veel minder geventileerd dan in een traditionele open kas. Door ontvochtiging via koeling en bevochtiging via vernevelingsinstallaties, is de luchtvochtigheid in deze kassen veel beter te sturen. Deze ontwikkelingen hebben geleid tot hernieuwde aandacht voor luchtvochtigheid als klimaatfactor in de kas.

Start van de teelt

Luchtvochtigheid beïnvloedt de groei, ontwikkeling en productie van tomaat via de fotosynthese, verdamping, strekking en nutriëntenopname. Op de korte termijn kan het aanhouden van een hoge luchtvochtigheid gunstig zijn, omdat het de celstrekking bevordert. Daarmee kan een hogere luchtvochtigheid, bijvoorbeeld aan het begin van de teelt, leiden tot een groter bladoppervlak en daarmee sneller een volledige lichtonderschepping. Verder staan bij een hogere luchtvochtigheid de huidmondjes verder open. Dit leidt tot een hogere fotosynthese, al is het effect daarvan op gewasniveau beperkt.

In de winter

In de winter en aan het begin van het voorjaar zal de luchtvochtigheid over het algemeen redelijk hoog zijn omdat de luchtramen vanwege lage buitentemperaturen vaak gesloten zijn en er veel geschermd wordt. Uit onderzoeken blijkt dat op de lange termijn een hoge luchtvochtigheid (0.1 – 0.4 kPa) tot een lagere productie kan leiden dan lagere luchtvochtigheden. Bij een hoge luchtvochtigheid is de verdamping van een gewas laag. De hoeveelheid water, en daarmee ook de hoeveelheid calcium die opgenomen wordt is daarmee ook lager dan bij een lage luchtvochtigheid. Dit kan leiden tot een lager calciumgehalte in het blad en daarmee tot kleinere bladeren. Dit leidt tot een verlaging van de hoeveelheid licht die onderschept wordt, en daarmee tot een verlaging van de gewasfotosynthese. In veel gevallen gaat dit gepaard met een afname van de productie, voornamelijk bepaald door een lager gemiddeld vruchtgewicht. Tomaten die geteeld zijn bij hoge luchtvochtigheid hebben over het algemeen een kortere houdbaarheid. Verder is bij een hoge luchtvochtigheid het risico op schimmelaantastingen groter, omdat de schimmelsporen een hoge luchtvochtigheid nodig hebben om te kiemen.

In de zomer

Onder zomerse omstandigheden kan in een open kas de luchtvochtigheid ver wegzakken. Onder die omstandigheden kan de wateropname de verdamping niet bijhouden, waardoor waterstress kan ontstaan, en daarmee gedeeltelijke sluiting van de huidmondjes en een afname van de fotosynthese. Met verneveling kan op deze momenten voorkomen worden dat de temperatuur te ver oploopt en dat de luchtvochtigheid te ver zakt. Zo kan de sluiting van de huidmondjes tegengegaan worden en kan de fotosynthese op niveau blijven. Omdat er bij verneveling minder gelucht hoeft te worden om de temperatuur in de zomer op peil te houden, blijft de CO₂ concentratie in de kas hoger. De combinatie van een hogere luchtvochtigheid, lagere temperatuur en hogere CO₂ concentratie kunnen tot een hogere productie leiden wanneer onder zomerse omstandigheden verneveling wordt toegepast. Wanneer luchtbevochtiging alleen toegepast wordt als de luchtvochtigheid laag is, is er geen verhoogd risico op schimmelaantastingen.

1 Inleiding

In de afgelopen jaren zijn nieuwe kasconcepten ontwikkeld waarin een verbeterde sturing van het kasklimaat centraal staat. Algemeen in deze kasconcepten (zoals gesloten kas, optima kas, kas als energiebron, energieleverende kas, aircokas) is dat er in de kas niet of veel minder geventileerd wordt, waardoor de CO₂ concentratie in de kas hoger is dan in de traditionele "open" kas (Opdam *et al.*, 2005; De Gelder *et al.*, 2005; www.komindegeslotenkas.nl). Dit is mogelijk door koeling van de kaslucht waardoor de temperatuur te sturen is. Doordat veel minder geventileerd wordt en de kas gekoeld werd, was ook de luchtvochtigheid in de gesloten kas beter te controleren dan in de open kas. In de aircokas wordt daarnaast ook verneveld (Raaphorst *et al.*, 2007; www.aircokas.nl), waardoor de luchtvochtigheid in de kas verhoogd kan worden.

Deze ontwikkelingen hebben geleid tot hernieuwde aandacht voor luchtvochtigheid als klimaatfactor in de kas. Er is met de nieuwe technische mogelijkheden meer mogelijk op het gebied van sturing van luchtvochtigheid, maar er zijn nog veel vragen over welke effecten luchtvochtigheid precies heeft op gewasgroei en ontwikkeling. Vragen zijn bijvoorbeeld beneden welke luchtvochtigheid er negatieve effecten op het gewas optreden, hoe groot deze effecten zijn en hoe ze fysiologisch gezien tot stand komen. Verder zijn er nog vragen over tot welke luchtvochtigheid er bevochtigd moet worden voor een optimale productie, zonder fysiogene afwijkingen of schimmelaantasting.

In de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw is er met name in Nederland en Engeland veel onderzoek gedaan naar de effecten van luchtvochtigheid op gewasgroei, met name in de wintermaanden. In die jaren waren de energieprijzen (ook) hoog. Er werd veel aandacht besteed aan isolatie van kassen, gebruik van schermen en nieuwe kasdekmaterialen, hetgeen allemaal leidde tot hogere luchtvochtigheden in de kas. De onderzoeken richtten zich dan ook met name op de effecten van hoge luchtvochtigheden op gewasgroei en ontwikkeling en de fysiologie die daaraan ten grondslag lag. Het meeste onderzoek is uitgevoerd in de winter, als de kassen nagenoeg gesloten waren en makkelijk hoge luchtvochtigheden te realiseren waren. Gegevens over onderzoek waarin specifiek onder zomerse omstandigheden is gekeken naar de effecten van een zeer lage luchtvochtigheid, en de effecten van luchtbevochtiging op dergelijke momenten komen met name uit Zuid-Europese landen.

In dit rapport worden de effecten van hoge en lage luchtvochtigheid op gewasgroei, -ontwikkeling en productie van tomaat beschreven. Er wordt ingegaan op de fysiologische achtergronden van de effecten van luchtvochtigheid. Voor zover mogelijk wordt aangegeven wat de grenswaarden zijn van de luchtvochtigheid. Hierbij wordt niet alleen naar de gewasgroei gekeken, maar ook naar schimmelaantastingen en effecten op kwaliteit.

2 Luchtvochtigheid

Er zijn verschillende manieren om aan te geven hoe vochtig de kaslucht is.

(Absolute) luchtvochtigheid. Dit is de concentratie van waterdamp in gram per m³ lucht (g/m³).

Relatieve luchtvochtigheid. De relatieve luchtvochtigheid (RV) is de verhouding tussen de hoeveelheid waterdamp die in de lucht zit en de hoeveelheid die de lucht bij dezelfde temperatuur maximaal kan opnemen (in %). De relatieve luchtvochtigheid kan veranderen als gevolg van twee factoren: de temperatuur en de luchtvochtigheid. Als de temperatuur toeneemt bij gelijkblijvende luchtvochtigheid, daalt de RV.

Dauwpunttemperatuur. Als onverzadigde lucht afkoelt, raakt deze steeds meer verzadigd. Bij een bepaalde temperatuur zal de lucht volledig verzadigd raken met waterdamp. Deze temperatuur noemen we het dauwpunt of de dauwpunttemperatuur. Koelt de lucht nog verder af dan treedt condensatie op. Als vruchten, stengels of andere plantendelen kouder zijn dan het dauwpunt, worden ze nat doordat de waterdamp er tegen condenseert.

Dampdruk of dampspanning. Elk gas in een ruimte veroorzaakt een spanning of druk. De druk door waterdamp wordt partiële druk van waterdamp of dampspanning genoemd en uitgedrukt in kilo Pascal (kPa) of mbar. Als de absolute luchtvochtigheid in grammen waterdamp per m³ groter wordt, neemt ook de dampspanning toe.

De verschillende begrippen kunnen in elkaar omgerekend worden als de temperatuur bekend is.

Dampdrukdeficit of VPD. Het dampdrukdeficit of vapour pressure deficit (VPD) is het verschil tussen de dampdruk van verzadigde lucht en de dampdruk van de kaslucht. De VPD wordt uitgedrukt in kPa.

Vochtdeficit. Zo lang lucht nog niet de maximale hoeveelheid waterdamp bevat, kan extra waterdamp worden opgenomen. De hoeveelheid die nog extra kan worden opgenomen heet het vochtdeficit (in g/m³). Als de temperatuur stijgt, wordt het vochtdeficit groter omdat lucht bij een hogere temperatuur meer waterdamp kan bevatten.

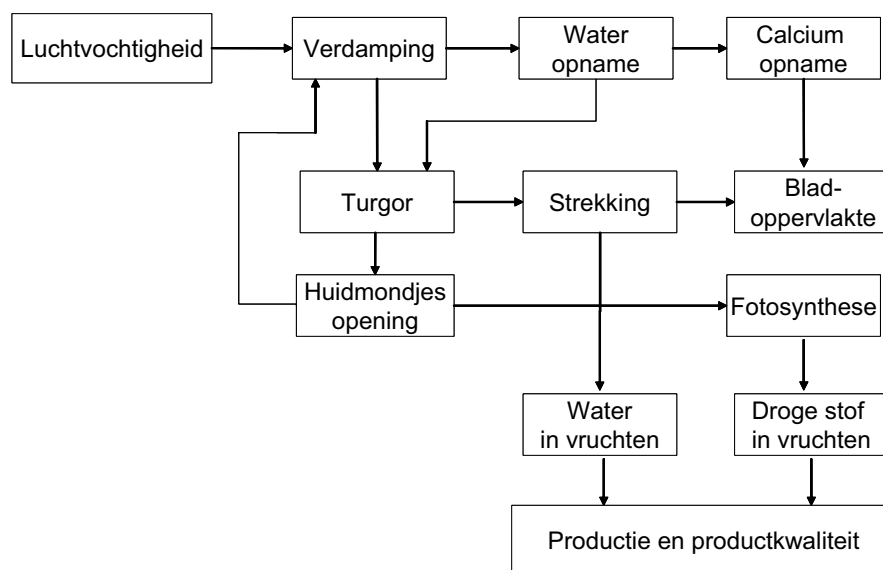
3 Effecten van luchtvochtigheid op het gewas

In 1987 is door Grange en Hand een overzichtsartikel verschenen over de effecten van luchtvochtigheid op de groei van glastuinbouwgewassen. Zij stelden dat effecten van luchtvochtigheid vooral optreden bij zeer hoge en zeer lage luchtvochtigheden. Een VPD tussen 1.0 en 0.2 kPa (55 tot 90% RV bij 20 °C) heeft weinig effect op de fysiologie en ontwikkeling van glastuinbouwgewassen (Grange & Hand, 1987). Een toename van de VPD van 1 naar 1.8 kPa leidt bij verschillende gewassen echter wel tot een afname van de groei (Hoffman, 1979). Een overzicht van de effecten van luchtvochtigheid op verschillende kasgewassen is gegeven in een brochure over luchtvochtigheid die in 1993 door het toenmalige Proefstation voor Tuinbouw onder Glas uitgegeven is.

Luchtvochtigheid kan de groei, ontwikkeling en productie van een gewas beïnvloeden via de volgende processen:

- Verdamping
- Huidmondjesopening (stomataire geleidbaarheid)
- Fotosynthese
- Strecking
- Nutriëntenopname (calcium)
- Assimilatenverdeling en productie

In onderstaande figuur wordt het effect van luchtvochtigheid op deze processen schematisch weergegeven.



Figuur 3.1. Schematische weergave van het effect van luchtvochtigheid op plantprocessen.

In de volgende paragrafen worden de effecten van luchtvochtigheid op deze processen toegelicht. In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de effecten van luchtvochtigheid op de gevoeligheid voor schimmelaantastingen en op de kwaliteit en houdbaarheid van geoogste vruchten.

3.1 Verdamping

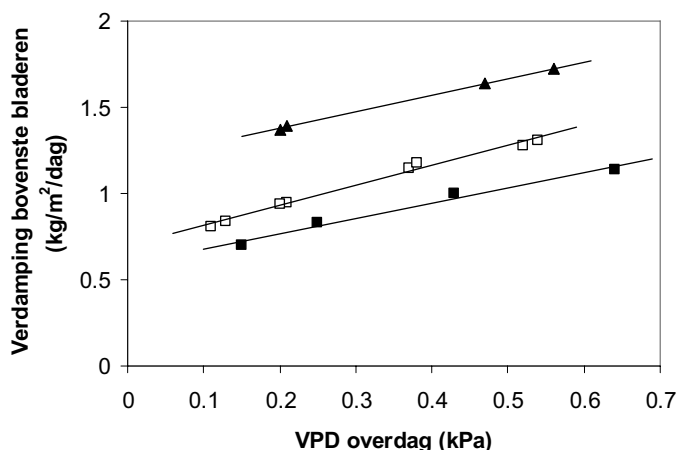
Als een plant verdampt geeft hij waterdamp af aan de omgevingslucht, via de huidmondjes van het blad. In de huidmondjes is de lucht altijd verzadigd met waterdamp (100% relatieve luchtvochtigheid). De omgevingslucht is altijd droger dan de lucht in deze holtes (De Graaf, 1993). Het waterverlies door de bladeren wordt bepaald door het

dampdrukverschil tussen blad en lucht, dat voornamelijk afhangt van de VPD van de lucht. Vochtigheid in de kas is dus niet alleen het gevolg van de verdamping, maar het beïnvloedt ook de verdamping (Bakker, 1991a).

Verdamping is voor de plant noodzakelijk om warmte aan de bladeren te onttrekken, dus om zich te koelen. Verder is het van belang voor de opname van calcium, omdat dit alleen via de verdampingsstroom (xyleem) door de plant getransporteerd wordt (Peet, 2005). Van de wateropname wordt gemiddeld slechts 10% vastgelegd in biomassa, de rest wordt verdampt (Stanghellini, 2007).

De verdamping van een gewas wordt vooral bepaald door instraling, luchttemperatuur, vochtigheid van de kaslucht (Stanghellini, 1987), bladoppervlakte (Jolliet & Bailey, 1992) en aantal, grootte en openingstoestand van de huidmondjes. De EC van de voedingsoplossing bleek weinig effect te hebben op de verdamping (Jolliet & Bailey, 1992), tenzij de EC de bladoppervlakte beïnvloedde (Li *et al.*, 2001). In 1993 en 1994 is onderzoek gedaan naar het effect van verschillende minimumbuistemperaturen op productie, waterverbruik en energieverbruik in winter en voorjaar (Esmeijer, 1998). Bij een minimumbuistemperatuur van 30 °C was de VPD gemiddeld 0.51 kPa, bij een minimumbuistemperatuur van 70 °C was de VPD gemiddeld 0.93 kPa. Een hogere minimumbuistemperatuur (70 °C) leidde tot een hoger waterverbruik en energieverbruik, maar had geen effect op de productie. Bij de laagste verdampingsniveaus was het bladoppervlak iets kleiner, maar dit resulteerde niet in een lagere productie. Verder verschilden de gewasgroei en gewasontwikkeling niet tussen de behandelingen (Esmeijer, 1998).

Naarmate de luchtvochtigheid van de kaslucht toeneemt, gaan de huidmondjes verder open. Echter de transpiratiesnelheid van een gewas neemt af met toenemende luchtvochtigheid (afnemende VPD) (Fricke & Krug, 1997; Jolliet *et al.*, 1993), zoals te zien is in Figuur 3.2. De reden hiervoor is dat de invloed van het dampdrukverschil tussen blad en lucht ($VPD_{\text{blad-lucht}}$) bestaat uit een direct effect (dampdrukverschil) en een indirect effect (huidmondjessluiting) die elkaar tegenwerken. Normaalgesproken is het stimulerende effect van een groot dampdrukverschil bladlucht het sterkst. De verdamping neemt dus toe bij een hogere VPD ondanks de zich sluitende huidmondjes.



Figuur 3.2. Effect van luchtvochtigheid gedurende de dag op de verdamping van de bovenste bladeren van tomaat gedurende de dag. De verschillende symbolen geven verschillende experimenten weer (Jolliet *et al.*, 1993).

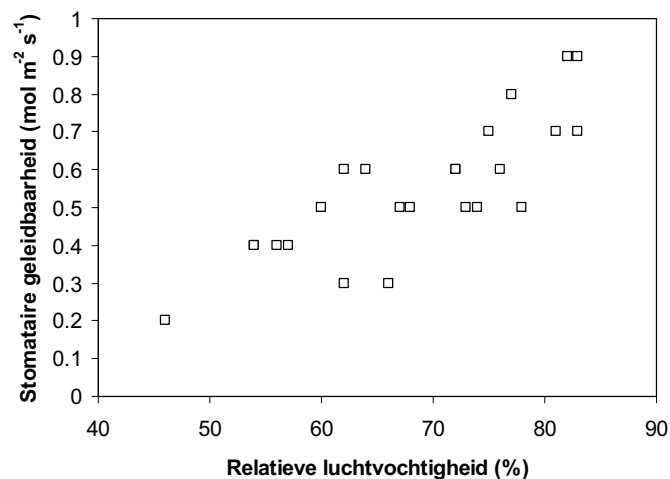
Voor de groei en ontwikkeling van gewassen is het van belang dat de waterhuishouding van de plant in balans is. Voorwaarde hiervoor is dat de wateropname de verdamping kan blijven volgen. Bij een lage luchtvochtigheid kan de verdamping erg hoog worden, hetgeen tot stress bij de plant kan leiden. Aanwijzingen voor overmatige verdamping zijn kleine, dunne bladeren en dunne stengels, maar een verhoudingsgewijs sterk wortelstelsel (Peet, 2005).

Concluderend

Bij een hoge luchtvochtigheid neemt de verdampingsnelheid van een gewas af, bij een lage luchtvochtigheid is de verdamping hoger. Hierdoor beïnvloedt het gewas zelf de luchtvochtigheid. Bij een drogere lucht zal het gewas meer verdampen waardoor de lucht vochtiger wordt en de verdamping weer afneemt. Deze cirkel wordt verbroken in een kas waarin de luchtvochtigheid afzonderlijk geregeld kan worden.

3.2 Huidmondjesopening

De opname van CO₂ door de plant ten behoeve van de fotosynthese en het verlies van waterdamp via transpiratie verloopt via de huidmondjes (zie Fig. 3.1). De openingstoestand van de huidmondjes wordt bepaald door de lichtintensiteit, vochtigheid van de lucht, CO₂ concentratie, bladtemperatuur en de beschikbaarheid van water. Over het algemeen staan de huidmondjes bij hogere luchtvochtigheden verder open. Dit effect is sterker bij hoge dan bij lage instraling (Bakker, 1990). In 2006 zijn binnen het project "Bio-optimaal kas" fotosynthesemetingen gedaan bij biologisch geteelde tomaten, waarbij een reeks luchtvochtigheden in de meetcuve van de fotosynthesemeter zijn aangelegd (Raaphorst *et al.*, 2007). In Figuur 3.3 is te zien dat bij een hogere luchtvochtigheid de stomataire geleidbaarheid hoger was. Stomataire geleidbaarheid is een maat voor de huidmondjesopening; een hogere stomataire geleidbaarheid betekent dat de huidmondjes verder open staan.



Figuur 3.3. Stomataire geleidbaarheid van bladeren van tomatenplanten die geteeld zijn in de Bio-optimaalkas en gemeten zijn bij verschillende relatieve luchtvochtigheden in de meetcuve van de fotosynthesemeter.

Stanghellini (1987) heeft een transpiratiemodel ontwikkeld voor kasgewassen, waarin de stomataire geleidbaarheid afhangt van de instraling, dampdrukverschil tussen blad en lucht, bladtemperatuur en CO₂ concentratie. Voor tomaat bleek dat het niet nodig was de bladtemperatuur en CO₂ concentratie mee te nemen (Joliet & Bailey, 1992). De stomataire geleidbaarheid van tomaat hangt dus voornamelijk af van straling en VPD, zoals ook werd bevestigd door Bakker (1991b).

Als planten langdurig bij een zekere luchtvochtigheid staan, zal de plant zich aan deze omstandigheden aanpassen. Eén van deze aanpassingen betreft de huidmondjes. Wanneer tomatenplanten gedurende 4 weken in klimaatkamers werden geteeld bij VPD van 0.2 kPa of 1.0 kPa, bleek dat het aantal huidmondjes bij hoge luchtvochtigheid hoger was dan bij lage luchtvochtigheid (Bakker, 1991b). De grootte van de huidmondjes van tomaat verschilde niet aantoonbaar, terwijl bij komkommer en paprika bleek dat bij hoge luchtvochtigheden de huidmondjes groter waren (Bakker, 1991b). Echter, het klimaat bepaalt hoe ver de huidmondjes open staan. En dat bepaalt de uitwisseling van

waterdamp en CO₂. Het bleek dat de verschillen in aantallen en groottes van huidmondjes zodanig beperkt waren dat het niet leidde tot een hogere geleidbaarheid van het blad voor waterdamp en CO₂. Het effect van luchtvochtigheid op fotosynthese en verdamping wordt dus niet beïnvloed door verschillen in aantal en grootte van de huidmondjes, maar door effecten op de openingstoestand van de huidmondjes (Bakker, 1991b).

Mulholland *et al.* (2000) hebben de stomataire geleidbaarheid gemeten bij tomaten die gedurende 2 maanden geteeld waren bij een VPD van 0.5 kPa (controle) of een VPD van 0.1 kPa. De bladeren van planten bij 0.1 kPa hadden een aantoonbare hogere geleidbaarheid dan bij 0.5 kPa. De reden hiervoor kan zowel zijn dat de huidmondjes verder open staan of dat er meer of grotere huidmondjes aanwezig zijn bij een hogere luchtvochtigheid.

Concluderend

Een plant reageert direct op veranderingen in relatieve luchtvochtigheid via de openingstoestand van de huidmondjes. Bij hogere luchtvochtigheden gaan de huidmondjes verder open, bij lagere luchtvochtigheden sluiten ze meer. Op lange termijn kan een plant zich aanpassen aan een hogere luchtvochtigheid door bladeren aan te leggen met meer en/of grotere huidmondjes.

3.3 Fotosynthese

Het aantal metingen dat is gedaan om de effecten van luchtvochtigheid op de fotosynthese te bepalen is redelijk beperkt. Op basis van tot dan toe beschikbare metingen aan gewassen als zonnebloem, gerst en rijst, concludeerden Grange en Hand (1987) in hun overzichtsartikel dat het effect van VPD tussen 1.0 kPa en 0.2 kPa op de fotosynthese beperkt is, tenzij de verdamping groter is dan de hoeveelheid water die beschikbaar is en er dus waterstress optreedt. Zij geven aan dat de luchtvochtigheid effect heeft op de fotosynthese via de openingstoestand van de huidmondjes.

Door Bakker (1991c) werd de geleidbaarheid van bladeren voor vocht gemeten aan tomatenplanten die geteeld waren bij verschillende VPDs in de winter. De metingen lieten zien dat bij een lagere luchtvochtigheid (hogere VPD) de geleidbaarheid van het blad afnam, dus dat de huidmondjes gaan sluiten. Met behulp van een model heeft hij berekend wat de effecten hiervan op de fotosynthese zijn. Als er van uitgegaan wordt dat licht niet beperkend is daalt de fotosynthese van een blad met 10 tot 20% als de VPD toeneemt van 0 tot 1 kPa (Bakker, 1991c), hetgeen overeenstemt met metingen gedaan aan tomatenbladeren door El-Sharkawy & Cock (1986). De effecten op de gewasfotosynthese zijn echter veel kleiner. Immers, de daling van de bladfotosynthese met 10-20% geldt alleen voor de bovenste bladeren in een gewas als licht niet beperkend is. In een gewas neemt de hoeveelheid licht van boven naar beneden echter sterk af. Het uiteindelijke effect van een stijging van de VPD van 0 naar 1 kPa op de totale gewasfotosynthese is bij veel licht een afname met ca. 5% en in omstandigheden met weinig licht (winter) met 2 tot 3% (Bakker, 1991c).

Luchtvochtigheid beïnvloedt de fotosynthese via de werking van de huidmondjes, die bij een lagere luchtvochtigheid sluiten. Het effect van de huidmondjesopening op de fotosynthesesnelheid is beperkt. Bij een verdubbeling van de VPD van 1.1 naar 2.2 kPa bij 25 °C en een hoge CO₂ concentratie halveerde de stomataire geleidbaarheid, terwijl de fotosynthese nauwelijks beïnvloed werd (Stanghellini & Bunce, 1993). De eerste fotosynthesemetingen bij tomaat in relatie tot luchtvochtigheid werden gedaan door Acock *et al.* (1976). Zij maten fotosynthese bij CO₂ concentraties van 400 en 1200 ppm. Bij 400 ppm CO₂ bleek de efficiëntie van de fotosynthese 18% hoger te zijn bij een VPD van 0.5 kPa dan bij 1.0 kPa. Bij 1200 ppm was dit effect slechts 5% (Acock *et al.*, 1976). Ook Bunce (1984) zag een afname van de fotosynthese bij een afnemende luchtvochtigheid.

Door Iraqi *et al.* (1998) werden fotosynthesemetingen gedaan aan tomaten die gedurende 9 maanden bij een VPD van 0.4 kPa en 0.97 kPa werden geteeld. Na 3 en 5 maanden bij verschillende luchtvochtigheden, waren er geen verschillen in fotosynthese. Na 5 maanden bleken de bladeren bij een VPD van 0.4 kleiner te zijn dan bij een VPD van 0.97, hetgeen gerelateerd was aan lagere calciumgehalten. Dit leidde bij de metingen 7 maanden na de start van de fotosynthesemetingen tot een lagere fotosynthese bij 0.4 kPa dan bij planten geteeld bij een VPD van 0.97 kPa (Iraqi

et al., 1998). Uit metingen van Xu *et al.* (2007) bleek dat de fotosynthesecapaciteit, i.e. de fotosynthese bij hoge lichtintensiteiten lager was bij een VPD van 0.4 kPa dan bij een VPD van 0.97 kPa. Dit zou verklaard kunnen worden door een afname in de activiteit van Rubisco en een lager gehalte aan chlorofyl (Xu *et al.*, 2007).

Concluderend

Een plant reageert op een verhoging van de luchtvochtigheid door de huidmondjes verder te openen, hetgeen kan leiden tot een verhoging van de fotosynthese. Wanneer een plant enige tijd bij hogere luchtvochtigheid staat, kan dit leiden tot meer strekking, dus grotere bladeren. Dit levert een hogere lichtonderschepping op en daarmee een hogere fotosynthese. Op lange termijn kan een hoge luchtvochtigheid leiden tot kleinere bladeren, mogelijk veroorzaakt door calciumgebrek. Dan leidt een hoge luchtvochtigheid tot een lagere gewasfotosynthese.

3.4 Strecking

Vochtigheid van de kaslucht kan de groei en de productie van een gewas beïnvloeden door een direct effect op de fotosynthese, of door de bladoppervlakte te beïnvloeden (Grange & Hand, 1987; Fig. 3.1). In het algemeen leidt een hoge luchtvochtigheid tot meer celstrekking, hetgeen zich uit in langere scheuten en grotere bladeren (Bakker, 1993). De celstrekking hangt af van de turgordruk. Bij lage luchtvochtigheid is de verdamping hoog en de turgor van het gewas relatief laag. Dat remt de celstrekking iets. Onder omstandigheden met weinig transpiratie (weinig straling, hoge luchtvochtigheid) is de turgor meestal hoger en kan er meer strekking optreden (Bakker, 1993). Met name aan het begin van de teelt kan het aanhouden van een hogere luchtvochtigheid gunstig zijn. Als de bladeren meer strekken wordt sneller een grote bladoppervlakte gevormd en daarmee eerder een volledige lichtonderschepping.

De invloed van luchtvochtigheid op de bladstrekking verschilt per gewas. Wanneer begonia, chrysanth, poinsettia en kalanchoe werden blootgesteld aan VPDs van 0.66, 0.42 en 0.16 kPa bleek dat bij potchrysanth het grootste bladoppervlakte werd gevormd bij een VPD van 0.42 kPa, bij snijchrysanth bij de laagste luchtvochtigheid en bij kalanchoe bij de hoogste luchtvochtigheid, terwijl het bladoppervlak van poinsettia niet beïnvloed werd door de VPD (Mortensen, 2000).

Door Holder & Cockshull (1990) werden tomatenplanten van 6 weken oud gedurende 1 maand blootgesteld aan verschillende luchtvochtigheden (VPD van 0.15 tot 0.64 kPa). De bladoppervlakte van de bladeren gegroeid bij hoge luchtvochtigheden was aantoonbaar lager dan bij lage luchtvochtigheden (Tabel 3.1). De ontwikkeling van deze planten, gemeten als de trosontwikkelingssnelheid en de lengte van de planten waren niet beïnvloed door de luchtvochtigheidsbehandelingen (Holder & Cockshull, 1990).

Tabel 3.1. Effect van luchtvochtigheden op de bladoppervlakte van de bladeren direct onder trossen 5 en 6, die gestrekt zijn tijdens de periode dat de verschillende luchtvochtigheden aangehouden werden. (Holder & Cockshull, 1990).

Bladpositie	Gerealiseerde luchtvochtigheid (kPa)			
	0.15	0.25	0.43	0.64
5	1159 d	1364 c	1817 b	2022 a
6	1034 d	1294 c	1666 b	1955 a

Door Li en Stanghellini (2001) werd een behandeling aangelegd waarbij de verdamping op 2/3^e van de verdamping in de controlebehandeling werd gehouden via sturing van de VPD van de kaslucht. Zij vonden geen effect op de strekking van de bladeren en de bladoppervlakte.

Door Mortensen (1986) werden bij jonge tomatenplanten die bij verschillende luchtvochtigheden waren gegroeid wel verschillen in plantlengte gevonden. Tomatenplanten bij een VPD van 0.9 kPa waren na 33 dagen 31 cm lang, terwijl ze bij een VPD van 0.1-0.2 kPa 41.5 cm lang waren (Mortensen, 1986).

Ook door Iraqi *et al.* (1997) werden na 6 maanden teelt verschillen in plantlengte gevonden. Tomaten geteeld bij een hoge luchtvochtigheid waren aantoonbaar korter dan de planten geteeld bij een lage luchtvochtigheid. De planten geteeld bij 0.4 kPa waren gemiddeld 329 cm lang, de planten geteeld bij 0.97 kPa waren gemiddeld 380 cm (Iraqi *et al.*, 1997). Lipton (1970) vond ook dat tomaten geteeld in een gesloten vochtige kas korter waren dan tomaten geteeld in een open kas, waarin de luchtvochtigheid lager was.

Het effect van luchtvochtigheid verschilt niet alleen per gewas, maar is ook afhankelijk van de plantleeftijd en de duur van de blootstelling aan verschillende luchtvochtigheden. Door Bakker werd het effect van luchtvochtigheid op jonge tomatenplanten bepaald gedurende 8 weken (Bakker, 1991a) en op planten die gedurende 5 tot 6 maanden geteeld werden (Bakker, 1990). Bij jonge planten bleek een hoge luchtvochtigheid (VPD 0.43 kPa) te leiden tot een groter bladoppervlak dan bij een lage luchtvochtigheid (VPD 0.81 kPa), maar dit verschil was niet significant. De effecten op langere termijn werden bepaald in een teelt waarin gedurende 3 tot 4 maanden luchtvochtigheden aangelegd werden in de range van 0.2 tot 0.8 kPa VPD. Daarna duurden de experimenten nog 2 maanden om alle tomaten te oogsten. Stengellengte van de tomaten werd niet aantoonbaar beïnvloed door de luchtvochtigheidsbehandelingen, terwijl het bladoppervlakte bij een langdurig hoge luchtvochtigheid fors gereduceerd werd (Tabel 3.2; Bakker, 1990)

Tabel 3.2. *Effect van luchtvochtigheid op de bladoppervlakte tussen trossen 0 en 8. Verschillende letters geven significante verschillen aan (Bakker, 1990)*

	Luchtvochtigheid (kPa)	
	0.68	0.43
Bladoppervlakte (cm ²)	14290 a	11000 b

Fussell (1994) teelde tomaten gedurende de wintermaanden (december tot maart) bij verschillende luchtvochtigheden. Ook hij nam waar dat het langdurig aanhouden van een lage VPD (hoge luchtvochtigheid) leidde tot kleinere bladeren en kleinere vruchten. Het verschil tussen de resultaten die gevonden werden voor jonge planten en voor oudere planten, heeft mogelijk te maken met calcium gehalten in de bladeren. Bij een langdurige hoge luchtvochtigheid kan er calcium gebrek optreden, hetgeen kan leiden tot een sterke afname in het bladoppervlak (Bakker, 1990).

Concluderend

Een hogere luchtvochtigheid leidt tot meer celstrekking, hetgeen zich uit in grotere bladeren en langere stengels. Een langdurig hoge luchtvochtigheid kan leiden tot calciumgebrek, hetgeen kan leiden tot (veel) kleinere bladeren.

3.5 Calciumopname

De luchtvochtigheid beïnvloedt de transportsystemen in de plant op twee manieren:

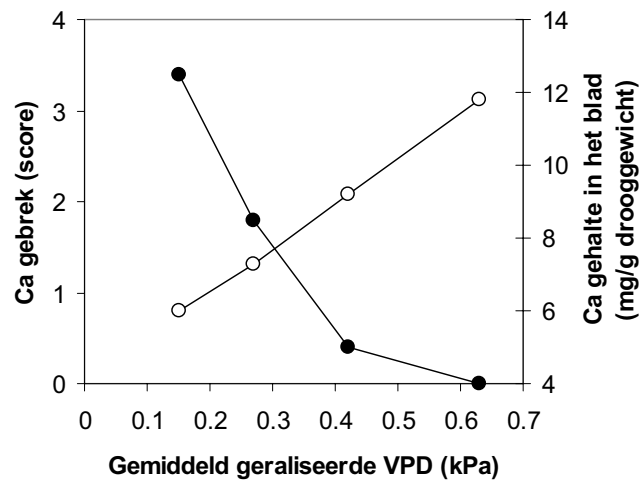
1. Bij een hogere luchtvochtigheid is de verdamping lager en daarmee ook de hoeveelheid xyleemsap die vanuit de wortels naar de bovengrondse, verdampende delen wordt gevoerd.
2. Een hoge luchtvochtigheid 's nachts stimuleert de worteldruk (Grange en Hand, 1987).

De meeste nutriënten worden door de plant via een actief geregeld proces opgenomen. Dat houdt in dat voor de opname energie nodig is, en dat de opname sterk gereguleerd is. De snelheid van de actieve opname wordt vooral

bepaald door de groeisnelheid van de plant. Uitzondering hierop vormen tweewaardige ionen, zoals calcium, die voornamelijk passief met de waterstroom mee de plant ingaan (Clarkson, 1984).

Bij een hoge luchtvochtigheid is de verdamping laag. De hoeveelheid water die door de plant opgenomen wordt is daarmee dan ook lager dan bij een lage luchtvochtigheid. Dit houdt in dat bij een hoge luchtvochtigheid de hoeveelheid calcium die door de plant opgenomen wordt minder is dan bij een lage luchtvochtigheid. Als tomatenplanten langdurig onder omstandigheden staan waarbij de verdamping laag is, neemt de hoeveelheid calcium in het blad af (Bakker *et al.*, 1987).

Lagere calciumgehalten in de bladeren kunnen leiden tot kleinere bladeren, een afname van het bladoppervlak, minder lichtonderschepping en een lagere productie (Ehret & Ho, 1986; Holder & Cockshull, 1990; Fussell, 1994). Holder & Cockshull (1990) zagen symptomen van calcium gebrek vanaf 14 dagen nadat de verschillende luchtvochtigheidsbehandelingen gestart waren, alleen in de behandelingen 0.1 en 0.2 kPa VPD. Analyses van de nutriëntengehaltes van de bladeren lieten zien dat in die behandelingen de calciumgehalten lager waren dan bij hogere VPDs (Fig. 3.4).



Figuur 3.4. Relatie tussen luchtvochtigheid, calciumgebrekssymptomen (●) in tomaten bladeren na 1 maand luchtvochtigheidsbehandeling en het calciumgehalte (○) (Holder en Cockshull, 1990).

Ook Iraqi *et al.* (1997) die gedurende 6 maanden tomaten teelden bij verschillende luchtvochtigheden vonden een hoger calciumgehalte in de bladeren bij een lagere luchtvochtigheid (Tabel 3.3).

*Tabel 3.3. Relatie tussen calciumgehalte in de bladeren en luchtvochtigheid voor tomatenplanten die gedurende 6 maanden bij verschillende luchtvochtigheden geteeld zijn. Verschillende letters geven aan dat de waarden significant verschillen (Iraqi *et al.*, 1997).*

VPD (kPa)	Calciumgehalte (g kg ⁻²)
0.4	10.2 b
0.97	12.1 a

Bij een hoge luchtvochtigheid werden door De Kreij (1998) bladrandjes in tomaat gevonden. Bij een lage luchtvochtigheid waren er geen bladrandjes. Het Ca gehalte van de aangetaste bladeren bij de hoge luchtvochtigheid was 50 tot 80% lager dan van niet aangetaste bladeren bij een lage RV. Ook door Fussell (1994) werden bij een hoge luchtvochtigheid meer bladrandjes gevonden dan bij een lage luchtvochtigheid. De calcium gehalten in de bladeren verschilden echter niet. De gehalten aan K, Mg en Mn waren wel lager bij een hoge luchtvochtigheid (Fussell, 1994).

Concluderend

Bij een hoge luchtvochtigheid is de verdamping, en daarmee ook de calciumopname laag. Als tomatenplanten langdurig bij een hoge luchtvochtigheid staan neemt het calciumgehalte in het blad af, hetgeen kan leiden tot een afname van het bladoppervlak.

3.6 Assimilatenverdeling en productie

Door Bakker (1991a) werden proeven gedaan waarbij de groei en drogestof verdeling van jonge tomatenplanten die 8 weken bij verschillende luchtvochtigheden hadden gestaan, werd gemeten. Het totale plantgewicht bleek bij een hoge luchtvochtigheid hoger te zijn dan bij een lage luchtvochtigheid, hetgeen werd veroorzaakt door een hoger stengelgewicht (Tabel 3.4).

Tabel 3.4. Effect van luchtvochtigheidsbehandelingen gedurende 8 weken op drooggewichten van de plant (bovengrondse delen), bladeren, stengels en vruchten van jonge tomatenplanten. Verschillende letters in één rij geven aan dat de verschillen significant zijn (Bakker, 1991a).

Orgaangewicht (g)	VPD (kPa)	
	0.68	0.43
Plant	21.5 b	24.8 a
Bladeren	13.0	15.3
Stengel	6.3 b	8.3 a
Vruchten	2.3	1.3

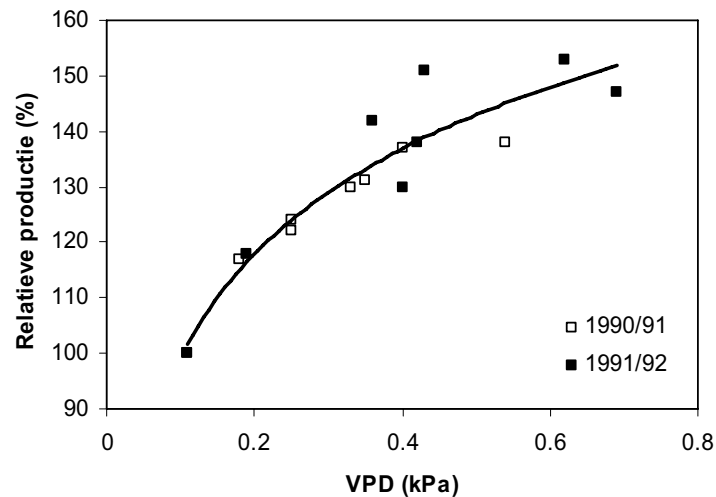
Door Li & Stanghellini (2001) werd wel een significant hoger drooggewicht gemeten van bladeren in een behandeling waarin de transpiratie $2/3^e$ was van de controlebehandeling door het realiseren van een hogere luchtvochtigheid. Drooggewichten van de overige organen verschilden niet significant.

Verder werd door Bakker (1990) het effect bepaald van een langdurig hoge of lage luchtvochtigheid op de groei en productie van tomaat (VPD 0.23 – 0.80 kPa). Gedurende 3 tot 4 maanden werden luchtvochtigheidsbehandelingen aangelegd, waarna nog 2 maanden tomaten werden geoogst. Uit drie experimenten bleek dat de vroege productie (2 tot 3 kg per m²) niet aantoonbaar beïnvloed werd door luchtvochtigheid. De totale productie was lager bij een hogere luchtvochtigheid (Bakker, 1990). De reden hiervoor is waarschijnlijk dat bij een hogere luchtvochtigheid het bladoppervlak gereduceerd was.

Ook Jolliet *et al.* (1993) en Fussell (1994) vonden dat hoge luchtvochtigheden in de winter tot productieverlies leidden (Tabel 3.5, Fig. 3.5).

Tabel 3.5. Effect van luchtvochtigheid op de productie van tomatenplanten. De luchtvochtigheidsbehandelingen zijn ca. 1 maand na planten aangelegd en werden 28 dagen (experiment 1), 43 dagen (experiment 2) of 83 dagen (experiment 3) aangehouden. Verschillende letters binnen 1 experiment geven significante verschillen aan (Jolliet et al., 1993).

Experiment	VPD	Productie (kg m ⁻²)
1	0.15	10.4 c
1	0.25	10.9 b
1	0.43	11.7 a
1	0.64	12.0 a
2	0.18	11.7 b
2	0.53	13.3 a
3	0.11	8.1 c
3	0.19	10.1 b
3	0.39	10.8 a
3	0.53	11.3 a



Figuur 3.5. Effect van het 24 uurs gemiddelde van de VPD op de relatieve productie (als % van de productie bij de behandeling 0.1 kPa VPD). Zaaidata waren 22 oktober 1990 en 24 oktober 1991. Behandelingen liepen van 9 december 1990 tot 1 maart 1991 en van 3 februari tot 15 maart 1992 (Fussell, 1994).

Holder & Cockshull (1990) vonden een significante invloed in een proef waarbij tomatenplanten van 6 weken oud gedurende 28 dagen aan verschillende luchtvochtigheden bloot werden gesteld (Tabel 3.6). De afname in productie bij een hoge luchtvochtigheid (0.1 kPa) was gerelateerd aan een afname in bladoppervlakte, met lage gehalten aan calcium in het blad en symptomen van calcium gebrek.

Tabel 3.6. *Effecten van luchtvochtigheidsbehandelingen op de productie van tomaten (Holder en Cockshull, 1990). Behandelingen zijn aangehouden gedurende 1 maand (15 jan – 12 feb) aan planten die op 1 december geplant zijn. Verschillende letters geven aan of de verschillen significant zijn.*

Gerealiseerde VPD (kPa)	Productie (kg m ⁻²)
0.15	10.1 d
0.25	10.7 c
0.43	11.1 b
0.64	12.4 a

Door Iraqi *et al.* (1997) werd een experiment gedaan waarbij de groei en productie van tomaten gedurende 6 maanden werd gevolgd. Tomaten geteeld bij een VPD van 0.97 kPa hadden een hoger vers- en drooggewicht en waren langer dan planten geteeld bij een VPD van 0.4 kPa. Hieruit bleek duidelijk een positief effect van een lagere luchtvochtigheid. Bij een continue VPD van 0.97 kPa was de productie na 28 weken met 36 kg per m² ongeveer anderhalf maal zo hoog als bij een continue VPD van 0.4 (Iraqi *et al.*, 1997). Dit ging gepaard met significant hogere gehalten aan N, P, K, Ca en Mg in de bladeren bij de hoge VPD dan bij de lage VPD.

Over de invloed van luchtvochtigheid op wortelgroei is nog redelijk weinig bekend. Bij tomaat bleek de spruit/wortelverhouding bij een hoge luchtvochtigheid iets hoger te zijn dan bij een lagere luchtvochtigheid (Bakker, 1991a). Dat houdt in dat er bij een hoge luchtvochtigheid een kleiner aandeel van het plantgewicht in de wortels zit. De reden hiervoor zou kunnen zijn dat er minder verdampt wordt, en dus minder wortels gevormd worden omdat de waterbehoefte van het gewas dan minder groot is. Bij komkommer werd ook gevonden dat de wortelgroei bij een lagere luchtvochtigheid iets bevorderd was ten opzicht van de totale groei van de plant (Bakker, 1991a; Van de Sanden, 1985; Van de Sanden & Veen, 1992), maar deze verschillen waren erg klein en niet significant.

Mortensen (1986) heeft een uitgebreide studie gedaan waarin jonge planten van 10 verschillende kasgewassen waaronder begonia, chrysant, varen, roos, komkommer, tomaat en sla, bij VPDs van 0.9 kPa, 0.6 kPa en 0.15 kPa in klimaatkamers werden geplaatst. Bij toenemende luchtvochtigheden (afnemende VPDs) nam het drooggewicht van de meeste gewassen toe. Het percentage droge stof nam af met toenemende relatieve luchtvochtigheid (Mortensen, 1986).

In een overzichtsartikel concludeert Picken (1984) dat vruchtzetting alleen door luchtvochtigheid beïnvloed wordt bij luchtvochtigheden buiten de range 0.2 tot 1.0 kPa. Als de luchtvochtigheid erg hoog is, komt het stuifmeel niet goed los van de meeldraden en bij een te lage luchtvochtigheid wil het stuifmeel niet goed plakken op de stamper. Beiden kunnen leiden tot problemen met de vruchtzetting (Picken, 1984).

Concluderend

In het traject van luchtvochtigheden waarin het meeste onderzoek is uitgevoerd (VPD tussen 0.1 en 0.8 kPa) reageert de productie van tomaat negatief op een verhoging van de luchtvochtigheid (verlagen van de VPD). Dit heeft verband met het feit dat bij een hogere luchtvochtigheid kleinere bladeren worden aangelegd, mogelijk door calciumgebrek in de bladeren. Hierdoor neemt de lichtonderschepping af, en daarmee ook de productie.

4 Effecten op plantgezondheid en kwaliteit

4.1 Plantgezondheid

De meest voorkomende en de meest schadelijke schimmel in de kasteelt van tomaten is *Botrytis*. De zwakste schakel in de schimmelaantasting is de wond aan de stengel die optreedt na bladplukken. Een vochtige stengelwond is een zeer toegankelijk infectiepunt voor *Botrytis*, waarvan de sporen alleen bij vocht kunnen ontkiemen (Köhl *et al.*, 2007). Bij de verspreiding van *Botrytis* in de kas zijn de sporen van belang. Die worden gevormd onder, voor de schimmel, gunstige omstandigheden, namelijk een hoge relatieve luchtvochtigheid (meer dan 93%) en een temperatuur tussen de 15 en 25 °C. De sporen van *Botrytis* komen vrij bij snelle veranderingen van de relatieve luchtvochtigheid (Kerssies, 1993). Het klimaat rond de spore is optimaal voor kieming wanneer er water beschikbaar is (vrij water, of een relatieve luchtvochtigheid hoger dan 95%) en temperaturen tussen 18 en 25 °C (Köhl *et al.*, 2007). Bij beheersing van *Botrytis* speelt de klimaatregeling een belangrijke rol. Er moet voorkomen worden dat schimmelsporen kunnen kiemen. Daarvoor is het nodig dat er gedurende meerdere uren (minimaal 2 tot maximaal 6-8 uur) vrij water of zeer hoge vochtigheid dichtbij het plantoppervlak vermeden wordt (Kerssies, 1993; Köhl *et al.*, 2007).

Bij langdurige hoge luchtvochtigheden kunnen er meer huidmondjes per mm² aanwezig zijn en staan de huidmondjes verder open. Dit kan negatieve effecten hebben op de plantgezondheid. Sommige schimmels en bacteriën dringen de plant via de huidmondjes binnen (Bakker, 1991b). Verder kunnen de effecten van verontreinigingen als gevolg van CO₂ doseren (bijvoorbeeld etheen, NO_x) groter zijn bij hogere luchtvochtigheden omdat de huidmondjes dan verder open staan (Grange & Hand, 1987).

4.2 Vruchtkwaliteit

Een belangrijke eigenschap van de tomatenvruchten is de kwaliteit, die uit te drukken is in smaak en in bewaarbaarheid (Dorais *et al.*, 2001). Door Bakker (1990) werden 3 experimenten gedaan waarin de luchtvochtigheid bij tomaat gevarieerd werd. In twee van de drie experimenten bleek de houdbaarheid van de geoogste tomaten bij een hogere luchtvochtigheid (VPD 0.23 – 0.35 kPa) korter te zijn dan bij een lage luchtvochtigheid (0.47 - 0.80 kPa). In het derde experiment verschilde de bewaarbaarheid niet aantoonbaar (Bakker, 1990). De bewaarbaarheid bij een hogere luchtvochtigheid is korter, omdat de vruchten sneller zacht worden (Janse & Welles, 1984), hetgeen te maken kan hebben met een hoger waterverlies (Janse, 1993b). In het onderzoek van Esmeijer (1998), waarbij verschillende verdampingsniveaus aangelegd werden door verschillende minimumbuistemperaturen aan te houden werd in een van de twee jaren gevonden dat bij een hogere VPD er minder zwelscheurtjes optraden en de consumenten een hogere beoordeling gaven voor de vruchten. De houdbaarheid verschilde niet tussen de behandelingen (Esmeijer, 1998). Door Fussell (1994) werd bij lage VPD wel een minder goede houdbaarheid gevonden, met als maat het gewichtsverlies na 6 dagenbewaring. Verlagen van de luchtvochtigheid kan een positief effect hebben op de smaak van tomaten. Het effect op het zuurgehalte en de suikers is wisselend, en meestal beperkt (Janse, 1993b).

Luchtvochtigheid kan ook andere kwaliteitsparameters beïnvloeden zoals gemiddeld vruchtgewicht en droge stof percentage. Tomaten geteeld in Zuid-Europa hadden bij een lagere luchtvochtigheid een lager versgewicht en een hoger droge stof percentage. Het gemiddeld drooggewicht per vrucht werd niet beïnvloed (Leonardi *et al.*, 2000). Vergelijkbare resultaten werden gevonden door Li *et al.* (2001). Bakker (1990) vond dat het gemiddeld versgewicht per vrucht voor de eerste 3 kg die geoogst werd hoger was bij een hoge luchtvochtigheid of niet significant verschilde. Bij de latere oogsten was het gemiddeld vruchtgewicht lager bij een hoge luchtvochtigheid, hetgeen mogelijk ook te maken heeft met een lager calciumgehalte in het blad.

Bij een lage luchtvochtigheid is de verdamping hoog. Er gaat dan veel calcium naar het blad en weinig naar de vrucht. Een lokaal tekort aan calcium in de vrucht kan leiden tot neusrot, een zwartbruine plek aan de onderkant van

de vrucht (Janse, 1993a). Een overmaat aan calcium kan daarentegen leiden tot goudspikkels, kleine witte tot geelachtige stipjes rond de kroon. Deze stipjes bestaan uit cellen met kristallen van calciumoxalaat, die leiden tot een kortere houdbaarheid van de vruchten. Door De Kreij (1992) werd bij een vochtig klimaat (vochtdeficit van 2.5 g/m^2) gevonden dat 9% van de vruchten veel goudspikkels hadden, tegen 4% in de controle (vochtdeficit van 5.5 g/m^2). Ook Fussell (1994) vond bij een hoge vochtigheid meer goudspikkels dan bij een lage vochtigheid. In de proef van De Kreij (1992) werden ook verschillende calciumniveaus in de watergift aangehouden. Bij een laag calciumniveau was 3% van de vruchten aangetast, bij een hoog calciumniveau 11%.

5 Effecten van luchtbevochtiging

Voor de groei en ontwikkeling van een gewas is het van belang dat de waterhuishouding van de plant in balans is. Voorwaarde hiervoor is dat de wateropname de verdamping kan blijven volgen. In de loop van het voorjaar en 's zomers kan de verdamping groter worden dan de wateropname, door sterke zinstraling en een lage luchtvochtigheid (Van Holsteijn, 1993). Dit kan leiden tot waterstress en daarmee tot een gedeeltelijke sluiting van de huidmondjes. Bij turgescence planten speelt dit nauwelijks een rol, maar bij planten die worden geteeld bij een hoge EC of een beperkte opnamecapaciteit voor water hebben, kan dit wel effect hebben (Heuvelink & Dorais, 2005). Op lange termijn heeft waterstress negatieve gevolgen voor de groei door een verminderde celstrekking, hetgeen kan leiden tot kleinere bladeren (Van Holsteijn, 1993; Stanghellini, 2007).

In de afgelopen jaren is veel interesse ontstaan in het bevochtigen van de kaslucht. Het biedt niet alleen mogelijkheden om te voorkomen dat de temperatuur in de kas erg hoog oploopt, maar ook om de luchtvochtigheid te verhogen en daarmee vochttekort in de plant tegen te gaan. Omdat er minder gelucht hoeft te worden, kan een hogere CO₂ concentratie worden gehandhaafd, waardoor de productie stijgt. In 2006 is in de Bio-optimaalkas een concept getest, waarin gebruik werd gemaakt van luchtbehandelingskasten, ventilatoren en vernevelaars (Raaphorst *et al.*, 2007). Met name overdag bleek de RV in de Bio-optimaalkas hoger en constanter te zijn dan in de referentiekas. Door de verneveling hoefde er minder gelucht te worden om de temperatuur op het gewenste peil te houden, waardoor de CO₂ concentratie in de Bio-optimaalkas gemiddeld over het hele jaar ca. 200 ppm hoger was dan in de referentiekas (Raaphorst *et al.*, 2007). Ook in Australië en de VS wordt verneveling toegepast als methode om de kas te koelen (Connellan, 2007).

Met bevochtiging kan op zonnige, warme momenten voorkomen worden dat de luchtvochtigheid in de kas te ver wegzakt. Dat betekent dat sluiting van de huidmondjes als gevolg van droogtestress voorkomen wordt. De fotosynthese kan daarmee op niveau blijven. Naar hoe groot dit effect is, en wat dit betekent voor de productie is tot nu toe nog nauwelijks onderzoek gedaan. Luchtbevochtiging zou het bladoppervlak van tomaten kunnen vergroten. De problemen zoals die in de wintermaanden optreden, waarbij bij continu hoge luchtvochtigheid de verdampingssnelheid zo laag kan worden, dat er calciumgebrek op kan treden, met als gevolg kleinere bladeren (Bakker, 1991a; Holder & Cockshull, 1990) spelen naar alle waarschijnlijkheid in de zomermaanden nauwelijks een rol. Door de veel hogere instraling is de hoeveelheid verdamping veel groter dan in de wintermaanden, waardoor waarschijnlijk voldoende calcium wordt aangevoerd naar de bovengrondse delen.

De Kreij (1991) onderzocht de effecten van luchtbevochtiging (vanaf 2 februari) in een tomatengewas dat op 12 december geplant was. Door de bevochtiging nam de VPD af van gemiddeld 0.76 kPa overdag naar 0.33 kPa en van gemiddeld 0.55 kPa naar 0.19 kPa 's nachts. Bij een hoge luchtvochtigheid waren de bladeren significant langer. Luchtbevochtiging leidde in de maanden juni en juli tot een significant hogere productie in kilo's per m². Op de kwaliteit had de bevochtiging geen effect.

In Zuid-Europa is onderzoek gedaan aan bevochtiging van kaslucht onder zomerse omstandigheden. Door Romero-Aranda *et al.* (2002) werden van februari tot half juli tomaten geteeld in plastic kassen in zuidoost Spanje. In één behandeling werd elke 8 minuten gedurende 10 seconden de nevelinstallatie aangezet. Op zonnige dagen liep de VPD in de kas zonder bevochtiging op tot 3 kPa en de temperatuur tot 35 °C. Bevochtiging verlaagde de temperatuur met ca. 7 °C en de VPD met 1.6 kPa. Stomataire geleidbaarheid en fotosynthese waren hoger in de behandeling met bevochtiging (Tabel 5.1). Het gewicht van de bladeren en het bladoppervlak van planten bij een hogere luchtvochtigheid waren groter, terwijl stengel- en wortelgewicht niet beïnvloed werden. De opbrengst was in de behandeling met bevochtiging 18% hoger dan zonder bevochtiging, hetgeen werd veroorzaakt door een hoger gemiddeld vruchtgewicht (Tabel 5.2).

Tabel 5.1. *Netto fotosynthesesnelheid, stomataire geleidbaarheid en verdampingssnelheid van 'Daniela' tomaten geteeld met en zonder vernevelingsinstallatie in de kas. Verschillende letters in een kolom geven significante verschillen aan (Romero-Aranda et al., 2002).*

	Fotosynthese ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Stomataire geleidbaarheid ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Verdamping ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Verneveling	30 a	413 a	7.8 b
Geen verneveling	24 b	381 b	11.5 a

Tabel 5.2. *Productie, gemiddeld vruchtgewicht en totaal aantal vruchten per plant van 'Daniela' tomaten geteeld met en zonder vernevelingsinstallatie in de kas. Verschillende letters in een kolom geven significante verschillen aan (Romero-Aranda et al., 2002).*

	Productie (kg plant^{-1})	Gemiddeld vruchtgewicht (g)	Aantal vruchten (-)
Verneveling	7.1 a	139 a	51 a
Geen verneveling	5.8 b	125 b	47 a

Concluderend:

Een erg lage luchtvochtigheid in de kas kan leiden tot sluiting van de huidmondjes. Dit doet de plant om overmatig waterverlies door verdamping te voorkomen, maar het betekent ook dat de opname van CO_2 voor de fotosynthese minder makkelijk verloopt. Door te vernevelen neemt de luchtvochtigheid in de kas toe en neemt de kasluchttemperatuur af. Omdat er minder gelucht hoeft te worden om de temperatuur op het gewenste peil te houden, is de CO_2 concentratie in de kas gemiddeld hoger. Verneveling kan daardoor in de zomer een positief effect hebben op de productie bij tomaat, mits de luchtvochtigheid niet zo hoog op loopt dat het leidt tot (schimmel)ziektes.

6 Conclusies en aanbevelingen

De ontwikkelingen die zich de laatste jaren hebben voorgedaan op het gebied van (semi) gesloten telen hebben geleid tot een hernieuwde belangstelling voor luchtvochtigheid als klimaatfactor in de kas. Door technische ontwikkelingen als ontvochtiging via koeling en luchtbevochtiging is het mogelijk de luchtvochtigheid in de kas beter te sturen. Dit leidt echter tot de vraag welke luchtvochtigheden het beste aangehouden kunnen worden.

Luchtvochtigheid in de winter

Veel van het onderzoek dat aan luchtvochtigheid is gedaan, is in de wintermaanden gedaan in de jaren 1980-1990 in Nederland en Engeland. In die jaren waren de energieprijzen hoog. De kassen werden steeds beter geïsoleerd, hetgeen leidde tot hogere luchtvochtigheden. Het onderzoek richtte zich toen dan ook voornamelijk op de effecten van hoge luchtvochtigheden (0.1 – 0.6 kPa). Op de korte termijn kan het aanhouden van een hoge luchtvochtigheid gunstig zijn, omdat het de celstrekking bevordert. Daarmee kan een hogere luchtvochtigheid, bijvoorbeeld aan het begin van de teelt leiden tot een groter bladoppervlak en daarmee sneller een volledige lichtonderschepping. Verder staan bij een hogere luchtvochtigheid de huidmondjes verder open. Bij individuele bladeren die veel licht ontvangen kan dit tot een flinke toename van de fotosynthese leiden. Op gewasniveau is het effect van luchtvochtigheid op de fotosynthese echter beperkt tot enkele procenten.

Op de lange termijn echter leidt een hoge luchtvochtigheid (0.1 – 0.4 kPa) tot een lagere tomatenproductie dan lagere luchtvochtigheden. Bij een hoge luchtvochtigheid is de verdamping van een gewas laag. De hoeveelheid water, en daarmee ook de hoeveelheid calcium die opgenomen wordt is daarmee ook lager dan bij een lage luchtvochtigheid. Dit kan leiden tot een lager calciumgehalte in het blad en daarmee tot kleinere bladeren. In veel gevallen gaat dit gepaard met een afname van de productie, voornamelijk bepaald door een lager gemiddeld vruchtgewicht.

Plantgezondheid en vruchtkwaliteit kunnen een probleem zijn wanneer langdurig bij hoge luchtvochtigheden geteeld wordt. De omstandigheden voor het kiemen van schimmelsporen zijn dan optimaal, hetgeen kan leiden tot uitval van planten. Tomaten die geteeld zijn bij een hoge luchtvochtigheid hebben over het algemeen een kortere houdbaarheid, hetgeen ongewenst is.

In de 90er jaren werd aangegeven dat een optimaal 24 uren gemiddelde voor luchtvochtigheid 0.3-0.4 kPa VPD zou zijn (Fussell, 1994). Dit was gebaseerd op een afweging tussen energiekosten voor droogstoken en ventileren enerzijds en de effecten op productie anderzijds. Het aanhouden van een lagere luchtvochtigheid (hogere VPD) leidt in de winter en het voorjaar tot een hoger gasverbruik en daarmee hogere energiekosten. Het aanhouden van een hogere luchtvochtigheid (lagere VPD) zal productie kosten en is dus ook ongewenst. Of een VPD van 0.3-0.4 kPa ook onder de huidige Nederlandse omstandigheden het meest optimaal is zou met de huidige energie- en productprijzen opnieuw berekend kunnen worden.

Luchtvochtigheid in de zomer

Onder zomerse omstandigheden kan in de kas de VPD oplopen tot waarden ver boven de 1.0 kPa. Onder die omstandigheden kan de wateropname de verdamping niet bijhouden, waardoor waterstress kan ontstaan, en daarmee gedeeltelijke sluiting van de huidmondjes. In bijvoorbeeld rozengewassen (Dieleman *et al.*, 2007; Schapendonk en Pot, 2007) is gemeten dat onder omstandigheden van hoge temperatuur en hoge VPD de fotosynthese tijdelijk sterk afneemt. Als de temperatuur en VPD aan het einde van de middag weer afnemen, gaan de huidmondjes weer verder open en kan de fotosynthese zich herstellen.

Luchtbevochtiging

Door de kaslucht onder zomerse omstandigheden te bevochtigen, zal de verdampingssnelheid afnemen. Daardoor wordt het voor de plant makkelijker voldoende water op te nemen om de verdamping bij te houden. Daardoor blijven de huidmondjes open staan (zie Fig. 3.1) en kan de plant de CO₂ voor de fotosynthese makkelijk opnemen. Dit kan leiden tot een hogere productie, zoals bijvoorbeeld door in Spanje is aangetoond.

Met luchtbevochtiging wordt niet alleen de luchtvochtigheid beïnvloed maar ook de temperatuur en CO₂ concentratie. Wanneer verneveld wordt, daalt de kasluchttemperatuur. Dat betekent dat er minder geventileerd hoeft te worden om warmte af te voeren, waardoor de CO₂ concentratie in de kas hoger blijft. Met name als er veel licht is, heeft een hogere CO₂ concentratie veel effect op de fotosynthese en daarmee op de productie.

Tot nu toe is er onder Nederlandse omstandigheden nog nauwelijks onderzoek gedaan naar hoe groot het effect van vernevelen in het voorjaar en de zomer kan zijn en wat dit betekent voor de productie. Het zou wenselijk zijn experimenteel na te gaan wat effecten van luchtbevochtiging in de zomer op gewasgroei, -ontwikkeling, fotosynthese, verdamping en productie zijn om daarmee kennis op te doen om de sturing van luchtvochtigheid in geconditioneerde kassen verder te optimaliseren.

7 Literatuur

- Acock, B., D.A. Charles-Edwards & D.W. Hand, 1976.
An analysis of some effects of humidity on photosynthesis by a tomato canopy under winter light conditions and a range of carbon dioxide concentrations. *Journal of Experimental Botany* 27: 933-941.
- Bakker, J.C., 1990.
Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Horticultural Science* 65: 323-331.
- Bakker, J.C., 1991a.
Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. Proefschrift Landbouwwuniversiteit Wageningen, 155 pp.
- Bakker, J.C., 1991b.
Effects of humidity on stomatal density and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae* 48: 205-212.
- Bakker, J.C., 1991c.
Leaf conductance of four glasshouse vegetable crops as affected by air humidity. *Agricultural and Forest Meteorology* 55: 23-36.
- Bakker, J.C., 1993.
Zichtbare aanpassingen en onzichtbare. In: Luchtvochtigheid. Brochure 104. PTG, 24-25.
- Bakker, J.C., G.W.H. Welles & J.A.M. van Uffelen, 1987.
The effects of day and night humidity on yield and quality of glasshouse cucumbers. *Journal of Horticultural Science* 62: 361-368.
- Bunce, J.A., 1984.
Effects of humidity on photosynthesis. *Journal of Experimental Botany* 35(158): 1245-1251.
- Connellan, G.J., 2007.
Developments in the cooling of Australian greenhouses. *Acta Hort.* 761:55-61
- Clarkson, D.T., 1984.
Calcium transport between tissue and its distribution in the plant. *Plant, Cell and Environment* 7: 449-456.
- Dieleman, A., E. Meinen, M. Warmenhoven, J. Steenhuizen, D. Uenk, S. Chizhmak & P. de Visser, 2007.
Efficiëntie van groeilicht gedurende het etmaal. Nota 490, Wageningen UR Glastuinbouw, 44 pp.
- Dorais, M., A.P. Papadopoulos & A. Gosselin, 2001.
Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews* 26: 239-319
- Ehret, D.L. & L.C. Ho, 1986.
Translocation of calcium in relation to tomato fruit growth. *Annals of Botany* 58: 679-688.
- El-Sharkawy, M.A. & J.H. Cock, 1986.
The humidity factor in stomatal control and its effect on crop productivity. In: R. Marcelle, H. Clijsters & M. Van Poucke (Eds.), *Biological control of photosynthesis*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands: 187-198.

- Esmeijer, M., 1998.
Minimale transpiratie in relatie tot energieverbruik, productie en kwaliteit van glastuinbouwgewassen. Rapport 154, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk.
- Fricke, A & H. Krug, 1997.
Influence of humidification and dehumidification on greenhouse climate as well as water relations and productivity of cucumber. II. Influences on plants. *Gartenbauwissenschaft* 62: 241-248.
- Fussell, M., 1994.
How humid do toms like it? *The Grower* April 21: 34-35.
- Gelder, A. de, E. Heuvelink & J.J.G. Opdam, 2005.
Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouses. *Acta Horticulturae* 691: 549-552.
- Graaf, R. de., 1993.
Plant verdampt door vochtverschil. In: *Luchtvochtigheid. Brochure 104. PTG*, 26-27.
- Grange, R.I. & D.W. Hand, 1987.
A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Journal of Horticultural Science* 62(2): 125-134.
- Heuvelink, E. & M. Dorais, 2005.
Crop growth and yield. In: *Tomatoes*, E. Heuvelink (Ed.), CAB Publishing, Oxfordshire, UK: 85-144.
- Hoffman, G.J., 1979.
Humidity. In: *Controlled environment guidelines for plant research*, T.W. Tibbits & T.T. Kozlowski (Eds.), Academic Press, London: 141-172.
- Holder, R., & K.E. Cockshull, 1990.
Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 65: 31-39.
- Iraqi, D., L. Gauthier, M. Dorais & A. Gosselin, 1997.
Influence du déficit de pression de vapeur et de la photopériode sur la croissance, la productivité et la composition minérale de la tomate de serre. *Canadian Journal of plant Science* 778 : 267-272.
- Iraqi, D., M. Dorais & A. Gosselin, 1998.
Influence of vapor pressure deficit on photosynthesis and pigment content of greenhouse tomato leaves. 14th International congress on plastics in agriculture: 144-154.
- Janse, 1993a.
Onjuist calciumgehalte geeft problemen. In: *Luchtvochtigheid. Brochure 104. PTG*: 52-53.
- Janse, 1993b.
Korter houdbaar door hoge luchtvochtigheid. In: *Luchtvochtigheid. Brochure 104. PTG*: 54-55
- Janse, J. & G.W.H. Welles, 1984.
Effects of energy saving measures on keeping quality of tomato and cucumber fruits. *Acta Horticulturae* 163: 261-269.

- Jolliet, O. & B.J. Bailey, 1992.
The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology* 58: 43-62.
- Jolliet, O., B.J. Baily, D.J. Hand & K. Cockshull, 1993.
Tomato yield in greenhouses related to humidity and transpiration. *Acta Horticulturae* 328: 115-124.
- Kerssies, A., 1993.
Vocht beïnvloedt schimmelgroei. In: *Luchtvochtigheid*. Brochure 104. PTG, 60-61.
- Köhl, J., P.H.B. de Visser & J. Wubben, 2007.
Risico's op schimmelaantasting in vruchtgroenten: literatuurstudie. Nota 467, Wageningen UR, 41 pp.
- Kreij, C. de, 1991.
Luchtvochtigheid, calcium en fosfaat bij tomaat. Inern verslag nr. 35, Proefstation voor de tuinbouw onder glas te Naaldwijk, 23 pp.
- Kreij, C. de, 1992.
Hoge luchtvochtigheid geeft minder neusrot. *Groenten + Fruit – vakdeel Glasgroenten* 20: 33.
- Kreij, K. de, 1998.
Goede verdamping van kop voorkomt bladrandjes. *Groenten en Fruit – vakdeel Glasgroenten* 23: 21.
- Leonardi, C., S. Guichard & N. Bertin, 2000.
High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae* 84: 285-296.
- 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. & C. Stanghellini, 2001.
Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* 89: 9-21.
- Lipton, W.J., 1970.
Growth of tomato plants and fruit production in high humidity and at high temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 95: 674-680.
- Mortensen, L.M., 1986.
Effect of relative humidity on growth and flowering of some greenhouse plants. *Scientia Horticulturae* 29: 301-307.
- Mortensen, L.M., 2000.
Effects of air humidity on growth, flowering, keeping quality and water relations of four short-day greenhouse species. *Scientia Horticulturae* 86: 299-310.
- Mulholland, B.J., M. Fussell, R.N. Edmondson, I.G. Burns, J.M.T. McKee & J. Basham, 2000.
Effect of humidity and nutrient feed K/Ca ration on physiological responses and the accumulation of dry matter, Ca and K in tomato. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 75(6): 713-722.

- Opdam, J.J.G., G.G. Schoonderbeek, E.M.B. Heller & A. de Gelder, 2005.
Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. *Acta Horticulturae* 691: 517-524.
- Peet, M.M., 2005.
Irrigation and fertilization. In: Tomatoes, E. Heuvelink (Ed.), CAB Publishing, Oxfordshire, UK: 171-198.
- Picken, A.J.F., 1984.
A review of pollination and fruit set in the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Horticultural Science* 59: 1-13.
- Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, 1993.
Luchtvochtigheid. Brochure 104. PTG, 71 pp.
- Raaphorst, M., P. van Weel, J. Pijnakker & A. Dieleman, 2007.
Telen in de bio-optimaal kas. Proef met een biologische tomatenteelt onder geconditioneerde omstandigheden. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw, 33 pp.
- Romero-Aranda, R., T. Soria & J. Cuartero., 2002.
Greenhouse mist improves yield of tomato plants grown under saline conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 127: 644-648.
- Schapendonk, A. & S. Pot, 2007.
Plantenpaspoort roos. Rapportage Plant Dynamics, 45 pp.
- Stanghellini, C., 1987.
Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. Proefschrift, Landbouwwuniversiteit Wageningen, 150 pp.
- Stanghellini, C., 2007. Experts delen kennis over vocht. *Groenten & Fruit* 35: 12-13.
- Stanghellini, C. & J.A. Bunce, 1993.
Response of photosynthesis and conductance to light, CO₂, temperature and humidity in tomato plants acclimated to ambient and elevated CO₂. *Photosynthetica* 29: 487-497.
- Van de Sanden, P.A.C.M., 1985.
Effect of air humidity on growth and water exchange of cucumber-seedlings. Preliminary report. *Acta Horticulturae* 174: 259-267.
- Van de Sanden, P.A.C.M. & B.W. Veen, 1992.
Effects of air humidity and nutrient solution concentration on growth, water potential and stomatal conductance of cucumber seedlings. *Scientia Horticulturae* 50: 173-186.
- Van Holsteijn, G.P.A., 1993.
Kaslucht verlangt soms extra vocht. In: Luchtvochtigheid. Brochure 104. PTG: 16-17.
- Xu, H., D. Iraqi & A. Gosselin, 2007.
Effect of ambient humidity on physiological activities and fruit yield and quality of greenhouse tomato. *Acta Horticulturae* 761: 85-92.