

A184

Kloos O.

MODEM

Modelgebaseerde Regeling voor
optimale Aardappelbewaring.

voortgangsrapportage januari - juni 1997

P. Hak
G. Verdijck
M. Hertog

VERTROUWELIJK

ato-dlo





ato-dlo

MODEM

**Modelgebaseerde Regeling voor
Optimale Aardappelbewaring**

Voortgangsrapportage januari-juni 1997

VERTROUWELIJK

projectleider	M. Hertog
projectgroep	P. Hak M. Hoving G. van der Kolk J. van Maldegem G. Verdijck
medewerkers	R. Bons W. van Kleef M. van Ooijen H. Sewtahal K. Sinke
eindverantwoordelijke	C. Ceton

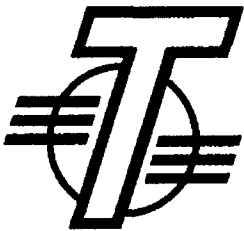
**Agrotechnological
Research Institute
(ATO-DLO)**
Bormsesteeg 59
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
The Netherlands
Telephone: 31.317.475000
Fax: 31.317.475347

Research on:
post harvest physiology
and quality parameters
storage and cell and
molecular biology
product development
logistic expert systems and
computer image analyses

225 1650

MODEM

Modelgebaseerde Regeling voor Optimale Aardappelbewaring



Tolsma Techniek b.v.
Postbus 165
8300 AD Emmeloord



Hoving Automatisering
Reigerweg 21
3897 LH Zeewolde



Dacom Automatisering
Postbus 2243
7801 CE Emmen



ato-dlo
Postbus 17
6700 AA Wageningen

een project gesubsidieerd door

SENER

Den Haag

onder projectnummer

ITU96007

Inhoud

	<i>Blz.</i>
1 Doel van het project	3
1.1 Probleemstelling	3
1.2 Doelstelling	3
2 Projectplanning	4
3 Resultaten januari - juli 1997	6
4 Produktmetingen	7
4.1 Inleiding	7
4.2 Stand van zaken bij aanvang project	7
4.3 Lopende metingen seizoen 1996/1997	8
4.4 Voorlopige resultaten seizoen 1996/1997	9
5 Produktmodel	14
5.1 Inleiding	14
5.2 Stand van zaken bij aanvang project	14
5.3 Huidige stand van zaken	15
6 Schuurmetingen	19
6.1 Inleiding	19
6.2 Uitvoering	19
7 Schuurmodel	21
7.1 Inleiding	21
7.2 Stand van zaken bij aanvang project	21
7.3 Huidige stand van zaken	22
7.4 Validatie	23

1 Doel van het project

1.1 Probleemstelling

Binnen de aardappelindustrie vinden een aantal ontwikkelingen plaats:

- de eisen met betrekking tot de kwaliteit van frites of chips van de consument worden hoger
- de eisen aan de kwaliteit van de aardappelen vanuit de verwerkende industrie worden hoger
- de concurrentie vanuit het buitenland (Oostblok) wordt sterker (voorlopig op prijs in de toekomst op kwaliteit?)

Met het oog op bovenstaande punten is het van groot belang dat de kwaliteit van de Nederlandse aardappel verder te verbeteren. De kwaliteit van aardappelen tijdens bewaring wordt sterk bepaald door de uitgangskwaliteit van aardappelen bij oogst en het bewaarklimaat in de bewaarschuur (voornamelijk temperatuur en relatieve luchtvochtigheid). Door een uitgekende geïntegreerde benadering van de aardappelbewaring vanuit thermodynamische en fysiologische kennis in combinatie met teelt- en weersgegevens is het mogelijk de kwaliteit van de Nederlandse aardappelbewaring verder te verbeteren.

1.2 Doelstelling

Tolsma Techniek stelt zich ten doel om in samenwerking met de automatiseringsbedrijven Dacom en Hoving en het onderzoek instituut ATO-DLO een prototype van een procesapplicatie te ontwikkelen die het klimaat in een aardappelbewaarschuur optimaal kan aansturen met betrekking tot de kwaliteit van de aardappelen (uitgedrukt in bakkleurindex, uitdroging en energieverbruik).

Hiertoe worden ontwikkeld: (a) een fysiologisch model dat de aardappelkwaliteit beschrijft, (b) een thermodynamisch model dat het klimaat in de aardappelschuur beschrijft en (c) een (MPC gebaseerde) regeling die op basis van de eerdergenoemde modellen en andere noodzakelijke informatie de technische installatie van de bewaarschuur aanstuurt. Naast de informatie die door de modellen wordt gegenereerd wordt in de regeling tevens rekening gehouden met het weer en de weervoorspelling. Hiertoe wordt de procescomputer gekoppeld (d) aan een netwerk. Via dit netwerk wordt de applicatie voorzien van de nodige informatie omtrent het weer en andere procesparameters (bijvoorbeeld informatie over de teelt of de ziekteverspreiding onder de aardappelen).

Het ontwikkelde systeem moet in staat zijn om de technische installatie in de bewaarschuur zodanig aan te sturen dat een significante verbetering wordt bereikt met betrekking tot:

- de kwaliteit (bakkleurindex) van de aardappelen bij aflevering
- het percentage uitval (afgekeurde partijen) bij de verwerkende industrie.

2 Projectplanning

Het **MODEM** project is onderverdeeld in 4 hoofd taken (A t/m D):

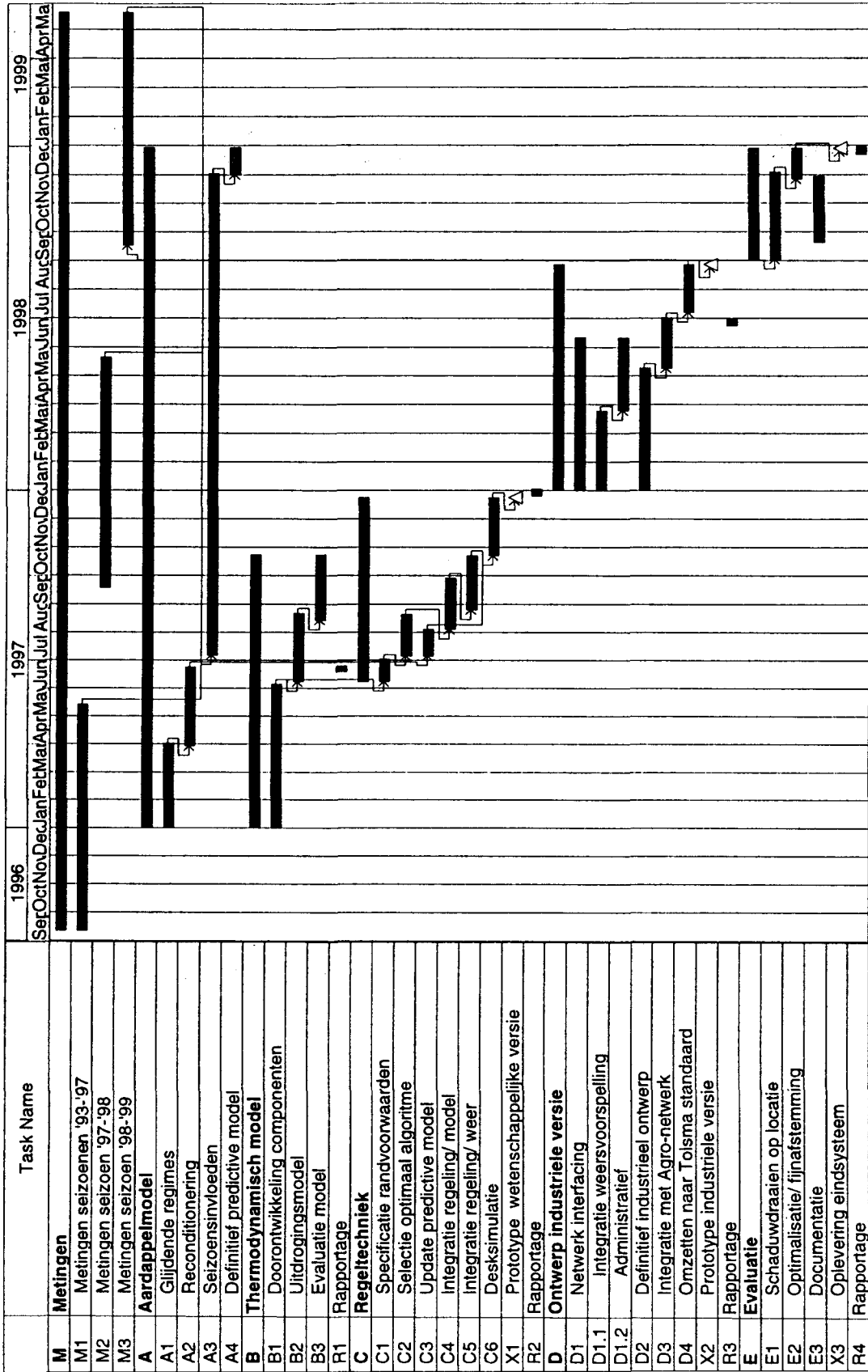
- A Het fysiologisch model van de aardappel
- B Het fysisch model van de aardappelschuur
- C De regelstrategie
- D De integratie van de deelsystemen en de prototype ontwikkeling

Naast deze vier hoofdtaken zijn nog een aantal andere taken te onderscheiden, te weten:

- M Metingen in de praktijk
- E Evaluatie/ optimalisering
- R Rapportage

Gedurende het eerste halfjaar van dit project is de aandacht volgens planning (blz. 5) uitgegaan naar de taken M, A en B. De geboekte voortgang is in overeenstemming met de verwachte voortgang volgens de planning. In dit eerste halfjaarlijkse verslag (R1) zal hiervan verslag worden gedaan.

MODEM PLANNING



Milestone Δ Summary

3 Resultaten januari - juli 1997

In dit eerste halfjaarlijkse verslag wordt de voortgang besproken van het **MODEM** project tijdens de periode januari tot juli 1997. In de volgende hoofdstukken wordt een overzicht gegeven van achtereenvolgens:

Hoofdstuk

- 4 produktmetingen: Deze zijn uitgevoerd tijdens bewaarexperimenten in de bewaarfaciliteiten van ATO-DLO waarbij de nadruk ligt op het achterhalen van het effect van afrijping op het moment van oogst op de bewaarbaarheid. Deze gegevens worden gebruikt voor het verder ontwikkelen van het produktmodel.
- 5 produktmodel: Het produktmodel is verder uitgebouwd om geschikt te maken voor gebruik onder dynamische temperatuur condities.
- 6 schuurmetingen: Apparatuur voor metingen in praktijkbewaarplaatsen is geïnstalleerd om gegevens te verzamelen ten aanzien van temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, koolzuurgas, ventilator draaiuren en klepstanden ten behoeve van de verdere ontwikkeling van het schuurmodel.
- 7 schuurmodel: Het schuurmodel is verder ontwikkeld en gevalideerd aan de hand van de beschikbare schuurmetingen.

4 Produktmetingen

4.1 Inleiding

In de afgelopen jaren zijn door ATO-DLO onderzoekinspanningen verricht en belangwekkende resultaten verkregen op het terrein van de aardappelbewaring. Zo zijn voor langdurige bewaring van aardappelen glijdende bewaarregimes ontwikkeld die met buitenluchtkoeling realiseerbaar zijn of zeer dicht te benaderen. Met deze glijdende bewaarregimes kan de verwerkingskwaliteit beter worden beheerst. De inzichten in de verzoetingsproblematiek zijn verdiept waardoor veroudering kan worden getraceerd voordat, als gevolg hiervan, de bakkleur achteruit gaat.

Ook is een wiskundig beschrijvend model ontwikkeld dat goed in staat blijkt het suikerverloop in de knollen in de tijd te beschrijven. Dit is echter een vaststelling achteraf. Het model gaat er van uit dat de rijpheid van de aardappel bij oogst bepalend is voor het verdere bewaargedrag. Alle factoren die invloed hebben op het fysiologische ontwikkelingsstadium van de aardappelknol komen in het model samen tot één rijpheidsfactor. Deze rijpheidsfactor bepaalt het bewaargedrag van de aardappel. Als deze partijafhankelijke factor gemeten kan worden aan het begin van het bewaarperiode, dan kan de verzoeting en daarmee de bakkleur van de aardappelen bij iedere temperatuur gedurende het hele bewaarperiode worden voorspeld. Dit biedt grote perspectieven voor de afstemming van het bewaarbeleid (partijgericht en energiezuinig bewaren), de kwaliteitsbeheersing en voor de logistieke afstemming van zowel handel als verwerkende industrie.

Dit deel van het onderzoek is specifiek gericht op het vinden van parameters die bruikbaar zijn voor het uitbouwen van het beschrijvende model tot een voorspellend model.

4.2 Stand van zaken bij aanvang project

Voor de verwerking van aardappelen tot frites en chips is een langdurige bewaring van een deel van de aardappelen noodzakelijk. Langdurige bewaring van aardappelen bij lagere temperaturen kan vorming van suikers in de knollen veroorzaken (koudeverzoeting). Te hoge suikergehaltes veroorzaken een te bruine kleur tijdens het bakproces. Dit is het gevolg van een niet-enzymatische reactie tussen aminozuren en reducerende suikers (Maillard-reactie).

Tijdens de bewaring spelen de bewaaromstandigheden en de fysiologische status van de aardappelen een rol bij de koudeverzoeting. De ophoping van suikers in de aardappelen is groter naarmate de bewaarperiode lager is. De gevoeligheid van aardappelen voor koudeverzoeting tijdens langdurige bewaring hangt af van verschillende factoren zoals o.a. ras, bemesting, grondsoort, weersomstandigheden en lengte van het groeiseizoen.

Uit ATO-DLO onderzoek van de afgelopen jaren is naar voren gekomen dat er grote verschillen bestaan in koudeverzoeting tijdens de bewaring tussen de verschillende jaren. Er zijn duidelijke aanwijzingen verkregen dat deze verschillen in suikerophoping tijdens de bewaring bepaald worden door de mate van afrijping van de knollen. De gevormde hoeveelheid reducerende suikers tijdens de bewaring is afhankelijk van het oogsttijdstip. (Te) vroeg geoogst materiaal kan tot twee keer zo veel reducerende suikers bevatten dan later geoogst materiaal bij bewaring bij lagere temperaturen.

Er is al veel onderzoek verricht naar koudeverzoeting. Relaties met teelt en klimaatfactoren

werden al wel vermoed, maar bleken moeilijk bewijsbaar te zijn. ATO onderzoek heeft aangetoond dat er een relatie is tussen de mate van koudeverzoeting en de rijpheid van de aardappelknol. Inmiddels zijn er aanwijzingen om deze rijpheid in een vroegtijdig stadium, rond het oogsttijdstip, te kunnen meten. Hieraan zal in het verdere onderzoek veel aandacht worden besteed. Met het verzoetingsmodel hebben we een onderzoeksinstrument in handen waarmee een directe relatie kan worden gelegd tussen enerzijds de combinatie van teeltfactoren resulterend in een bepaalde rijpheid van het produkt en anderzijds het bewaargedrag. Als het verzoetingsmodel voorzien kan worden van parameters die de rijpheid van de knollen kunnen karakteriseren, kan het model voorspellend gemaakt worden. Dan kan met het model een keuze worden gemaakt voor een zo realistisch mogelijk temperatuurbeleid om een zo optimaal mogelijke afleveringskwaliteit te kunnen realiseren. Dan kan daadwerkelijk partijgericht bewaard gaan worden.

4.3 Lopende metingen seizoen 1996/1997

In 1996 zijn vier rassen aardappelen geteeld op ATO proefboerderij "De Eest" te Nagele (NOP). Het betrof de volgende rassen:

- Turbo vrij vroeg ras
- Agria middenlaat ras
- Asterix . . . vrij laat ras
- Aziza vrij laat tot laat ras

Ieder ras werd op vijf verschillende tijdstippen geoogst, met tussenliggende perioden van twee weken. Veertien dagen vóór ieder oogsttijdstip werd, zoals gebruikelijk in de praktijk, het loof vernietigd (een combinatie van klappen en spuiten).

De relatief vroege rassen Turbo en Agria werden geoogst op achtereenvolgens 20 augustus, 3 en 17 september en 1 en 15 oktober 1996. De latere rassen Asterix en Aziza werd geoogst op achtereenvolgens 3 en 17 september en 1, 15 en 29 oktober 1996.

Direct na ieder oogsttijdstip werd van ieder ras eerst materiaal 13 dagen bewaard bij 14°C voor wondheling. Daarna werd materiaal van de verschillende rassen en oogsttijdstippen opgeslagen bij de volgende temperatuur condities:

- constant 4 °C
- constant 5 °C
- constant 6 °C
- constant 8 °C ^{b)}
- constant 14 °C (om veroudering te induceren) ^{b)}
- glijdend regime van 14-4-14 °C ^{a)}
- glijdend regime van 14-6-14 °C ^{a)}
- glijdend regime van 14-8-14 °C ^{a)}

^{a)} Voor de glijdende regimes werd op 7 oktober 1996 met de geleidelijke temperatuurdaling vanaf 14 °C begonnen. Rond 16 november was 8 °C bereikt, rond 1 december 6 °C en rond 15 december 1996 was 4 °C bereikt. Begin april 1997 werd weer met de geleidelijke temperatuurstijging begonnen. Rond 20 juni 1997 zal 14 °C weer zijn bereikt.

^{b)} Deze resultaten worden hier niet besproken

Per ras en oogsttijdstip zijn monsters genomen op het tijdstip van:

- doodspuiten van het loof,
- oogsten,
- einde wondheling (start bewaring onder verschillende condities).

Van deze monsters werden steeds de suikers en de bakkleur-index bepaald en werd een deel gevriesdroogd. Van de gevriesdroogde monsters zullen op termijn verschillende componenten worden bepaald die mogelijk aanwijzingen kunnen opleveren voor verschillen in rijpheid.

Om het bewaargedrag te kunnen volgen onder de verschillende opslagcondities zijn per ras/oogsttijdstip en bewaarconditie periodiek de gehalten aan sucrose en reducerende suikers en de bakkleur-index bepaald. Tijdens de eerste twee maanden opslag werden deze bepalingen uitgevoerd om de veertien dagen en later (tot ca. 20 augustus 1997) om de maand.

4.4 Voorlopige resultaten seizoen 1996/1997

Om een indruk te geven hoe de verschillende oogsttijdstippen (rijpheden) uitwerken op het bewaargedrag zijn in de figuren 1 t/m 8 voorlopige resultaten m.b.t. het verloop van de bakkleurindex van het lopende bewaarstadium gegeven. Per figuur is steeds het verloop van de bakkleur voor het eerste, derde en vijfde oogsttijdstip gegeven.

In figuur 1 en 2 zijn de resultaten voor het ras Turbo weergegeven.

In figuur 3 en 4 zijn de resultaten voor het ras Agria weergegeven.

In figuur 5 en 6 zijn de resultaten voor het ras Asterix weergegeven.

In figuur 7 en 8 zijn de resultaten voor het ras Aziza weergegeven.

In de respectievelijke figuren staan steeds de bakkleurindicis van het betreffende ras voor achtereenvolgens de drie lage bewaartemperaturen (4, 5 en 6 °C) en de drie regimes (14-4,6,8-14 °C). In de figuren is steeds middels een horizontale lijn bij een bakkleur-index van 4 de grens van het acceptabele en onacceptabele gebied aangegeven. Gebruikelijk zijn bakkleurindicis tot 4 acceptabel en > 4 onacceptabel.

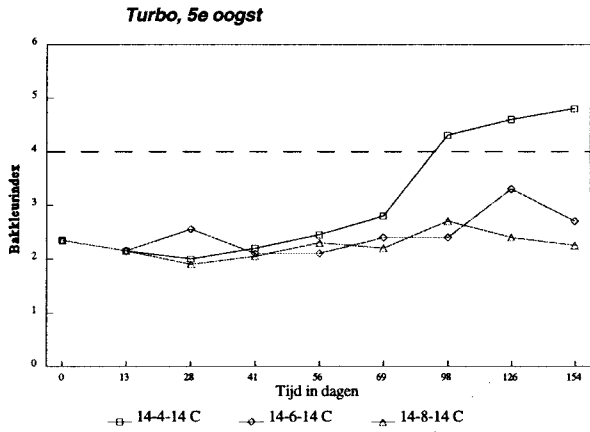
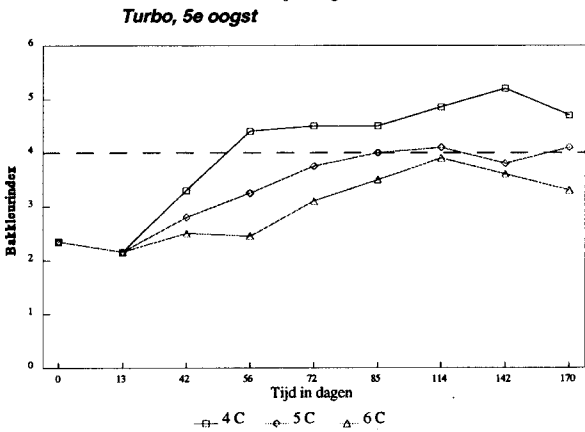
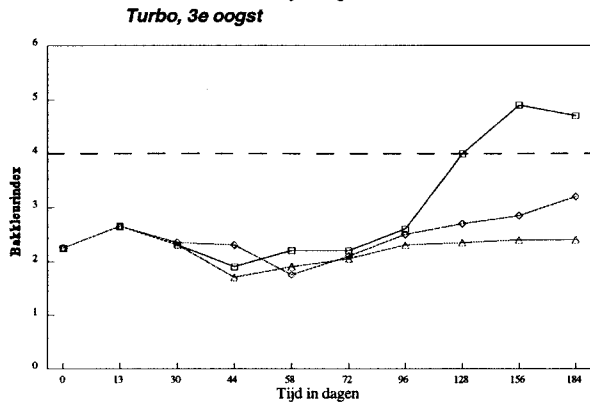
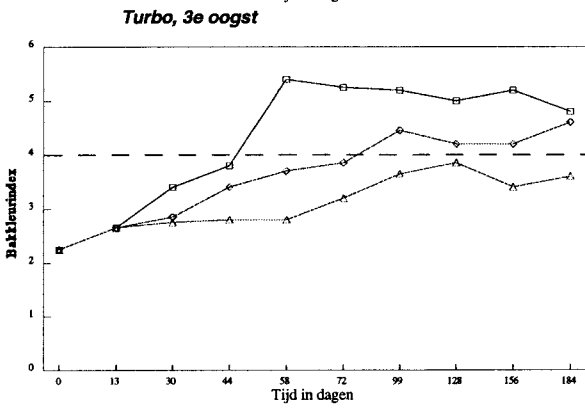
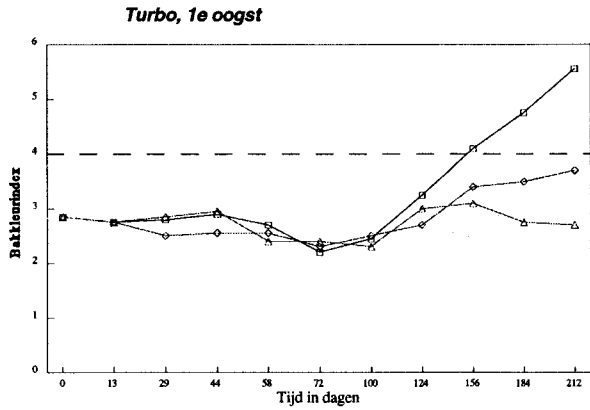
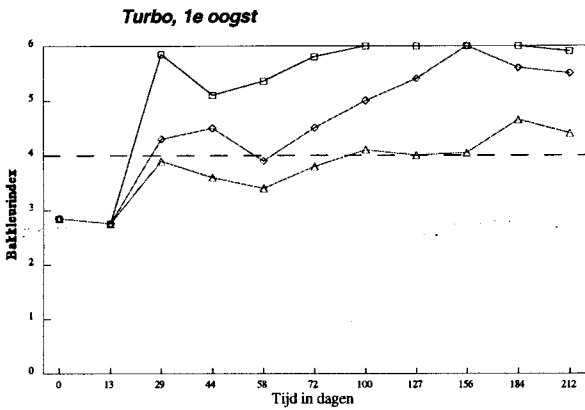
Uit de figuren blijkt dat aardappels van de eerste oogst sneller suikers accumuleren en doorgaans hogere waarden bereiken dan aardappels van de vijfde oogst. De derde oogst ligt hier ergens tussenin. Dit komt met name naar voren tijdens koudeverzoeting bij de lage constante temperaturen (Fig. 1, 3, 5 en 7). Het temperatuureffect wordt bovendien kleiner naarmate de aardappels later geoogst zijn.

De verschillen tussen de oogsten bij bewaring onder de glijdende regimes (Fig. 2, 4, 6 en 8) zijn doorgaans aanzienlijk geringer. Als gevolg van de relatief warme bewaring tijdens de inkoelperiode zijn de verschillen tussen de partijen die bij oogst aanwezig waren weer deels weggewerkt.

Vergelijking van de resultaten van de constante bewaartemperaturen met die van de overeenkomstige glijdende regimes (dus bijv. 4 °C met 14-4-14 °C etc.) laat zien dat, ongeacht ras en oogsttijdstip, het verloop van de bakkleur bij de glijdende bewaarregimes beter is dan bij de overeenkomstige constante bewaartemperaturen.

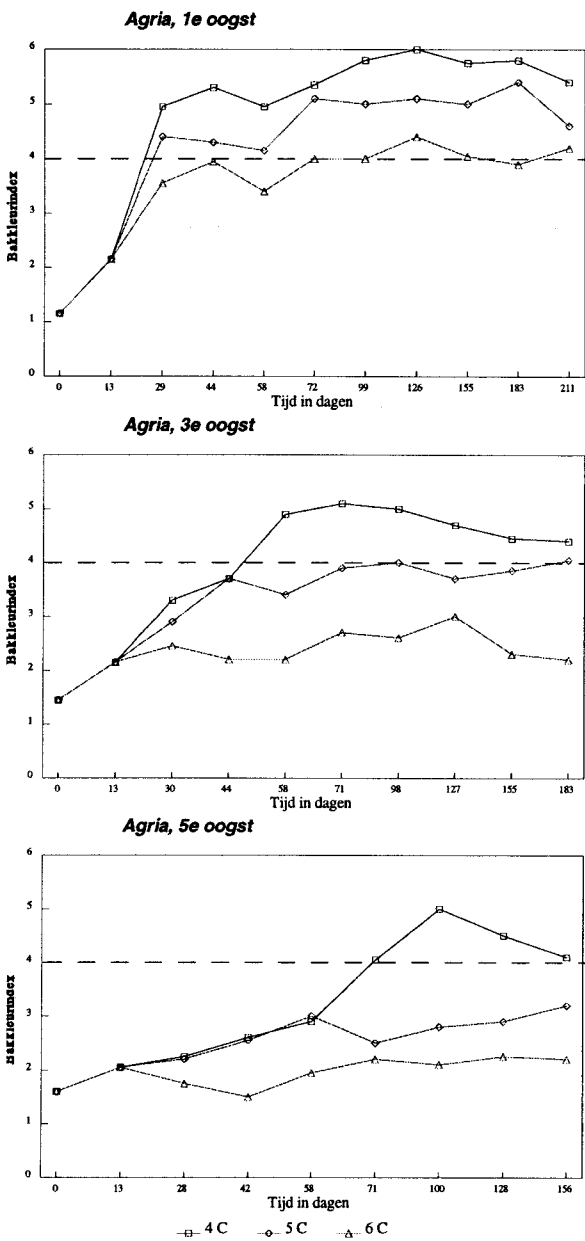
Tenslotte zijn er kleine rasverschillen zichtbaar.

Uit de voorlopige resultaten van seizoen 1996/1997 komt duidelijk naar voren dat het oogsttijdstip, en daarmee de mate van rijpheid, bepalend is voor het verdere verloop van de verwerkingskwaliteit tijdens de bewaring. Wanneer de gegevens in termen van geaccumuleerde hoeveelheid reducerende suikers beschikbaar komt, kunnen deze gegevens worden geanalyseerd met het verzoetingsmodel om de in het model gedefinieerde rijpheidsfactor te bepalen. Vervolgens zal worden gezocht naar een relatie tussen de in het model gedefinieerde rijpheidsfactor met een meting aan het gevriesdroogde materiaal.

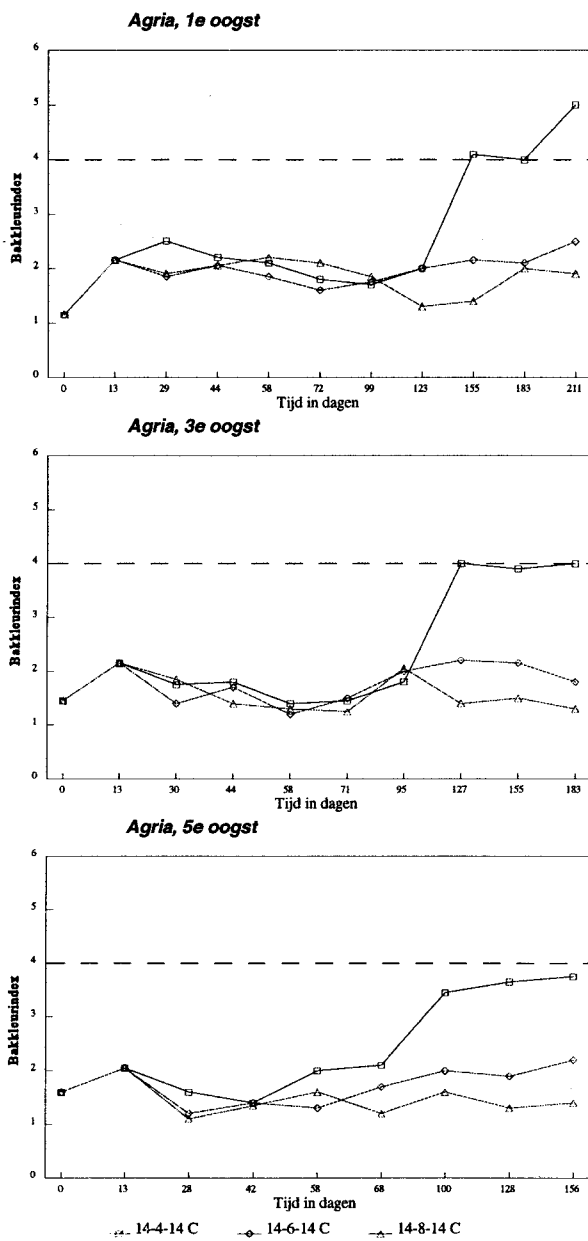


Figuur 1: Bakkleurindex voor Turbo aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij constant 4, 5 of 6 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleurindex 4

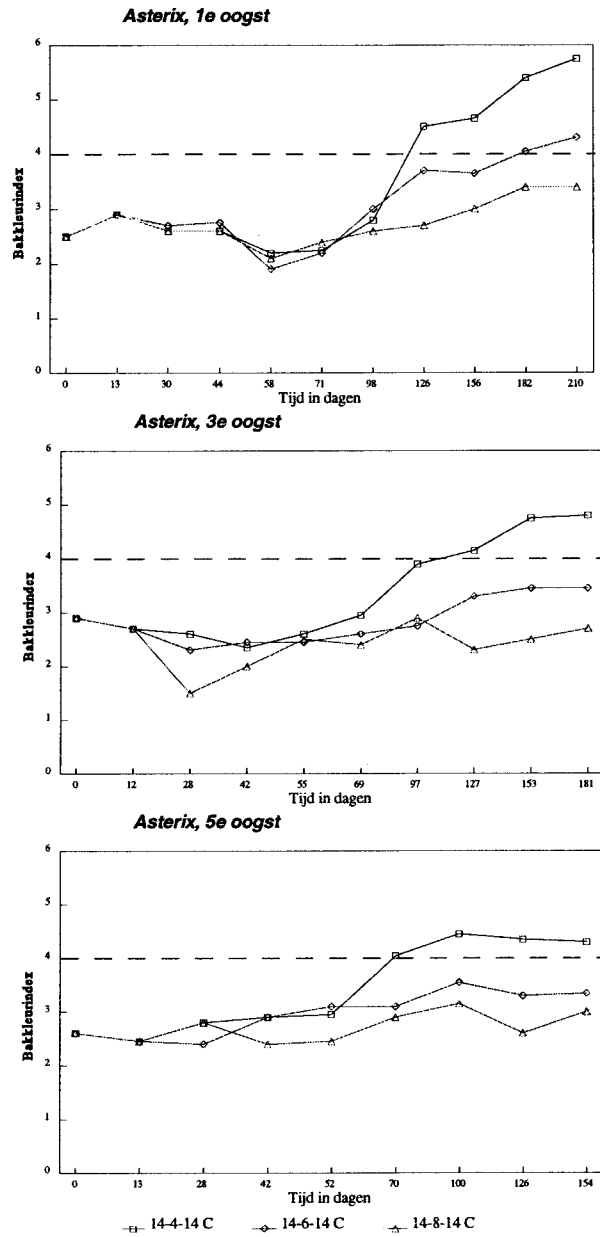
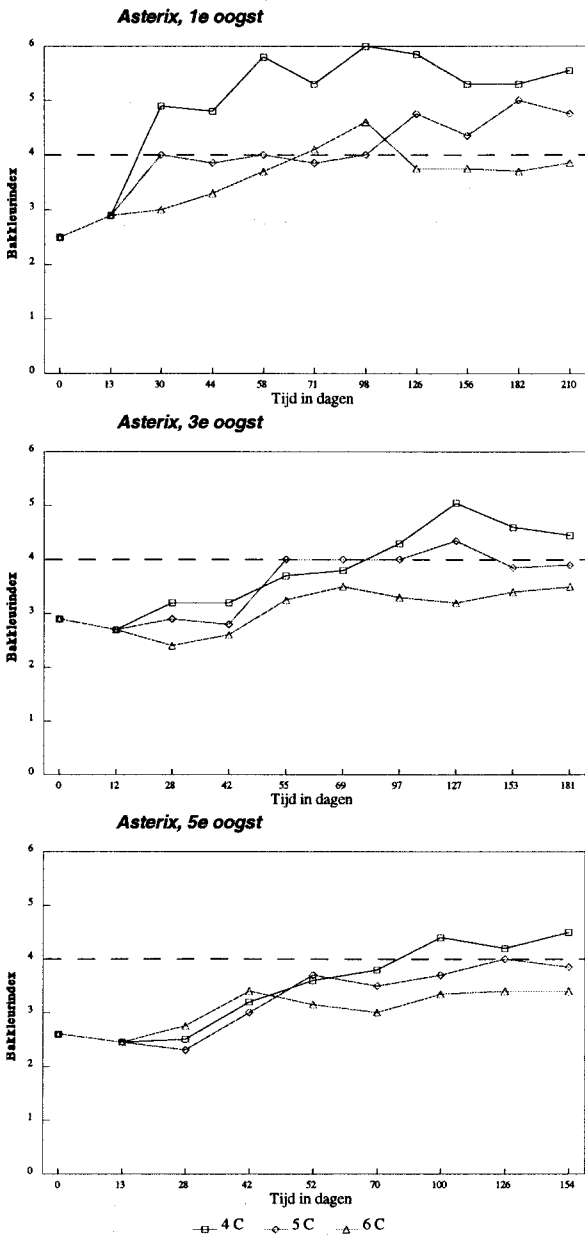
Figuur 2: Bakkleurindex voor Turbo aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij de regimes 14-4-14 °C, 14-6-14 °C of 14-8-14 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleur index 4



Figuur 3: Bakkleurindex voor Agria aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij constant 4, 5 of 6 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleurindex 4



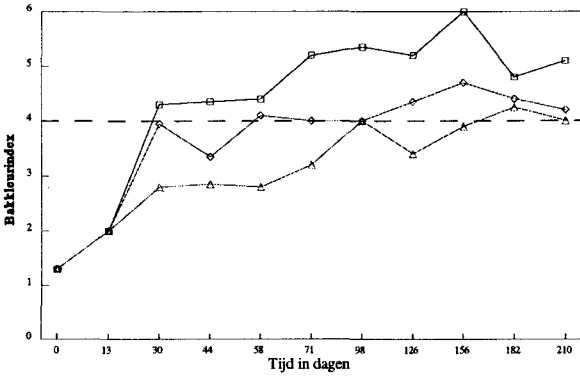
Figuur 4: Bakkleurindex voor Agria aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij de regimes 14-4-14 °C, 14-6-14 °C of 14-8-14 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleur index 4



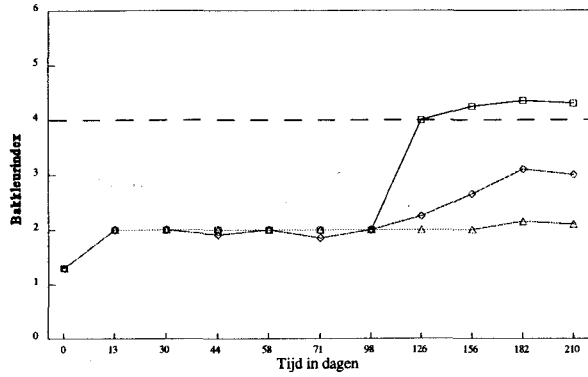
figuur 5: Bakkleurindex voor Asterix aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij constant 4, 5 of 6 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleurindex 4

Figuur 6: Bakkleurindex voor Asterix aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij de regimes 14-4-14 °C, 14-6-14 °C of 14-8-14 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleur index 4

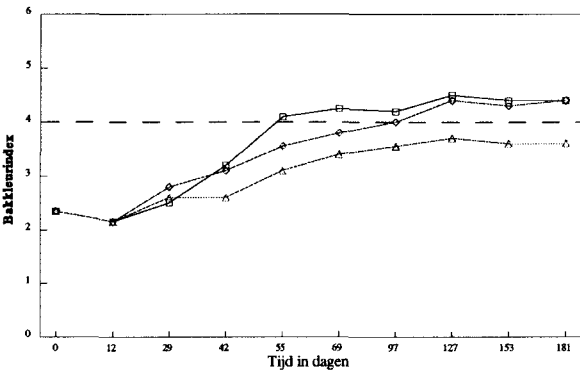
Aziza, 1e oogst



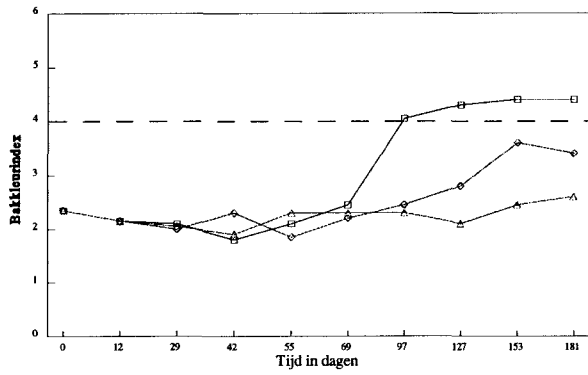
Aziza, 1e oogst



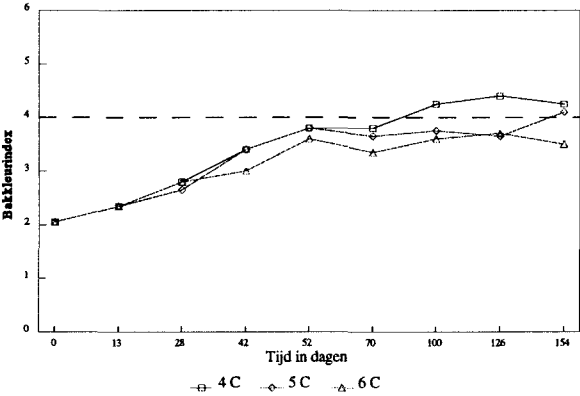
Aziza, 3e oogst



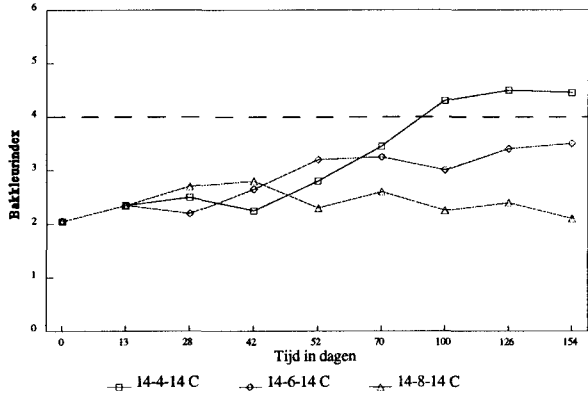
Aziza, 3e oogst



Aziza, 5e oogst



Aziza, 5e oogst



figuur 7: Bakkleurindex voor Aziza aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij constant 4, 5 of 6 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleurindex 4

Figuur 8: Bakkleurindex voor Aziza aardappelen afkomstig van oogst 1, 3 en 5 tijdens bewaring bij de regimes 14-4-14 °C, 14-6-14 °C of 14-8-14 °C. De horizontale stippellijn geeft de grens aan van bakkleur index 4

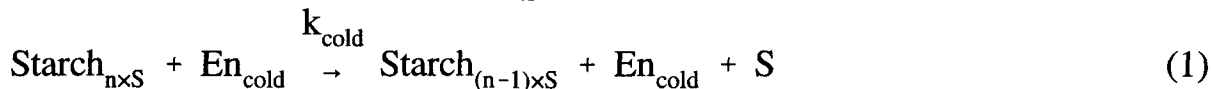
5 Produktmodel

5.1 Inleiding

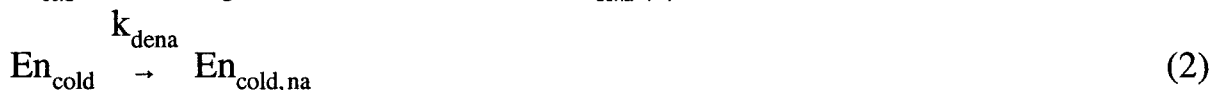
In de afgelopen jaren is bij ATO-DLO veel bewaaronderzoek verricht aan aardappelen voor de verwerkende industrie. Hierbij is met name gekeken naar het effect van temperatuur op bakkleur, geaccumuleerde hoeveelheid reducerende suikers en gewichtsverliezen. In verband met het grote belang voor de verwerkende industrie is een kwaliteitsverloopmodel ontwikkeld dat de accumulatie van reducerende suikers tijdens de bewaring kan beschrijven. Dit model blijkt in staat te zijn de jarenlang verzamelde gegevens op een goede manier te kunnen beschrijven. Processen als koudeverzoeting en ouderdomsverzoeting en hun temperatuurafhankelijkheid kunnen voor verschillende rassen over de verschillende seizoenen worden verklaard. Met het ontwikkelde model is de zeer uitgebreide experimentele kennis in hanteerbare vorm beschikbaar gekomen.

5.2 Stand van zaken bij aanvang project

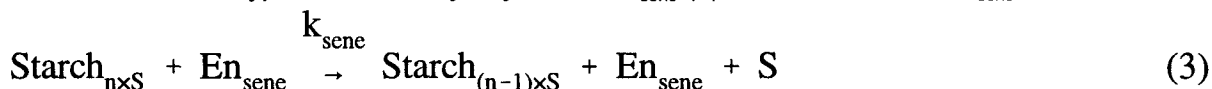
Het verzoetingsmodel dat is ontwikkeld is gebaseerd op een simplificatie van het mechanisme dat verantwoordelijk wordt geacht voor de verzoeting van aardappelen. Het enzymstelsel verantwoordelijk voor koudeverzoeting splits suikereenheden af van de zetmeelketens. Deze reactie (1) verloopt met een snelheid k_{cold} .



De ervaring dat aardappelen later in het seizoen minder gevoelig zijn voor lage temperaturen dan bij aanvang van het seizoen heeft geleid tot het idee dat het betreffende enzymstelsel gevoelig is voor veroudering. In de loop van de bewaring wordt het koudeverzoetings enzym En_{cold} dan ook afgebroken met een snelheid k_{dena} (2).



Equivalent aan de koudeverzoeting vindt ouderdomsverzoeting plaats. Deze wordt verwezenlijkt door een tweede hypothetisch enzymstelsel En_{sene} (3) met een snelheid k_{sene} .



Dit enzymstelsel wordt typisch pas in de loop van de bewaring actief. Er wordt dan ook van uitgegaan dat dit systeem nog moet worden gevormd tijdens de bewaring (4) met een snelheid k_{form} .



Mogelijk moet deze exponentiële toename worden geïnterpreteerd als een membraandesintegratie als gevolg waarvan de substraat-enzym interactie toeneemt resulterend in een netto toegenomen enzymactiviteit.

De geaccumuleerde suikers kunnen tenslotte nog via de ademhaling worden verwijderd met een snelheid k_{resp} .



Elk van de hierboven gebruikte reactiesnelheden is afhankelijk van de temperatuur. Op grond van de geschetste reactiemechanismen is een stelsel differentiaalvergelijkingen opgesteld die beschrijft hoe het niveau aan enzymen (En_{cold} , En_{sene}) en suikers (S) verandert in functie van tijd en temperatuur (6). Dit is de kern van het gehele verzoetingsmodel.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dEn_{cold}}{dt} = -k_{dena} \cdot En_{cold} \\ \frac{dEn_{sene}}{dt} = k_{form} \cdot En_{sene} \\ \frac{dS}{dt} = k_{cold} \cdot En_{cold} \cdot Starch + k_{sene} \cdot En_{sene} \cdot Starch - k_{resp} \cdot S \cdot O_2 \end{array} \right. \quad (6)$$

Deze formulering is gebruikt om de bewaring bij constante temperaturen te beschrijven van Bintje (3 seizoenen), Saturna (2 seizoenen), Agria (1 seizoen) en Van Gogh (1 seizoen). Hierbij is een verklaring van gemiddeld 95% bereikt.

Om de verschillen tussen seizoenen te kunnen verklaren is terugggegrepen op literatuurgegevens waarin wordt gesteld dat tijdens de normale ontwikkeling van aardappels in het veld, de hoeveelheid van bepaalde bij het suikermetabolisme betrokken enzymen afneemt. Analoog hieraan hebben we verondersteld dat later geoogst produkt minder enzym (En_{cold}) bevat.

Het bleek inderdaad mogelijk seizoensverschillen op deze manier terug te voeren op initiële verschillen in En_{cold} . Alle andere model parameters zijn voor de opeenvolgende seizoenen van bijvoorbeeld Bintje gelijk verondersteld. De factor $En_{cold,0}$ kan dus de waargenomen verschillen tussen partijen verklaren ervan uitgaande dat deze verschillen gerelateerd zijn aan een verschil in rijpheid. Hierbij maakt het niet wezenlijk uit of dit verschil in fysiologische leeftijd van de knollen is bepaald door omgevingsfactoren (o.a. weer en bemesting) of door het oogsttijdstip. Om het model geschikt te maken voor gebruik binnen **MODEM** moet het nu verder worden gevalideerd voor dynamische temperaturen en moet de voorspellende kracht op grond van een initiële rijpheid verder worden getoetst.

5.3 Huidige stand van zaken

Gedurende het eerste halfjaar van **MODEM** is volgens planning gekeken naar de mogelijkheid om het model ook geschikt te maken voor het beschrijven van dynamische temperatuurcondities. Tijdens 'real life' bewaarsituaties zullen namelijk zelden lange perioden van constante temperatuur optreden.

Een model dat ontwikkeld is voor constante temperaturen hoeft niet per definitie geschikt te zijn voor gebruik onder dynamische condities. Een en ander hangt samen met de toegepaste

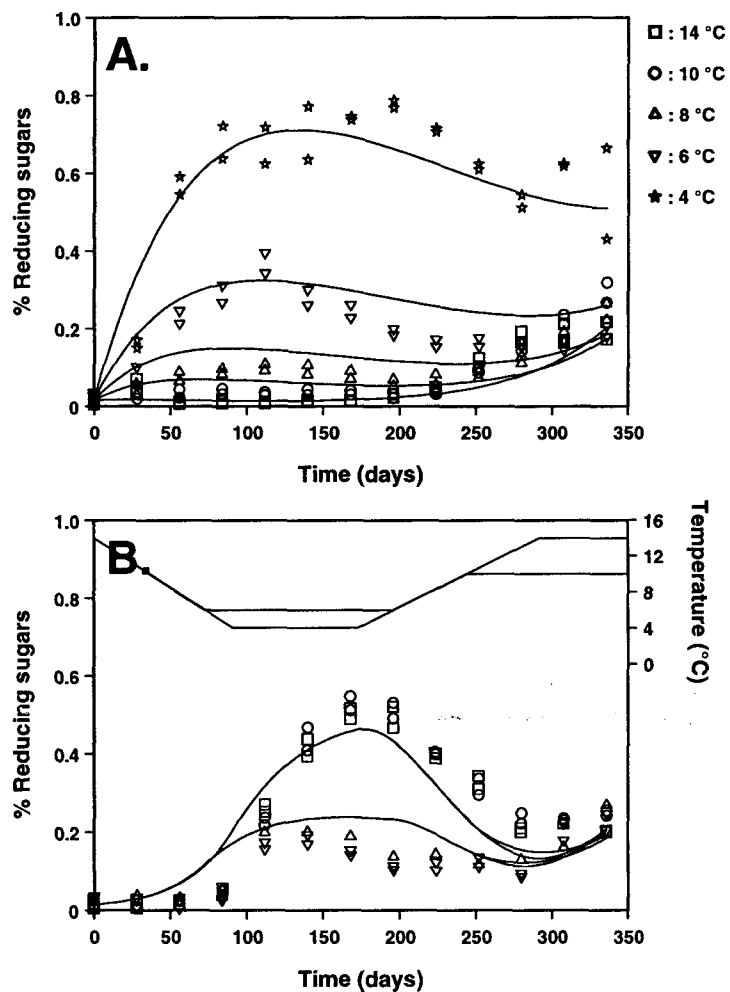
vereenvoudigingen in het model. Voor constante condities kunnen allerlei biochemische evenwichtsreacties gevoelig worden vereenvoudigd tot onomkeerbare aflopende reacties. Juist onder dynamische temperatuur condities kunnen evenwichtsreacties echter nogal eens de neiging hebben van richting te veranderen. Hier moet binnen de gekozen modelstructuur dan nog wel mogelijkheid voor zijn. Binnen de bestaande modelstructuur is indirect nog steeds één zo'n evenwicht aanwezig. Het evenwicht tussen suiker aanmaak (reactieschema 1 en 3) en suiker afbraak (reactieschema 5). In eerste instantie is dan ook gekeken in hoeverre deze modelstructuur voldoende is om de waargenomen verschijnselen onder dynamische temperatuurcondities te beschrijven.

Hiertoe zijn gegevens gebruikt van twee seizoenen Bintje (1991-1992, 1992-1993). De dataset verzameld bij constante temperaturen is uitgebreid met gegevens van reconditioneren en glijdende bewaarregimes.

Bij reconditioneren zijn knollen na bewaring bij een constante temperatuur overgebracht voor een nabewaring van twee weken bij 18 °C. Deze behandeling wordt in de praktijk op beperkte schaal toegepast om geaccumuleerde suikers weer te verwijderen. Tijdens het ATO bewaaronderzoek is deze behandeling veelvuldig toegepast door het gehele bewaarperiode heen om de reversibiliteit van de suikeraccumulatie te onderzoeken. Hierdoor is nu een zeer uitgebreide dataset beschikbaar.

De glijdende bewaarregimes zijn reeds eerder ter sprake gekomen en deze houden in dat startende vanaf 14 °C gedurende het najaar geleidelijk wordt ingekoeld (1 °C per week) naar een constante bewaar temperatuur (4-8 °C) waarna in het voorjaar weer geleidelijk (1 °C per week) wordt opgewarmd naar 10 of 14 °C. Op grond van buitenluchtcoeling is zo een stabiel temperatuurbeleid te realiseren dan weer wordt getracht door het hele seizoen een constant lage temperatuur te handhaven.

Er is voor gekozen om direct twee seizoenen tegelijk te bekijken om zodoende te controleren of de



Figuur 9: De accumulatie van reducerende suikers (glucose en fructose) tijdens bewaring bij constante temperaturen (A.) en bij de glijdende temperatuur regimes (B.). Zoals aangegeven in de bovenste helft van B.. De symbolen zijn gemeten waarden en de lijnen zijn gesimuleerd m.b.v. het model. De duplo bepalingen staan voor de glucose and fructose bepaling

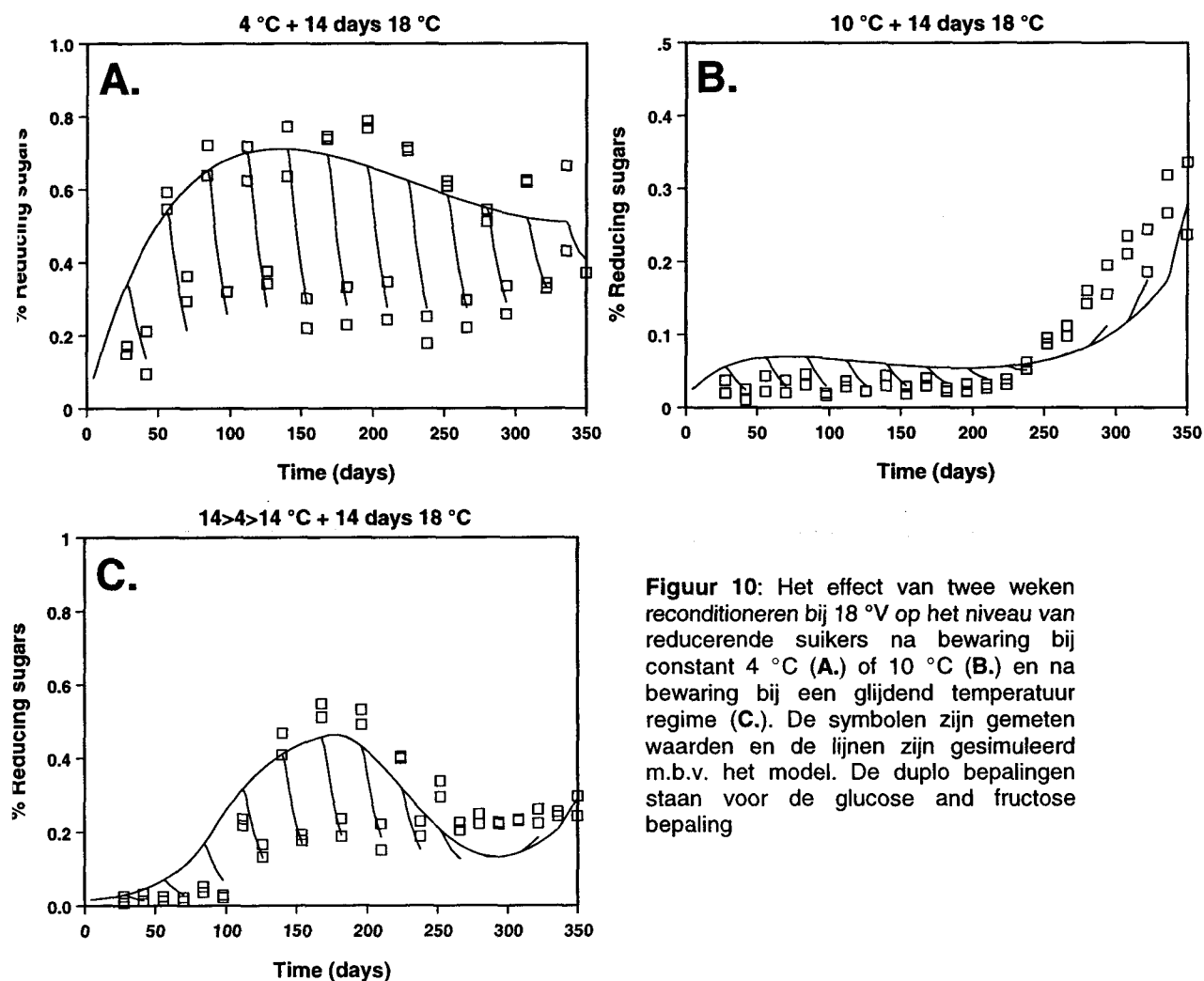
verklarende kracht op grond van een verschillende rijpheid behouden blijft.

De gezamenlijke analyse van alle gegevens van twee seizoenen Bintje resulteert in een verklaring van 88%. Dit betreft dus alle metingen afkomstig van:

- twee seizoenen
- bewaring bij constante temperaturen
- bewaring bij glijdende temperatuur regimes
- reconditionering na bewaring bij constante temperaturen
- reconditionering na bewaring bij glijdende temperatuur regimes.

Deze verruiming van de toepasbaarheid van het model gaat ten koste van de verklarende kracht (88% i.p.v. de in het verleden bereikte 92% voor de analyse van constante temperaturen van drie seizoenen Bintje) maar is met behoud van de mogelijkheid om meerdere seizoenen/partijen te combineren m.b.v. één rijpheidsafhankelijke factor.

In figuur 9 staan de resultaten uitgezet van het model voor bewaring bij constante 9.A) en geleidelijke temperaturen (9.B). Figuur 10 geeft het effect weer van reconditioneren. Beide figuren bevatten alleen de gegevens voor Bintje van seizoen 1992-1993.



Figuur 10: Het effect van twee weken reconditioneren bij 18 °V op het niveau van reducerende suikers na bewaring bij constant 4 °C (A.) of 10 °C (B.) en na bewaring bij een glijdend temperatuur regime (C.). De symbolen zijn gemeten waarden en de lijnen zijn gesimuleerd m.b.v. het model. De duplo bepalingen staan voor de glucose and fructose bepaling

Uit de figuren blijkt dat alle fenomenen met het model te beschrijven zijn: het temperatureffect op de verzoeting, veroudering, reconditionering, het teruglopen van het reconditioneereffect later in de bewaring en de negatieve reconditioneereffecten tijdens de verouderingsfase. Al deze gedragingen zijn in principe aanwezig, alleen in detail zijn er nog afwijkingen van de experimentele waarden.

Eerste oriënterende structurele aanpassingen van het model om deze afwijkingen te kunnen ondervangen hebben echter nog niet tot een significante verbetering van het model geleid. Vooralsnog zal de bestaande modelstructuur dan ook worden gehandhaafd om eerst alle beschikbare experimentele data van de diverse cultivars te analyseren.

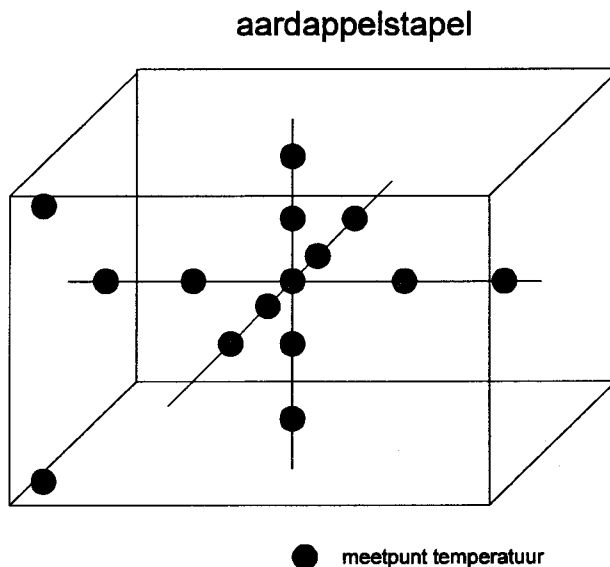
6 Schuurmetingen

6.1 Inleiding

Datasets zijn onmisbaar bij het bepalen van de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van het ontwikkelde model. Ook wordt het zichtbaar welke aspecten verbeterd of meegenomen moeten worden in de modellering. Bij aanvang van het project waren geen volledige datasets beschikbaar van de bewaarplaats. Dit is echter wel noodzakelijk en daarom worden er uitgebreide metingen verricht in kader van dit project. In de metingen die voor dit project worden uitgevoerd worden de volgende aspecten opgenomen:

- Het temperatuurverloop in verticale richting in het centrum van de aardappelstapel;
- Het temperatuurverloop in horizontale richting;
- Het temperatuurverloop in de bovenruimte, luchtsluis en luchtkanalen;
- De relatieve luchtvochtigheid in verticale richting in het centrum van de aardappelstapel;
- De relatieve luchtvochtigheid in de bovenruimte, luchtsluis en luchtkanalen;
- Het CO₂-verloop in verticale richting in het centrum van de aardappelstapel;
- De temperatuur en relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht die binnenkomt bij externe ventilatie.

In Figuur 11 zijn de locaties van de temperatuurmetingen in de aardappelstapel weergegeven.



Figuur 11: Locatie meetpunten temperatuur

6.2 Uitvoering

In het bewaar seizoen '96-'97 zijn in één bewaarplaats alle temperatuurmetingen aangebracht. De verkregen datasets worden gebruikt voor modelvalidatie. Analyse van de verkregen metingen van de temperatuur moet duidelijkheid verschaffen over onder meer het benodigde aantal meetpunten in de luchtsluis en de bovenruimte. Daarnaast worden de meest geschikte meetlocaties om de effecten van de buiten- en zijmuren van de bewaarplaats op de

aardappelstapel te meten bepaald. De apparatuur om de relatieve luchtvochtigheid en het CO₂-gehalte te meten wordt in het bewaar seizoen '96-'97 getest om deze grootheden in het bewaar seizoen '97-'98 te kunnen meten. Verder wordt het gehele data-acquisitie en data-opslag systeem dit bewaar seizoen in de praktijk uitgevoerd, zodat het gehele systeem gecontroleerd en verbeterd kan worden voor een optimale data-acquisitie in het bewaar seizoen '97-'98.

De meting van het CO₂-gehalte en de relatieve luchtvochtigheid in het centrum van de aardappelstapel wordt uitgevoerd door met een pomp de lucht van de gewenste locaties door slangen aan te zuigen, waarna de gewenste grootheden worden gemeten.

In het bewaar seizoen '96-'97 zijn de noodzakelijke meetinstrumenten geplaatst tijdens de bewaring. Dit betekent dat een aantal meetinstrumenten niet geplaatst kon worden en er bij een aantal metingen sprake is van een destructieve plaatsing van de meetinstrumenten. Voor het bewaar seizoen '97-'98 wordt het gehele meetsysteem aangelegd voordat met de inschuring van de aardappelen wordt begonnen. Op deze manier hoeven de meetinstrumenten tijdens het inschuren enkel op de juiste locatie aangebracht te worden. Hiermee is het mogelijk om het gehele meetsysteem niet-destructief te plaatsen, wat na de inschuring tijdens een lopend bewaar seizoen niet meer mogelijk is.

7 Schuurmodel

7.1 Inleiding

Een fysisch model van de bewaarplaats is noodzakelijk om te kunnen anticiperen op weers- en produktinvloeden. Het schuurmodel kan worden gebruikt bij de bepaling van de optimale strategie om het klimaat in de bewaarplaats zo goed mogelijk te regelen. Dit met als doel de gewenste optimale produktkwaliteit te bereiken. Naast een optimale produktkwaliteit wordt gestreefd naar een minimaal energieverbruik.

Het schuurmodel van de bewaarplaats moet de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en eventueel de gassamenstelling beschrijven. Het suikergehalte in de aardappelen wordt grotendeels bepaald door het temperatuurverloop in de bewaarplaats. De temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid bepalen het vochtverlies en het daarmee gepaard gaande gewichtsverlies van de aardappelen. Naast temperatuur en relatieve luchtvochtigheid is de gassamenstelling in de bewaarplaats van belang om degeneratie verschijnselen in de aardappel te vermijden. De gassamenstelling wordt bepaald door de ademhaling van de aardappelen en door de mate van ventilatie. Door van deze gegevens gebruik te maken, kan uit de juiste fysische vergelijkingen een model voor de bewaarplaats worden afgeleid. Een noodzakelijk stap bij het modelleren is altijd de validatie van het model om de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van het model te bepalen. Hiervoor zijn metingen aan een bewaarplaats noodzakelijk.

Eerst wordt kort de stand van zaken aan het begin van het project omschreven, gevolgd door een beschrijving van de uitbreidingen en verbeteringen die inmiddels zijn uitgevoerd. Tot slot worden de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van het thermodynamische deel van het schuurmodel besproken aan de hand van de beschikbare metingen.

7.2 Stand van zaken bij aanvang project

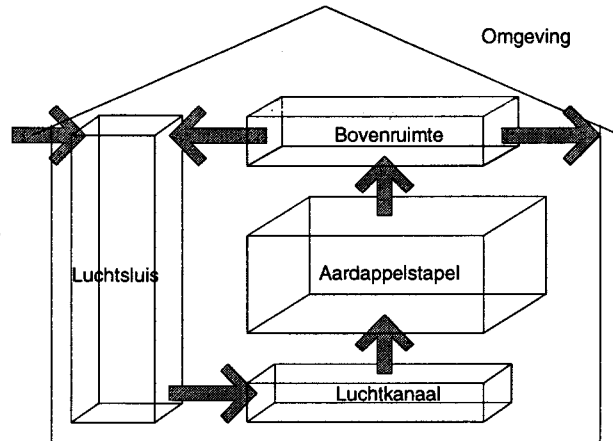
Voorafgaand aan **MODEM** is bij ATO-DLO een voorstudie uitgevoerd naar het modelleren van de aardappelbewaarplaats. Hierbij is een eenvoudig model opgesteld dat de temperaturen van aardappelen en lucht en het vochtgehalte van de lucht beschrijft. Behalve dat de vocht- en suikergehalten en het gewichtsverlies van de aardappelen niet worden beschreven, beperken de eerdere modellen zich tot een profiel bestaande uit drie punten in het centrum van de aardappelstapel. Verschillen in horizontale richting door de aardappelstapel worden verwaarloosd, terwijl een relatief groot rekentijd benodigd is. Verder is het bepalen van een verloop in verticale richting, gebaseerd op slechts drie punten, niet erg betrouwbaar. Validatie van het model met beschikbare metingen tonen onverklaarde verschillen, waarbij verschillen van 1,5 C niet uitzonderlijk zijn. Dit is aanleiding om in het kader van **MODEM** een nieuw en uitgebreider schuurmodel voor de aardappelbewaring te ontwikkelen.

7.3 Huidige stand van zaken

De bewaarplaats is onder te verdelen in een aantal afzonderlijk te modelleren eenheden, zie Figuur 12:

- Aardappelstapel;
- Bovenruimte;
- Luchtsluis;
- Luchtkanaal.

Indien voldoende meetgegevens beschikbaar zijn kunnen deze eenheden ook afzonderlijk worden gevalideerd.



Figuur 12: Bewaarplaats in afzonderlijke eenheden

Aardappelstapel

Behalve de differentiaalvergelijkingen voor de temperaturen van de lucht en de aardappelen zijn differentiaalvergelijkingen opgesteld voor het vochtgehalte van zowel de lucht als de aardappelen. Om in verticale richting een verloop van temperatuur en vochtgehalte te kunnen bepalen is in eerste instantie uitgegaan van een zeer groot aantal elementen. In een volgende stap is het aantal elementen zodanig gereduceerd dat enerzijds het nog steeds mogelijk is om het karakteristieke verloop in verticale richting te beschrijven en anderzijds het aantal elementen af te stemmen op de realiseerbare metingen, zodat een maximale betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van het model worden verkregen bij een acceptabele rekentijd.

Behalve in verticale richting is het ontwikkelde model in staat het verloop van temperatuur en vochtgehalte in horizontale richting te beschrijven. Dit verloop wordt veroorzaakt door de invloed van buiten- en zijmuren op de aardappelstapel. Verder kan er sprake zijn van een inhomogene verdeling van aardappelen over de bewaarplaats. Door deze uitbreiding van het model kan de gehele bewaarplaats in de beschouwing worden meegenomen en kan het effect van de regelstrategie worden afgestemd en beoordeeld op de gehele bewaarplaats in plaats van zich te beperken tot het centrum van de aardappelstapel.

Naast de ruimtelijke effecten is het model van de bewaarplaats zodanig uitgebreid dat het gewichtsverlies en de natuurlijke opwarming van de aardappelen tijdens de bewaring voorspeld kunnen worden. Dit maakt het tevens mogelijk om in de regelstrategie rekening te houden met het gewichtsverlies om deze zo minimaal mogelijk te houden. Verder is het suikermodel inmiddels opgenomen in het model. Het ontwikkelde model is in staat om het tijdsverloop van de suikergehalten en de variatie over de gehele bewaarplaats te beschrijven.

Bovenruimte

De bovenruimte is gemodelleerd als een ideaal gemengde ruimte, waarmee wordt aangenomen dat door de gehele bovenruimte een gelijke temperatuur en vochtgehalte heersen. Een belangrijk onderdeel bij de modellering van de bovenruimte is de warmteuitwisseling van de bovenruimte met de omgeving via de zijmuren en het dak. Voor deze beschrijving wordt gebruik gemaakt van afschattingen van de isolatiewaarden.

Luchtsluis

Het grootste probleem bij de modellering van de luchtsluis is de bepaling van de relatie tussen de stand van het ventilatieluik dat buitenlucht tijdens de ventilatie binnenlaat en het luchtdebiet. Dit wordt opgelost door het debiet te relateren aan het actuele doorlaatoppervlak van het luik. Eventueel kan deze relatie worden uitgebreid om de weerstand die de luchtstromen van buiten en uit de bovenruimte ondervinden te beschrijven. De relatie tussen het luchtdebiet door de luiken en de stand van deze luiken maakt het mogelijk om met redelijke nauwkeurigheid de temperatuur in de luchtsluis te beschrijven.

Luchtkanaal

Indien er wordt geventileerd in de bewaarplaats, wordt door een ventilator lucht vanuit de luchtsluis naar het luchtkanaal geblazen. In het model wordt de warmte die de ventilatoren aan de lucht afstaan tijdens ventilatie in rekening gebracht. Tussen de ventilatieperioden in, heerst in het luchtkanaal dezelfde temperatuur en vochtgehalte als in de luchtsluis.

Naast bekendheid over de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van het ontwikkelde model moet de validatie ook duidelijkheid verschaffen over de grootte van de effecten in horizontale richting. Met deze informatie kan het model worden aangepast en worden verbeterd, zodat het beter geschikt is om een optimale bewaring van aardappelen mogelijk te maken.

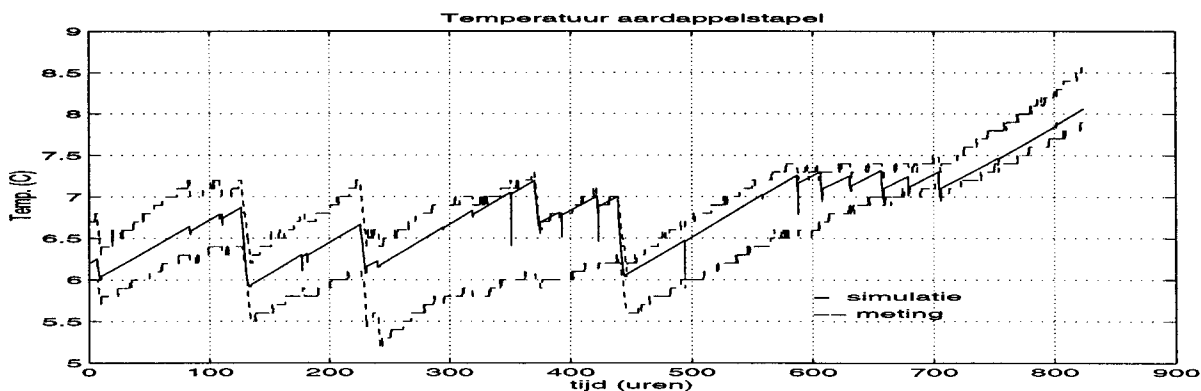
7.4 Validatie

Validatie van het ontwikkelde model is een altijd noodzakelijke stap in de modelvorming. Validatie maakt de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van het model duidelijk en geeft de aspecten aan waarop verbetering van het model noodzakelijk en/of mogelijk is. De op dit moment beschikbare metingen worden vergeleken met de modelresultaten en worden geanalyseerd. De beschikbare metingen beperken zich tot de temperaturen. Eerst wordt gekeken naar het temperatuurverloop in de aardappelstapel. Vervolgens worden de overige onderdelen, te weten de bovenruimte, luchtsluis en luchtkanalen, beschouwd.

Aardappelstapel

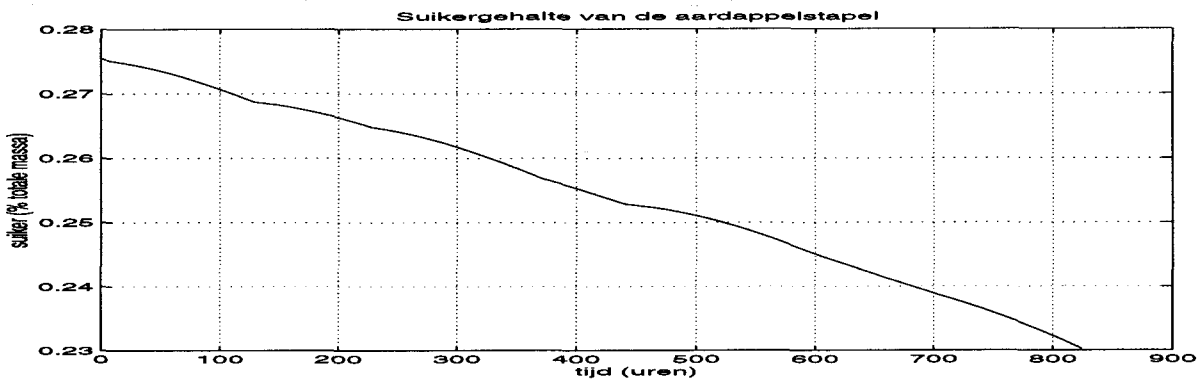
In Figuur 13 is het temperatuurverloop weergegeven van een meetpunt op 1,5 m. onder het oppervlak van de aardappelstapel.

In de figuur zijn, naast het resultaat van de simulatie, de tijdsverlopen van een tweetal meetpunten weergegeven. De simulatie ligt tussen deze beide waarden in. Het verloop van de temperatuur in verticale richting door het aardappelstapel, het temperatuurverloop, is door het gebrek aan geschikte meetdata niet te vergelijken. Dit is wel mogelijk na uitvoering van de metingen in het bewaar seizoen '97-'98.



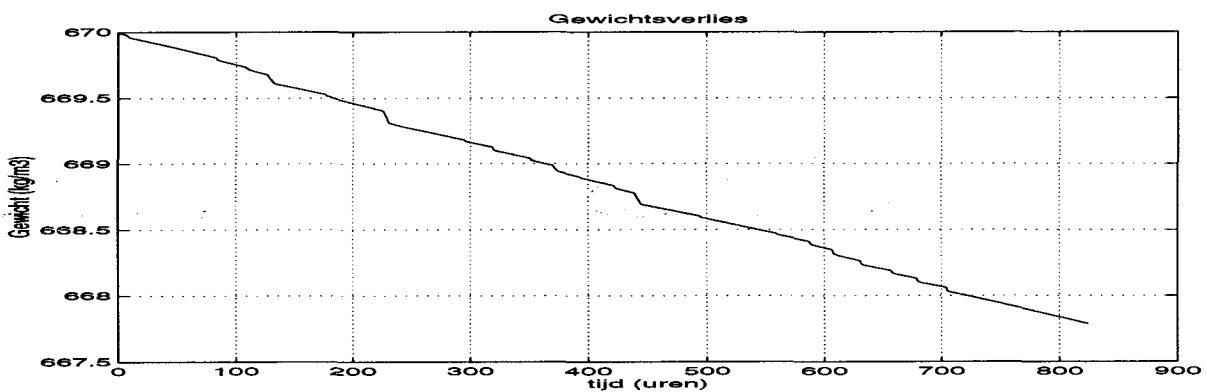
Figuur 13: Temperatuurverloop van de aardappelstapel

De betekenis van dit temperatuurverloop in termen van verzoeting van de aardappelen kan aan de hand van een simulatie worden bepaald. Aangezien de metingen uit figuur 13 verkregen zijn na ± 200 dagen bewaring zijn eerst de waarden voor het suikermiddel voor dag 200 bepaald uitgaande van een standaardbewaring bij constant 6°C . Deze waarden zijn, in figuur 14, als startpunt genomen voor de simulatie van de verzoeting tijdens het 900 uur durende temperatuurtraject uit figuur 13.



Figuur 14: Suikerverloop aardappelstapel

In Figuur 15 is het gewichtsverlies van de aardappelen tijdens de bewaring weergegeven. Een aardappel verliest op twee manieren gewicht. Allereerst door de verdamping van water vanuit de aardappel naar de omringende lucht. Daarnaast door het omzetten van suiker met zuurstof in koolstofdioxide en water waarbij nog energie vrijkomt. Doordat tijdens het ventileren de aardappelen in contact komen met relatief droge lucht neemt de verdamping op dat moment toe. Deze punten zijn dan ook terug te vinden in de figuur. Het voorspelde verloop voor het gewichtsverlies komt neer op een gewichtsverlies gedurende bewaring van goed 2,5 %. Hierbij is niet inbegrepen het gewichtsverlies dat optreedt tijdens het drogen/wondhelen aan het begin van het bewaarperiode en het opwarmen aan het einde van het droogperiode.

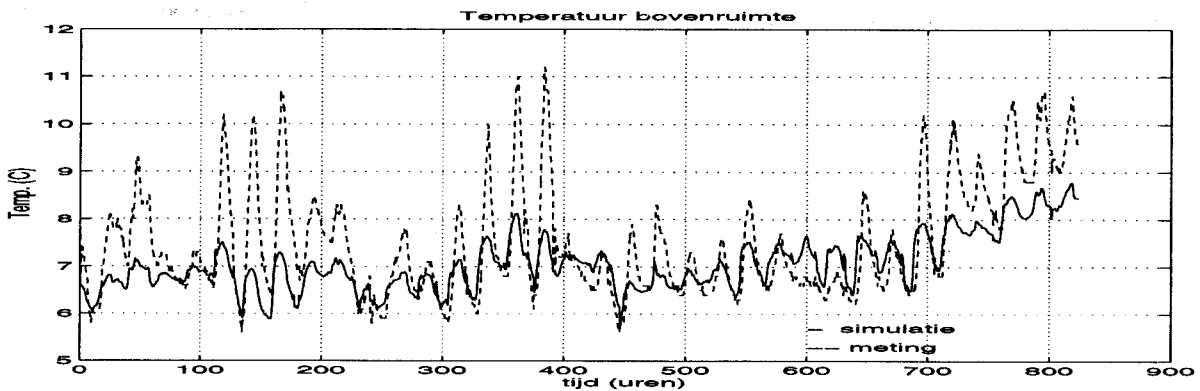


Figuur 15: Gewichtsverlies van de aardappelen

Bovenruimte

In Figuur 16 is het temperatuurverloop in de bovenruimte weergegeven van zowel de simulatie als de meting. Wat opvalt is dat de fluctuatie van de meting veel groter is dan uit de simulatie volgt. Hiervoor zijn twee verklaringen mogelijk. Omdat de fluctuaties overeenkomen met de fluctuaties van de buitentemperatuur is de isolatiewaarde van het dak waarschijnlijk niet goed gekozen. Echter, gezien de metingen van de luchtsluit in Figuur 17, lijkt dit niet de gezochte

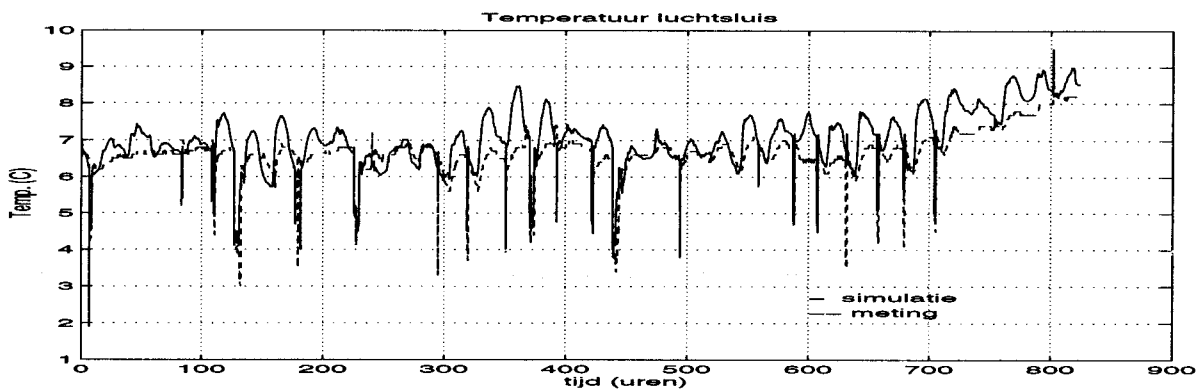
verklaring te zijn. Gezien de positie van het meetpunt in de bovenruimte net onder het dak is het waarschijnlijk dat de daktemperatuur wordt gevolgd. Alleen als aangenomen wordt dat enkel deze lucht de daktemperatuur volgt en in de rest van de bovenruimte een meer uniforme temperatuur heerst, kunnen de metingen, zoals weergegeven in Figuur 16 en 17, worden verklaard. Door het uitvoeren van een extra meting kan de geldigheid van deze verklaring worden bepaald.



Figuur 16: Temperatuurverloop van de bovenruimte

Luchtsluis

In Figuur 17 is de temperatuur van de luchtsluis weergegeven, zowel van de simulatie als van de meting. Het blijkt dat deze vrij goed overeenkomen, hoewel de simulatie te grote fluctuaties laat zien. Deze worden veroorzaakt door de fluctuaties in de luchttemperatuur in de bovenruimte. Speciale aandacht vereist de relatie tussen de stand van de luiken (binnen- en buitenluis) en het debiet door deze luiken. Tijdens het ventileren met buitenlucht wordt de temperatuur in de luchtsluis door deze relatie bepaald.



Figuur 17: Temperatuurverloop in de luchtsluis

Conclusies

Tot zover een reële vergelijking mogelijk is, komen de simulaties vrij goed overeen met de beschikbare metingen. Het probleem is dat de beschikbare dataset niet volledig is en dat daarom de geplande metingen in het bewaarstizoen '97-'98 noodzakelijk zijn. Met deze volledige dataset kan de geldigheid, betreffende de verklaring van de temperatuurmeting in de bovenruimte, worden aangetoond. Dan is het tevens mogelijk om de isolatiewaarden van het dak en de wanden nader te onderzoeken. Het model lijkt op dit moment bruikbaar in het ontwerp van een regeling voor de aardappelbewaarpplaats.