



On-line schatting van het ventilatievoud van kassen

E.J. van Henten, J. Bontsema, J.G. Kornet, J. Hemming



Gefinancierd door:



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit

Productschap



Tuinbouw

Voor een bloeiende zaak

In samenwerking met:





On-line schatting van het ventilatievoud van kassen

E.J. van Henten, J. Bontsema, J.G. Kornet, J. Hemming

© 2006 Wageningen, Plant Research International B.V.

Alle rechten voorregevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door
fbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gotokopieën, opnamen of enige
andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Research International B.V.

Plant Research International B.V.

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : info.plant@wur.nl
Internet : www.plant.wur.nl

Voorwoord

Voor u ligt het concept eindrapport van het project “On-line schatting van het ventilatievoud van kassen”. In dit project is een methode ontwikkeld, waarmee in de kas het ventilatievoud kan worden bepaald, zonder de procesgang te beïnvloeden en zonder extra instrumentatie.

Het project is gefinancierd door Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit en Productschap Tuinbouw, waarvoor onze dank.

Dit onderzoek is uitgevoerd door:

Dr. ir. E. J. van Henten, dr. J. Bontsema, J.G. Kornet en dr. J. Hemming, Plant Research International B.V. ,Wageningen.

De experimenten zijn uitgevoerd bij Klapwijk GreenQ, Monster, die voor dit project belangeloos een deel van hun kassen beschikbaar stelde. Tevens heeft het personeel van Klapwijk GreenQ geadviseerd over het gebruik van de nieuwe methode. Priva B.V., De Lier heeft de praktijkdata voor bijlage 3 van dit rapport geleverd en heeft de technische infrastructuur bij Klapwijk GreenQ, zoals beschreven in hoofdstuk 3 geleverd en onderhouden. PPO, cluster Tuinbouw, Naaldwijk heeft de tracergas-experimenten uit bijlage 3 mogelijk gemaakt en de daarbij behorende klimaatdata geleverd. Wij bedanken Klapwijk GreenQ, Priva en PPO voor hun bijdrage aan dit project.

Wageningen, maart 2006

Dr.ir. E.J. van Henten, projectleider

Projectreferenties:

A&F project nummer: 630.54005.01

PT projectnummer: 11703

LNV programma: 399

Samenvatting

Natuurlijke ventilatie is één van de belangrijkste manieren om de luchtvochtigheid en de temperatuur in een kas te regelen. Maar hoeveel vocht, warmte en CO₂ er door de ramen naar buiten gaan is niet bekend. Als bijvoorbeeld de RV binnen bijvoorbeeld 85% is, gaan de luchtramen open, ook als is het buiten zo vochtig dat luchten weinig zin heeft. Maar ondertussen gaat er wel ongewild warmte en CO₂ uit de kas. In dit rapport wordt daarom een methode beschreven om op eenvoudige manier het ventilatievoud van kassen te bepalen en daarmee ook op eenvoudige manier inzicht te krijgen in de energie-, vocht- en CO₂-stromen.

Met een betrouwbare weergave van het ventilatievoud door de klimaatcomputer kan de tuinder een betere afweging maken tussen bevordering van de activiteit van de plant enerzijds en verlies aan warmte anderzijds. Een beter inzicht in de invloed van de raamstand op het ventilatievoud, wordt nu nog als een belangrijk knelpunt gezien op weg naar een betere vochtregeling. Een betere vochtregeling kan tot 10% energie besparen.

Ventilatie kan berekend worden uit een complexe natuurkundige relatie tussen raamstanden (lij- en windzijde), windrichting, windsnelheid en temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Verder hangt deze relatie ook nog af van het soort kas en het soort ramen en de positie van de ramen. De nieuwe ventilatiemonitor, zoals de methode ook genoemd kan worden is gebaseerd op de energiebalans van de kas. Ventilatie is één van de onderdelen in de balans en juist omdat de balans in evenwicht zal zijn, kan uit de energiebalans het ventilatievoud worden bepaald. Hiervoor zijn metingen nodig van de buistemperatuur, binnen- en buitentemperatuur en de globale straling. Deze metingen zijn beschikbaar via de klimaatcomputer. De nieuwe methode is niet afhankelijk van het type kas, de kas mag ook een rond dak hebben of mag een tunnelkas zijn. Ramen hoeven niet in het dek zitten en de nieuwe methode is niet afhankelijk van de niet altijd betrouwbare windmetingen.

De metingen van de ventilatiemonitor zijn vergeleken met metingen via een tracergasmethode en met de complexe natuurkundige berekening van de ventilatie. Alle drie de methoden geven vergelijkbare uitkomsten en dus kan gesteld worden dat de nieuwe methode betrouwbaar is. De ventilatiemonitor is succesvol in een praktijkexperiment getest. De nieuwe schattingsmethode werkt technisch goed. Het algoritme heeft wekenlang achtereen probleemloos gedraaid in een praktijkkas van GreenQ. Vergelijking met het ventilatievoud berekend met behulp van een fysische relatie leert dat de nieuwe methode realistische uitkomsten geeft. Er is in absolute zin verschil tussen beide methoden, maar de dynamiek is vrijwel hetzelfde. De tuinders, die bij het experiment betrokken waren hebben aangegeven, dat in dit stadium van de ontwikkeling de trend in de schatting van het ventilatievoud belangrijker is dan de absolute waarde.

Met behulp van de ventilatiemonitor is het eenvoudig om energie-, vocht- en CO₂-stromen te bepalen. Het energieverlies als gevolg van ventilatie is een direct bijproduct van de berekening van het ventilatievoud. Met een (extra) meting van de luchtvochtigheid buiten kan de vochtverwijdering als gevolg van ventilatie worden bepaald. Een CO₂-meting buiten, bijvoorbeeld

door gebruik te maken van de bestaande CO₂-meter in combinatie met een multiplexer geeft in combinatie met de ventilatievoudschatting het CO₂-verlies als gevolg van het luchten.

Absolute nauwkeurigheid van de ventilatiemonitor wordt belangrijk als in de toekomst deze nieuwe methode in de klimaatregeling wordt toegepast, maar hiervoor is verder onderzoek nodig. De methode kan wel zonder veel moeite uitgebreid worden naar situaties met belichting of schermen.

Uit de praktijkproef is gebleken dat, zonder begeleiding, de tuinders er moeite mee hebben om de informatie van het nieuwe systeem te verwerken, te interpreteren en toe te passen bij het klimaatbeheer. Bij de implementatie in de praktijk moet aandacht worden besteed aan de wijze waarop de informatie aan de tuinder wordt verstrekt en aan de vertaalslag van deze informatie naar strategische acties ten aanzien van het kasklimaat.

Inhoudsopgave

	page
Samenvatting	5
Inhoudsopgave	7
1 Inleiding	9
2 Stoken is niet moeilijk, luchten is moeilijk.	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Hoe werkt de ventilatiemonitor?	12
2.3 Waarom is ventileren moeilijk?	13
3 Het schatten van het ventilatievoud van kassen: het experiment	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Experimentele opzet	15
3.2.1 De kas	15
3.2.2 ICT infrastructuur	17
3.2.3 Resultaten	20
3.2.4 Reactie tuinder	24
3.2.5 Conclusies	24
4 Conclusies	27
Referenties	29
5 Bijlage 1. Modelvorming en meting van het ventilatievoud van kassen: een literatuur overzicht	31
5.1 Modelvorming van het ventilatievoud van kassen	31
5.1.1 De homogene kas	31
5.1.1.1 Windeffecten	32
5.1.1.2 Thermische effecten	33
5.1.1.3 Combinatie van wind effecten en thermische effecten	33
5.1.1.4 Calibratie van de ventilatiemodellen	33
5.1.2 De niet-homogene kas	34
5.2 Meting van het ventilatievoud van kassen	35
5.2.1 Meting van drukverschillen	35
5.2.2 Meting van luchtbeweging	35
5.2.3 Meting van het ventilatievoud met tracer gassen	36
5.3 Conclusies	37

	page
6 Bijlage 2. Het schatten van het ventilatievoud van kassen: theorie	39
6.1 Inleiding	39
6.2 Toestandswaarnemers	39
6.3 Het ventilatieproces als dynamisch systeem	40
6.4 Waarnemers voor niet-lineaire systemen	41
6.5 Waarnemers voor de onbekende ingang van een systeem	42
6.6 Toepassing op het schatten van het ventilatievoud	47
6.7 Conclusies	47
7 Bijlage 3. Het schatten van het ventilatievoud van kassen: praktijk	49
7.1 Inleiding	49
7.2 Energiebalans voor een kas	49
7.3 Schatting van het ventilatievoud	52
7.4 Verificatie met tracergasexperimenten	54
7.5 Het gebruik van de ventilatievoudschatting in de praktijk	56

1 Inleiding

Natuurlijke ventilatie is één van de grootheden waarmee de luchtvochtigheid en de temperatuur in Nederlandse kassen wordt gereguleerd. Daarmee is het ook een belangrijke oorzaak van een onomkeerbaar verlies van voelbare en latente warmte en koolzuurgas uit de kas. In de praktijk is er een groeiende vraag naar het inzichtelijk maken van de energie- en vochtstromen in de kas om beter grip te krijgen op de kasklimaatregeling en in het bijzonder op de vochtbeheersing (Klapwijk and Jasperse 2003). Met een betrouwbare weergave van het ventilatievoud door de klimaatcomputer kan de tuinder een betere afweging maken tussen bevordering van de activiteit van de plant enerzijds en verlies van latente en voelbare warmte anderzijds. Tevens kan met een nauwkeuriger vochtregeling tot 10% energie worden bespaard (Vegter 2003; Vreugdenhil 2003). Vanuit de praktijk is er dan ook aangedrongen op het beschikbaar krijgen van een hanteerbaar kengetal dat de hoeveelheid ventilatie weergeeft als additionele informatie naast de beschikbare klimaatparameters. Daarnaast wordt vanuit de voorlichting het ontbreken van inzicht in de invloed van de raamstand op het ventilatievoud als belangrijkste knelpunt genoemd op weg naar een betere vochtregeling (Vegter 2003). Ook nieuwe optimaliserende regelaars vragen om een kwantitatieve en liefst nauwkeurige beschrijving van het kasklimaatproces en de ventilatie-uitwisseling met de buitenlucht is daar een belangrijk onderdeel van (Bontsema, van Henten et al. 2002).

Het probleem is dat voor een specifieke kas de ventilatie-uitwisseling met de buitenlucht nog maar moeilijk op praktijkschaal kan worden gekwantificeerd. Dit in tegenstelling tot de overige energie- en massastromen in een kas die inmiddels goed in kaart zijn gebracht of kunnen worden gemeten (Bot 1983; Stanghellini 1987; Zwart 1996). De ventilatie van kassen kan met modellen worden beschreven, waarin het ventilatievoud als functie van een groot aantal factoren zoals kastype, raamtype, windrichting en -snelheid buiten de kas en het verschil tussen binnen en buitentemperatuur is gekwantificeerd (Bot 1983; Jong 1990). Dit model is evenwel niet één generiek ventilatiemodel dat voor alle kassen geldt, maar hierin blijven enkele kasspecifieke parameters over (Campen and Bot 2003). Deze worden vooral veroorzaakt doordat voor elke kas de grootte, de ligging en de omgeving verschillend zijn en daardoor het windveld anders op de kas inwerkt. Dit project beoogt een methodiek te realiseren waarmee, gebruikmakend van kennis van het kasklimaatproces, het ventilatievoud van kassen en de daaraan gerelateerde energie, vocht en CO₂-stromen kunnen worden gekwantificeerd.

Aan welke specificaties dient zo'n systeem te voldoen? Op dit moment wordt het klimaat in kassen geregeld per compartiment. Een compartiment beslaat gemiddeld genomen 5000 m² kasruimte. Per compartiment wordt één meetbox gebruikt voor het meten van de temperatuur en de luchtvochtigheid en er is één meetpunt voor CO₂. Hoewel tuinders zich bewust zijn van bijvoorbeeld temperatuur gradiënten in de kas (bijv. geveleffecten) wordt in de praktijk de temperatuur niet op meerdere plekken gemeten om dergelijke effecten in kaart te brengen. Ook is de klimatiseringsinstallatie, verwarming en ventilatieramen, niet toegerust om op een kleinere schaal dan een geheel compartiment op het klimaat in te grijpen. Wat wel gebeurt, is dat eventuele gradiënten in de praktijk worden uitgevlakt door het installeren van circulatieventilatoren. Dit onderzoek is gericht op de vraag of en op welke wijze in de

tuinbouwpraktijk het ventilatievoud van kassen en de daaraan gerelateerde energie, vocht en CO₂ stromen, kunnen worden gekwantificeerd. Ontwerpeisen voor een dergelijk systeem zijn:

1. methode schat ventilatievoud van één kascompartiment alsmede de daaraan gerelateerde energie, vocht en CO₂ stromen,
2. eenvoudig te implementeren op een in de tuinbouwpraktijk gebruikte procescomputer,
3. nauwkeurigheid naar de stand der techniek,
4. methode mag niet structureel interfereren met de procesgang in een kas,
5. methode moet goedkoop zijn en veilig voor de medewerkers van de tuin.

In hoofdstuk 2 wordt ventileren en het begrip ventilatievoud nader uitgelegd en ook wordt inzichtelijk gemaakt hoe de methode werkt, waarmee het ventilatievoud wordt geschat.

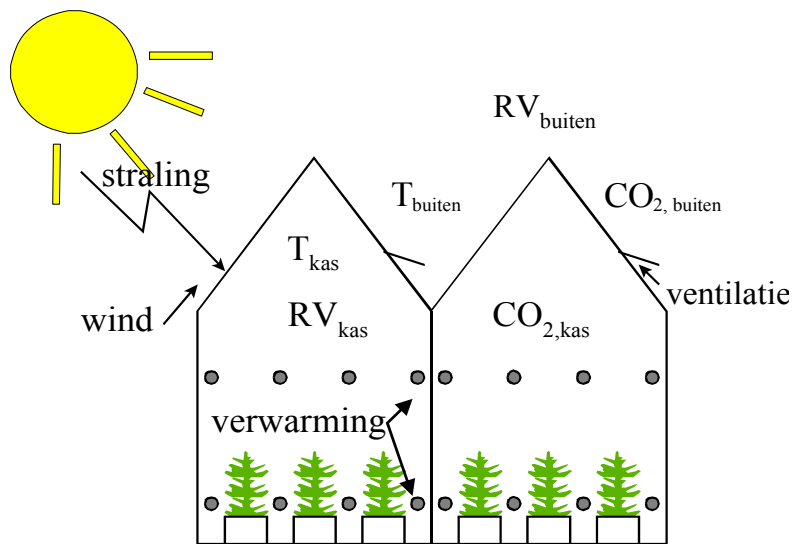
In hoofdstuk 3 toont de resultaten van het testen van de nieuwe methode voor het schatten van het ventilatievoud in een praktijksituatie. De conclusies van het onderzoek staan vermeld in hoofdstuk 4.

In Bijlage 1 wordt de stand van zaken ten aanzien van het modelleren en meten van het ventilatievoud van kassen beschreven op basis van een literatuuronderzoek. Bijlage 2 beschrijft in detail de methode, waarmee het ventilatievoud on-line volgens eerder genoemde specificaties in de kas kan worden geschat. Bijlage 3 beschrijft hoe de methode in de praktijk gebruikt moet worden.

2 Stoken is niet moeilijk, luchten is moeilijk.

2.1 Inleiding

In een natuurlijk geventileerde kas spelen een drietal klimaatgrootheden een hoofdrol. Dit zijn de temperatuur in de kas, de relatieve luchtvochtigheid en de CO_2 -concentratie. Deze klimaatgrootheden worden beïnvloed door enerzijds door de teler bepaalde invloeden, zoals verwarming, CO_2 -dosering en ventilatie. Anderzijds wordt het klimaat in de kas beïnvloed door de buitenomstandigheden, zoals zonnestraling, buitentemperatuur, CO_2 -concentratie buiten, RV buiten en de windsnelheid en windrichting. In onderstaand figuur is dit proces schematisch weergegeven.



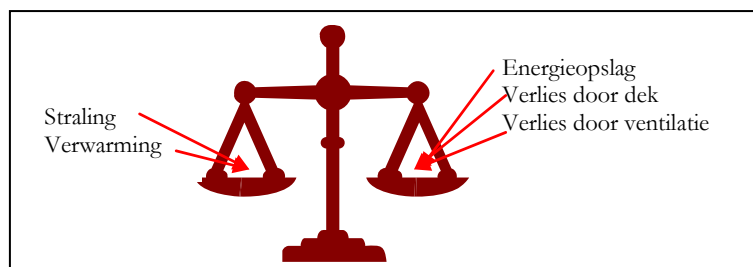
Figuur 2.1. Schematische weergave kasklimaat

Voor een goed klimaat stelt de tuinder bepaalde waarden in zoals een stook- en ventilatielij, en grenzen voor de RV en CO_2 . De invloed van de verwarming op de temperatuur van de kas is voor een tuinder inzichtelijk, verhoging van de buistemperatuur geeft een hogere kastemperatuur. Verhoging van de CO_2 -dosering geeft meestal een verhoging van de CO_2 -concentratie. Echter het is niet helemaal duidelijk hoe de ventilatie werkt. Ventileren gebeurt door de ramen meer of minder te openen, maar ramen open zetten wil niet zeggen dat bijvoorbeeld de temperatuur in de kas daalt of de RV afneemt. Ventilatie door de ramen hangt niet alleen af van hoever de ramen open staan, maar ook van de windrichting en de windsnelheid. Dit effect is duidelijk merkbaar bij veel wind, een kleine raamopening is dan al voelbaar. Daarnaast hangt de ventilatie af van het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur, het zogenaamde schoorsteeneffect. Vooral bij koud weer is dit effect goed merkbaar, je voelt de kou door de ramen binnenkomen. De relatie tussen raamstanden (lij- en windzijde), windrichting, windsnelheid en temperatuurverschil tussen binnen en buiten is een complexe natuurkundige relatie, die ook afhankelijk is van het soort kas

en het soort ramen en de positie van de ramen. De vraag is daarom gesteld of het niet mogelijk is om, gebruik makend van de al gemeten kasklimaatgrootheden en klimaatgrootheden buiten, inzicht te bieden in de effectiviteit van het ventileren. Inzicht in de vorm van een schatting van de ventilatievoud en de berekening van het warmte-, vocht- en CO₂-verlies,, die daarmee gepaard gaat. De geschatte ventilatievoud kan on-line op de kasklimaatcomputer getoond kan worden en vormt daarmee een soort ventilatiemonitor.

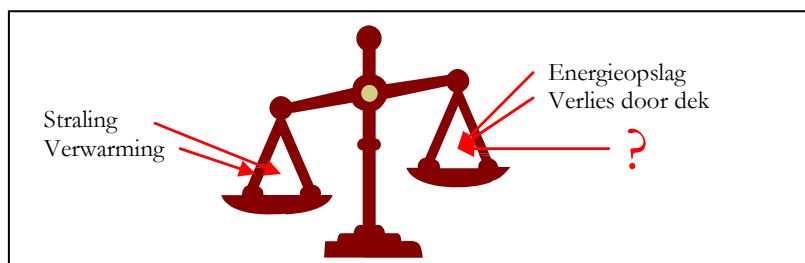
2.2 Hoe werkt de ventilatiemonitor?

Die ventilatiemonitor berust op de energiebalans van de kas. De balans is weergegeven in figuur 2.2. De energiebalans kan worden weergegeven als een weegschaal. Links op de weegschaal staat de toegevoerde warmte aan de kas, namelijk de instraling van de zon en de warmte van de verwarmingsbuizen. Rechts op de weegschaal staat de afgevoerde warmte, samen met de energieopslag in de kas. De afgevoerde warmte bestaat uit warmteverlies door het dek en warmteverlies door de ramen als gevolg van ventilatie. De energieopslag is het verschil tussen toegevoerde en afgevoerde warmte en bepaalt de stijging of daling van de temperatuur in de kas.



Figuur 2.2. De energiebalans van een kas.

Natuurkundig gesproken is de weegschaal altijd in balans. Hiervan wordt in de berekening van het ventilatievoud gebruik gemaakt. Op papier kan ook de energiebalans opgeschreven worden, maar zoals eerder gezegd is de ventilatie en dus ook het warmteverlies door ventilatie niet eenvoudig te bepalen. Omdat we de ventilatie niet kennen krijgen we dus de situatie als weergegeven in figuur 2.3. De balans lijkt uit evenwicht.



Figuur 2.3. Energiebalans uit evenwicht door onbekende ventilatievoud

Door nu op ieder tijdstip net zolang het onbekende ventilatieverlies te corrigeren tot de weegschaal weer in evenwicht is, is dit verlies dus te berekenen. Met behulp van een techniek uit de meet- en regeltechniek kan dit proces volledig geautomatiseerd worden.

Nu het warmteverlies als gevolg van ventilatie bekend is, kan ook de ventilatieflux berekend worden. De ventilatieflux is de hoeveelheid lucht die per tijdseenheid door de ramen wordt uitgewisseld met de omgeving. De in de tuinbouw gangbaardere term ventilatievoud, het aantal malen per uur dat de lucht in de kas ververst wordt, is eenvoudig uit deze ventilatieflux te bepalen.

Uit de geautomatiseerde balans volgt het warmteverlies als gevolg van ventilatie. Dit warmteverlies is evenredig met het product van ventilatieflux en verschil tussen binnen- en buitentemperatuur. Omdat dit laatste bij iedere tuinder gemeten wordt, kan uit het warmteverlies door ventilatie, de ventilatieflux bepaald worden. Dit gebeurt natuurlijk volledig automatisch. Deze ventilatiemonitor gebruikt alleen klimaatgegevens, zoals die nu al bij iedere tuinder door de klimaatcomputer worden gemeten. Daarnaast is door de constructie ook het warmteverlies door ventilatie bekend.

2.3 Waarom is ventileren moeilijk?

Zoals eerder opgemerkt hangt het warmteverlies niet alleen af van hoeveel lucht er met de omgeving wordt uitgewisseld, maar ook van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten de kas. Dus bij koud weer zal er snel veel warmte door de ramen naar buiten verdwijnen, terwijl bij warm weer het zo kan zijn, ondanks dat het waait, er geen warmte door de ramen verdwijnt, omdat het binnen en buiten even warm is.

Ventilatie wordt niet alleen gebruikt om de temperatuur in een kas te verminderen, maar ook vooral om het overtollige vocht, geproduceerd door het gewas, af te voeren. De ventilatiemonitor kan uitgebreid worden om ook de vochtafvoer weer te geven. Hiervoor moet echter wel een RV-sensor buiten worden geïnstalleerd. De meeste tuinders meten geen RV buiten. De vochtafvoer door ventilatie is analoog aan warmteverlies door ventilatie evenredig met het product van ventilatievoud en het verschil tussen vochtconcentratie binnen en buiten de kas.

In tijden dat het buiten bijna even vochtig is als binnen, heeft het dus geen zin om te gaan ventileren om vocht kwijt te raken. Benadrukt moet worden dat vochtigheid uitgedrukt moet worden in absolute vochtigheid om deze conclusie te kunnen trekken. Het gebruik van de relatieve luchtvochtigheid, zoals nu gebruikelijk in de tuinbouwsector, maakt de zaak gecompliceerder. Gelijke RV binnen en buiten, kan bij geopende ramen namelijk nog wel vochtuitwisseling betekenen, tenzij ook de binnen- en buitentemperatuur gelijk zijn.

In de situatie dat er geen of nauwelijks vochtuitwisseling door ventilatie mogelijk is, doordat de absolute vochtigheid binnen en buiten gelijk is, maar er toch wordt geventileerd, verliest men natuurlijk warmte en CO₂, terwijl dit dan misschien niet gewenst is.

Net als voor vochtafvoer kan de ventilatiemonitor uitgebreid worden om de CO₂-verliezen als gevolg van ventilatie weer te geven. Hiervoor moet de tuinder een multiplexer op zijn CO₂-

meetapparaat hebben en er moet van dat apparaat een aanzuigslang naar buiten worden aangebracht.

Met on-line monitoring van ventilatievoud krijgt de ondernemer op termijn een extra middel om doelgerichter te kunnen ventileren en daarmee gas en CO₂ te besparen bij een hoger of gelijk productieniveau en minder risico.

In het volgende hoofdstuk worden de resultaten de ventilatiemonitor getoond, zoals bepaalt in een commerciële kas. Voor de achtergronden van natuurlijke ventilatie en de methodiek achter de ventilatiemonitor wordt verwezen naar de bijlagen.

3 Het schatten van het ventilatievoud van kassen: het experiment

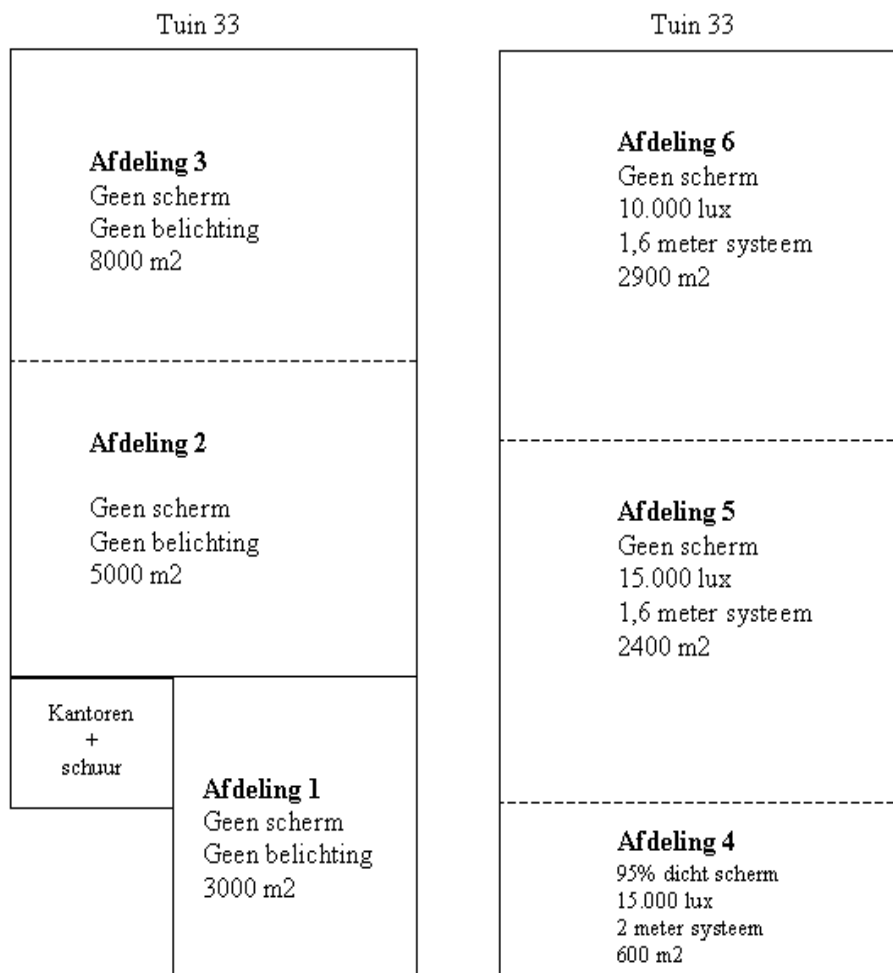
3.1 Inleiding

De in het vorige hoofdstuk ontworpen schatter voor het ventilatievoud is verder uitgetest in een praktijksituatie bij tomatenteler Klapwijk GreenQ in Monster. Bij Klapwijk GreenQ worden op een standaard manier tomaten geteeld, maar daarnaast is het bedrijf ingericht voor het doen van onderzoek, wat voor dit project aantrekkelijk was.

3.2 Experimentele opzet

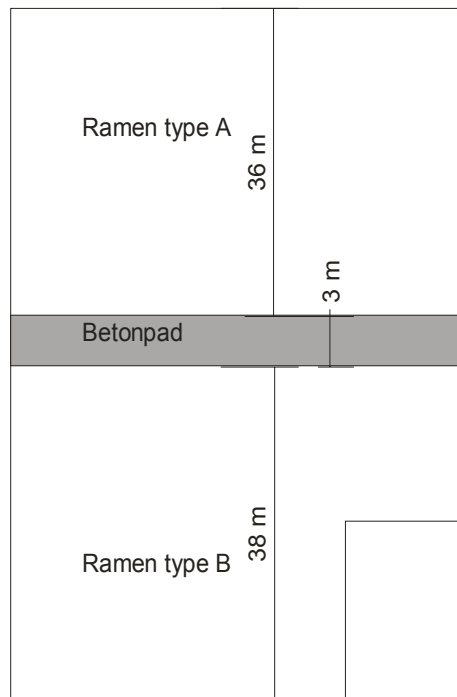
3.2.1 De kas

Het onderzoek bij Klapwijk GreenQ is uitgevoerd in Tuin 33, zie figuur 3.1.



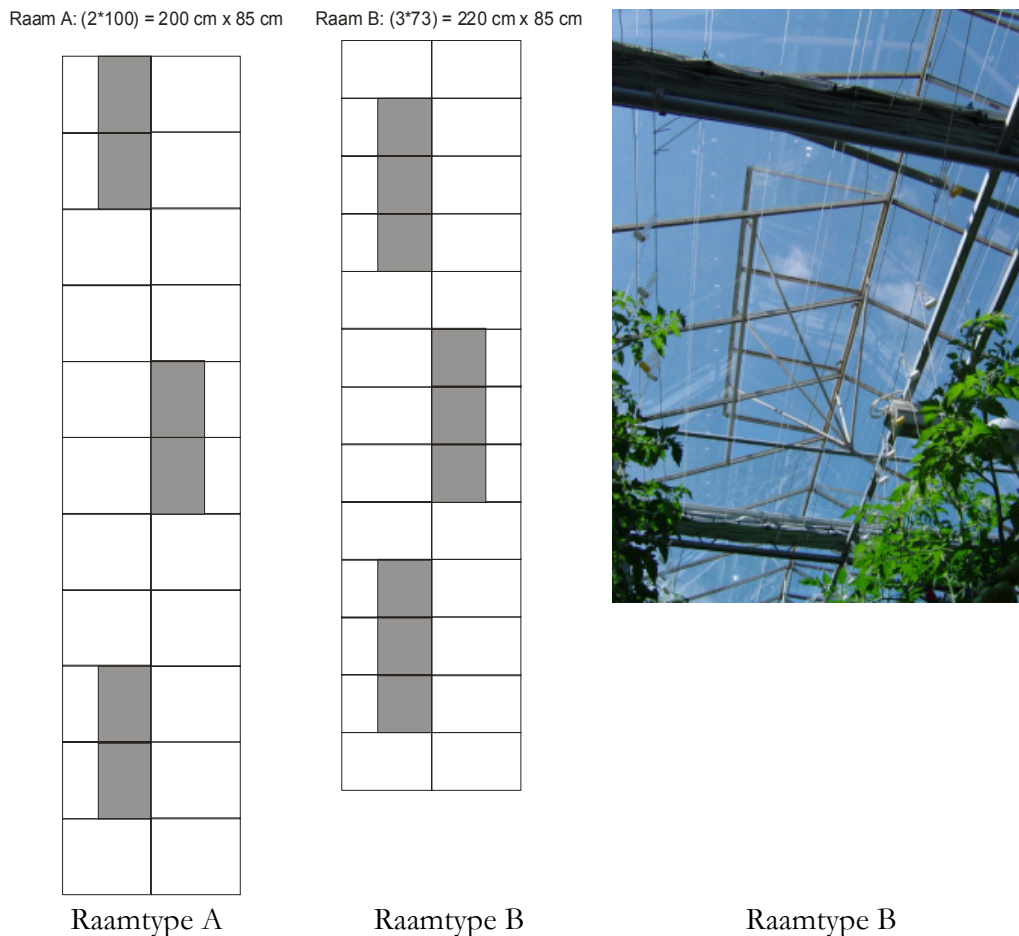
Figuur 3.1. Schematisch overzicht van de kas

Het experiment is uitgevoerd in afdeling 2 van Tuin 33. Deze afdeling is schematisch weergegeven in figuur 3.2.



Figuur 3.2. Schematisch overzicht van afdeling 2.

Deze afdeling heeft twee typen ramen. De verdeling van de ramen over de kappen is weergegeven in figuur 3.3.



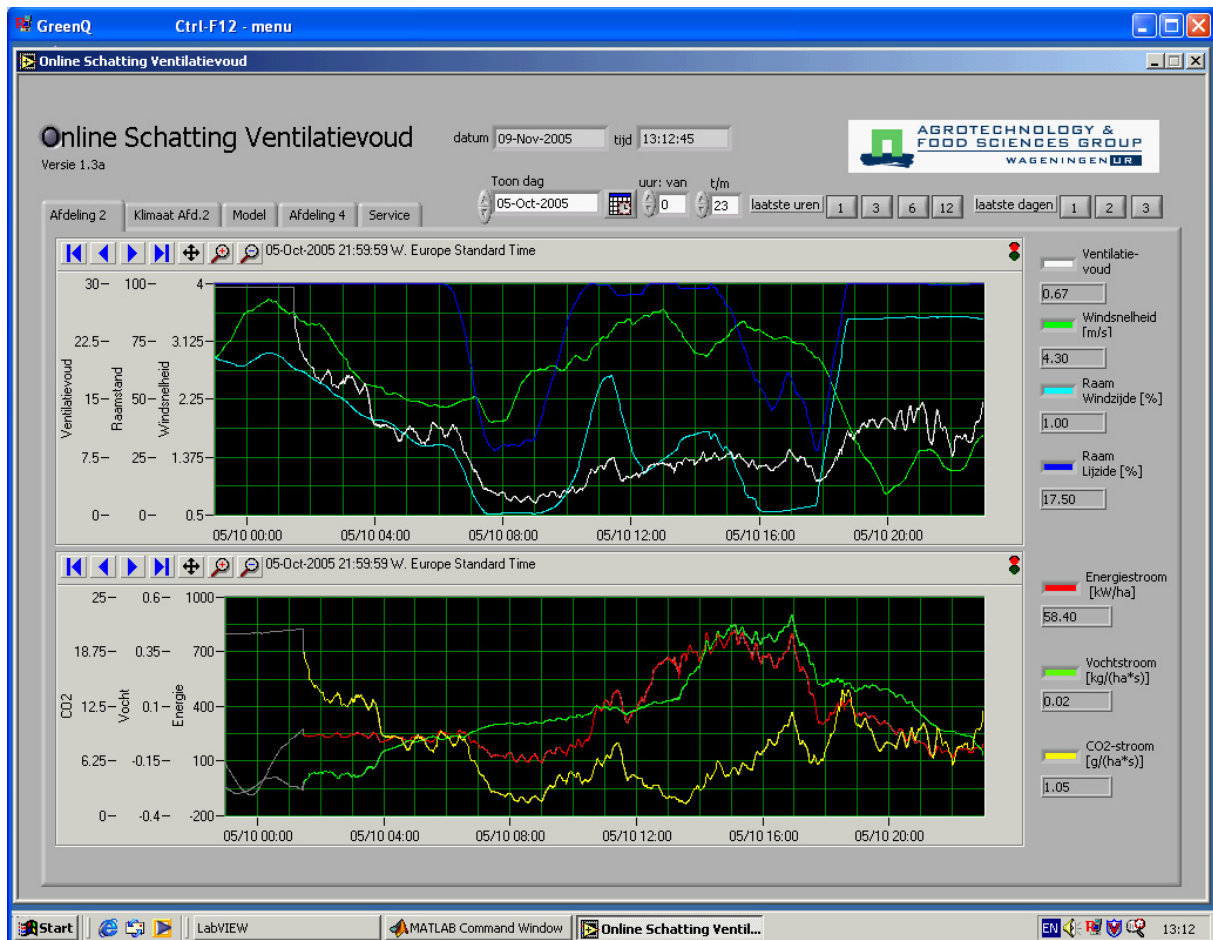
Figuur 3.3. De raamtypes in afdeling 2.

3.2.2 ICT infrastructuur

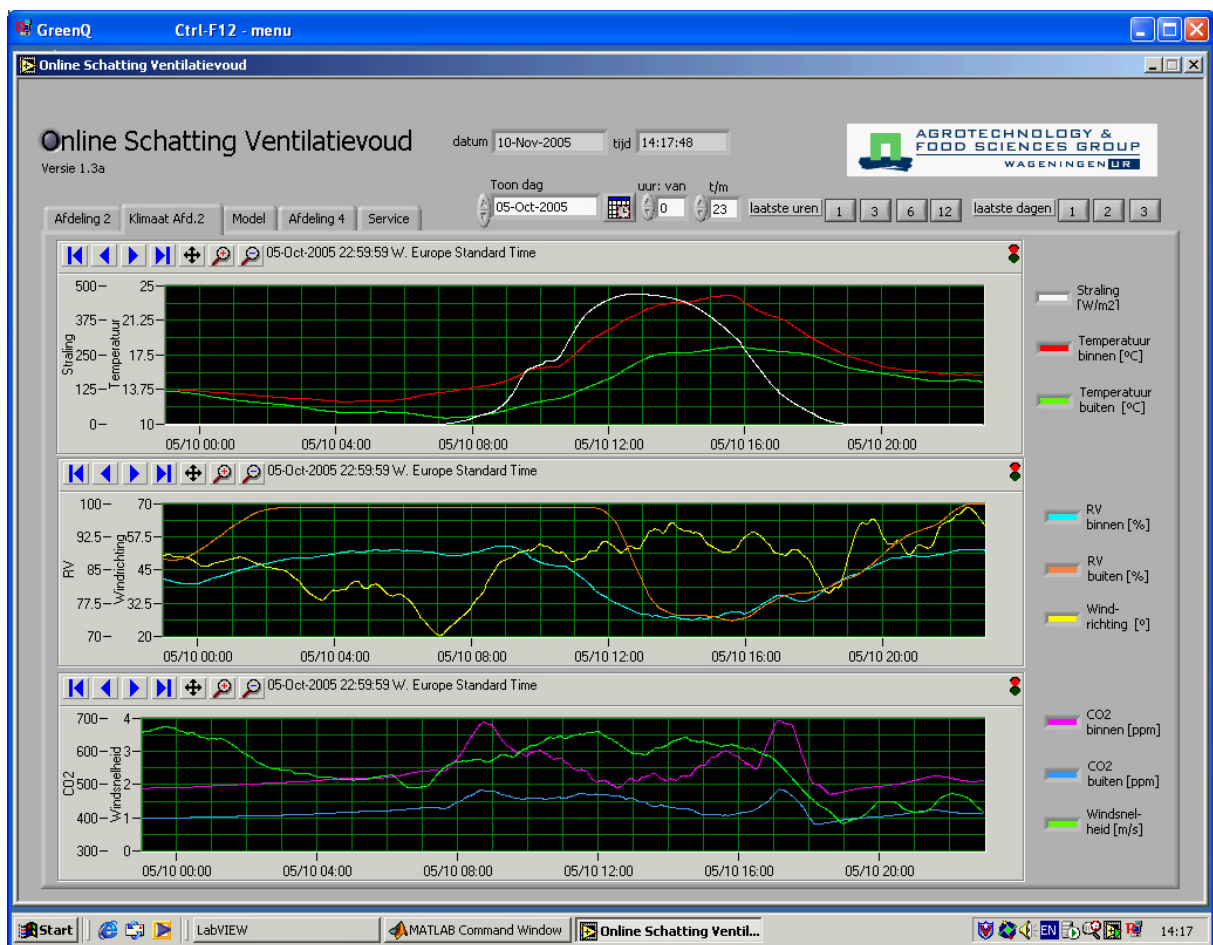
Bij Klapwijk GreenQ is op de kasklimaatcomputer, een Priva Integro, een PC, de “Priva Logger”, aangesloten, die om de minuut de voor dit onderzoek benodigde klimaatgegevens wegschrijft naar een bestand. De “Priva Logger” en een meet PC van A&F zijn aangesloten op een lokaal netwerk van Klapwijk GreenQ. De A&F PC haalt het bestand met klimaatgegevens op en verwerkt deze via de programma’s LabVIEW[®] en Matlab[®] tot een schatting van het ventilatievoud. Via Internet is het, beveiligd, mogelijk om vanuit Wageningen in te loggen, via het programma Remote Administrator[®] op de A&F PC in Mönster.

De interface naar de gebruiker is gemaakt in LabVIEW[®] zoals weergegeven in figuur 3.4. De gebruiker ziet twee schermen, waarop meestal de gegevens van de laatste 12 of 24 uur zijn weergegeven, in dit geval de gemeten en berekende gegevens van 5 oktober 2005, van 00.00 uur tot 23.00 uur. De gebruiker heeft echter ook de mogelijkheid om historische data te bekijken. In het bovenste scherm, worden de windsnelheid (groen), de raamstand lijszijde (blauw), raamstand windzijde (licht blauw) en het geschatte ventilatievoud (wit) weergegeven. Rechts wordt ook de momentane waarde van deze grootheden weergegeven. In het onderste scherm ziet de gebruiker

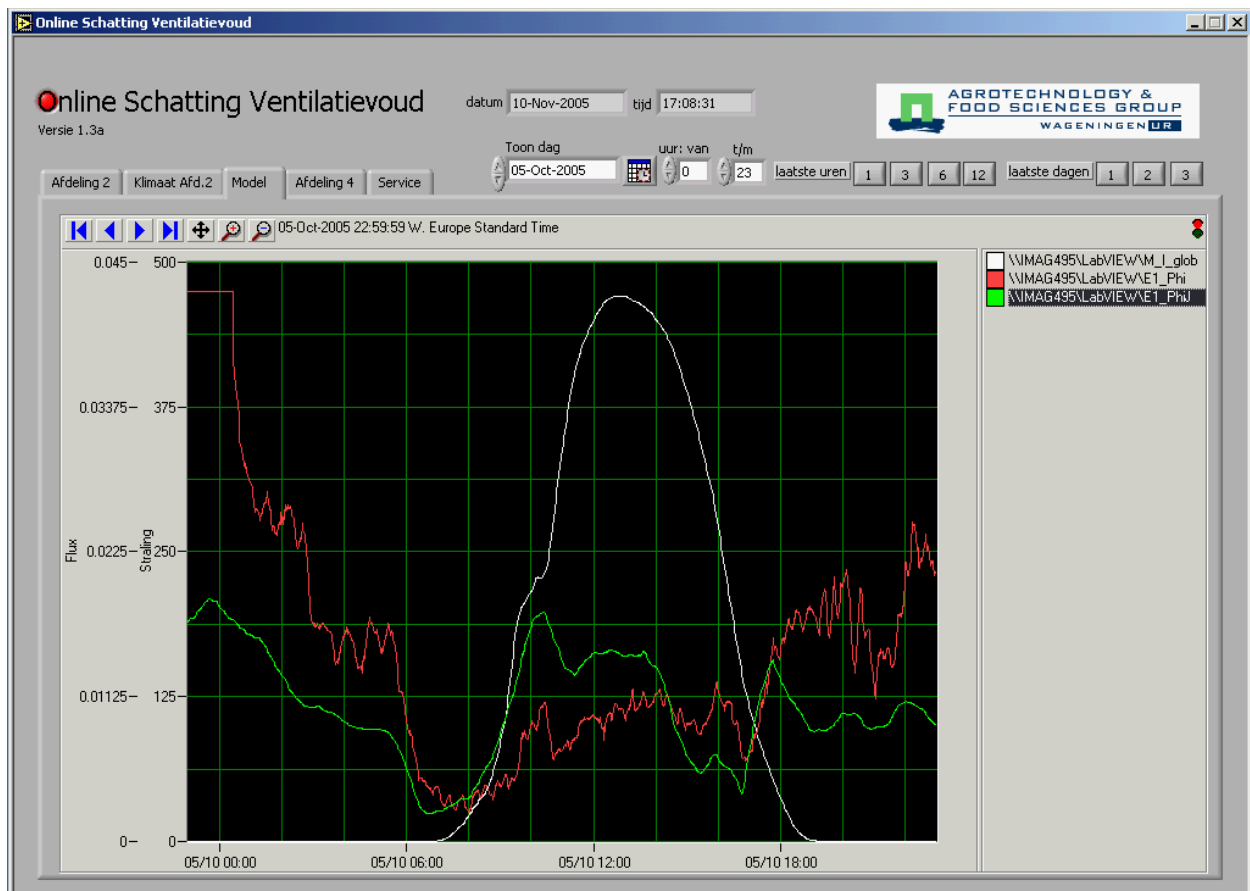
de energiestroom (rood), de vochtstroom (groen) en de CO₂-stroom (geel), als gevolg van ventileren. Op verzoek van de tuinders van Klapwijk GreenQ is er ook er scherm toegevoegd met alle klimaatgegevens (button Klimaat afd. 2), zie figuur 3.5. Voor het onderzoek is een scherm toegevoegd (button Model) om de geschatte ventilatievoud te kunnen vergelijken met het berekende ventilatievoud met behulp van het model van (Jong 1990), zie figuur 3.6.



Figuur 3.4. De interface voor de gebruiker; bovenste scherm toont raamstand aan wind- en lijzijde, windsnelheid en geschatte ventilatievoud, het onderste scherm toont de met het ventilatievoud samenhangende energie- en massastromen



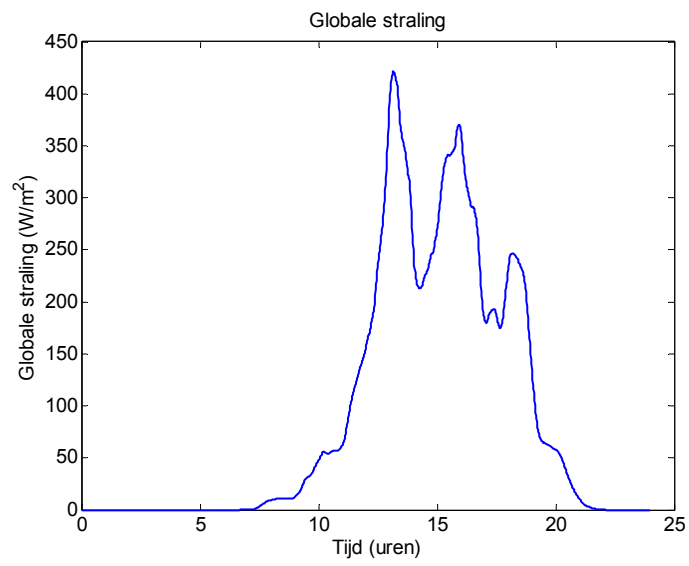
Figuur 3.5. Scherm met klimaatgegevens



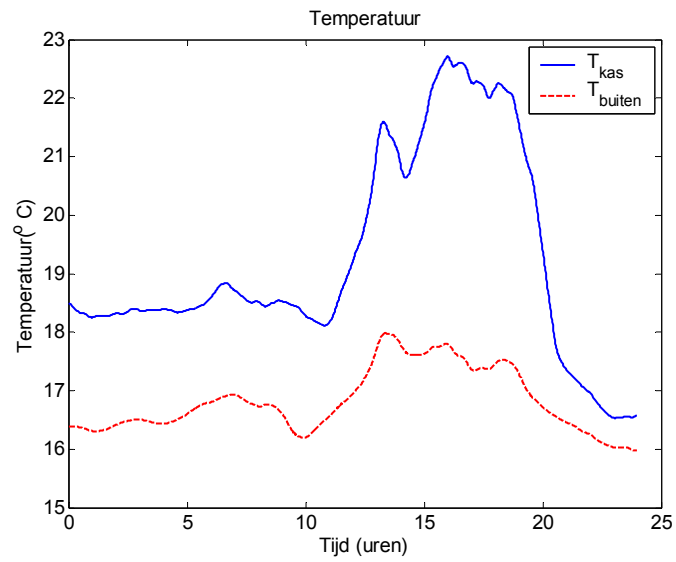
Figuur 3.6. Scherm met geschatte (rood) en berekende (groen) ventilatievoud

3.2.3 Resultaten

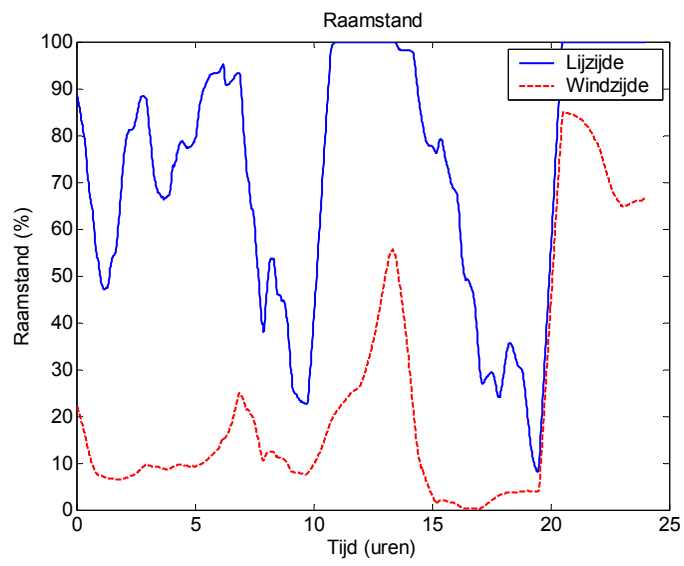
In de volgende figuren is het binnen- en buitenklimaat en de raamstanden van afdeling 2 van de kas van Klapwijk GreenQ op 20 augustus 2005 weergegeven; in figuur 3.7. is de globale straling weergegeven, figuur 3.8 toont de gemeten binnen en buitentemperatuur, figuur 3.9 geeft de raamstand aan wind- en lijzijde en figuren 5.10 tonen respectievelijk de windrichting en windsnelheid.



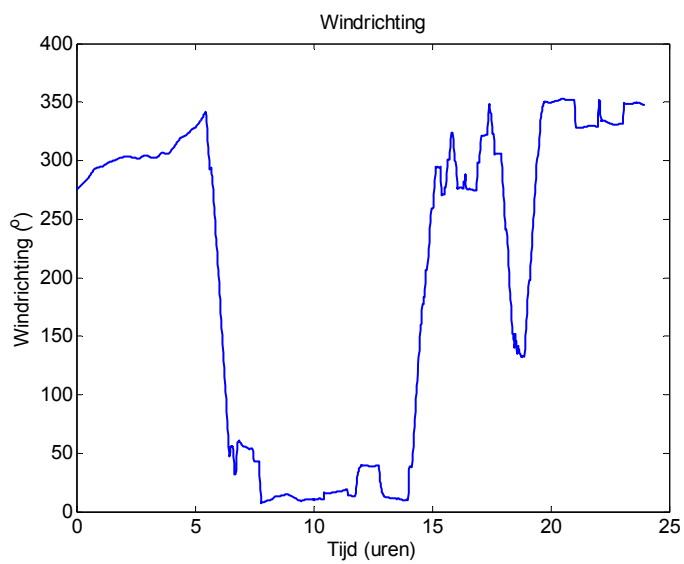
Figuur 3.7. Globale straling, 20 augustus 2005



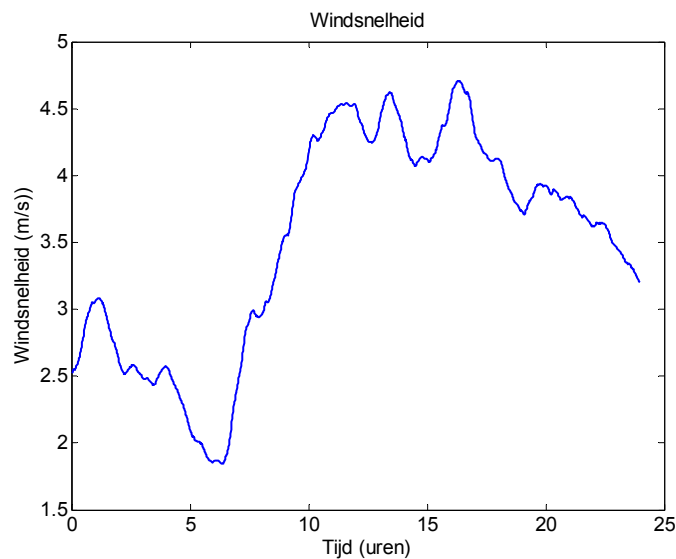
Figuur 3.8. Binnen- en buitentemperatuur, 20 augustus 2005



Figuur 3.9. Raamstanden, 20 augustus 2005

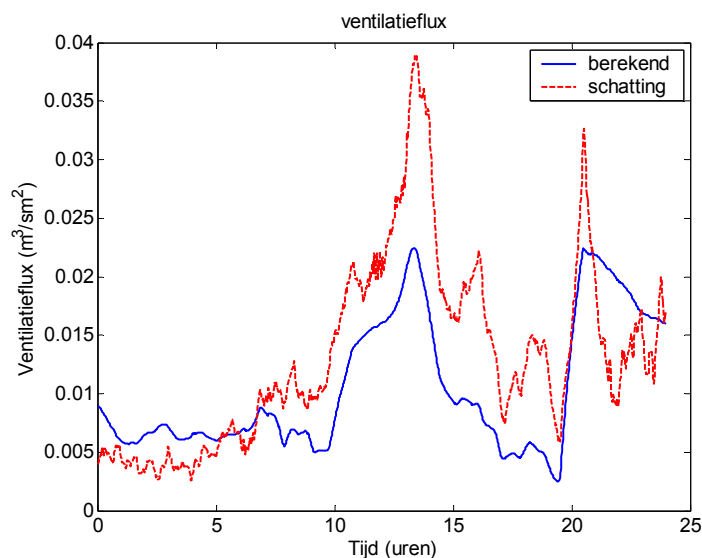


Figuur 3.10. Windrichting, 20 augustus 2005



Figuur 3.11. Windsnelheid, 20 augustus 2005.

Met deze gegevens heeft het algoritme de ventilatievoud on-line geschat. Samen met de berekende ventilatievoud volgens (Jong 1990) is de schatting weergegeven in figuur 3.12.



Figuur 3.12. Ventilatieflux, 20 augustus 2005.

Uit figuur 3.12 blijkt dat zowel de geschatte ventilatievoud als de berekende ventilatievoud een zelfde dynamiek hebben. Verder is de geschatte ventilatievoud meestal groter dan de berekende ventilatievoud, vooral bij hogere instraling. Opgemerkt moet worden, dat de berekening volgens (Jong 1990) geen rekening kan houden met twee verschillende raamtypes in één afdeling, hiervoor is een soort gemiddelde gebruikt. Verder zijn volgens (Knoll 2004) windmetingen bij kassen niet erg betrouwbaar, vanwege de geringe hoogte waarop wordt gemeten. Met deze

opmerkingen kunnen we stellen dat de nieuwe methode even goed is als de berekening van (Jong 1990) en minder gegevens van de kas nodig heeft.

3.2.4 Reactie tuinder

Op 14 september 2005 is een demo gegeven voor de tuinders van Klapwijk GreenQ en voor een productmanager van Priva. De aanwezigen reageerden positief op het getoonde systeem. De trend in de getoonde signalen, dus nemen de ventilatie, energie- en vochtstromen toe of af, wordt belangrijker geacht dan absolute waarden. Absolute waarden zijn pas belangrijk als het proces echt nauwkeurig gestuurd moet worden, op basis van deze nieuwe schattingmethode. Dit wordt als een volgende stap gezien. Opvallend is dat tuinders onmiddellijk een verband willen leggen tussen windsnelheid, windrichting, raamstanden en ventilatiestromen.

Ook het scherm met de energiestromen riep meteen discussie op. Zo kon worden vastgesteld dat op één van de dagen in september de vochtuitwisseling met de buitenlucht tot nul was teruggelopen ondanks dat de ramen wagenwijd openstaan. Terecht werd geconcludeerd dat het onder die omstandigheden geen zin heeft de ramen verder te openen.

Aan de orde werd gesteld of dit systeem kan worden uitgebreid met bijvoorbeeld een vochtprognose voor de komende dag. Gegeven een weersvoorspelling is dat zeker mogelijk, maar niet in dit project voorzien.

Op verzoek van de mensen van Klapwijk GreenQ en PRIVA is na deze datum een extra scherm met het actuele binnenklimaat en meteodata toegevoegd, om zo relaties met de andere getoonde grootheden te kunnen analyseren.

Aan de mensen van Klapwijk GreenQ is vervolgens gevraagd om zonder aanwezigheid van de onderzoekers het systeem te evalueren. Hieruit kwam het volgende naar voren. De presentatie van alle gegevens in een paar schermen wordt als lastig ervaren om je te oriënteren. Het is de tuinders opgevallen dat de windzijde veel invloed op de ventilatievoud heeft. Dit is interessant, omdat dit fysisch logisch is maar in de praktijk wordt dit blijkbaar niet als vanzelfsprekend ervaren. Bij de tuinders komt de vraag naar boven wat ze er nu mee kunnen bij de regeling van het klimaat. Ze zijn het erover eens dat er waardevolle informatie uit het nieuwe systeem komt, maar hoe dit geïnterpreteerd moet worden en wat ze ermee kunnen is nog niet helemaal duidelijk. Hier ligt nog een taak voor de onderzoekers en de toeleverancier. De tuinders denken dat de schattingmethode in eerste instantie kan fungeren als een feedback op de gekozen teeltstrategie. Als voorbeeld noemen ze CO₂ in de namiddag binnenhouden, maar wel warmte kwijtraken. De vraag is om dan een goed evenwicht hierin te vinden en ze denken dat de ventilatieschatter bij dit soort vraagstukken een belangrijke rol kan spelen.

3.2.5 Conclusies

De nieuwe schattingsmethode werkt technisch goed. Het algoritme heeft wekenlang achterelkaar probleemloos gedraaid bij Klapwijk GreenQ. De internetverbinding tussen A&F en Klapwijk GreenQ maakte het mogelijk om snel en efficiënt wijzigingen in de gebruikersinterface en het algoritme aan te brengen.

Vergelijking met het ventilatievoud volgens (Jong 1990) leert dat de nieuwe methode realistische uitkomsten geeft. Er is in absolute zin verschil tussen beide methoden, maar de dynamiek is vrijwel hetzelfde. De tuinders, die bij het experiment betrokken waren hebben aangegeven, dat in dit stadium de trend in de schatting van het ventilatievoud belangrijker is dan de absolute waarde. Dit laatste wordt wel belangrijk als in de toekomst deze nieuwe methode in de klimaatregeling wordt toegepast.

Zonder begeleiding hebben de tuinders er moeite mee om de informatie van het nieuwe systeem te verwerken en te vertalen naar alternatieve strategieën voor de klimaatbeheersing.

4 Conclusies

In dit rapport is de stand van zaken beschreven op het gebied van het meten c.q. modelleren van het ventilatievoud van kassen. Gezocht is naar een methode die voldoet aan de volgende criteria:

1. de methode schat ventilatievoud van één kascompartiment evenals de daaraan gerelateerde energie, vocht en CO₂ stromen,
2. eenvoudig te implementeren op een in de tuinbouwpraktijk gebruikte procescomputer,
3. nauwkeurigheid naar de stand der techniek,
4. methode mag niet structureel interfereren met de procesgang in een kas,
5. methode moet goedkoop zijn en veilig voor de medewerkers van de tuin.

Het ventilatieproces is op hoofdlijnen zeer goed in kaart gebracht en kan middels modellen worden beschreven. De algemene en praktische toepasbaarheid blijft echter een probleem omdat een aantal modelparameters te sterk afhankelijk zijn van grootte, ligging en geometrie van de kas en obstakels in de omgeving van de kas. Kwantificeren van deze parameters lijkt niet eenvoudig te zijn.

Een eenvoudige en goedkope methode waarmee in de tuinbouwpraktijk het ventilatievoud kan worden gemeten lijkt niet te bestaan. Ofwel de instrumentatie is complex of kostbaar of de gebruikte middelen zijn giftig. Ook beïnvloeden de meeste methoden de procesgang in de kas of geven een schatting van het ventilatievoud over een langere en minder interessante tijdspanne. Een kans ligt in het gebruik van CO₂, vocht en temperatuur als tracers. Die worden standaard gemeten en kunnen ook informatie verschaffen over het ventilatievoud. Onderzoek heeft aangetoond dat daarmee goede resultaten kunnen worden verkregen in vergelijkingen met andere kostbaardere tracergasmetingen. Maar geen van de beschreven onderzoeken leverde een methode op waarmee op korte termijn, d.w.z. binnen een uur, een schatting van het ventilatievoud kan worden gegenereerd zonder de procesgang in de kas te beïnvloeden.

Gezien voorgaande conclusies, is in dit rapport een interessante methode beschreven. Gewone, meetbare klimaatgrootheden worden gebruikt als tracergas in een methode die zonder de procesgang te beïnvloeden op korte termijn schattingen van het ventilatievoud kan genereren. Daarmee wordt inzicht gegeven in de omvang en het verloop in de tijd van het natuurlijke ventilatieproces; inzicht dat tot op heden in de tuinbouwpraktijk niet of nauwelijks bestond.

De nieuwe methode is niet afhankelijk van het type kas, het hoeft dus geen Venlo-type te zijn, maar mag ook een kas met ronde dak of een tunnelkas zijn. De nieuwe methode is ook niet afhankelijk van de raamconfiguratie, zoals de methode van (Jong 1990). Een derde voordeel is dat de nieuwe methode niet afhankelijk is van windmetingen, zoals de methode van (Jong 1990). Windmetingen zijn in de tuinbouwpraktijk het algemeen niet erg betrouwbaar (Knoll 2004).

Met simulaties van een vereenvoudigde maar wel representatieve modelsituatie is aangetoond dat deze methode bruikbaar is voor het schatten van het ventilatievoud in kassen. De methode is

daarnaast vergeleken met de bepaling van de ventilatieflux, via een tracergasexperiment. Hieruit blijkt dat de nieuwe methode betrouwbaar is.

Voor gebruik in de praktijk kan de nieuwe methode eenvoudig aan iedere specifieke kas worden aangepast. De voor de methode gebruikte eenvoudige dynamische energiebalans, geldt voor iedere kas, alleen de parameters zullen voor iedere kas anders zijn. Deze parameters zijn eenvoudig te bepalen uit metingen van het klimaat, die toch al gebeuren, dus zonder de procesgang te beïnvloeden. De instelling van de schatter voor de ventilatievoud, hangt alleen van deze parameters af, met andere woorden, de nieuwe methode kan worden uitgerust met een automatische calibratieprocedure.

De nieuwe methode is zowel een voorbeeld van sensor fusion als van een intelligente of soft sensor. De nieuwe methode combineert vier sensoren namelijk drie temperatuur sensoren (pijptemperatuur, kasluchttemperatuur en buitentemperatuur) en een stralingssensor, om een nieuwe grootheid, ventilatieflux of ventilatievoud, te meten. Voor de tuinder zal de nieuwe methode dus gewoon een meting zijn. De nieuwe methode gebruikt naast metingen ook kennis, namelijk een dynamische energiebalans, om het ventilatievoud te bepalen. Door het gebruik van deze kennis noemt zo'n methode een intelligente sensor of een soft sensor.

De nieuwe methode is succesvol in een praktijkexperiment getest. De nieuwe schattingsmethode werkt technisch goed. Het algoritme heeft wekenlang achterelkaar probleemloos gedraaid bij Klapwijk GreenQ. De internetverbinding tussen A&F en Klapwijk GreenQ maakte het mogelijk om snel en efficiënt wijzigingen in de gebruikersinterface en het algoritme aan te brengen. Vergelijking met het ventilatievoud volgens (Jong 1990) leert dat de nieuwe methode realistische uitkomsten geeft. Er is in absolute zin verschil tussen beide methoden, maar de dynamiek is vrijwel hetzelfde. De tuinders, die bij het experiment betrokken waren hebben aangegeven, dat in dit stadium de trend in de schatting van het ventilatievoud belangrijker is dan de absolute waarde. Dit laatste wordt wel belangrijk als in de toekomst deze nieuwe methode in de klimaatregeling wordt toegepast.

Zonder begeleiding hebben de tuinders er moeite mee om de informatie van het nieuwe systeem te verwerken en te vertalen naar alternatieve strategieën voor de klimaatbeheersing.

Referenties

- Baptista, F. J., B. J. Bailey, et al. (1999). "Greenhouse ventilation rate: Theory and measurement with tracer gas techniques." Journal of Agricultural Engineering Research **72**(4): 363-374.
- Bontsema, J., E. J. van Henten, et al. (2002). Optimaal energie efficiënt - model based - besturingssysteem voor kasklimaat. Wageningen, IMAG B.V.: 75.
- Bot, G. P. A. (1983). Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Wageningen, Bot.
- Boulard, T. and A. Baille (1995). "Modeling of Air Exchange-Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents." Journal of Agricultural Engineering Research **61**(1): 37-47.
- Boulard, T. and B. Draoui (1995). "Natural Ventilation of a Greenhouse with Continuous Roof Vents - Measurements and Data-Analysis." Journal of Agricultural Engineering Research **61**(1): 27-35.
- Boulard, T., C. Kittas, et al. (2002). "Convective and ventilation transfers in greenhouses, part 2: Determination of the distributed greenhouse climate." Biosystems Engineering **83**(2): 129-147.
- Boulard, T., J. F. Meneses, et al. (1996). "The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses." Agricultural and Forest Meteorology **79**(1-2): 61-77.
- Boulard, T., G. Papadakis, et al. (1997). "Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse." Agricultural and Forest Meteorology **88**(1-4): 111-119.
- Buwason, K. K. and M. Saif (1998). "An Observer for a Class of Disturbance Driven Nonlinear Systems." Applied Mathematics Letters **11**(6): 109-113.
- Campan, J. B. and G. P. A. Bot (2003). "Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics." Biosystems Engineering **84**(1): 69-77.
- Dayan, J., E. Dayan, et al. (2004). "Simulation and control of ventilation rates in greenhouses." Mathematics and Computers in Simulation **65**(1-2): 3-17.
- Dochain, D. (2003). "State and parameter estimation in chemical and biochemical processes: a tutorial." Journal of Process Control **13**: 801-818.
- Dochain, D. (2003). "State observers for processes with uncertain kinetics." International Journal of Control **76**(15): 1483-1492.
- Fernandez, J. E. and B. J. Bailey (1992). "Measurement and Prediction of Greenhouse Ventilation Rates." Agricultural and Forest Meteorology **58**(3-4): 229-245.
- Henten, E. J. v. (1994). Greenhouse climate management: an optimal control approach. PhD Thesis Wageningen University.
- Jong, T. d. (1990). Natural ventilation of large multi-span greenhouses. PhD Thesis Wageningen University, De Jong.
- Klapwijk, P. and H. Jasperse (2003). "Persoonlijke mededeling."
- Knoll, B. (2004). "Persoonlijke mededeling."
- Lamrani, M. A., T. Boulard, et al. (2001). "Airflows and temperature patterns induced in a confined greenhouse." Journal of Agricultural Engineering Research **78**(1): 75-88.
- Luenberger, D. G. (1966). "Observer for Multivariable Systems." IEEE Transactions on Automatic Control **AC-11**(2): 190-197.
- Luenberger, D. G. (1971). "An Introduction to Observers." IEEE Transactions on Automatic Control **AC-16**(6): 596-602.
- Mistriotis, A., C. Arcidiacono, et al. (1997). "Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds." Agricultural and Forest Meteorology **88**(1-4): 121-135.

- Montero, J. I., G. R. Hunt, et al. (2001). "Effect of ventilator configuration on wind-driven ventilation in a crop protection structure for the tropics." Journal of Agricultural Engineering Research **80**(1): 99-107.
- Nise, N. S. (1995). Control System Engineering. Redwood City, California 94065, USA, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- Papadakis, G., M. Mermier, et al. (1996). "Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings." Journal of Agricultural Engineering Research **63**(3): 219-227.
- Sherman, M. H. (1990). "Tracer-Gas Techniques for Measuring Ventilation in a Single Zone." Building and Environment **25**(4): 365-374.
- Stanghellini, C. (1987). Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Wageningen, Imag.
- Teitel, M. and J. Tanny (1999). "Natural ventilation of greenhouses: experiments and model." Agricultural and Forest Meteorology **96**(1-3): 59-70.
- Vegter, B. (2003). "Buitenvocht geeft rustiger en energiezuiniger klimaatregeling." Vakblad voor de Bloemisterij(32): 28-29.
- Vreugdenhil, A. (2003). "Vochtmeting bespaart 10% gas." Agrarisch Dagblad.
- Walker, I. S. and D. J. Wilson (1993). "Evaluating Models for Superposition of Wind and Stack Effect in Air Infiltration." Building and Environment **28**(2): 201-210.
- Zwart, H. F. d. (1996). Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. [S.l.], De Zwart.

5 Bijlage 1. Modelvorming en meting van het ventilatievoud van kassen: een literatuur overzicht

5.1 Modelvorming van het ventilatievoud van kassen

De natuurlijke ventilatie van kassen wordt beïnvloed door de stand van de ramen, de windsnelheid, de windrichting, temperatuur verschillen tussen binnen en buiten, de grootte en vorm van de kas en de omvang en ligging van gebouwen en andere obstakels zoals windhagen in de nabije omgeving van de kas (Baptista, Bailey et al. 1999; Campen and Bot 2003).

Modelvorming van het ventilatievoud van kassen komt neer op het kwantificeren van de relatie tussen het ventilatievoud en bovengenoemde invloedsfactoren. In dit literatuuroverzicht wordt de stand van zaken op het gebied van modelvorming van het ventilatievoud beschreven.

In de literatuur kunnen twee hoofdlijnen worden onderscheiden. Eén onderzoekslijn neemt aan dat een kas een perfect geroerde tank is waarin energie, vocht en CO₂ homogeen over de ruimte zijn verdeeld. De andere onderzoekslijn gaat er vanuit dat energie, vocht en CO₂ niet homogeen zijn verdeeld in de kas. Zoals hierna duidelijk zal worden hebben beide aanpakken hun voor- en nadelen. Beschouwen we de kas als een homogeen systeem dan zijn we alleen in staat om fysische verschijnselen zoals ventilatie maar ook de daaraan gerelateerde energie, vocht en CO₂ stromen op macroniveau, d.w.z. voor een gehele kas(compartment) te beschrijven. De modelbeschrijvingen zijn over het algemeen relatief eenvoudig. Dergelijke modellen zijn echter niet in staat om verschijnselen op een microniveau te beschrijven, d.w.z. binnen een kas(compartment). Daarvoor hebben we modellen nodig die de kas beschrijven als een niet-homogeen systeem waarin aspecten op microniveau worden meegenomen. De modelvergelijkingen zijn complexer en de oplossing van de modellen zijn rekentechnisch kostbaar. Beide modelbenaderingen zullen hieronder kort worden beschreven.

5.1.1 De homogene kas

Ventilatie is het gevolg van een drukverschil over een opening. Op basis van de Bernoulli-vergelijking kan de gemiddelde snelheid van lucht die zich door een opening verplaatst als functie van het drukverschil over de opening beschreven worden met de vergelijking

$$u_0 = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} C_d \left(\frac{2}{\rho} |\Delta P| \right)^{0.5} \quad (1)$$

waarin ΔP is het drukverschil over de opening, ρ is de dichtheid van de lucht, C_d is een de zogenaamde 'discharge-coefficient' en het teken van $|\Delta P|/\Delta P$ geeft aan of we te maken hebben met een ingaande of uitgaande luchtstroom. De constante C_d is afhankelijk van de grootte en geometrie van de opening en kan in laboratorium experimenten worden gekwantificeerd.

Het drukverschil ΔP kent twee oorzaken. Ten eerste, een drukverschil als gevolg van windeffecten. Ten tweede, een drukverschil als gevolg van thermiek ofwel een temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

5.1.1.1 Windeffecten

Wind rondom een gebouw creëert een drukveld dat bij openingen resulteert in een luchtstroom door die opening: ventilatie. Het windeffect kent twee componenten: (1) een statisch effect dat wordt veroorzaakt door een statische drukverdeling over het gebouw en (2) een dynamisch effect of turbulent effect dat wordt veroorzaakt door een turbulente interactie van de wind met het gebouw. In de praktijk is het moeilijk onderscheid te maken tussen deze componenten en in de meeste onderzoeken op het gebied van kasventilatie worden ze als één geheel beschouwd.

Het drukverschil over een opening in een kas hangt af van de kinetische energie van de lokale windsnelheid in de nabijheid van die opening. Die windsnelheid kan verschillen per opening en is moeilijk te meten. Daarom wordt een effectief drukverschil over alle openingen gerelateerd aan de kinetische energie van de windsnelheid gemeten op een referentie hoogte. Het drukverschil wordt dan weer beschreven met de Bernoulli vergelijking

$$\Delta P = \frac{1}{2} C_w \rho u_r^2 \quad (2)$$

waarin u_r is de windsnelheid op referentie hoogte, ρ is de dichtheid van lucht en C_w is een constante. Deze constante is afhankelijk van de plaats van de kas, de grootte en geometrie van de kas alsmede plaats en grootte van obstakels in de nabijheid van de kas en is dus niet voor elke kas hetzelfde.

Substitutie van vergelijking (2) in vergelijking (1) levert een beschrijving voor de gemiddelde windsnelheid door een opening als gevolg van de windsnelheid op referentie hoogte:

$$u_0 = C_d C_w^{0.5} u_r \quad (3)$$

Er van uitgaande dat de onderste helft van een raam voor instroom van lucht wordt gebruikt en de bovenste helft voor uitstroom, levert integratie van vergelijking (3) een vergelijking van de ventilatieflux ϕ_w in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$:

$$\phi_w = 0.5 A_0 C_d C_w^{0.5} u_r \quad (4)$$

waar A_0 in m^2 de grootte van de opening is. Wat opvalt in deze vergelijking is, dat de ventilatieflux lineair afhankelijk is van de windsnelheid en de grootte van de ventilatieopening. Dat is door vele experimenten bevestigd (Bot 1983; Jong 1990).

5.1.1.2 Thermische effecten

Ventilatie als gevolg van schoorsteeneffect of thermiek wordt veroorzaakt door verschillen in dichtheid van de lucht aan beide zijde van de opening die op hun beurt weer worden veroorzaakt door temperatuurverschillen aan beide zijde van die opening. Een veel gebruikte vergelijking voor het beschrijven van thermisch gedreven ventilatie is

$$\phi_{th} = \frac{A}{2} C_d \left(2g \frac{\Delta T}{T_0} \frac{H}{4} \right)^{0.5} \quad (5)$$

waarin g is de valversnelling, ΔT is het temperatuurverschil over de opening, T_0 is een referentietemperatuur, H is de verticale hoogte van de opening en C_d is de reeds eerder beschreven ontladingscoëfficiënt.

5.1.1.3 Combinatie van wind effecten en thermische effecten

In de praktijk zal natuurlijke ventilatie veroorzaakt worden door een combinatie van wind en thermische effecten. In (Walker and Wilson 1993) is aangegeven dat bij benadering de eenvoudigste beschrijving van de combinatie van beide effecten wordt gegeven door

$$\phi = \left(\phi_w^2 + \phi_{th}^2 \right)^{0.5} \quad (6)$$

Deze benadering veroorzaakt wel een fout van ongeveer 10%, maar is vanwege zijn eenvoud in menig onderzoek gebruikt.

Thermische effecten domineren bij lage windsnelheden van kleiner dan 2 ms^{-1} . Bij hogere windsnelheden domineert de windgedreven ventilatie (Bot 1983; Boulard and Baille 1995; Papadakis, Mermier et al. 1996).

5.1.1.4 Calibratie van de ventilatiemodellen

In de eerder beschreven ventilatiemodellen moeten de parameters C_d en C_w van een waarde worden voorzien. Dit heet calibratie. De ontladingsparameter C_d is een specifieke waarde die samenhangt met de vorm en grootte van het ventilatieraam en kan in principe in een laboratorium worden gemeten. Bij de parameter C_w ligt dat anders. Deze factor is afhankelijk van de vorm, grootte en ligging van de kas en de vorm en ligging van obstakels in de nabijheid van de kas. Er zijn een aantal opties om die parameter te bepalen:

1. Door middel van meting van het ventilatievoud in een full-scale kas met een tracergas,
2. Door een kas te beschrijven met een CFD model en daaruit de parameter af te leiden,
3. Door een kas met omgeving op schaal na te bouwen en in een windtunnel door te meten,
4. Door gebruik te maken van de zogenaamde Cp-generator van TNO waarin kennis van grote hoeveelheden windtunnel experimenten is geaggregeerd (Knoll 2004).

Ad 1. Tracergasmetingen zijn tijdrovend en (mede daardoor) kostbaar. Elk experiment vraagt de nodige tijd en de kas dient onder een breed scala van weerssituaties doorgemeten te worden. Zie ook paragraaf 2.2.3.

Ad 2. Deze methode vereist een gedetailleerde beschrijving van de 3-dimensionale vorm en grootte van de kas en zijn nabije omgeving. Daarna dient dit model onder een groot aantal weerssituaties doorgerekend te worden. Dat is een tijdrovende aangelegenheid. Zie ook paragraaf 2.1.2.

Ad 3. Deze methode is kostbaar omdat de kas en zijn omgeving op schaal nagebouwd dienen te worden en daarna onder diverse omstandigheden doorgemeten moeten worden.

Ad 4. Ook deze methode vraagt een beschrijving van de 3-dimensionale vorm en grootte van de kas en zijn omgeving. Daarna dient dit model ook voor verschillende weerssituaties doorgerekend te worden. De methode is minder rekenintensief dan methode 2, maar ook minder nauwkeurig en is nog in ontwikkeling (Knoll 2004).

5.1.2 De niet-homogene kas

In deze benadering wordt aangenomen dat fysische grootheden zoals temperatuur, vocht en CO_2 niet-homogeen verdeeld zijn en worden deze expliciet beschreven. Zie (Mistriotis, Arcidiacono et al. 1997) en (Boulard, Kittas et al. 2002) voor een meer gedetailleerde beschrijving van deze aanpak bij de beschrijving van het kasklimaat.

De benadering is gebaseerd op de volgende partiële differentiaalvergelijking die de wet van behoud van energie en massa niet alleen in de tijd maar ook in de 3-dimensionale ruimte beschrijft:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \varphi \vec{v} = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\varphi} \vec{\nabla} \varphi) + S_{\varphi} \quad (7)$$

waarin \vec{v} is een snelheidsvector, Γ_{φ} is een diffusiecoëfficiënt en S_{φ} is een bron term. Het symbool φ beschrijft de concentratie van het getransporteerde medium. In de massabalans vergelijkingen correspondeert φ met de dichtheid ρ . Wordt een stromingspatroon beschreven dan correspondeert φ met $\rho \vec{v}$. Dan bestaat vergelijking (7) uit drie vergelijkingen, de drie zogenaamde Navier-Stokes vergelijkingen die gerelateerd zijn met de drie coördinaten in de ruimte. Als energie wordt getransporteerd, wordt een extra vergelijking toegevoegd waarin φ correspondeert met $\rho c_p T$, en wordt het temperatuur veld beschreven.

De partiële differentiaal vergelijking (7) wordt numeriek opgelost. Deze techniek wordt CFD (Computational Fluid Dynamics) genoemd. In de meest gebruikte benadering wordt de ruimte verdeeld in eindige volumes en wordt vergelijking (7) gediscretiseerd in zowel ruimte als tijd. Invloeden van windsnelheid, windrichting, temperatuur, RV en CO_2 buiten de kas worden als randvoorwaarden in de oplossing meegenomen. Oplossen van dit stelsel vergelijkingen is

rekentechnisch nog steeds een tijdrovende aangelegenheid. Pas recent zijn echt drie-dimensionale modelbeschrijvingen van een kas op deze wijze doorgerekend door (Campen and Bot 2003). Eerdere onderzoeken reduceerden het probleem tot een twee-dimensionale doorsnede in het horizontale of verticale vlak (Mistriotis, Arcidiacono et al. 1997).

Ook in CFD modellen worden parameters gebruikt die moeten worden gecalibreerd. Sommige kunnen worden geschat op basis van fysische inzichten of empirische kennis. Calibratie experimenten zijn in de literatuur niet gevonden.

5.2 Meting van het ventilatievoud van kassen

Ventilatie, dat wil zeggen luchtuitwisseling door een opening tussen twee ruimtes, wordt veroorzaakt door drukverschillen over de opening tussen die twee ruimtes. Dit drukverschil veroorzaakt een luchtstroming door de opening. De luchtstroom door de opening resulteert vervolgens in een effectieve uitwisseling van lucht tussen de twee ruimtes.

Daarmee zijn er drie aanknopingspunten om met meetinstrumenten grip te krijgen op het fenomeen ventilatie.

5.2.1 Meting van drukverschillen

Het drukverschil tussen de buitenlucht en het binnenklimaat kan worden gemeten met een drukverschilmeter zoals beschreven in (Boulard, Meneses et al. 1996). Zij verrichtten een drukverschilmeting op vloerniveau tussen één punt in de kas en één punt buiten de kas. Hoewel deze meting wel enig inzicht gaf in het drukverschil tussen de ruimte binnen en de buitenlucht, gaf de meting geen inzicht in de verdeling van de druk over het gehele gebouw. De instrumentatie is kostbaar en gevoelig voor storingen en vindt in het kasventilatie onderzoek geen toepassing.

5.2.2 Meting van luchtbeweging

Luchtbewegingen in kassen en door de ruimte kunnen op verschillende manieren worden gemeten of gevisualiseerd:

1. *Sonic anemometry*,
2. *Laser Doppler anemometry (LDA)*,
3. *Particle Image Velocimetry (PIV)*.

Sonic anemometry is gebaseerd op het principe dat de voortplantingssnelheid van geluid toeneemt als de lucht beweegt in de richting van het geluidssignaal en *vice versa*. Een dergelijk instrument is commercieel verkrijgbaar en kan worden gebruikt om luchtsnelheden in ramen te kwantificeren zoals beschreven in (Boulard, Papadakis et al. 1997). Zij plaatsten een anemometer op een rail bij de opening van een continue nokluchting van een mediterrane kas en verplaatsten het in de korte tijd over deze rail langs de ventilatieopening om zodoende inzicht te krijgen in de effectieve in- en uitstroom door deze opening. Zij konden op deze wijze aantonen dat op sommige plaatsen lucht door de ramen naar binnengaat en op andere plaatsen een netto luchtstroom de kas verlaat. Met aanvullende metingen konden zij aantonen dat de totale luchtstroom die door de ramen gaat

groter is dan de effectieve luchtstroom die daadwerkelijk tot uitwisseling met het binnenklimaat komt. Zij stelden op deze wijze een effectieve ventilatie van 0.60 vast. Deze meetmethode geeft dus geen inzicht in de effectieve uitwisseling met het binnenklimaat. Een ander nadeel is dat het meetinstrument in het stromende medium moet worden geplaatst en daarmee de stroming kan beïnvloeden.

Laser Doppler Anemometry (LDA) meet de verplaatsing van geïnjecteerde deeltjes in de luchtstroom door middel van reflectie van een laserstraal. De methode wordt vooral gebruikt om stromingen in een 2-dimensionaal vlak te kwantificeren. In een drie-dimensionaal vlak kan ook gemeten worden maar dat is een tijdrovende aangelegenheid. Het is niet mogelijk deze techniek in een kas met planten toe te passen omdat planten de laserbeam tegen houden. Zie (Lamrani, Boulard et al. 2001) voor meer details.

Particle Image Velocimetry (PIV) is vergelijkbaar met LDA met dien verstande dat de verplaatsing van deeltjes wordt gemeten met standaard camera's in het zichtbare licht. Deze techniek is toegepast bij stromingsonderzoek van (Montero, Hunt et al. 2001) aan een schaalmodel van een kas in een watertank.

5.2.3 Meting van het ventilatievoud met tracer gassen

Het ventilatievoud is een maat voor de effectieve uitwisseling van lucht van de kas met zijn omgeving. Deze effectieve uitwisseling kan worden gemeten met behulp van de zogenaamde tracer-gas techniek. Deze techniek is gebaseerd op de massabalans van een natuurlijke component (zoals energie, vocht of CO₂) of een toegevoegde component (zoals bijvoorbeeld lachgas):

$$V \frac{dc_{in}}{dt} = -Q(t)(c_{in}(t) - c_{out}(t)) \pm F_{in}(t) \quad (8)$$

waarin ϕ is het ventilatievoud, V is het kasvolume, t is de tijd, c_{in} en c_{out} zijn de concentraties tracergas in en buiten de kas en $F_{in}(t)$ is de doseerflux van het tracergas in de kas.

Deze techniek is al vaak toegepast voor het kwantificeren van het ventilatievoud van kassen, zie (Bot 1983; Jong 1990; Boulard, Meneses et al. 1996; Baptista, Bailey et al. 1999; Campen and Bot 2003). In (Sherman 1990) wordt een uitgebreid overzicht gegeven van de diverse aspecten van deze techniek.

De tracergasmethode wordt grofweg op twee manieren toegepast. In de eerste methode wordt tracergas gedoseerd tot een hoge concentratie. Als die is bereikt wordt het verval van die concentratie in de tijd gemeten, waaruit het ventilatievoud kan worden berekend. Deze methode is relatief eenvoudig te implementeren, maar vereist wel dat tijdens de concentratieval die bij lage gemiddelde ventilatiesnelheden enige tijd in beslag kan nemen, de externe condities constant zijn. Dat is in de tuinbouw praktijk niet het geval. De raamstand mag niet veranderd worden en de

windsnelheid kent in Nederland aanzienlijk korte termijn fluctuaties. Daardoor geeft deze meting in het beste geval een schatting van een gemiddelde ventilatievoud over een langere periode.

Bij de tweede methode wordt tracergas in de kas gepompt tot een vooraf ingestelde concentratie en wordt met een regelaar getracht die concentratie constant te houden. De effectieve ventilatievoud is dan gelijk aan de doseersnelheid van tracergas. Deze heeft als belangrijk nadeel dat een flink stuk instrumentatie geïmplementeerd moet worden om het tracergas op de gewenste concentratie te houden. Ook kost deze aanpak veel tracergas.

Wat is een goed tracergas? Een tracergas mag niet giftig zijn voor mens en plant, moet inert zijn, mag het proces op geen enkele wijze beïnvloeden, moet makkelijk te onderscheiden zijn van andere natuurlijk aanwezige componenten, moet ten aanzien van ventilatie dezelfde eigenschappen hebben als lucht en moet makkelijk en goedkoop meetbaar zijn. Een veel gebruikt tracergas is lachgas, N_2O . Dit tracergas voldoet voor onderzoeksdoeleinden aan alle criteria maar zal in de tuinbouwpraktijk niet snel toegepast worden. In hoge concentraties is het giftig voor mens en dier, het is niet goedkoop en kan alleen met relatief kostbare instrumenten worden gemeten. In enkele onderzoeken specifiek gericht op het meten van het ventilatievoud van kassen zijn zowel CO_2 , vocht en zelfs voelbare warmte (via luchttemperatuur) als tracers gebruikt om het ventilatievoud te meten. De instrumentatie voor meting is in alle kassen aanwezig. Nadeel is wel dat de balansen van deze tracergassen door bijvoorbeeld het gewas (fotosynthese, verdamping) of door het buitenklimaat worden beïnvloed (denk aan zonnestraling). Als deze grootheden echter kunnen worden gekwantificeerd met behulp van een meting of modellen dan biedt dat wel weer een mogelijkheid het ventilatievoud te schatten, zie (Fernandez and Bailey 1992; Boulard and Draoui 1995; Teitel and Tanny 1999; Dayan, Dayan et al. 2004). Vergelijking met tracergasmetingen met lachgas toonde aan dat dit in wezen een goede aanpak is. Maar de uitvoering in eerder genoemde onderzoeken kende een paar nadelen. Ofwel de gangbare procesbesturing werd sterk beïnvloed. In (Teitel and Tanny 1999) werden de ramen een langere tijd gesloten om vocht en warmte in de kas op te laten lopen voor een klassieke concentratieverval meting op het moment dat de ramen werden geopend. Dit experiment kon daarom alleen in de ochtend worden uitgevoerd om gewasschade te voorkomen. Daardoor werd ook maar één meting op dagbasis verkregen. De overige onderzoekers verkregen ventilatieschattingen op uurbasis en namen daarbij aan dat het klimaat in de kas gedurende een uur niet veranderd. Dat is Nederlandse omstandigheden niet correct en kan tot fouten leiden. Los nog van het feit dat een ventilatieschatting op uurbasis wellicht al interessant is, maar het aantrekkelijker is op iets kortere termijn een schatting te kunnen genereren. Het is interessant om waar te nemen dat geen van de beschreven onderzoeken expliciet gebruik van de dynamica van het kasklimaat. De reden daarvan is onduidelijk. In hoofdstuk 3 zal worden getoond dat daar een interessante kans ligt om op basis van metingen van het kasklimaat op korte termijn schattingen te genereren van het ventilatievoud zonder de procesgang in de kas te beïnvloeden.

5.3 Conclusies

Het ventilatieproces is op hoofdlijnen zeer goed in kaart gebracht en kan middels modellen worden beschreven. De algemene en praktische toepasbaarheid blijft echter een probleem omdat

een aantal modelparameters te sterk afhankelijk zijn van grootte, ligging en geometrie van de kas en obstakels in de omgeving van de kas. Kwantificeren van deze parameters lijkt niet eenvoudig te zijn.

Een eenvoudige en goedkope methode waarmee in de tuinbouwpraktijk het ventilatievoud kan worden gemeten lijkt niet te bestaan. Ofwel de instrumentatie is complex of kostbaar of de gebruikte middelen zijn giftig. Ook beïnvloeden de meeste methoden de procesgang in de kas of geven een schatting van het ventilatievoud over een langere en minder interessante tijdspanne. Een kans ligt in het gebruik van CO₂, vocht en voelbare warmte als tracers. Die worden standaard gemeten in de kas en kunnen ook informatie verschaffen over het ventilatievoud. Onderzoek heeft aangetoond dat daarmee goede resultaten kunnen worden verkregen in vergelijking met tracergasmetingen. Maar geen van de beschreven onderzoeken leverde een methode op waarmee op korte termijn, d.w.z. binnen een uur, een schatting van het ventilatievoud kan worden gegenereerd zonder de procesgang te beïnvloeden. In dit onderzoek is een nieuwe methode uitgewerkt, die op basis van standaard metingen van het kasklimaat en gebruikmakend van een dynamische energiebalans, een schatting van het ventilatievoud kan genereren, zonder de procesgang te beïnvloeden. De theoretische achtergronden worden bijlage 2 beschreven. De praktische uitwerking staat in bijlage 3.

6 Bijlage 2. Het schatten van het ventilatievoud van kassen: theorie

6.1 Inleiding

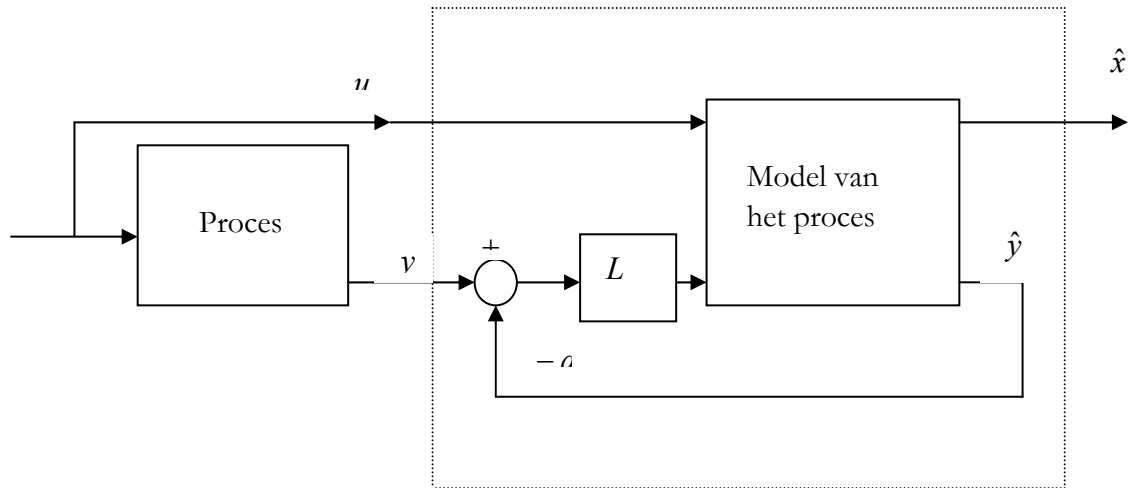
Uit bijlage 1 is gebleken, dat er geen eenvoudige en goedkope methode bestaat waarmee in de tuinbouwpraktijk het ventilatievoud kan worden gemeten. Ofwel de instrumentatie is complex of kostbaar of de gebruikte middelen zijn giftig. Ook beïnvloeden de meeste methoden de procesgang in de kas of geven een schatting van het ventilatievoud over een langere en minder interessante tijdspanne. In dit onderzoek wordt een nieuwe methode uitgewerkt, die op basis van standaard metingen van het kasklimaat en gebruikmakend van een dynamische energiebalans, een schatting van het ventilatievoud kan genereren, zonder de procesgang te beïnvloeden. De theoretische achtergronden worden in dit hoofdstuk beschreven.

Klassieke regeltechniek houdt zich bezig met het ontwerpen van regelaars, die de uitgang van het proces terugkoppelen naar de ingang van het proces, om een bepaald doel te bereiken. Een voorbeeld is bijvoorbeeld de cruise control in een auto. Het verschil tussen ingestelde en werkelijke snelheid, wordt via een regelaar naar het gaspedaal gestuurd. Echter de uitgang van het proces beschrijft in het algemeen niet het complete proces, dat is gekarakteriseerd door zijn zogenaamde toestanden. Bij het voorbeeld van de cruise control zijn de toestanden van het proces rijden, zowel de afgelegde afstand als de snelheid. Als men de toestanden van een proces kent, is het beter de toestanden terug te koppelen, dan alleen de uitgang. Dit is zogenaamde toestandsterugkoppeling. In de jaren zestig van de vorige eeuw, werd de vraag gesteld, als men de uitgang van een proces meet en men kent de ingang van het proces, is het dan mogelijk om een toestandsschatter te ontwerpen, zodanig, dat als men deze schatter gebruikt in toestandsterugkoppeling in plaats van de echte toestand, het geregelde systeem soortgelijke eigenschappen heeft als het geregelde systeem met de originele toestandsterugkoppeling. Deze toestandsschatter werd een waarnemer genoemd.

6.2 Toestandswaarnemers

Een waarnemer kan opgevat worden als een intelligente sensor, het gebruikt alle informatie over het proces en samen met de bekende ingang en de gemeten uitgang van het proces, produceert het een schatting van de toestand van het proces. De termen software sensor en soft-sensor worden ook gebruikt.

Een toestandswaarnemer wordt opgebouwd uit een model van het proces, samen met een correctieterm, die bestaat uit een terugkoppellus, die de toestandsschatting corrigeert, door een versterkingsfactor L (de waarnemer gain), die werkt op de fout tussen de uitgang van het proces en geschatte uitgang. Schematisch is dit weergegeven in onderstaand figuur (Fig. 6.1).



Figuur 6.1. Toestandswaarnemer voor een proces.

De waarnemer kan zelf ook weer als proces of systeem opgevat worden, het is een dynamisch systeem, met als ingangen u en y (de ingang en de uitgang van het oorspronkelijke proces) en het heeft als uitgang, de geschatte toestand van het proces.

Indien het proces lineair is, dan kan, onder milde voorwaarden, L zodanig worden gekozen dat de fout tussen de toestand x van het proces en de geschatte toestand \hat{x} uiteindelijk naar nul gaat. De snelheid waarmee de fout naar nul gaat, is onder milde voorwaarden op het proces, vrij te kiezen, door de ontwerper van de waarnemer (Luenberger 1966; Luenberger 1971).

6.3 Het ventilatieproces als dynamisch systeem

De energiebalans voor een tuinbouwkas, onder een aantal aannames en vereenvoudiging, leidt tot de volgende dynamische vergelijking voor het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur, ΔT , (Henten 1994):

$$(6.1) \quad \frac{d\Delta T}{dt} = c_1 (Q_{\text{heating}} - Q_{\text{ventilatie}} - Q_{\text{kasdek}} + Q_{\text{straling}})$$

Hierin zijn Q_{heating} , $Q_{\text{ventilatie}}$, Q_{kasdek} , en Q_{straling} respectievelijk de warmtetoevoer via het verwarmingsnet, het energieverlies via de ventilatie, energieverlies via het kasdek en de energietoevoer als gevolg van de straling van de zon. Hierbij kan $Q_{\text{ventilatie}}$ geschreven worden als, $c_1 c_2 \phi_{\text{ventilatie}} \Delta T$, waarbij $\phi_{\text{ventilatie}}$ de ventilatieflux is. Omdat het gaat om het schatten van de

ventilatieflux, kan de dynamische vergelijking vanuit een systeemtheoretisch aspect als volgt worden beschreven:

$$(6.2) \quad \frac{d\Delta T}{dt} = f(\Delta T, t) + c_1 c_2 \phi_{\text{ventilatie}} \Delta T$$

In deze vergelijking representeert de term $f(\Delta T, t)$ de warmtetoevoer via het verwarmingsnet, energieverlies via kasdek en warmtetoevoer als gevolg van straling. Deze term is alleen afhankelijk van ΔT en gemeten en bekende grootheden als buistemperatuur en globale straling. De ventilatieflux, $\phi_{\text{ventilatie}}$, in vergelijking (6.2) wordt vanuit een systeemtheoretisch gezichtspunt gezien als een ingang, die het systeem aandrijft. De verschiltemperatuur ΔT , wordt de toestand genoemd. Definieer $x = \Delta T$ en $u = \phi_{\text{ventilatie}}$, dan wordt vergelijking (6.2):

$$(6.3) \quad \frac{dx}{dt} = f(x, t) + bxu$$

De uitdrukking xu , een zogenaamde kruisterm tussen de toestand en de ingang, noemt men een bilineaire term, dit is een speciaal geval van een niet-lineaire term. Als in vergelijking (6.3) de term $f(x, t)$ lineair is, noemt men het systeem beschreven door (6.3) bilineair. In de volgende secties wordt het abstracte model, beschreven door vergelijking (6.3) als voorbeeld gebruikt.

6.4 Waarnemers voor niet-lineaire systemen

In het algemeen zullen systemen niet-lineair zijn, d.w.z. als de ingang in amplitude twee keer zo groot wordt, zal bij een niet-lineair systeem de amplitude van de uitgang niet twee keer zo groot zijn. Echter het is ook in dit geval mogelijk een waarnemer te definiëren. In het lineaire geval is de waarnemer gain L een constante, of in het geval van meer dan één uitgang en meer dan één toestand een constante matrix. In het niet-lineaire geval ziet de constructie van de waarnemer er weer uit als in Fig. 1, maar nu is de waarnemer gain een niet-lineaire functie van de geschatte toestand: $L = l(\hat{x})$ (Dochain 2003; Dochain 2003). Ook hier geldt weer, dat als de waarnemer gain $L = l(\hat{x})$ goed wordt gekozen, de fout tussen de echte toestand en zijn schatting uiteindelijk weer naar nul gaat. Waar in het lineaire geval het niet zo moeilijk is om de waarnemer gain uit te rekenen, is dit in het niet-lineaire geval veel moeilijker en bestaat geen alles omvattende theorie, die alle niet-lineaire gevallen kan behandelen. Eén van de mogelijkheden is om een zogenaamde liberaliserende uitgangsterugkoppeling te gebruiken.

Als ter illustratie, verondersteld wordt dat de enige niet-lineariteit een product is van de ingang u en de toestand x (beide scalair, dus de uitgang y is gelijk aan x), dan kan men een nieuwe ingang definiëren, $v = xu$. Omdat verondersteld is dat $y = x$, zien we dat we v kunnen construeren en dat v een functie is van de uitgang, vandaar de term uitgangsterugkoppeling. Met deze nieuwe ingang v is het systeem lineair geworden en kan de waarnemer gain met de lineaire theorie bepaald worden. Als deze waarnemer bepaald is, vult men voor v yu in, en heeft men een waarnemer voor het niet-lineaire systeem.

6.5 Waarnemers voor de onbekende ingang van een systeem

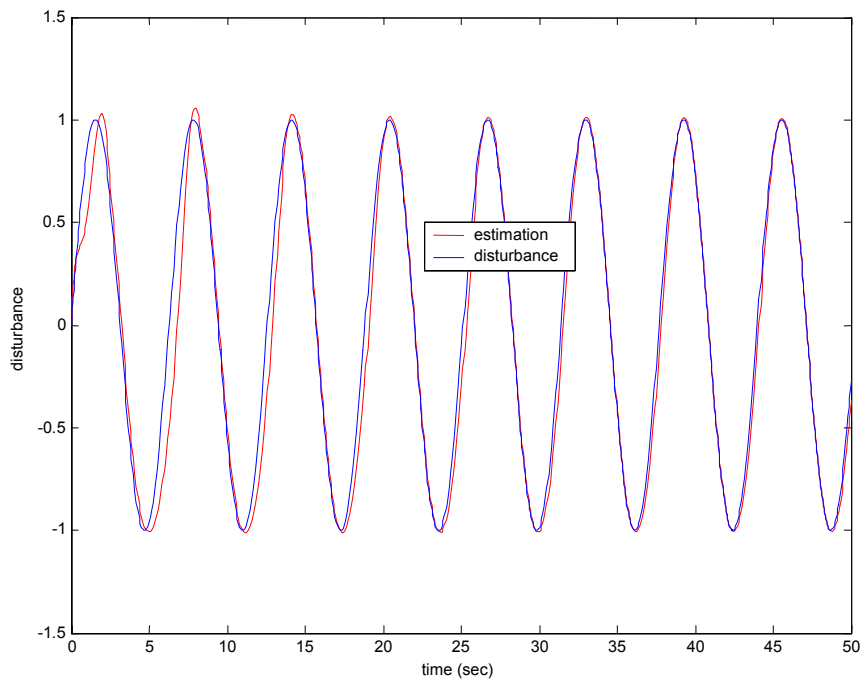
Tot nu toe hebben we gekeken naar het schatten van de toestand van een systeem. Voor het probleem van het bepalen van de ventilatieflux in tuinbouwkassen, kunnen we deze methode niet direct gebruiken, want de ventilatieflux is geen toestand van het proces kasklimaat, maar een ingang, de ventilatieflux drijft het proces namelijk aan. De vraag is nu of de theorie van toestandswaarnemers uitgebreid kan worden naar het waarnemen van onbekende ingangen van het proces, de zogenaamd Onbekende Ingangs Waarnemer (OIW), in het engels de zogenaamde Unknown Input Observer (UIO). Onbekende ingangen zijn in het algemeen verstoringen op het systeem, aangezien de regelingen natuurlijk bekend zijn. Bij tuinbouwkassen ligt het iets anders, de ventilatieflux is op zichzelf onbekend, maar wordt door de klimaatregeling beïnvloed door de raamstand. Voorlopig wordt de ventilatieflux beschouwd als een externe verstoring op het systeem kasklimaat. In de toekomst kan men doordat men de ventilatieflux kan schatten, deze schatting opvatten als een meting en vervolgens voor de raamstand een setpointregeling opzetten, waarbij de regeling het verschil tussen “gemeten” ventilatieflux en gewenste ventilatieflux teruggekoppeld naar de raamstand.

De meest bekende methode om een onbekende ingang u te schatten, is het model van het systeem, beschreven door differentiaalvergelijkingen, uit te breiden met een nieuwe vergelijking:

$\frac{du}{dt} = 0$. Wat men in feite doet is een nieuwe toestand introduceren, namelijk de onbekende u .

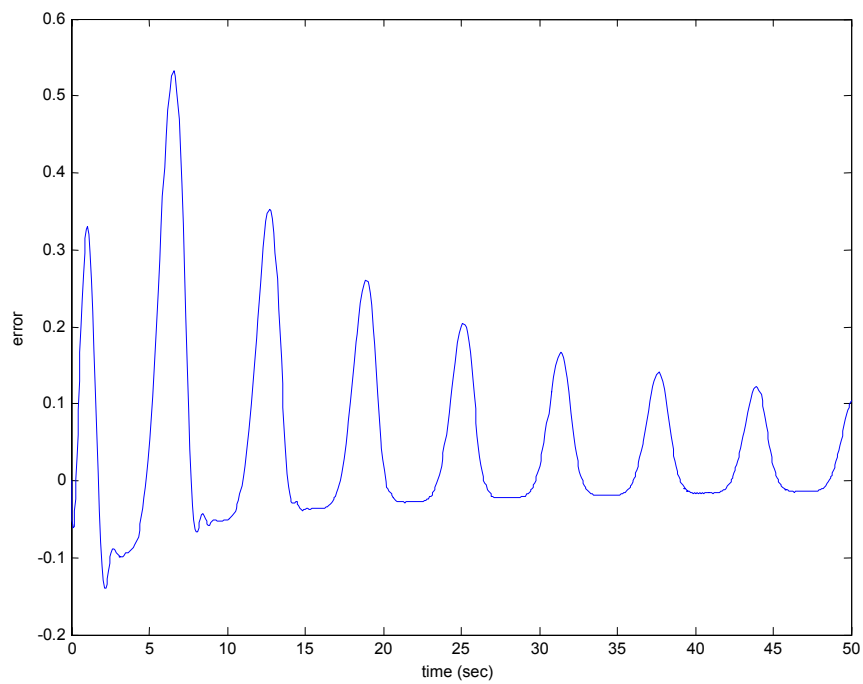
Omdat in wezen verondersteld wordt dat u constant is, zal deze methode alleen werken voor langzaam veranderende ingangen u .

Voor een simpel voorbeeld, gebaseerd op vergelijking (6.3), waar de niet-lineariteit bestaat uit een zogenaamde kruisterm tussen ingang en toestand (xu), is een OIW gemaakt, zonder gebruik te maken van een linearisatie door uitgangsterugkoppeling, maar door te kiezen voor een constante waarnemer gain. Als onbekende ingangssignaal is gekozen voor een periodiek signaal met periode van 2π seconden.



Figuur 6.2. De onbekende ingang (verstoring) en zijn schatting.

Uit Fig. 6.2 blijkt, dat de waarnemer de onbekende ingang vrij snel en vrij goed volgt. In Fig. 6.3 is de fout tussen de onbekende ingang en zijn schatting weergegeven.



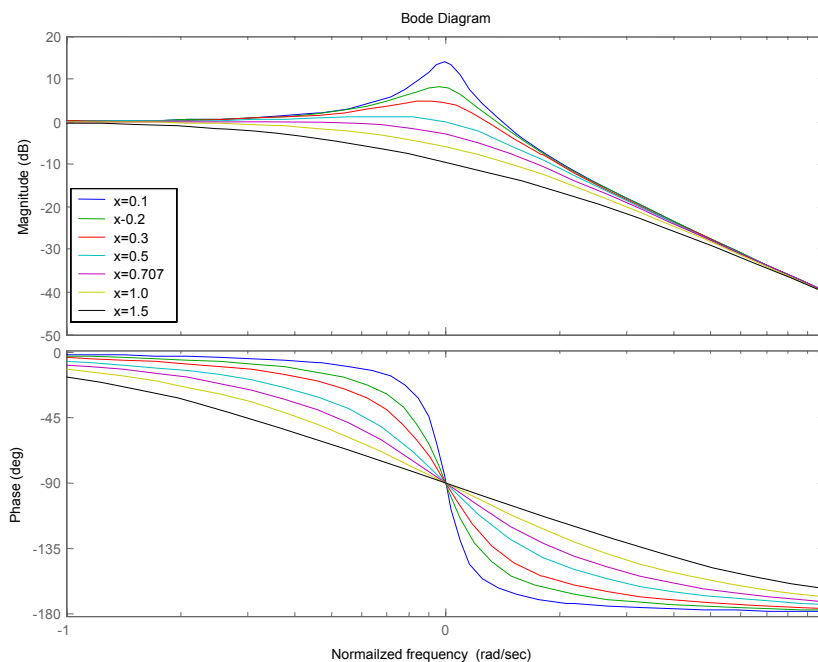
Figuur 6.3. De fout tussen de onbekende fout en zijn schatting.

Uit Fig. 6.3 blijkt dat de fout na ongeveer 8 periodes al kleiner is dan 10%.

In dit voorbeeld is de waarnemer gain, door trial en error zo gekozen, dat het resultaat acceptabel is. Om enig inzicht te krijgen hoe de waarnemer gain gekozen moet worden, is gekeken naar een lineair scalair systeem, met één onbekende ingang. De waarnemer gain is in dit geval een

constante twee bij één matrix $L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}$. Met de structuur van een waarnemer en de aanname dat

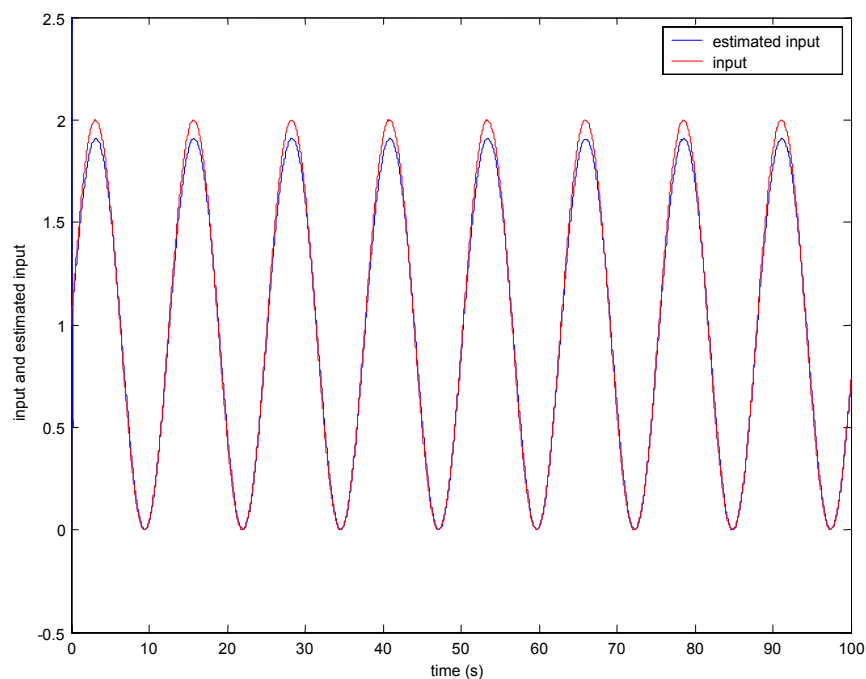
de onbekende ingang u slechts langzaam varieert, kan eenvoudig worden bepaald, dat de overdracht tussen de onbekende ingang u en zijn schatting \hat{u} is gegeven door een tweede orde systeem, met een natuurlijke frequentie van ω_0 en een dempingsfactor ξ . Tussen l_1 , l_2 en ω_0, ξ bestaat een éénduidige relatie. In het ideale geval zou de overdracht tussen u en \hat{u} één zijn, want dan zou de schatting perfect zijn. Om na te gaan wat de overdracht tussen u en zijn schatting \hat{u} is, voor verschillende ω_0 en ξ , is voor het tweede orde systeem in Fig. 6.4 het zogenaamde Bode-diagram weergegeven. Een Bode-diagram is gebaseerd op het feit, dat voor een lineair systeem geldt, dat als de ingang van het systeem een periodiek signaal is met een frequentie ω , de uitgang van het systeem ook weer een periodiek signaal is met dezelfde frequentie ω , maar met een andere amplitude en verschoven in de tijd (een zogenaamde faseverschuiving), voor meer details zie (Nise 1995). In het Bode-diagram is in de bovenste grafiek de versterking (in dB) van de amplitude van de ingang weergegeven als functie van de genormaliseerde frequentie ω/ω_0 , voor verschillende waarden van ξ . In de onderste grafiek is de verschuiving (fase) weergegeven.



Figuur 6.4. Het Bode diagram van het tweede orde OIW voor verschillende tuning parameters

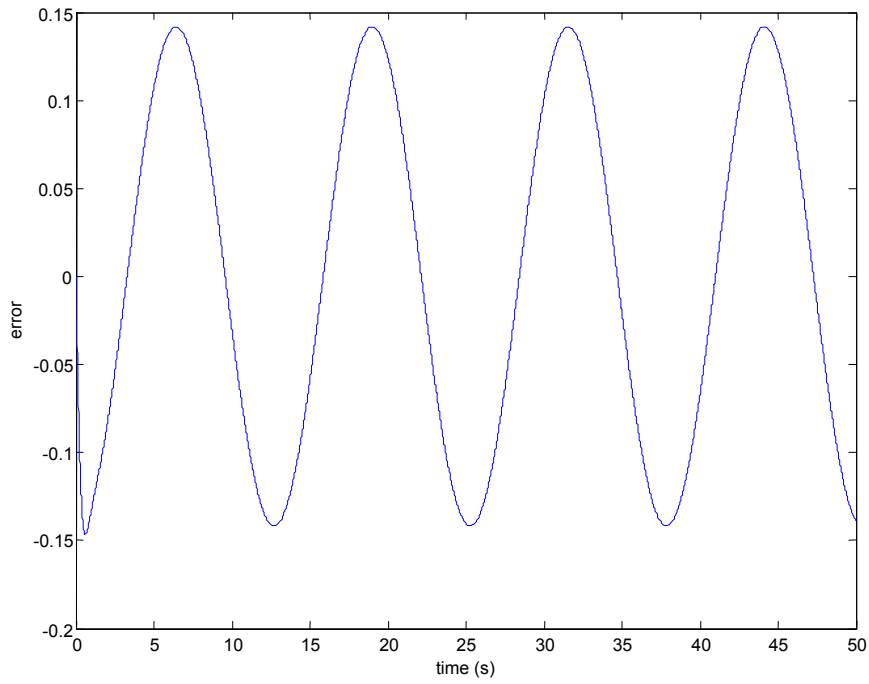
Uit Fig. 6.4 is nu duidelijk te zien dat er twee bronnen van fouten zijn voor de schatting van de onbekende ingang, namelijk ten eerste is uit de bovenste grafiek te zien, dat de amplitudeversterking ongelijk is aan één en ten tweede dat het geschatte signaal behoorlijk gaat achter lopen bij het oorspronkelijke signaal. Voor dit eenvoudige voorbeeld kan men de volgende regel hanteren: kies $\xi = 0.707$ en ω_0 vijf tot tien keer de dominante frequentie van het onbekende ingangssignaal. Vervolgens zijn uit de waarden van ξ en ω_0 de waarden van de waarnemer gain te berekenen.

Als illustratie nemen we een eenvoudig eerste orde systeem, de waarnemer is zo gekozen, dat de natuurlijke frequentie van de waarnemer tien keer de frequentie is van de onbekende ingang. In Fig. 6.5 is het resultaat van deze waarnemer te zien. Ook nu is weer duidelijk dat de waarneming een goede schatting geeft van de onbekende ingang.

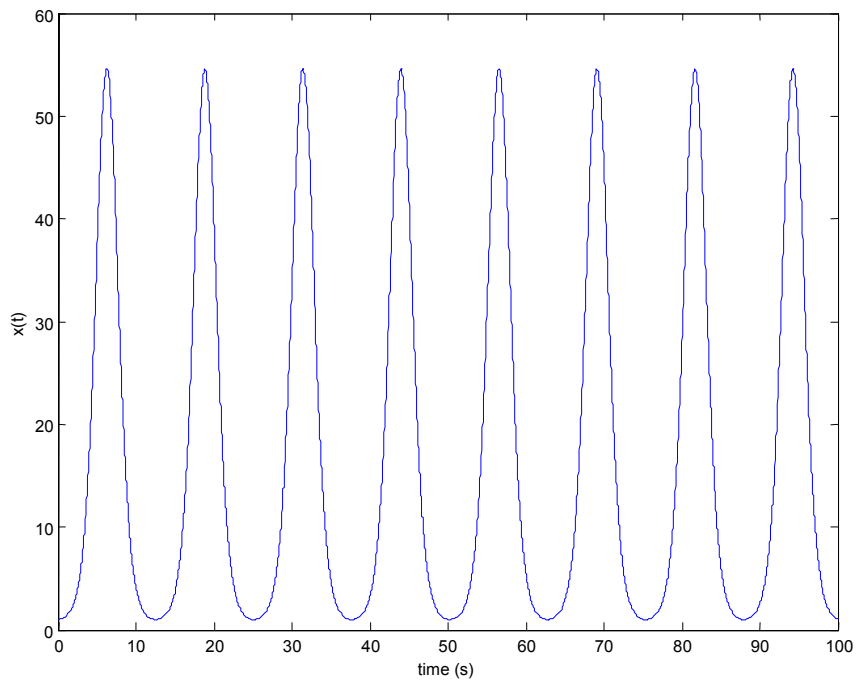


Figuur 6.5. Het onbekende ingangssignaal en zijn schatting.

In Fig. 6.6 is de fout tussen het oorspronkelijke signaal en zijn schatting weergegeven. Uit Fig. 6.6 blijkt dat de fout tussen de onbekende ingang en zijn schatting, voor deze waarnemer, minder is dan 10%.



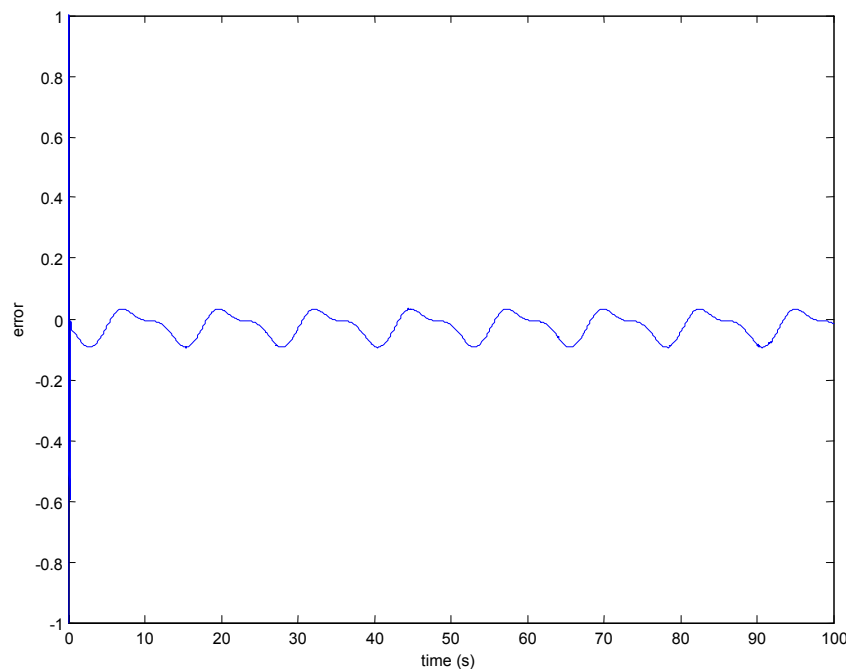
Figuur 6.6 De fout tussen de ingang en zijn schatting.



Figuur 6.7. De toestand van het systeem.

Als volgend voorbeeld passen we de linearisatie door uitgangsterugkoppeling toe, voor een systeem met een kruisterm tussen toestand en ingang. In dit geval blijkt de toestand van het systeem grote waarden te kunnen aannemen, zie Fig. 6.7.

In Fig. 6.8. is de fout tussen de onbekende ingang van het systeem en zijn schatting weergegeven. De maximale amplitude van het onbekende ingangssignaal is 2, dus de schattingsfout is minder dan 5%.



Figuur 6.8. De fout tussen ingang en zijn schatting.

6.6 Toepassing op het schatten van het ventilatievoud

Uitgaande van de energiebalans van een tuinbouwkas, zoals beschreven in paragraaf 6.3. is het dus mogelijk om een dynamische waarnemer te ontwikkelen en daarmee een dynamische schatting voor het ventilatievoud. De extra meting, die hiervoor nodig is de buitentemperatuur, die in de praktijk nu ook wordt gemeten. Met de schatting van het ventilatievoud en de metingen van de buitentemperatuur, straling en buistemperatuur is dan een dynamische schatting te geven van het energieverlies als gevolg van ventileren. Als ook de absolute luchtvochtigheid buiten en de CO_2 -concentratie buiten wordt gemeten, kan met de schatting van het ventilatievoud, ook een dynamische schatting worden gegeven van de vochtuitwisseling en het verlies van CO_2 als gevolg van ventileren.

6.7 Conclusies

Uit de voorbeelden is gebleken, dat het mogelijk is om een (dynamische) schatting te geven voor een onbekende ingang van een proces. Het is hierbij niet noodzakelijk dat het proces wordt beschreven door een lineair model, een niet-lineaire beschrijving mag ook. Een veelbelovende

methode voor het ontwerpen van een waarnemer van de onbekende ingang van een niet-lineair proces is het concept van linearisatie door uitgangsterugkoppeling, waarna vervolgens de lineaire theorie kan worden toegepast. Er zijn ook natuurlijk nog andere methodes, zoals bijv. in (Buwason and Saif 1998), maar deze zijn in het algemeen zeer complex.

7 Bijlage 3. Het schatten van het ventilatievoud van kassen: praktijk

7.1 Inleiding

Zoals in paragraaf 6.3 besproken is, zal de schatter voor het ventilatievoud worden gebaseerd op de energiebalans voor de kas. De keuze voor de vorm van de energiebalans wordt gemaakt op basis van de eis, dat het algoritme voor de schatter zo eenvoudig mogelijk moet zijn, in verband met de instelling van de parameters en toch zodanig dat de balans de werkelijkheid goed weergeeft. De tweede eis voor de keuze van de vorm van de energiebalans, is dat zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van de huidige in de praktijk gemeten grootheden en dat geen kostbare extra sensoren nodig zijn.

7.2 Energiebalans voor een kas

Voor de energiebalans van een kas van het Venlo-type wordt gekozen voor het volgende model (Henten 1994):

$$(7.1) \quad C_{cap,q} \frac{dT_{kas}}{dt} = Q_{pijp} - Q_{vent} - Q_{trans} + Q_{straling}$$

waarbij T_{kas} de kasluchttemperatuur (K) is, $C_{cap,q}$ is de warmtecapaciteit van de kaslucht ($Jm^{-2}K^{-1}$). Q_{pijp} , Q_{vent} , Q_{trans} en $Q_{straling}$ zijn respectievelijk de warmtetoevoer door de verwarmingspijpen (Wm^{-2}), energieverlies als gevolg van de ventilatie door de ramen en als gevolg van de ventilatielek (Wm^{-2}), energieverlies door de transmissie door het kasdek (Wm^{-2}) en de warmtelast als gevolg van de zonnestraling (Wm^{-2}). Deze energietermen worden achtereenvolgens gegeven door:

$$(7.2) \quad Q_{pijp} = c_{pijp,kas} (T_{pijp} - T_{kas})$$

met T_{pijp} (K) de buistemperatuur van het verwarmingssysteem in de kas en $c_{pijp,kas}$ ($Wm^{-2}K^{-1}$) is de warmteoverdrachtscoëfficiënt, uitgedrukt per m^2 bodem.

$$(7.3) \quad Q_{vent} = c_{lucht} \phi_{vent} (T_{kas} - T_{buiten})$$

Hier is c_{lucht} de warmtecapaciteit van lucht ($Jm^{-3}C^{-1}$), ϕ_{vent} de ventilatieflux door ramen en kieren ($m^3s^{-1}m^{-2}$). De ventilatieflux is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, windrichting, windsnelheid, raamopening en raamconfiguratie. Voor de simulaties wordt gebruikt gemaakt van het model beschreven in (Jong 1990). T_{buiten} is de buitentemperatuur.

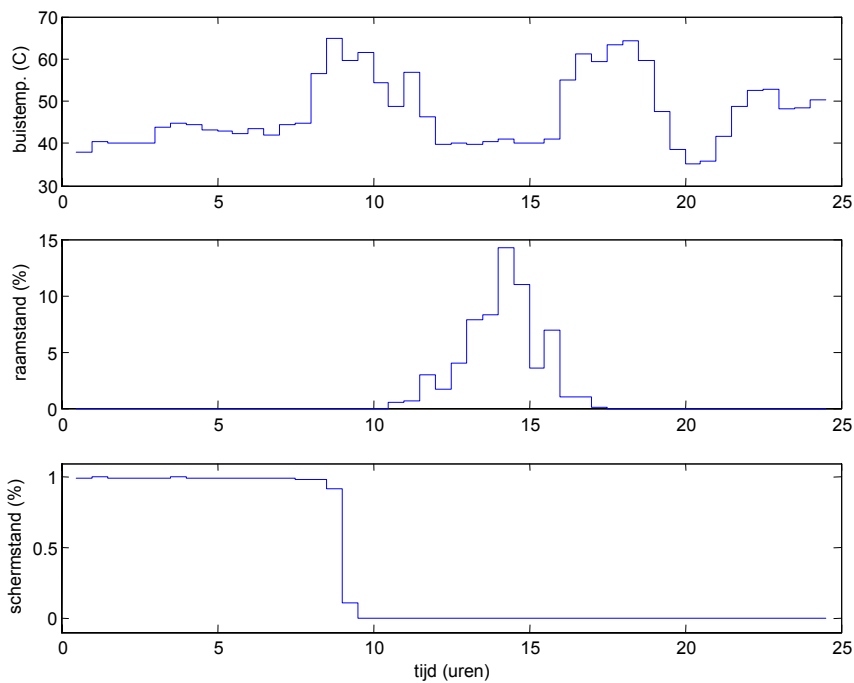
$$(7.4) \quad Q_{trans} = c_{dek} (T_{kas} - T_{buiten})$$

met c_{dek} de warmte overdracht coëfficiënt van het kasdek.

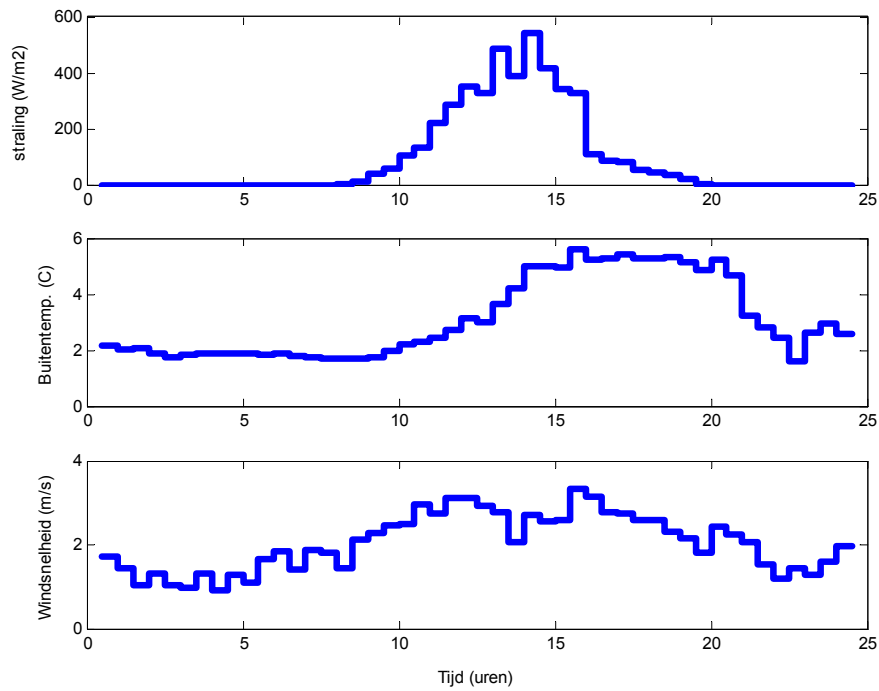
$$(7.5) \quad Q_{straling} = c_{straling} I$$

met $c_{straling}$ de coëfficiënt die aangeeft welke fractie van de globale straling I (Wm^{-2}) bijdraagt aan de warmte last van de kas.

De energiebalans voor de kas, samen met het ventilatiemodel van (Jong 1990) is gesimuleerd, gebruik makend van gemeten data (sturingen en buitenomstandigheden) van een praktijkkas met een vol producerend tomatengewas op dag 71 (12-03-04). Deze gegevens zijn beschikbaar gesteld door PRIVA BV. De sturingen en de buitenomstandigheden zijn weergegeven in figuur 7.1 en 7.2.

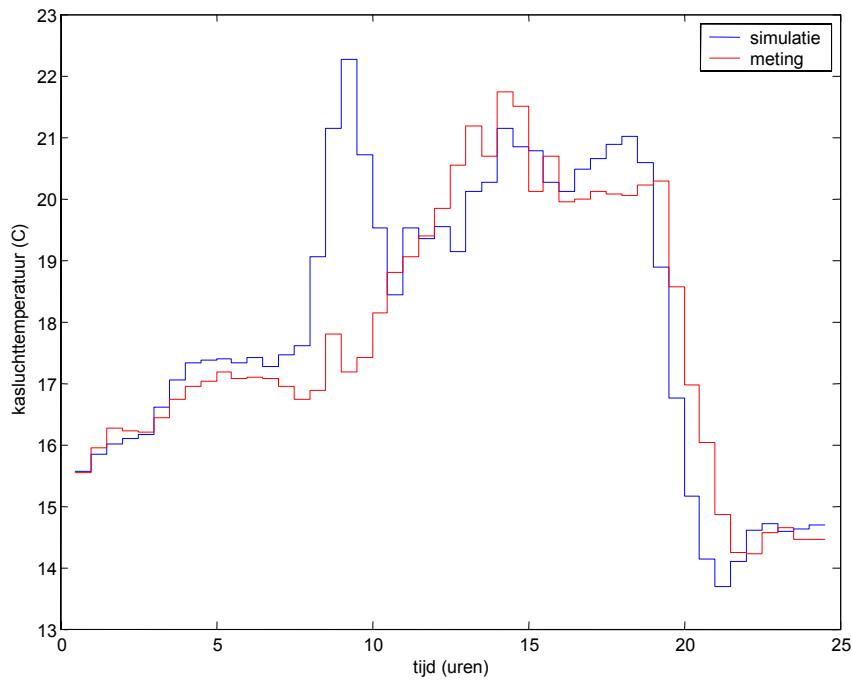


Figuur 7.1. De sturingen op dag 71



Figuur 7.2. De buitenomstandigheden op dag 71

De gesimuleerde kasttemperatuur is daarna vergeleken met gemeten kasttemperatuur. Het resultaat is weergegeven in figuur 7.3.



Figuur 7.3. Gesimuleerde en gemeten kastluchttemperatuur op dag 71.

Er is niet geprobeerd om een perfecte fit van het model op de data te krijgen, dit valt buiten het project en zou tevens het model teveel aanpassen aan het ventilatiemodel van (Jong 1990). De grote afwijking rond 10 uur wordt veroorzaakt door het opentrekken van het scherm (zie figuur 7.1).

7.3 Schatting van het ventilatievoud

Om de schatter voor het ventilatievoud te bepalen wordt de energiebalans volgens vergelijking (7.1) nu geschreven als:

$$(7.6) \quad \frac{dT_{kas}}{dt} = -\frac{c_{pijp,kas} + c_{dek}}{C_{cap,q}} T_{kas} - \frac{c_{lucht}}{C_{cap,q}} (T_{kas} - T_{buiten}) \phi_{vent} + \frac{1}{C_{cap,q}} (c_{pijp,kas} T_{pijp} + c_{dek} T_{buiten} + c_{straling} I)$$

Definiëren we $d(t) = \frac{1}{C_{cap,q}} (c_{pijp,kas} T_{pijp} + c_{dek} T_{buiten} + c_{straling} I)$, $v(t) = c_{lucht} (T_{kas} - T_{buiten}) \phi_{vent}$,

$a = \frac{c_{pijp,kas} + c_{dek}}{C_{cap,q}}$ en $b = \frac{1}{C_{cap,q}}$, dan wordt vergelijking (7.6):

$$(7.7) \quad \frac{dT_{kas}}{dt} = aT_{kas} + bv(t) + d(t)$$

Hierbij is $d(t)$ een gemeten input voor het systeem en de transformatie

$v(t) = c_{lucht} (T_{kas} - T_{buiten}) \phi_{vent}$ heeft ervoor gezorgd dat het niet-lineaire systeem lineair wordt, zie ook paragraaf 6.4. Voor het systeem, beschreven door vergelijking (7.7) kan nu de methode uit paragraaf 6.5 worden toegepast. Uit de metingen blijkt, dat voor de praktijkkas geldt, dat $a = -2.9 \times 10^{-4}$ en $b = -3.3 \times 10^{-5}$.

De schatter voor de ventilatieflux, of beter voor de getransformeerde ventilatieflux wordt gegeven door:

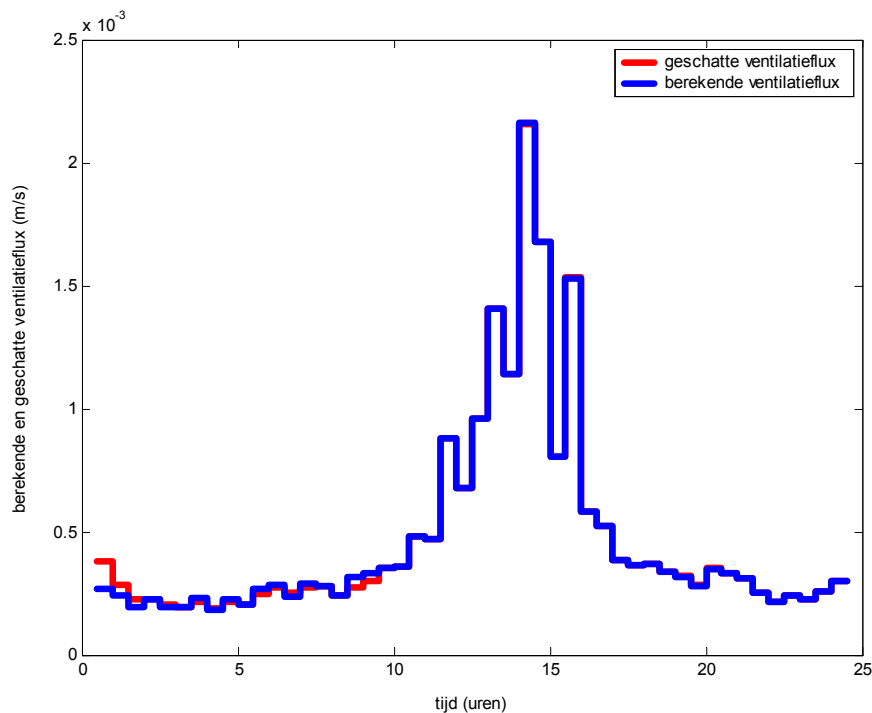
$$(7.8) \quad \begin{aligned} \frac{d\hat{T}_{kas}}{dt} &= a\hat{T}_{kas} + b\hat{v} + d(t) + l_1(T_{kas,gemeten} - \hat{T}_{kas}) \\ \frac{d\hat{v}}{dt} &= l_2(T_{kas,gemeten} - \hat{T}_{kas}) \end{aligned}$$

Hierbij zijn versterkingsfactoren voor de schatter, volgens de methode uit paragraaf 3.5 bepaald als $l_1 = 0.0239$ en $l_2 = -8.3333$.

Uit vergelijking (7.8), die in de praktijk on-line meeloopt met de klimaatcomputer, volgt dan \hat{v} op ieder tijdstip, door \hat{v} terug te transformeren volgt dan een schatting voor de ventilatieflux:

$$(7.9) \quad \hat{\phi} = \frac{\hat{v}}{c_{lucht}(\hat{T}_{kas} - T_{buiten})}$$

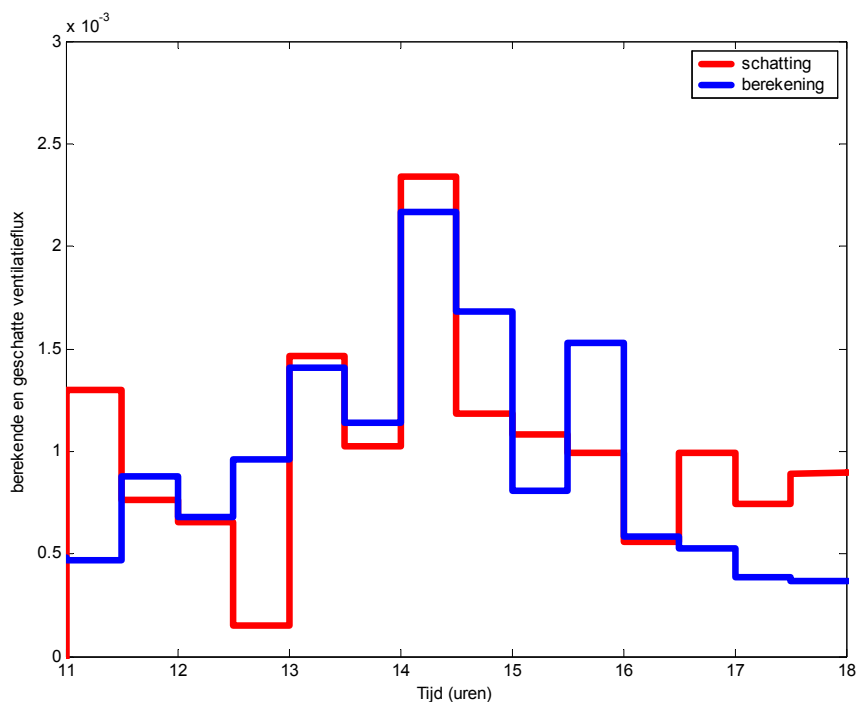
Bovenstaande methode toegepast in een simulatie, waarbij de ventilatieflux in het simulatiemodel is berekend volgens het model van (Jong 1990) geeft het resultaat zoals weergegeven in figuur 7.4.



Figuur 7.4. Berekende en geschatte ventilatieflux op dag 71.

Uit dit figuur blijkt dat in de simulatie situatie de ventilatieflux perfect wordt geschat, de enige afwijking is in het begin, dit wordt veroorzaakt door dat schatter en berekening met verschillende beginwaarden beginnen.

In figuur 7.5 is de geschatte ventilatieflux, op basis van vergelijkingen 7.8 en 7.9 weergegeven, tevens is de ventilatieflux berekend volgens (Jong 1990) weergegeven.



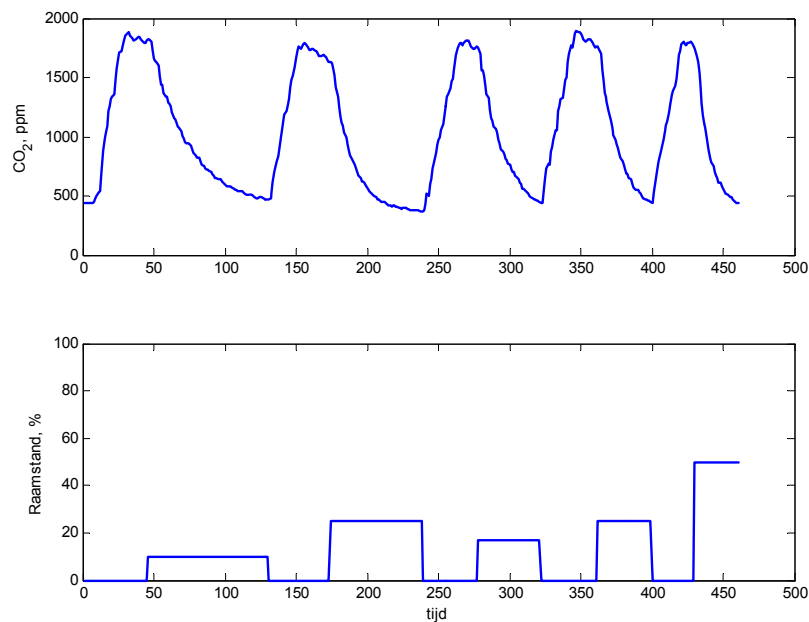
Figuur 7.5. De geschatte en berekende ventilatieflux.

Uit deze figuur blijkt dat de orde van grootte van de met de nieuwe methode geschatte ventilatieflux, in dezelfde orde van grootte is dan de met methode van (Jong 1990) berekende flux. Dit geeft vertrouwen in de correctheid van de nieuwe methode. In de volgende paragraaf zal de nieuwe methode worden vergeleken met een flux bepaald met een tracergasexperiment. De nieuwe schattingsmethode kan opgevat worden als een resultaat van sensor fusion, je gebruikt de gegevens van een viertal sensoren, een stralingssensor en drie temperatuursensoren (pijp, binnen en buiten), om een nieuwe grootheid (ventilatieflux) te bepalen. Anderzijds kun je de nieuwe methode opvatten als een intelligente of soft sensor, je gebruikt namelijk, naast metingen ook kennis, in dit geval de dynamische energiebalans van de kas, om de ventilatieflux te bepalen.

7.4 Verificatie met tracergasexperimenten

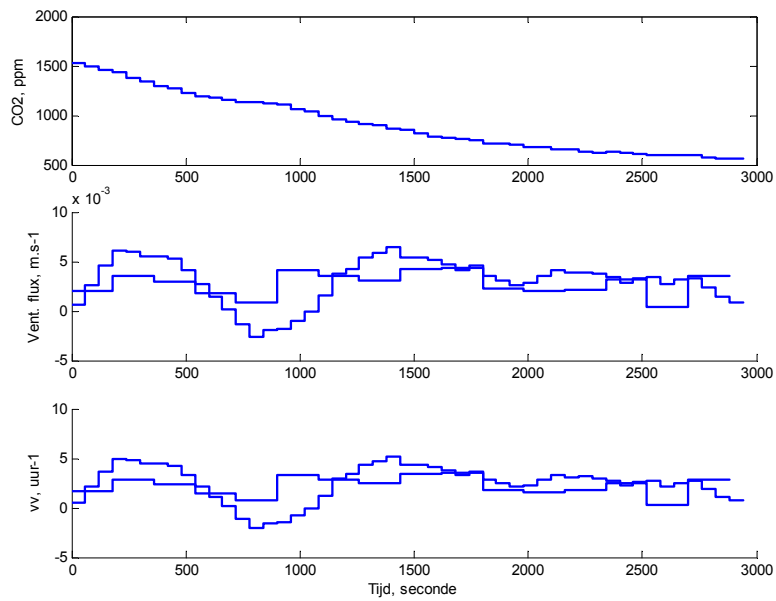
In een kascompartiment van 280 m² van PPO te Naaldwijk is tweemaal een klassiek tracergasexperiment met CO₂ uitgevoerd om het ventilatievoud te schatten en daarmee het ontwikkelde schattingsalgoritme te evalueren. In de kas stond geen gewas. De vloer bestond uit beton. Aangrenzende kascompartimenten waren leeg. In de ruimte was een distributiesysteem voor het doseren van zuivere CO₂ aangebracht. In de nok was een halve nokluchting aangebracht bestaande uit 3 ramen aan de oostzijde en 4 ramen aan de westzijde. Door deze opzet werd de CO₂-concentratie in de kas uitsluitend bepaald de hoeveelheid geïnjecteerde zuivere CO₂ en door ventilatieverliezen door de ramen. Op minuutbasis zijn diverse klimaatgrootheden in de kas (luchttemperatuur, RV, CO₂-concentratie, buistemperatuur, groeinettemperatuur, raamstand) en buiten de kas (globale straling, RV, CO₂, windsnelheid, windrichting) geregistreerd.

Het experiment werd als volgt uitgevoerd. Met gesloten ramen werd in de kas CO_2 geïnjecteerd tot een concentratie van 1500 ppm of hoger. Vervolgens werden de ramen geopend en het verval in de CO_2 -concentratie gemeten. Figuur 7.6 laat tijdens één van deze experimenten de CO_2 -concentratie in de loop van de tijd zien samen met de raamstand. Uit het verval van de CO_2 -concentratie is de ventilatieflux ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) en het ventilatievoud (uur^{-1}) geschat.

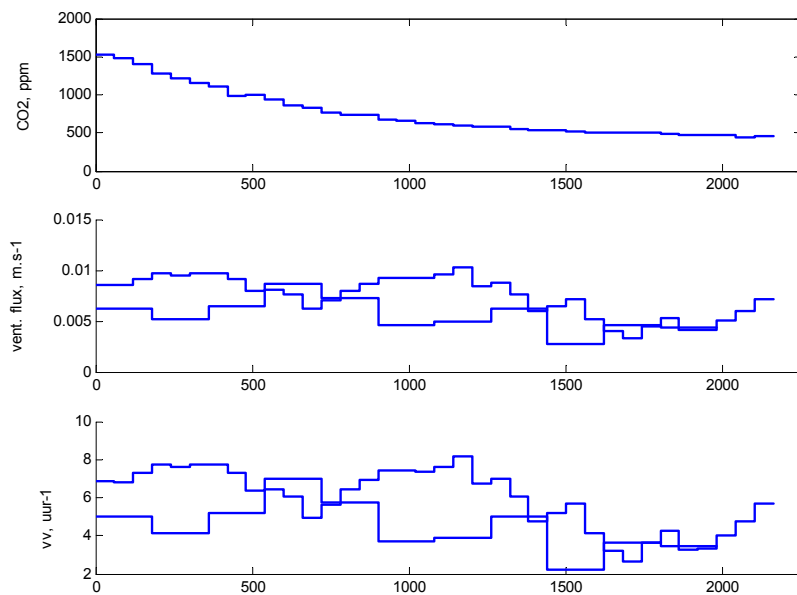


Figuur 7.6. Het verloop van de CO_2 -concentratie en de raamstand aan lijzijde.

De figuren 7.7 en 7.8 laten de uitgewerkte resultaten van een tweetal experimenten zien. Getoond wordt het verval van de CO_2 -concentratie en de schatting van de ventilatieflux op basis van de CO_2 -balans en met behulp van de ventilatieschatter ontwikkeld in dit onderzoek. Ook is het ventilatievoud weergegeven. Voor het schatten van de ventilatieflux op basis van de CO_2 -balans is een methode gebruikt zoals beschreven in (Sherman 1990). Beide methoden leveren qua orde grootte dezelfde schatting van de ventilatieflux op hoewel op sommige punten verschillen van een factor twee kunnen worden gevonden. Wat duidelijk opvalt, is dat de ventilatie een dynamisch proces is met grote fluctuaties in de tijd, ook al blijkt dat niet direct uit de vervalcurve van de CO_2 -concentratie. Zo nu en dan leveren beide schattingsmethoden een negatieve ventilatieflux op. Dit lijkt vooral voor te komen op momenten dat de ventilatie zeer laag is.



Figuur 7.7. Het verval van de CO₂-concentratie bij een raamstand van 10%, alsmede de geschatte ventilatieflux en het ventilatievoud op basis van de CO₂-balans (..) en de energiebalans (-).



Figuur 7.8. Het verval van de CO₂-concentratie bij een raamstand van 25%, alsmede de geschatte ventilatieflux en het ventilatievoud op basis van de CO₂-balans (..) en de energiebalans (-).

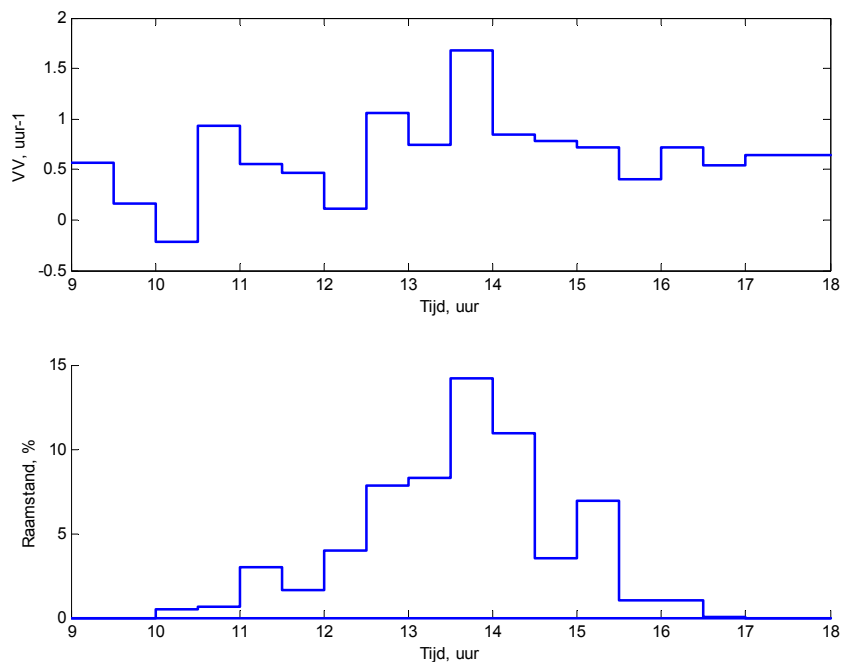
7.5 Het gebruik van de ventilatievoudschatting in de praktijk

De hier beschreven methode geeft een schatting van de effectieve ventilatieflux door de ramen uitgedrukt in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Dat is een moeilijk te interpreteren grootheid. Als het puur gaat om het

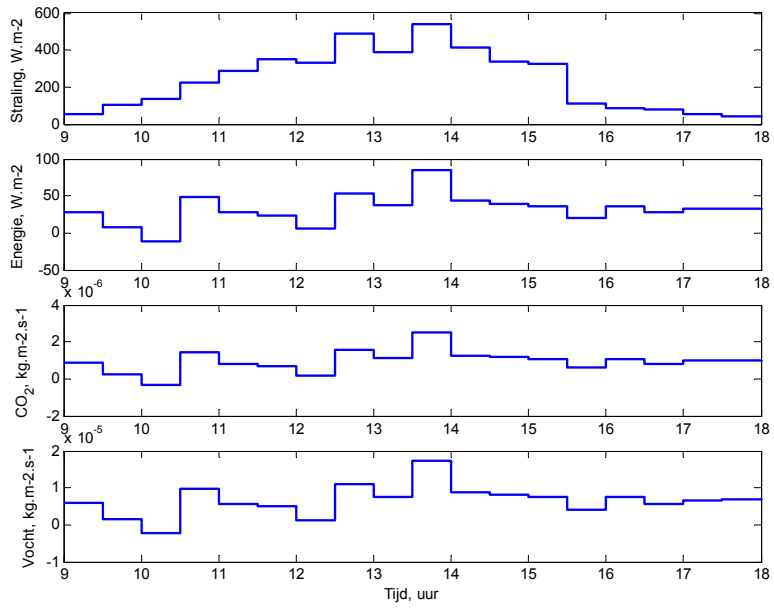
representeren van de ‘verversingssnelheid’ van de kas, dan wordt meestal het ventilatievoud gebruikt. Het ventilatievoud is het aantal malen dat een ruimte per uur volledig wordt ververst en heeft dus de eenheid uur^{-1} . Toch zijn het niet de ventilatieflux of het ventilatievoud die voor de praktijk interessant zijn. Het zijn de daarmee gepaard gaande stromen van voelbare energie, vocht en CO_2 die voor de tuinder van belang zijn.

Voor een drietal dagen (71, 104 en 170) in 2004 zijn in de figuren 7.9 t/m 7.14 het geschatte ventilatievoud bij gemeten raamstanden alsmede het geschatte ventilatietransport van energie (latent en voelbaar), CO_2 en vocht weergegeven.

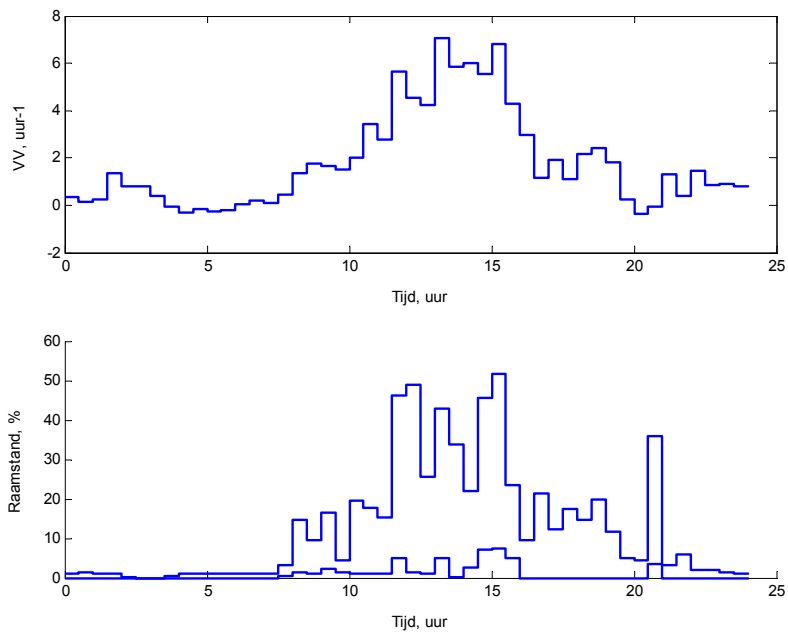
De drie dagen onderscheiden zich van elkaar door het feit dat er weinig (dag 71), middelmatig (dag 104) en veel (dag 170) werd gelucht. De data zijn weergegeven als halfuur gemiddelden.



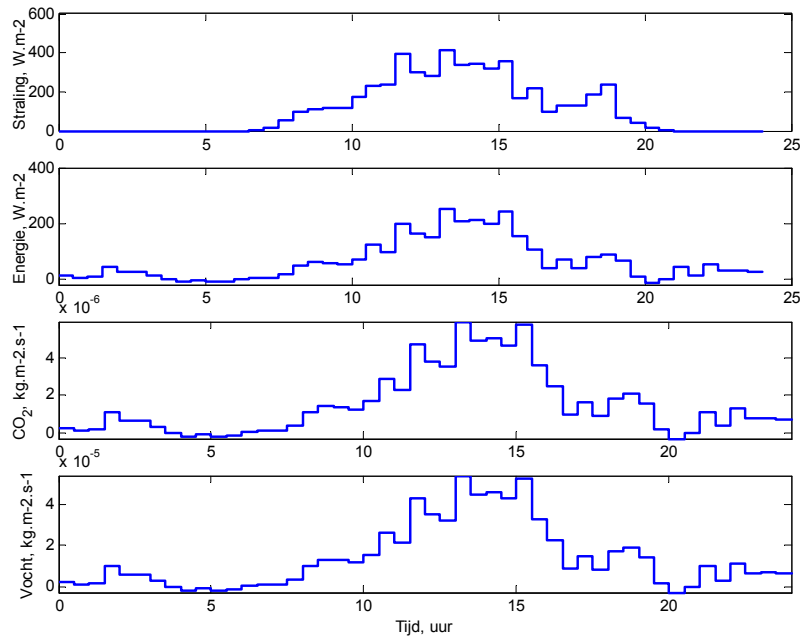
Figuur 7.9 Schatting van het ventilatievoud en de gemeten raamstand (-: oostzijde) op dag 71 in 2004.



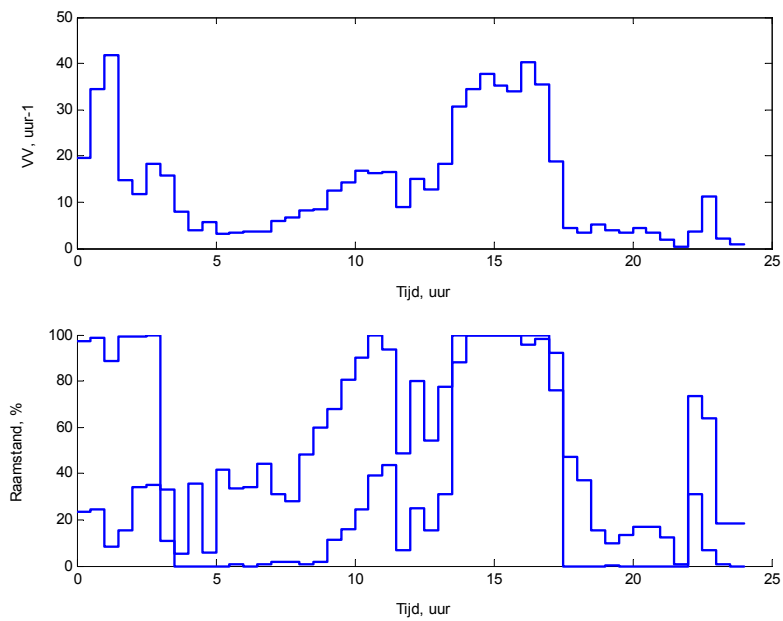
Figuur 7.10. De gemeten globale straling en het geschatte verlies van energie (latent en voelbaar), CO₂ en vocht op dag 71 in 2004.



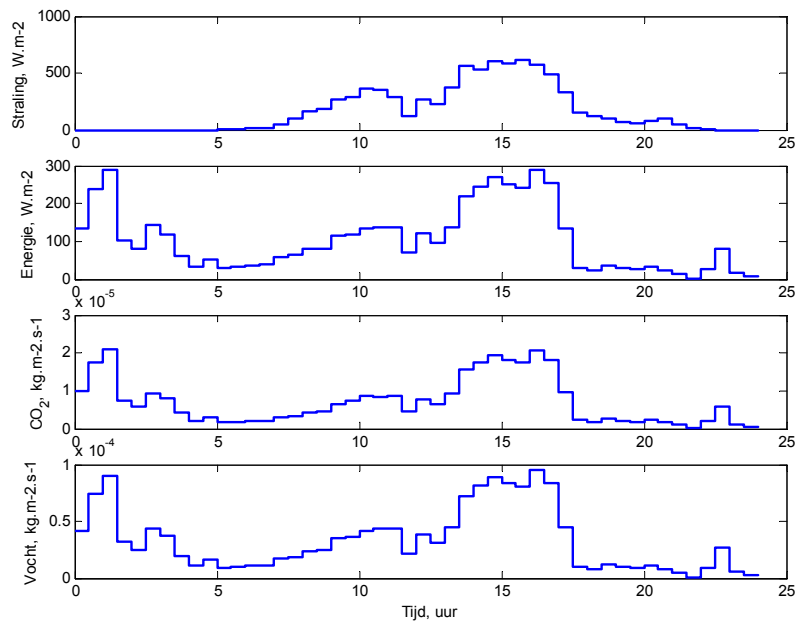
Figuur 7.11. Schatting van het ventilatievoud en de gemeten raamstand (-: oostzijde, ..: westzijde) op dag 104 in 2004.



Figuur 7.12. De gemeten globale straling en het geschatte verlies van energie (latent en voelbaar), CO₂ en vocht op dag 104 in 2004.



Figuur 7.13. Schatting van het ventilatievoud en de gemeten raamstanden (-: oostzijde, ..: westzijde) op dag 170 in 2004.



Figuur 7.14. De gemeten globale straling en het geschatte verlies van energie (latent en voelbaar), CO₂ en vocht op dag 170 in 2004.

Wat kan de tuinder met deze informatie? Het is cruciaal om vast te stellen dat de ventilatieschatter inzicht geeft in de omvang en het verloop in de tijd van het natuurlijke ventilatieproces; inzicht dat in de tuinbouwpraktijk tot op heden niet of nauwelijks bestond. Natuurlijke ventilatie is in Nederland nog steeds de goedkoopste en meest gebruikte manier om overschotten aan energie en vocht weg te werken. Bezuinigen op het gebruik van fossiele energiebronnen vraagt echter om kritischer gebruik van ventilatiekoeling en -ontvochtiging. Dat vereist inzicht in de omvang van de betrokken processen. Dat wordt met de ventilatieschatter nu mogelijk.

Voor de tuinder zit nu de meerwaarde in het registreren en vergelijken van het ventilatievoud en de daarmee gepaarde gaande massa- en energiestromen naar buiten zowel binnen het bedrijf als tussen bedrijven onderling. De ventilatieschatter biedt ook de mogelijkheid het effect van alternatieve regelstrategieën te evalueren. De data van het ventilatievoud kunnen ook gerelateerd worden aan bijvoorbeeld metingen van de fotosynthese en de gewasverdamping. Daarmee kan het inzicht in de relatie klimaat versus gewasgroei en productie worden vergroot.

Voor gebruik in de tuinbouwpraktijk zijn metingen nodig van de temperatuur in de kas, de pijptemperatuur, temperatuur buiten de kas en de globale straling. Het lijkt voor de hand te liggen het meetpunt in het midden van de kas te positioneren.