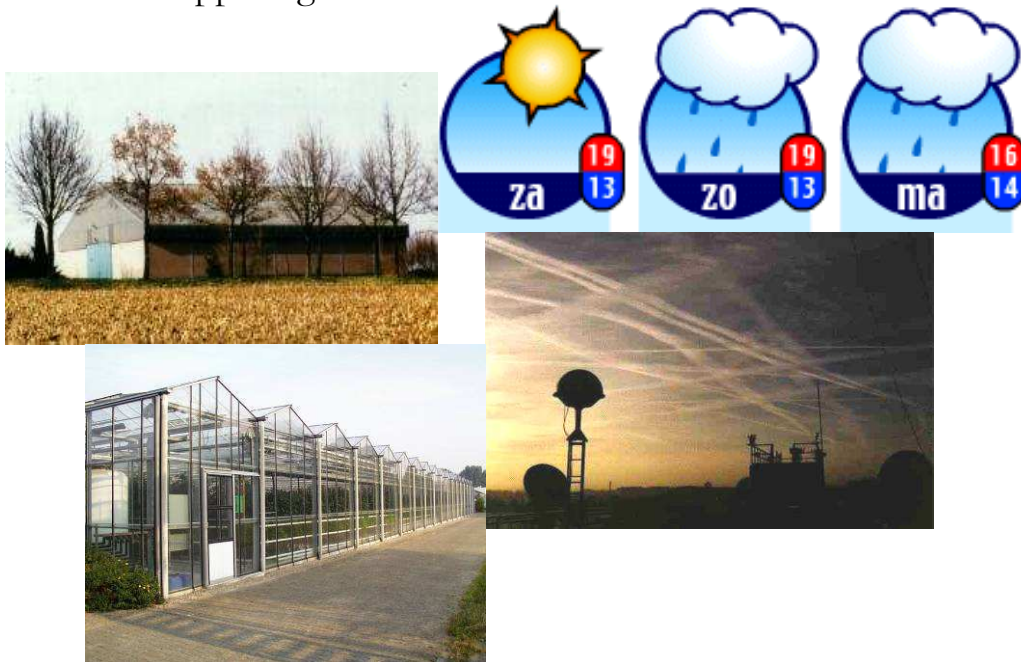


Weer in Control II

Openbare eindrapportage



Projecttitel: Weer in Control II
EET projectnummer: EETK01120
Looptijd: 15 september 2001 t/m 15 maart 2006
Penvoerder: Agrotechnology and Food Sciences Group B.V.
Projectleider: Leo Lukasse

economieecologie**t**technologie

Colofon

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Programma E.E.T. (Economie, Ecologie en Technologie) een gezamenlijk initiatief van de Ministeries van Economische Zaken, Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen en Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Het programma wordt uitgevoerd door het Programmabureau E.E.T., een onderdeel van SenterNovem.

This project is supported with a grant of the Dutch Programme EET (Economy, Ecology, Technology), a joint initiative of the Ministries of Economic Affairs, Education, Culture and Sciences and of Housing, Spatial Planning and the Environment. The programme is run by the EET Programme Office, a partnership of Senter and Novem.

Titel	Weer in Control II
Auteur(s)	Dr. Leo Lukasse, Dr. Jan Bontsema, met hulp van de gehele wic2 werkgroep
Internet	www.afsg.nl/wic2
AFSG rapport nummer	651
ISBN-nummer	90-8585-015-0
Publicatiedatum	18 Mei 2006
Vertrouwelijk	Nee
OPD-code	01/354
prijs	€ 0.00
Goedgekeurd door	Hans Maas

Agrotechnology and Food Sciences Group
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: info.afsg@wur.nl
Internet: www.afsg.wur.nl

© Agrotechnology and Food Sciences Group

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for inaccuracies in this report.



Het kwaliteitsmanagementsysteem van Agrotechnology and Food Sciences Group is gecertificeerd door SGS International Certification Services EESV op basis van ISO 9001:2000.

Inhoudsopgave

1 Samenvatting	4
1.1 Projectdoelstelling	4
1.2 Gevolgde werkwijze	4
1.3 Conclusie	5
1.4 Samenwerkende partijen	5
2 Summary	6
2.1 Objective	6
2.2 Outline of workplan	6
2.3 Description of consortium	7
3 Trefwoorden/Keywords	8
4 Beschrijving van het 'Weer in Control'-concept	9
4.1 De techniek	9
4.2 De processen	9
4.2.1 Glastuinbouw	9
4.2.2 Aardappel/uienbewaring	10
4.3 Modellen	11
4.4 Besturing op basis van een kostencriterium	14
4.4.1 Inleiding	14
4.4.2 Criterium voor de glastuinbouw	14
4.4.3 Criterium bewaring aardappelen en uien	15
4.5 Weersverwachtingen	15
5 Resultaten	16
5.1 Glastuinbouw	16
5.2 Aardappel/uienbewaring	18
6 Perspectief voor toepassing	21
7 Bijdrage aan EET doelstellingen	22
7.1 Samenwerking	22
7.2 Technologie	22
7.3 Economie en ecologie	23
7.3.1 Aardappelen/uien	23
7.3.2 Kasklimaat	23
8 Openbare publicaties	24
9 Bijlage, Contactpersonen	25

1 Samenvatting

1.1 Projectdoelstelling

Het doel van het project 'Weer in Control II' is het verbeteren van de economische en ecologische efficiëntie van de besturing van een breed scala van productieprocessen die worden beïnvloed door het weer. Het beoogde doel kan worden bereikt door in de procesbesturing te anticiperen op weersverwachtingen. Daarvoor worden in dit project twee stappen gezet:

- Ontwikkelen van een generieke concept/architectuur voor het anticiperen op weersverwachtingen in de besturing van processen die door het weer worden beïnvloed,
- Het toetsen van het concept en de architectuur door implementatie van een prototype in een tweetal karakteristieke maar wel sterk verschillende praktijksituaties, te weten: de besturing van een gewasproductieproces in een kas, de besturing van een koelinstallatie voor de bewaring van agrarische producten.

1.2 Gevolgde werkwijze

In de uitvoering van het project zijn voor beide toepassingen min of meer parallel aan elkaar achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen:

1. Opstellen Programma van Eisen
2. Formuleren en programmeren van (Receding Horizon) Optimal Control
3. Simulatiestudies
4. Analyse van onzekerheidsaspecten van de weersverwachting
5. Implementatie in softwareomgeving van industriële partners
6. Meerwaardeanalyse
7. (Experimentele) toetsing door industriële partners

Door tweemaandelijks plenair overleg waren alle partners voortdurend over en weer geïnformeerd, en door de goede feedback en discussies ook in staat om van elkaar te leren. Formuleren en programmeren van het Receding Horizon Optimal Control (RHOC) probleem (stap 2) is een zeer intensief proces. Per toepassing beslaat dit honderden tot duizenden regels programmacode. De simulatiestudie (stap 3) is primair bedoeld om te verifiëren of de geprogrammeerde RHOC code logische en gewenste oplossingen genereert. Zo niet dan moet er worden ingegrepen. Deze stap is van belang voor enerzijds software debugging en anderzijds evaluatie van de ontworpen methodiek. In de weersanalyse (stap 4) is gekeken in hoeverre weersverwachtingen met lokale metingen zijn te verbeteren, en wat de te verwachten onzekerheidsrange is. Bij implementatie in de softwareomgeving van de industriële partner (stap 5) is vooral applicatie interfacing een belangrijk item. In de meerwaardeanalyse (stap 6) is d.m.v. simulaties de meerwaarde in specifieke scenario's geëvalueerd. Tenslotte is door experimentele toetsing (stap 7) bepaald hoe het systeem als geheel functioneert. Die experimentele toetsing door de industriële partners gaat door na afloop van het project. De toetsing heeft enerzijds echt 'toetsing' als doel maar anderzijds speelt ook al mee de verzameling van demonstratiemateriaal om evt. potentiële klanten te overtuigen.

Gedurende alle stappen is steeds zo veel mogelijk generiek gewerkt. Het resultaat is dat er een verzameling kennis en software is opgebouwd die gemakkelijk kan worden ingezet voor nieuwe toepassingen.

1.3 Conclusie

De projectdoelstellingen zijn gehaald. Er is een generieke concept/architectuur ontwikkeld voor het anticiperen op weersverwachtingen in de besturing van processen die door het weer worden beïnvloed. Dat concept is vervolgens getoetst door implementatie van een prototype in de besturing van twee werkelijke bewaarplaatsen voor aardappelen/uien. Voor toepassing in de glastuinbouw is getoetst door implementatie in een zeer realistische simulatieomgeving. Uit alle toetsingen komen goede resultaten. Het prototype werkt stabiel en genereert logische stuursignalen en de praktische bruikbaarheid van het concept is daarmee bewezen.

De simulaties laten besparing zien die oplopen tot 20%. Bij een sectorbrede implementatie is daardoor een besparing in aardgasgebruik tot 800 miljoen m³ mogelijk ter waarde van 200 miljoen euro.

In de bewaring van aardappelen/uien lijkt de weg vrij voor gefaseerde marktintroductie, beginnend vanaf bewaarperiode 2006/2007.

De deelnemende kennisinstellingen zullen na afloop van het project op zoek gaan naar nieuwe toepassingen om de economische en ecologische efficiëntie te verbeteren van de besturing van een nog breder scala van productieprocessen die worden beïnvloed door het weer. Daarbij gaan de gedachten in de eerste plaats uit naar binnenklimaatbeheersing in het algemeen, naar verslogistiek, en naar waterbeheer.

1.4 Samenwerkende partijen

Partners in het wic2 samenwerkingsverband:

	Postadres	Telefoon en Fax
	Agrotechnology and Food Sciences Group Postbus 17, 6700 AA Wageningen	+31 (0) 317 475 029 +31 (0) 317 475 347
	Plant Research International Postbus 16, 6700 AA Wageningen	0317 - 47 70 00 0317 - 41 80 94
	PRIVA B.V. Postbus 18, 2678 ZG De Lier	+31 (0) 174 522 600 +31 (0) 174 522 700
	Tolsma Techniek Emmeloord B.V. Postbus 1010, 8300 BA Emmeloord	+31 (0) 527 636 465 +31 (0) 527 699 532
	Wageningen Universiteit Postbus 43, 6700 AA Wageningen	+31 (0) 317 482 124 +31 (0) 317 484 957
	Weathernews Weteringpad 2, 3762 EN Soest	+31 (0) 35 603 9027 +31 (0) 35 603 9002

2 Summary

2.1 Objective

The aim of the project “Weather in Control II” is to improve the economic and ecological efficiency of managing a wide range of production processes which are influenced by the weather. This target could be achieved by anticipating the weather forecasts in the process control. Accordingly, the project has been set out in two steps:

- To develop a generic concept/architecture for anticipating the weather forecasts in the control of processes which can be influenced by the weather;
- To test the concept and the architecture by implementing a prototype in two characteristic but greatly differing real situations: the control of a crop production process in a greenhouse, and the control of a cooling installation for the storage of agriculture produce.

2.2 Outline of workplan

In the course of the project, the following steps have more or less been carried out successively for each of the two applications:

1. Setting up a Programme of Requirements
2. Formulating and programming (Receding Horizon) Optimal Control
3. Simulation studies
4. Analysis of uncertainties in weather forecasts
5. Implementation in the software environments of industrial partners
6. Analysis of added-value
7. (Experimental) testing by industrial partners

All partners were constantly informed of the project progress during bi-monthly sessions, and such feedback and discussion also enabled them to learn from one another. Formulating and programming of the Receding Horizon Optimal Control (RHOC) problem (step 2) is a very intensive process. For each application this requires thousands of lines of programming codes. The simulation study (step 3) is primarily meant to verify whether the programmed RHOC code generates logic and desired solutions. If this was not the case, something would have to be done. This step is important for software debugging on the one hand, and for evaluation of the developed method, on the other hand. The weather analysis (step 4) studies to what degree weather forecasts can be improved with local measurements, and which range of uncertainties should be expected. During implementation in the software environment of the industrial partners (step 5), application interfacing has been of particular importance. In the added-value analysis (step 6), simulations have been used to evaluate the added value in specific scenarios. Finally, the functioning of the system as a whole has been determined by means of experimental testing (step 7). This experimental testing by the industrial partners will continue after the project ends. The testing aims to be a real ‘test’ on the one hand, but also has a role in the gathering of demonstration materials for convincing potential customers.

The generic aspect was kept in mind during all these steps. The result is a built-up of knowledge and software which can easily be employed in new applications.

2.3 Conclusion

The aims of the project have been achieved. A generic concept/architecture has been developed to anticipate the weather forecasts in the control of processes which are influenced by the weather. Thereafter, this concept has been tested by implementation of a prototype in the control of two real storage facilities for potatoes/onions. For application in greenhouse horticulture, the test has been done by implementation in a very realistic simulation environment. All these tests have produced good results. In particular, in the storage of potatoes/onions, the way has been paved for phased market introduction, beginning from storage season 2006/2007.

The participating knowledge centre will search for new applications when the project has ended so as to improve the economic and ecological efficiency of the control of an even wider range of production processes which are influenced by the weather. Plans already exist concerning indoor climate control in general, fresh logistics and water management.

2.4 Description of consortium

Partners in the wic2 consortium:

	Postal adress	Phone and Fax
	Agrotechnology and Food Sciences Group Postbus 17, 6700 AA Wageningen	+31 (0) 317 475 029 +31 (0) 317 475 347
	Plant Research International Postbus 16, 6700 AA Wageningen	+31 (0) 317 47 70 00 +31 (0) 317 41 80 94
	PRIVA B.V. Postbus 18, 2678 ZG De Lier	+31 (0) 174 522 600 +31 (0) 174 522 700
	Tolsma Techniek Emmeloord B.V. Postbus 1010, 8300 BA Emmeloord	+31 (0) 527 636 465 +31 (0) 527 699 532
	Wageningen Universiteit Postbus 43, 6700 AA Wageningen	+31 (0) 317 482 124 +31 (0) 317 484 957
	Weathernews Weteringpad 2, 3762 EN Soest	+31 (0) 35 603 9027 +31 (0) 35 603 9002

3 Trefwoorden/Keywords

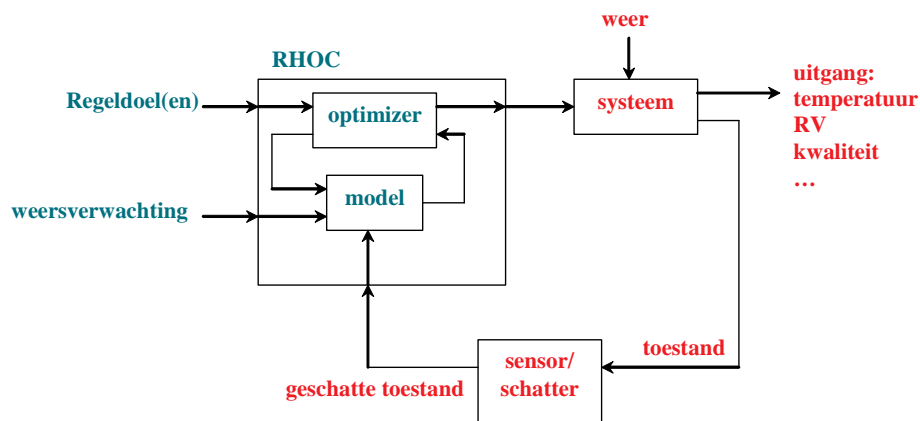
trefwoorden: optimal control, kasklimaat, aardappelbewaring, klimaatregeling, modelgebaseerde regeling, regeltechniek, onzekerheid, weersverwachting.

keywords: optimal control, greenhouse climate, potato storage, climate control, model based control, control technology, uncertainty, weather forecast.

4 Beschrijving van het 'Weer in Control'-concept

4.1 De techniek

In Figuur 1 is globaal de techniek weergegeven, die in dit project ontwikkeld is. Een systeem, zoals een kas of een bewaarplaats, wordt beïnvloed door het weer. Het systeem wordt geregeld via een terugkoppeling van gemeten grootheden (zoals bijvoorbeeld temperatuur en luchtvochtigheid). De ontwikkeling van de Receding Horizon Optimal Control regelaar (RHOC in Figuur 1) staat centraal in het project. De RHOC kent in feite 4 onderdelen: model, optimizer, regeldoel(en) en weersverwachting. Van het systeem wordt een model gemaakt. De optimalisatieroutine berekent de sturingen die het regeldoel (bijvoorbeeld zo weinig mogelijk energie en toch een goede productie) zo goed mogelijk waar maken, daarbij gebruik makend van de weersverwachtingen. Dit optimaliseren wordt op ieder stuurtijdstip herhaald.



Figuur 1: schematische weergave van een systeem, geregeld door middel van RHOC.

4.2 De processen

4.2.1 Glastuinbouw

In de glastuinbouw worden gewassen, zoals vruchtgroenten en bloemen in een van het buitenklimaat afgeschermd omgeving geteeld, om een hogere productie te bereiken en ook om een langer teeltseizoen te creëren.

In een natuurlijk geventileerde kas spelen een viertal klimaatgrootheden de hoofdrol. Dit zijn de temperatuur in de kas, de relatieve luchtvochtigheid, straling en de CO₂-concentratie. Deze klimaatgrootheden worden enerzijds beïnvloed door de teler, die verwarming, CO₂-dosering, energie- en schermdoeken en ventilatie kan sturen. Anderzijds wordt het klimaat in de kas beïnvloed door de buitenomstandigheden, zoals zonnestraling, buitentemperatuur, CO₂-concentratie buiten, RV buiten en de windsnelheid en windrichting. In onderstaande Figuur 2 is een impressie van het proces weergegeven.

4.2.2 Aardappel/uienbewing

Het doel van aardappel/uienbewaring is om de periode tussen oogst enerzijds en consumptie en/of verwerking anderzijds te overbruggen bij zo weinig mogelijk bewaarverliezen en tegen zo laag mogelijk kosten.

In bewaarplaatsen worden aardappelen/uien onder geconditioneerde omstandigheden bewaard van september/ oktober tot soms wel juni/juli in het volgende jaar. In de eerste maand richt de bewaring zich vooral op het drogen van het gerooide product, gevolgd door een periode van wondheling (het biologische herstel van rooibeschadigingen). Dit gebeurt veelal bij temperaturen boven 12 °C. Daarna wordt in enkele weken tijd de temperatuur teruggebracht naar een bewaar temperatuur die tussen 3 en 8 °C ligt. Daarbij wordt bewaakt dat een ingestelde maximale afkoeling per dag niet wordt overschreden. Naast temperatuur is de luchtvochtigheid van belang, die beïnvloedt de uitdroging (gewichtsverlies) en evt. verspreiding van ziekten en schimmels. Voor consumptie aardappelen is het verder van belang dat CO₂ in de bewaarplaats niet boven 1 à 2% komt. In Figuur 3 is een impressie gegeven van de aardappelen- en uienbewaring.



Een kas van het Venlo-type gebruikt in de glastuinbouw



Binnen in een kas



Verwarming door verwarmingsbuizen



Natuurlijke ventilatie via dakramen

Figuur 2: Impressie van glastuinbouw en factoren van invloed op klimaatgrootheden.



Een bewaarplaats in de Noord-Oost polder



Bulkbewaring uien



Kistenbewaring met mechanische koeling



Aardappelen in bewaring

Figuur 3: impressie van aardappel- en uienbewaring.

4.3 Modellen

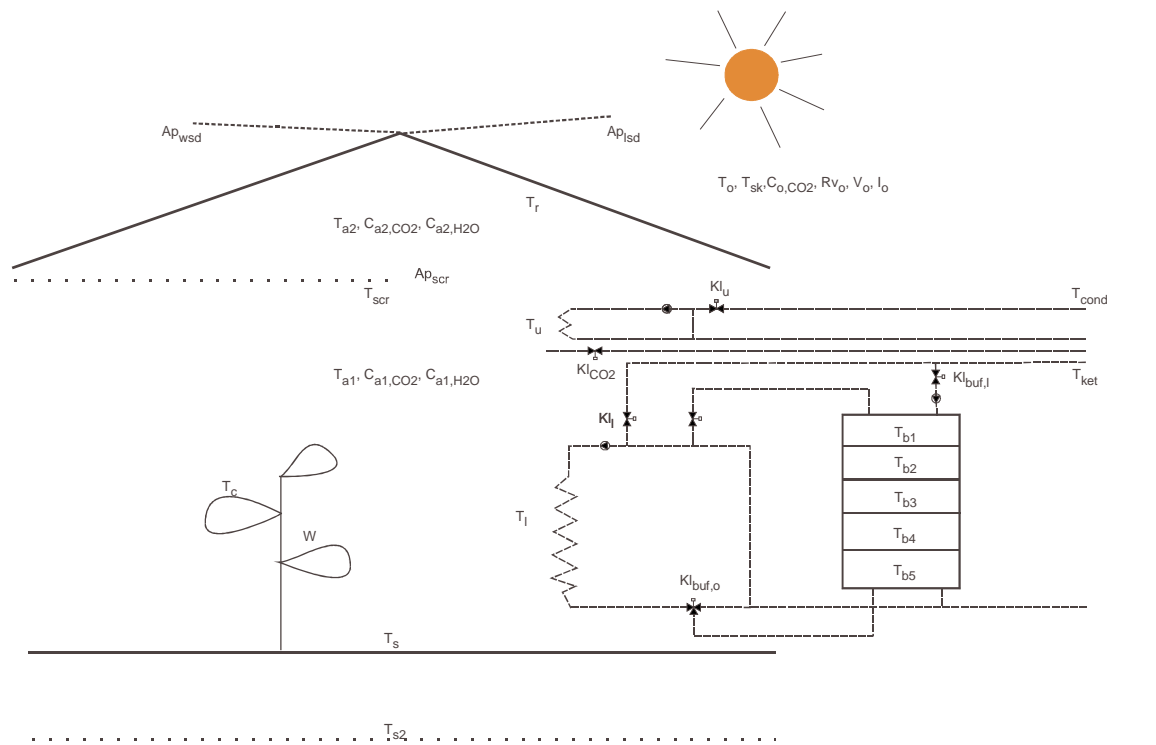
Voor het gebruik van een optimaliserende regelaar is een model nodig dat het dynamisch gedrag van het bestuurd systeem beschrijft. Zo'n model ziet er in algemene wiskundige termen als volgt uit:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, v, t)$$

In deze vergelijking staat x voor de toestandsgrootheden van het proces (bijv. de binnentemperatuur). u staat voor de ingangsgrootheden waarmee de klimaatregelcomputer de toestandsgrootheden (bijv. de temperatuur) kan beïnvloeden (denk bijv. aan ventilatie met buitenlucht). Deze variabelen worden ook wel stuurgrootheden genoemd. v staat voor de ingangsgrootheden waar de klimaatregelcomputer geen invloed op heeft maar die wel de toestand van het binnenklimaat (bijv. de temperatuur) beïnvloeden (denk aan de buitentemperatuur). Deze variabelen worden ook wel storingen genoemd. x , u en v zijn vectoren. De tijd wordt

aangegeven met t . Tenslotte representeert dx/dt de verandering van een toestand van het proces in de tijd.

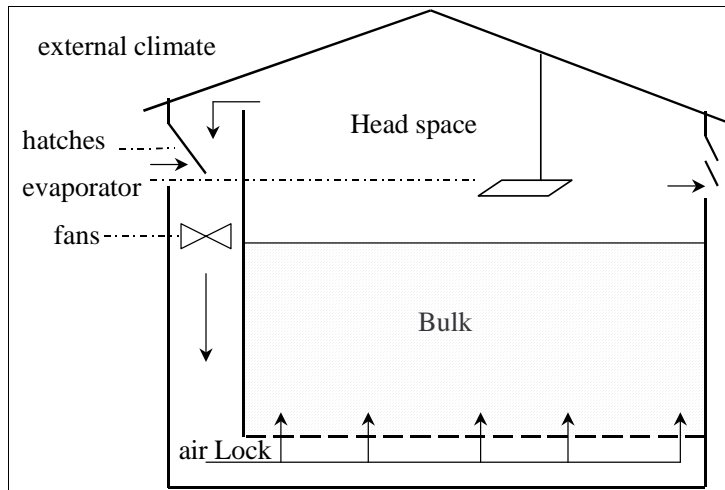
Figuur 4 toont het te besturen proces van een kas, met alle toestanden, sturingen en externe verstoringen. Figuur 5 toont het te besturen proces van een bewaarplaats.



Legenda:

$A_{p_{wsd}}$	raamstand windzijde	$C_{a1, H2O}$	absolute luchtvochtigheid kas
$A_{p_{lsd}}$	raamstand lijszijde	T_c	planttemperatuur
T_o	temperatuur buiten	W	droge stofgewicht gewas
T_{sk}	Hemeltemperatuur	T_u	temperatuur bovennet verwarming
$C_{o,CO2}$	CO ₂ -concentratie buiten	T_l	temperatuur ondernet verwarming
RV_o	relatieve luchtvochtigheid buiten	T_{cond}	temperatuur water van de condensator
V_o	windsnelheid	T_{ket}	temperatuur water van de ketel
I_o	globale straling	T_s	temperatuur bodem
T_{a2}	temperatuur kas, boven het scherm	$T_{b1...T_{b5}}$	temperatuur warmtebuffer
$C_{a2,CO2}$	CO ₂ -concentratie kas, boven het scherm	Kl_l	klepstand verwarming ondernet
$C_{a2, H2O}$	absolute luchtvochtigheid kas, boven het scherm	Kl_u	klepstand verwarming bovennet
$A_{p_{scr}}$	Schermstand	$Kl_{buf,l}$	klepstand buffer naar ondernet
T_{scr}	Temperatuur scherm	$Kl_{buf,o}$	klepstand ondernet naar buffer
T_{a1}	Temperatuur kas	Kl_{co2}	CO ₂ doseerklepstand
$C_{a1,CO2}$	CO ₂ -concentratie kas		

Figuur 4: het te besturen proces (kas).



Figuur 5: het te besturen proces (bewaarplaats).

4.4 Besturing op basis van een kostencriterium

4.4.1 Inleiding

Bij voorkeur zou je een proces als de productie in de glastuinbouw of het bewaren van aardappels of uien, wat op zich een economisch proces is, ook op een economisch optimale manier willen besturen. In de praktijk is het ondoenlijk om de optimale besturing met zuiver economische modellen en – kostencriteria te berekenen. Voor de glastuinbouw geldt dat er geen generieke groei modellen zijn die de waarde van een te verkopen product kunnen bepalen. Bij de bewaring van aardappels en uien geldt iets soortgelijks, hier is het moeilijk een relatie te leggen tussen kwaliteitverlies en prijs. Om toch praktisch relevante besturingstechnologie te ontwikkelen is gekozen voor het gebruik van afgeleide kostencriteria.

4.4.2 Criterium voor de glastuinbouw

Het optimalisatieprobleem voor de glastuinbouw komt neer op de planning van het klimaat in de kas en de productie van warmte en CO₂ om dit klimaat te kunnen realiseren. Het kasklimaat bestaat uit de temperatuur, de relatieve luchtvochtigheid, de CO₂-concentratie en de hoeveelheid straling in de kas. Om dit te realiseren kunnen buisverwarming, ventilatie, CO₂-dosering en doeken worden ingezet.

Bij het plannen wordt, gebruik makend van de weersverwachting, het klimaat bepaald waarbij de realisatiekosten minimaal zijn en zo goed mogelijk aan de randvoorwaarden wordt voldaan. Deze randvoorwaarden zijn instellingen waarmee de tuinder ervoor kan zorgen dat de kwaliteit van de teelt gewaarborgd is. In het criterium voor de glastuinbouw worden de gemiddelde etmaaltemperatuur (temperatuur integraal), de maximale temperatuur, de minimale temperatuur, de maximale relatieve luchtvochtigheid en de maximale CO₂-concentratie als randvoorwaarden meegenomen in de planning.

Het ontwikkelde besturingsconcept bepaalt op basis van het bovenstaande criterium het verloop van de klimaattoestanden en bijbehorende sturing voor de komende 24 uur. Met behulp van een zogenaamde optimale regelaar wordt de uitvoering van dit plan continu bijgestuurd om te corrigeren voor afwijkingen in de gebruikte modellen en de weersverwachting.

4.4.3 *Criterium bewaring aardappelen en uien*

Het optimalisatieprobleem voor de aardappel/uienbewaring komt neer op de planning van twee stuurgrootheden: wanneer hoeveel mechanisch koelen (1), en wanneer hoeveel ventileren met buitenlucht (2). Deze planning wordt zodanig geoptimaliseerd dat het opgegeven kostencriterium wordt geminimaliseerd. Voornaamste ingrediënten van het kostencriterium zijn een straf op afwijking van de gewenste bewaar temperatuur en de elektriciteitskosten van koelen en/of ventileren. De RHOC-regelaar wordt gevoed met tiendaagse weersverwachtingen, waarvan projectpartner WNI eenmaal per dag een nieuwe update uitbrengt. Waarom een horizon van precies 10 dagen te gebruiken? 10 dagen is het meeste wat projectpartner WNI kan leveren, en in simulatiestudies blijkt dit een beter resultaat te geven dan werken met een kortere horizon.

De regelaar plant steeds opnieuw het optimale verloop van sturingen, bewaar temperatuur, en overige modeltoestanden, gebruikmakend van de verwachte buitencondities en de verwachte elektriciteitsstarieven. De berekende sturingen worden geïmplementeerd totdat de RHOC-regelaar een nieuwe optimalisatie uitvoert en de eerder berekende, maar nog niet geïmplementeerde, sturingen overschreven worden door de nieuwste optimalisatie-uitkomst.

4.5 **Weersverwachtingen**

Bij het gebruik van optimal control strategieën in de klimaatregelingen in de glastuinbouw en de opslag van biologische producten, is het gebruik van weersverwachtingen een belangrijk hulpmiddel. Deze weersverwachtingen herbergen echter nogal wat onzekerheid. Zo wordt de verwachting over het algemeen gegeven voor een specifieke locatie (meestal een meteorologisch station) welke niet gelijk is aan de locatie van de klimaatregeling. Verder kunnen lokale aspecten zoals bebouwing, grondsoort en open water in de omgeving van invloed zijn op het lokale weer. Het is aangetoond dat het aanpassen van de verwachtingen met behulp van lokale metingen een verbetering oplevert tot ongeveer tien uur vooruit. Ook een systematische fout kan met behulp van lokale metingen geminimaliseerd worden.

Er zijn twee verschillende type weersverwachtingen commercieel verkrijgbaar: de korte termijn weersverwachting en de middellange termijn weersverwachting. De korte termijn weersverwachting bevat gegevens voor ieder uur van 0 tot 36 uur vooruit. De middellange termijn weersverwachting bestaat uit een ensemble van weersverwachtingen tot tien dagen vooruit. Het ensemble bestaat uit 50 leden. Elk van deze leden geeft een weersverwachting en heeft een kans van 1/50 om uit te komen. Over een langere periode gerekend geeft het gemiddelde van het ensemble de beste verwachting. Met deze “gemiddelde” weersverwachting wordt dan ook een optimaal stuurprofiel uitgerekend.

Doordat het ensemble uit 50 leden bestaat die elk een even grote waarschijnlijkheid hebben om voor te komen, geeft dit ensemble een maat van onzekerheid van de verwachting aan. Door nu het gebruikte model door te rekenen voor elk van de leden van het ensemble, wordt een kansdichtheidsfunctie van de doelfunctie gevonden. De kansdichtheidsfunctie van de totale kosten geeft vervolgens inzicht in het risico dat de gebruiker loopt.

5 Resultaten

In dit project is aangetoond dat het mogelijk is om met gebruik van weersverwachtingen een energie efficiënter klimaatsturing in glastuinbouw kassen en in bewaarplaatsen voor agrarische producten te realiseren. In de aardappelbewaring is dit aangetoond in een praktijksituatie en de glastuinbouw in een testomgeving.

De energiebesparing bedraagt voor de aardappel- en uienbewaring grofweg 20%. Een relatieve besparing van 20% is gelijk aan een absolute besparing per 1000 kg product van resp. ± 3 kWh elektriciteit per bewaarperiode voor aardappelen en ± 9 kWh elektriciteit per bewaarperiode voor uien. Deze besparing gaat hand in hand met een betere klimaatbeheersing in de bewaarplaats, en dat kon nog wel eens een belangrijker resultaat zijn dan 20% elektriciteitsbesparing. Wel zit er een grote onzekerheid in de verwachte energiebesparing: in experimenten wisselen dagen met 50% energiebesparing en dagen met 0% energiebesparing elkaar af.

Voor de glastuinbouw wordt een energiebesparing verwacht, in combinatie met een hogere productie en betere beheersing van de kwaliteit. Tijdens simulaties zijn voor de glastuinbouw besparingsgetallen gerealiseerd tot 20%. Dit potentiële besparingspercentage is indicatief, omdat nog een aantal onvoorziene technische obstakels moet worden opgelost om een compleet beeld te krijgen. Daar de gehele Nederlandse glastuinbouw jaarlijks zo'n 4×10^9 m³ aardgas gebruikt zou een energiebesparing van 20% voor de gehele sector een besparing van zo'n 0.8×10^9 m³ aardgas betekenen.

5.1 Glastuinbouw

Het projectresultaat voor de glastuinbouwtoepassing bestaat uit een werkend prototype in simulatieomgeving. Hiervoor zijn een optimale besturing en een simulator gerealiseerd.

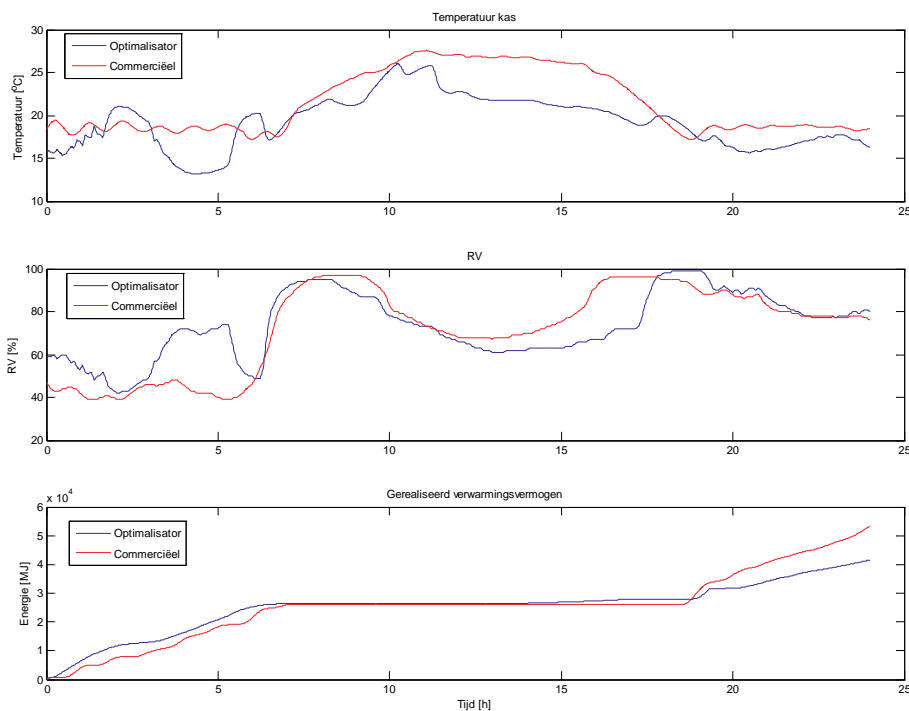
De simulator bevat modelbeschrijvingen voor de gehele tuinbouwkas, inclusief installaties en gewas. Hiermee is het mogelijk de installaties op het niveau van sturingen in te zetten en het effect van deze sturingen op het kasklimaat en het gewas te simuleren. Groot voordeel van deze simulator is het feit dat onafhankelijk van het huidige weerpatroon de werking van de optimale besturing geëvalueerd kan worden voor specifieke weerpatronen. De simulator is in de standaard testomgeving van Priva Research and Development ontwikkeld en kan daardoor ook gebruikt worden om de huidige commerciële regelingen te evalueren en eventueel te verbeteren.

De optimale besturing bestaat uit een tweetal modules; een planningsmodule en een regelmodule. De planningsmodule optimaliseert het criterium zoals beschreven in paragraaf 4.4.2 voor het geldige weerpatroon. De regelmodule zorgt voor de uitvoering van de door de planningsmodule berekende sturingen. Hierbij worden de sturingen aangepast als het gerealiseerde klimaat afwijkt van het berekende optimale klimaat.

Met de simulatieomgeving zijn evaluaties uitgevoerd waarbij de ontwikkelde optimale besturing vergeleken is met de huidige commerciële regelingen van Priva B.V. Uit deze evaluaties is gebleken dat de werkwijze van de optimale besturing voordelen biedt ten opzichte van de huidige commerciële regelingen. Met name het geïntegreerd plannen en regelen van klimaat in de kas zorgt ervoor dat op de juiste momenten, waarop het effect maximaal is, regelacties worden ondernomen. Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk de uitstoot van CO₂ naar de omgeving terug te dringen en kan de relatieve luchtvochtigheid beter in de hand gehouden worden. Tijdens de evaluaties zijn (energie)besparingsgetallen gerealiseerd tot 20%. Het is uiteindelijk echter moeilijk gebleken om op basis van de uitgevoerde simulaties eenduidige kwantitatieve uitspraken te doen over de energiebesparing dan wel productieverhoging. Hiervoor is een uitvoerige verdere analyse noodzakelijk.

In Figuur 6 is een voorbeeld weergegeven van de testresultaten zoals deze uitgevoerd zijn. Deze figuur geeft een gesimuleerde dag in de zomerperiode. De belangrijkste verschillen tussen de regeling van de optimalisator en de commerciële regeling zijn:

- De gemiddelde temperatuur ligt dichterbij de gewenste gemiddelde temperatuur van 20°C.
- De commerciële regeling is een goed voorbeeld van een setpoint regelaar, deze zal altijd proberen het setpoint te handhaven. Dit in tegenstelling tot de optimale regelaar die vooruit kijkt en op basis van het criterium kan besluiten de temperatuur tijdelijk iets hoger of lager te laten worden.
- Doordat de optimale regelaar de temperatuur aan het eind van de dag iets verder laat zakken, wordt energie bespaard ten opzichte van de commerciële regeling.
- De relatieve luchtvochtigheid in de afdeling met de commerciële regeling ligt gedurende langere tijd rondom de maximale luchtvochtigheid van 90%. Deze grens is kritisch voor de teeltkwaliteit.



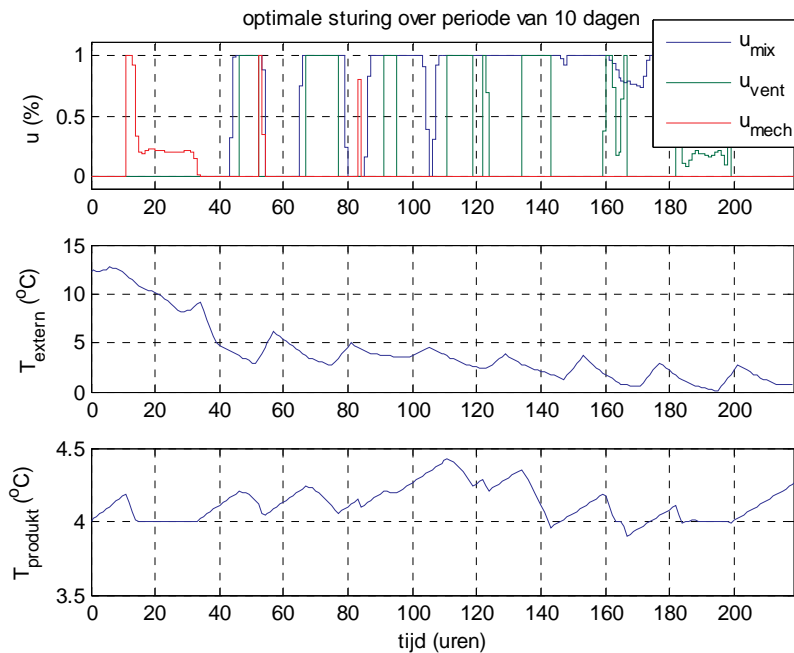
Figuur 6: voorbeeld van gesimuleerd verloop van temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en verwarmingsenergie in een kascompartiment met de optimale besturing en de huidige commerciële regelingen.

5.2 Aardappel/uienbewaring

Voor bewaring is de optimalisator ontwikkeld als een aanvulling op de bestaande klimaatcomputer, net als in de applicatie glastuinbouw. De berekende optimale sturingen worden op een ingenieuze wijze via de bestaande klimaatcomputer geïmplementeerd op het werkelijke proces. Dit maakt dat de in de klimaatcomputer opgenomen beveiligingen intact blijven en dat zowel bestaande als toekomstige klanten eenvoudig kunnen kiezen voor klimatisering met of zonder optimalisator-module.

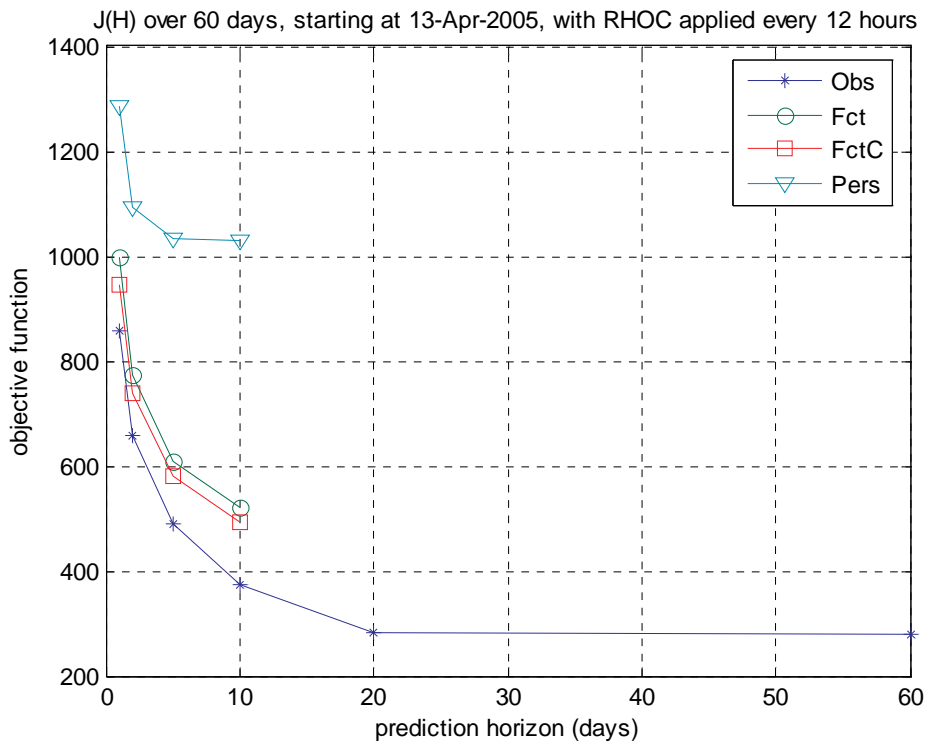
De ontwikkelde optimalisator is nog binnen de looptijd van het project getest op echte bewaarplaatsen en blijkt daar te functioneren conform verwachting. Figuur 7 geeft een voorbeeld van een berekende tiendaagse planning. In Figuur 7 geldt voor de producttemperatuur een streefwaarde van 4 °C. Mechanische koeling (u_{mech}) is energetisch minder efficiënt dan buitenluchtventilatie ($u_{\text{vent}} > 0$ en $u_{\text{mix}} > 0$). In de planning wordt duidelijk op een slimme manier de afweging gemaakt tussen temperatuurbeheersing en energiebesparing (mechanisch koelen vervangen door buitenluchtventilatie, en elektriciteit bij voorkeur afnemen tijdens daltarief uren). In de daltariefuren gedurende de eerste 30 uur in Figuur 7 wordt de temperatuur met mechanische koeling teruggebracht tot setpoint, omdat er gedurende de eerste 45 uur geen mogelijkheid voor buitenluchtventilatie wordt verwacht ($T_{\text{extern}} > T_{\text{streef}}$ tot $\pm t=45$ uur). In de periode $45 < t < 140$ is het mogelijk om T_{produkt} dicht bij T_{streef} te houden met minimale gebruikmaking van u_{mech} . In $100 < t < 130$ mag de temperatuur hoger oplopen dan in $0 < t < 30$ uur,

omdat al op $t=100$ wordt voorzien dat er vanaf $t=130$ prima mogelijkheden komen voor temperatuurreductie d.m.v. goedkope buitenluchtventilatie. Daarna volstaat buitenluchtventilatie om T_{produkt} rond T_{streef} te houden, maar worden geen ventilatoren aangeschakeld in periodes met hoog elektriciteitsstarief. Met een klassieke regeling zou deze intelligentie slechts te imiteren zijn wanneer de bewaarder veelvuldig de instellingen handmatig wijzigt. Vooral de keuze om wel mechanisch te koelen in de periode $10 < t < 30$ en niet in $100 < t < 130$ is met een klassieke regeling niet mogelijk zonder tussentijds handmatig wijzigen van klimaatcomputerinstellingen.



Figuur 7: voorbeeld van gepland verloop van toestanden en sturingen in bewaarplaats.

Uit de experimenten is moeilijk te concluderen of de optimalisator echt tot verbetering leidt, omdat goed vergelijkingsmateriaal ontbreekt. Daarom is in simulatie een uitgebreide meerwaardeanalyse uitgevoerd. Die meerwaardeanalyse toont onomstotelijk aan dat er een behoorlijke verbetering mogelijk is. Figuur 8 toont één van de vele figuren uit die meerwaardeanalyse. De donkerblauwe lijn Obs, in Figuur 8 toont het realiseerbare kostencriterium bij perfecte voorkennis van het werkelijke weer. Hieruit blijkt dat het voor de 60 dagen na 13 april 2005 lonend was om te optimaliseren met een horizon tot 20 dagen vooruit, mits goede weersverwachtingen beschikbaar zijn. De rode en groene lijnen tonen de gerealiseerde criteriumwaarden bij gebruik van WNI weersverwachtingen (Fct) en WNI weersverwachtingen verbeterd met actuele lokale temperatuurmeting (FctC). Ook met werkelijke weersverwachtingen blijkt het nuttig om 10 dagen vooruit te kijken. Wanneer de regelaar wordt gevoed met 'persistente' verwachtingen, cq. de aanname dat de weercyclus waargenomen gedurende de afgelopen 24 uur zich blijft herhalen in de toekomst, dan verslechtert de realiseerbare criteriumwaarde enorm, getuige de lichtblauwe lijn (Pers) in Figuur 8.



Figuur 8: doelfunctie als functie van voorspelhorizon voor vier verschillende soorten weersverwachtingen.

6 Perspectief voor toepassing

Voor het bewaren van aardappelen en uien zal, zoals het er nu naar uitziet projectpartner Tolsma Techniek bewaarseizoen 2006/2007 beginnen een systeem in de markt gaan zetten. De omzet van het nieuwe product zal in het begin klein zijn.

Voor de glastuinbouw heeft Priva besloten om het in dit project ontwikkelde concept voorlopig niet integraal op de markt te brengen. Er zijn nog te veel onzekerheden over het ontwikkelde concept, om het betrouwbaar en zonder afbreukrisico in de markt te zetten. Wel zal het systeem in een testomgeving gebruikt worden om te kunnen vergelijken met andere beschikbare systemen. Naar verwachting zal de opgedane kennis (op z'n minst) tot verbetering van de bestaande systemen leiden. Of en hoe (delen van) het concept een plaats krijgen binnen de huidige commerciële regelingen is op dit moment nog onderwerp van Priva-interne studie. Priva zal in ieder geval uiterst zorgvuldig te werk gaan bij evt. toekomstige marktintroductie van (delen van) het concept omdat ze zichzelf absoluut geen missers wil permitteren.

De deelnemende kennisinstellingen zullen op zoek gaan naar nieuwe mogelijkheden voor toepassing van de reeds ontwikkelde technologie en voor het verder doorontwikkelen van de besturingstechnologie. Bij nieuwe toepassingen gaan de gedachten in de eerste plaats uit naar binnenklimaatbeheersing in het algemeen, naar verslogistiek, en naar waterbeheer. Plant Research International (PRI) heeft inmiddels een tweetal aansluitende projecten verworven. Eén project gaat over het optimaliseren van de paprikateelt, zowel met betrekking tot energiebesparing alsook arbeidsbesparing. In dit paprika project zijn van de deelnemers van het Weer in Control project alleen PRI en in geringe mate Wageningen Universiteit betrokken. Een tweede project, dat nauw verwant is aan het Weer in Control project, betreft het verbeteren van de monitoring van processen in een glastuinbouwkas. Bij dit project is ook PRIVA betrokken.

7 Bijdrage aan EET doelstellingen

De projectdoelstellingen (hfst. 1.1) zijn gehaald. Er is een generieke concept/architectuur ontwikkeld voor het anticiperen op weersverwachtingen in de besturing van processen die door het weer worden beïnvloed. Dat concept is vervolgens getoetst door implementatie van een prototype in de besturing van twee werkelijke bewaarplaatsen voor aardappelen/uien. Voor toepassing in de glastuinbouw is getoetst door implementatie in een zeer realistische simulatieomgeving. Uit alle toetsingen komen goede resultaten. Met name in de bewaring van aardappelen/uien lijkt de weg vrij voor gefaseerde marktintroductie, beginnend vanaf bewaarperiode 2006/2007.

De deelnemende kennisinstellingen zullen na afloop van het project op zoek gaan naar nieuwe toepassingen om de economische en ecologische efficiëntie te verbeteren van de besturing van een nog breder scala van productieprocessen die worden beïnvloed door het weer. Daarbij gaan de gedachten in de eerste plaats uit naar binnenklimaatbeheersing in het algemeen, naar verslogistiek, en naar waterbeheer.

7.1 Samenwerking

In dit project is een zeer goede samenwerking ontstaan tussen de partners onderling. Deze samenwerking heeft dingen mogelijk gemaakt die zonder die samenwerking niet bereikt zouden zijn.

Het anticiperen op weersverwachtingen bij de klimaatbeheersing in bewaarplaatsen op de manier zoals dat in Tolsma's nieuwste prototype gebeurt, had Tolsma Techniek nooit zonder de kennisinstellingen kunnen ontwikkelen.

Priva heeft binnen dit project veel kennis opgebouwd m.b.t. het optimaal anticiperen op weersverwachtingen in de kasklimaatregeling. Deze kennisopbouw is tot stand gebracht dankzij intensief overleg met de kennisinstellingen, en de integratie van de door de kennisinstellingen ontwikkelde optimale besturing in de standaard testomgeving. Priva zal die kennis in de toekomst zeker benutten door de opgedane kennis te gebruiken bij de eigen productontwikkeling.

De ontwikkeling van methodiek en bijbehorende software door de kennisinstellingen heeft zondermeer een impuls gekregen door de samenwerking van die kennisinstellingen binnen dit project. Het praktisch valoriseren van die kennis kan enkel d.m.v. een zorgvuldige overdracht naar de industrie op specificatie van die industrie, dat is dankzij deze intensieve samenwerking gelukt.

De samenwerking was zodanig succesvol dat het zeer voor de hand ligt dat de partners elkaar in de toekomst weer op zullen zoeken in andere samenwerkingsverbanden.

7.2 Technologie

Er is een enorm stuk technologie (door)ontwikkeld rond het regelconcept in Figuur 1. Daarover is veel informatie te vinden in de referenties (hfst. 8). Ook is er veel inzicht opgebouwd over de vraag hoe bepaalde regel/beheerswensen effectief kunnen worden omgezet in wiskundige regeldoelen in Figuur 1. Omdat dit soort informatie vrij uniek is en voor de industriële partners

bovendien als een belangrijk competitief voordeel wordt gezien, is daarover niet gepubliceerd. Door de sterk modulaire opbouw van de ontwikkelde software waarin het concept is ondergebracht, is hergebruik van losse deelresultaten gemakkelijk. Zo kon bijv. www.coldstorage.nl mede ontstaan als spin-off van dit EET-project.

7.3 Economie en ecologie

7.3.1 *Aardappelen/uien*

Bij de bewaring van aardappelen/uien wordt een elektriciteitsbesparing van $\pm 20\%$ voorzien. Wel zit er een grote onzekerheid in de verwachte energiebesparing: in experimenten wisselen dagen met 50% energiebesparing en dagen met 0% energiebesparing elkaar af. Een relatieve besparing van 20% is gelijk aan een absolute besparing per 1000 kg product van resp. ± 3 kWh elektriciteit per bewaarperiode voor aardappelen en ± 9 kWh elektriciteit per bewaarperiode voor uien. Het maximale geschatte effect bij toepassing in Nederland is dan een CO₂-reductie uit fossiele energie van 3000 a 4000 ton CO₂/jaar. Mogelijk kan, bij toepassing van het projectresultaat, in Nederland een maximale afname van elektriciteitsgebruik optreden van 10 a 20 GWh/jaar. Deze besparing is vooral mogelijk doordat mechanische koeling minder nodig is bij een goed gebruik van de weersverwachting.

7.3.2 *Kasklimaat*

De integrale benadering van het kasklimaat, waarbij verder gekeken wordt dan de actuele stand van zaken, biedt perspectieven voor een positief effect op zowel de economische als milieudoelstellingen van de teler. Deze perspectieven worden veroorzaakt doordat de optimale besturing installaties inzet op momenten waarop ze het maximale effect hebben. Hierdoor lijkt bij een tenminste gelijkblijvende productie en productkwaliteit een aanzienlijke energiebesparing en verlaging van de CO₂-uitstoot mogelijk. Deze besparing komt vooral tot stand door meer gebruik te maken van duurzame energie (zonne-energie) en minder van fossiele energie.

Tijdens de simulaties zijn besparingsgetallen gerealiseerd tot 20%. Dit potentiële besparingspercentage is indicatief omdat nog een aantal onvoorziene technische obstakels moet worden opgelost om een compleet beeld te krijgen. Daar de gehele Nederlandse glastuinbouw jaarlijks zo'n 4×10^9 m³ aardgas gebruikt zou een energiebesparing van 20% voor de gehele sector een besparing van zo'n 0.8×10^9 m³ aardgas betekenen. Bij een huidige energieprijis van €0.25/m³ zou dit overeenkomen met een besparing van 200 miljoen euro. De CO₂ emissiebesparing komt daarbij uit op 1.4 miljoen ton, dat is 0.7% van de Kyoto doelstelling voor Nederland!

8 Openbare publicaties

- Bontsema, Jan, Eldert van Henten, Jorrit Budding and Theo Rieswijk, 2005. On-line estimation of the ventilation rate of greenhouses. Abstract 24th Benelux Meeting on Systems and Control, 22-24 March, Houffalize, Belgium, 1p.
- Bontsema, Jan, Eldert van Henten, Jorrit Budding and Theo Rieswijk, 2005. On-line estimation of the ventilation rate of greenhouses. Proceedings 16th IFAC World Congress , 4-8 July, Prague, 6p.
- Doeswijk, T.G. and K.J. Keesman, 2005. Adaptive Weather Forecasting using Local Meteorological Information. Biosystems Engineering 91(4): 421-431.)
- Doeswijk, T.G. and K.J. Keesman, 2005. Parameter Estimation and Prediction of a Nonlinear Storage Model: an algebraic approach. Proceedings of the 2005 International Conference on Control & Automation, Budapest, IEEE.
- Doeswijk, T.G. and K.J. Keesman, 2005. Improving Local Weather Forecasts for Agricultural Applications. Automation, Control and Information Technology (Signal and Image Processing), Novosibirsk, IASTED.
- Doeswijk, T. G. and K. J. Keesman, 2006. Parameter estimation and prediction of nonlinear biological systems: some examples. Accepted for publication in: Proc. of the 14th IFAC symposium on system identification. Newcastle, Australia. Elsevier.
- Doeswijk, T.G., K.J. Keesman and G. van Straten, 2006. Impact of weather forecast uncertainty in optimal climate control of storehouses. Accepted for publication in Proc. of CAPPT 2006, Potsdam.
- Henten, E.J. van, Sensitivity Analysis of an Optimal Control Problem in Greenhouse Climate Management, Biosystems Engineering (2003), vol. 85, pp. 355-364.
- Henten, E.J. van, and J. Bontsema (2006). Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management. Submitted to Control Engineering Practice.
- Keesman, K.J., D. Peters and L.J.S. Lukasse, 2003. Optimal climate control of a storage facility using local weather forecasts, Control Engineering Practice, 11(5), pp 505-516
- Kramer-Cuppen, J.E. de, A.J. van der Voort and L.J.S. Lukasse, 2005. RHOC for weather forecast use in potato storage. Proc. of 24th Benelux Meeting on Systems and Control, 22-24 March, Houffalize, Belgium, p.88
- Kramer, Janneke de; Leo Lukasse; Aart-Jan van der Voort, 2005a. Ventilated Bulk-Storage of Agricultural Produce – a Physical Model.
- Lukasse, L.J.S., J.E. de Kramer, A.J. van der Voort, 2006. A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk-storage of agricultural produce. Accepted for publication in Int'l Journal of Refrigeration.
- Lukasse, Leo, Aart-Jan van der Voort and Janneke de Kramer-Cuppen, 2006. Optimal climate control to anticipate future weather and energy tariffs. Accepted for publication in Proc. of CAPPT 2006, Potsdam.

9 Bijlage, Contactpersonen

Penvoerder:

Wageningen UR, AFSG: dr.ir. L.J.S. Lukasse

Inhoudelijk:

Wageningen UR:	leerstoelgroep MRS	prof.dr.ir. G. van Straten
	PRI	dr. J. Bontsema
	AFSG	dr. ir. L.J.S. Lukasse
Priva Hortimation:		Dr.ir. T.A. van Rieswijk
Tolsma Techniek Emmeloord B.V.:		Ir. J.P. van Maldegem
WNI		E. van Bentum

Stuurgroep:

Weathernews International		E. van Bentum
Wageningen UR - AFSG		Ir. H.L.M.M. Maas
	PRI	Dr.ir. S. Bakker
	leerstoelgroep MRS	prof.dr.ir. G. van Straten
Tolsma Techniek Emmeloord B.V.		Ing. W.P.M. van Hooijdonk
PRIVA B.V.		Ir. S. Noorda
Programmabureau EET		Ing. R.B.H. Ravelli