Dienst Landbouwkundig Onderzoek

Instituut voor Agrotechnologisch Onderzoek

Energiebesparing bij de bewaring van aardappelen; ontwerp van een kunstmatige intelligentiesysteem

Studie uitgevoerd voor NOVEM
Eindrapport 1993

Ing. P.S. Hak
Ir. K. Pleijsier
Ir. M.F.M. Janssens (projectleider)

Nederlandse onderneming voor energie en milieu bv

Novem

ato-dlo

2251181

Rapport 411 / Juni 1994

Energiebesparing bij de bewaring van aardappelen en ontwerp van een kunstmatige intelligentiesysteem

Inhoudsopgave

pagina

Inleiding 2

Doelstelling 4

Uitgebreide doelstelling 4

A. Pootaardappelen

Inleiding 5

1. Kennisverzameling en AI systeem 5
2. Samenwerking 9
3. Proefmateriaal 12
4. Bewaaronderzoek 12
5. Sensoren 14
6. Kwaliteit 14
7. Voorlopige conclusies en aanbevelingen 15

B. Consumptieaardappelen

Inleiding 16

1. Kennisverzameling en AI systeem 16
2. Samenwerking 16
3. Proefmateriaal 20
4. Bewaaronderzoek 22
5. Sensoren 24
6. Kwaliteit 25
7. Voorlopige conclusies en aanbevelingen 26

Conclusies en aanbevelingen 31

Energiebesparing bij de bewaring van aardappelen en ontwerp van een kennissysteem

Inleiding

De aardappel is één van de weinige akkerbouwgewassen die op basis van vraag en aanbod, dus via een gewoon marktmechanisme, worden verbouwd. Ruim 4,5 miljoen ton aardappelen worden ieder jaar gedurende een groot aantal maanden bewaard voor consumptie- en pootgoeddoeleinden. Deze bewaring kost ca. 450 TJ energie als gevolg van lage temperatuurtrajecten, geregeld met behulp van klimaatinstallaties. De kwaliteit neemt tijdens bewaring dikwijls sterk af om vaak onbekende redenen. De kennis rond aardappelbewaring is sterk empirisch van aard. Dit heeft onder andere tot gevolg dat in een groot aantal nieuw opgezette aardappelbewaarplaatsen problemen zijn ontstaan die niet kunnen worden verklaard.

Dit onderzoek beoogt via gericht, verklarend fundamenteel en daaraan gekoppeld toegepast onderzoek ideale energiezuinige temperatuurtrajecten en -systemen voor de aardappelbewaring te vinden, waarbij de eindkwaliteit van de aardappel van vitaal belang is. Ook de relatie met andere omgevingsfactoren als Controlled Atmosphere en natuurlijke kiemremmers wordt hierbij onderzocht. De door dit onderzoek gegenereerde kennis zal condenseren rond een te ontwikkelen kennissysteem voor de aardappelbewaring.

ATO-DLO, met ruim 300 medewerkers, voert dit onderzoek uit met een unieke combinatie van kennis, techniek en outillage, waarbij voor aardappelonderzoek de volgende gebieden van belang zijn:
- kwaliteit en fysiologie van de aardappel
- meet- en regelsystemen
- koel- en klimaattechniek en andere omgevingsfactoren
- beslissingsondersteunende systemen, waaronder kennissystemen

Het onderzoek duurt vier jaar en wordt uitgevoerd door de hoofdafdeling Systeemkunde, met als startdatum 1 januari 1992, en een inzet van 4 manjaren per jaar. Het onderzoek kost over een periode van 4 jaar ca. *f* 2.600.000,-, waarvan ATO-DLO ruim *f* 1.000.000,- voor haar rekening neemt en het bedrijfsleven *f* 850.000,-. NOVEM levert voor het jaar 1993 een bijdrage van *f* 150.000,-.

De onderzoeksgroepen, betaald door ATO-DLO + bedrijfsleven, zullen worden ingezet voor bestudering van de kwaliteitsparameters en de andere bewaarfactoren. Verschillende onderzoeksgroepen werken nauw samen in een programmagroep zoals aangegeven in het onderzoekvoorstel van november 1992 (blz. 29).

Het project dient in deze vier jaar te resulteren in een implementatie van een optimaal en energiezuinig bewaarsysteem in de praktijk.

De fasering van het project is:

Jaar 1	Fundamenteel onderzoek op laboratoriumschaal en semipraktijkschaal.
tot 4 jaar	Afronding en implementatie in de praktijk van fundamenteel en toegepast onderzoek inclusief het energiezuinige temperatuurregime meet-/regelsystemen en -algoritmes en het kunstmatige intelligentiesysteem.

Voor een verdere uitsplitsing van de fasering wordt verwezen naar het onderzoekvoorstel van november 1992.

Na elk jaar wordt op grond van de ATO-DLO rapportage en mondeling overleg met NOVEM de voortgang geëvalueerd en wel of niet tot voortzetting besloten.
De verwachte energiebesparing per jaar wordt geschat op minimaal 0,072 GJ en kan in het gunstigste geval oplopen tot 0,144 GJ.

Het project maakt gebruik van oriënterend vóóronderzoek en op het ATO-DLO aanwezige kennis ten aanzien van:
- verwerkings-/kwaliteitseigenschappen van aardappel
- Controlled Atmosphere bewaring bij vooral groente en fruit en in beperkte mate bij (poot-)aardappelen
- werkingsmechanismen van etherische oliën als carvon
- lage temperatuureffecten op verzoeting en enzymactiviteiten (PFP/PFK) bij aardappel
- koelsystemen/meet- en regelsystemen bij groente, fruit en aardappelen.

Het project maakt waar relevant gebruik van binnen het programma ontwikkelde kennis.

Doelstelling

Beknopte formulering doelstelling
Het project beoogt via bestudering van interacties van temperatuur, Controlled Atmosphere en carvon/etherische oliën op de kwaliteitsparameters, energiezuinige bewaarsystemen voor aardappelen te ontwikkelen, alsmede daar waar nodig de ontwikkeling van nieuwe sensoren. De resultaten van het onderzoek worden verwerkt in een kennissysteem, dat wordt gekoppeld aan een meet- en regelsysteem dat optimaal gebruik maakt van buitenluchtkoeling en interactieve sensoren.

Uitgebreide doelstelling
Het onderzoekprogramma bestaat uit 2 deelprogramma's, die voor een deel veel verwantschap vertonen en parallel worden uitgevoerd, en voor een deel zodanig verschillen dat ze gescheiden worden uitgevoerd. Het betreft de energiebesparing tijdens bewaring van ***pootaardappelen*** **(A)** en energiebesparing bij ***consumptieaardappelen*** **(B)**. Beide deelprogramma's bestaan uit de volgende onderdelen en doelstellingen:

1) optimalisering van koeling, koelsystemen meet- en regeltechniek en gebruikmaking van koude buitenlucht;
2) toepassing van plantaardige oliën als carvon voor inductie van kiemrust, zodat bij pootaardappelen het opwarmen en afkoelen voor tussentijds afkiemen achterwege kan blijven en bij consumptieaardappelen de kieming en verhoogde ademhalingsactiviteit laat in het seizoen kan worden beperkt;
3) tijdelijke toepassing van Controlled Atmosphere (CA) met gewijzigde O_2/CO_2 verhoudingen voor kiemrustbreking van vroeg te leveren pootgoedpartijen, zodat opwarming achterwege kan blijven en er gebruik van buitenluchttemperaturen kan worden gemaakt;
4) interactie van temperatuur en tijd op kwaliteitsparameters;
5) ontwikkeling van sensoren waarmee de kwaliteit gericht en dus energiezuinig kan worden gestuurd;
6) ontwikkeling van een kunstmatige intelligentiesysteem voor energiezuinige bewaring van aardappelen bij een optimale beheersing van de kwaliteit;
7) implementatie van de onderzoeksresultaten in praktijk-bewaarplaatsen.

Dit programma van 4 jaar zal resulteren in direct toepasbare resultaten in de praktijk, een energiebesparing van 20 tot 40 miljoen kWh en een betere kwaliteit van de aardappelen.

A. Pootaardappelen

Inleiding

De oogst van pootaardappelen in Nederland is éénmalig per seizoen. Na de oogst worden de pootaardappelen opgeslagen totdat ze weer worden uitgepoot. Daar een deel van de pootaardappelen wordt geëxporteerd vóór januari varieert de opslagperiode van het Nederlandse pootgoed van enige maanden tot circa acht maanden. De bewaring moet zodanig zijn dat de groeikracht (vermogen om snel meerdere kiemen te produceren) van de knollen op het tijdstip van poten zo optimaal mogelijk is. Het bewaarregime en de uitgangskwaliteit bepalen het verloop van de groeikracht tijdens de bewaring. Daarnaast is er een rasinvloed (als gevolg van genetische variatie) op temperatuur m.b.t. het verloop van de groeikracht.
Voor een energiezuinige bewaring van pootaardappelen en een goede beheersing van de groeikracht is het noodzakelijk om eerst meer inzicht te krijgen in groeikrachtcurven van rassen bij verschillende bewaartemperaturen. Dit onderzoek werd in seizoen 1992/1993 voortgezet volgens de planning van het onderzoekvoorstel van november 1992. Hieronder volgen de beschrijvingen bij elk actiepunt uit de fasering voor jaar 2.

1. Kennisverzameling en kennissysteem

In dit hoofdstuk worden de vorderingen op het gebied van kennisverzameling en de ontwikkeling van het kennissysteem beschreven. Er is op verzoek van NOVEM onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van duurzame energie bij de bewaring van aardappelen. Daarvan wordt verslag gedaan in de paragraaf 'duurzame energie'.

Voor het ontwikkelen van expertsystemen bestaan, in grote lijnen, twee technieken:
- De kennis van één menselijke expert overnemen in een computerprogramma. Bij deze techniek worden zowel de sterke als de zwakke punten van de kennis van de menselijke expert overgenomen.
- De problemen identificeren en vervolgens specifieke kennis voor het oplossen van de problemen ontwikkelen, waarbij de ontwikkelde kennis van een vorm is die goed te integreren is in expertsystemen. Deze techniek is meer gebaseerd op berekeningen en oorzakelijke verbanden dan op beredeneringen.

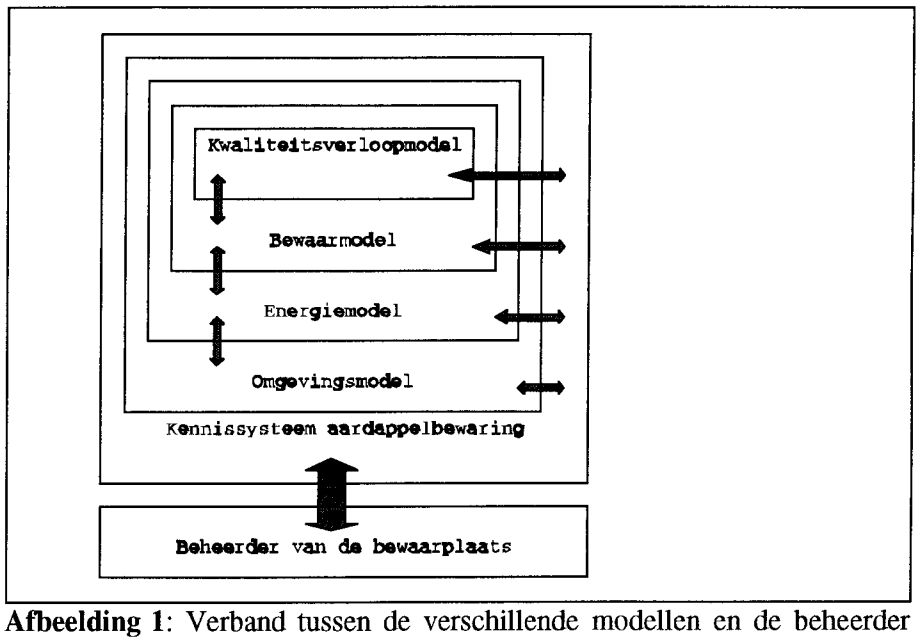
Voor het ontwikkelen van het kennissysteem is veel expertise aanwezig bij de verschillende experts. Helaas was het niet mogelijk om dé menselijke expert te vinden omdat de verschillende experts elkaar tegenspreken en omdat slechts de kombinatie van de kennis van de verschillende experts het gehele probleemveld afdekt. Wel werd door de meeste experts aangegeven dat m.b.v. klimaattechnische berekeningen veel te verbeteren is aan de bewaaromstandigheden in de aardappelbewaring. Daarom is gekozen voor de tweede techniek voor het ontwikkelen van het expertsysteem. Binnen ATO-DLO wordt veel onderzoek gedaan aan de modelmatige beschrijving van de processen die plaatsvinden tijdens de bewaring van aardappelen. Deze modellen worden ontwikkeld voor

toepassing in het expertsysteem. Van de ontwikkeling en de onderlinge samenhang van deze modellen wordt in de rest van dit hoofdstuk verslag gedaan.

Duurzame energie
De aanduiding duurzame energie wordt gehanteerd voor de energie die wordt geleverd door onuitputtelijke of hernieuwbare energiebronnen. Het gaat daarbij om zonne-energie, windenergie, waterkracht en biomassa. Door hun onuitputtelijke karakter onderscheiden deze bronnen zich van de energiegrondstoffen zoals olie, aardgas, steenkool en uraan die slechts in eindige hoeveelheden op aarde voorhanden zijn. Aardwarmte is strikt genomen geen duurzame energiebron. De natuurlijke aardwarmtestroom is te gering om de warmte die bij winning wordt onttrokken weer in hetzelfde tempo aan te vullen (Algemene Energieraad 1982).
Literatuuronderzoek (Bakema 1993, Lange 1988) en raadpleging van experts heeft uitgewezen dat het gebruik van ondergrondse koude-opslag en grondbuizen bij de bewaring van pootaardappelen weinig perspectiefvol is. Er zijn geen beschrijvingen gevonden van toepassing van grondbuizen, grondwater en/of warmtekracht koppeling bij aardappelbewaringen. Wel zijn er verschillende referenties gevonden van onderzoek naar duurzame energie voor andere toepassingen. Helaas laten de gepresenteerde resultaten voor deze toepassingen zich slecht vertalen naar de toepassing voor de bewaring van aardappelen. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in gewenste luchttemperatuur bij pootaardappelbewaring (2-6°C) en de toepassingen bij varkensbewaring (20-24°C), veehouderij en luchtbehandeling (20°C). Een gemiddelde grondwatertemperatuur van 11°C is te hoog voor direkte toepassing bij de bewaring van pootaardappelen maar biedt wel mogelijkheden voor het voorkoelen van lucht of het gebruik van zogenaamde natte condensors.
Het gebruik van zonne-energie voor de bewaring van aardappelen is nu nog niet interessant omdat de omzetting van de zonne-warmte in kou nog niet rendabel is. Wel lijkt de ontwikkeling van zonne-kollektoren en absorptiekoeling op korte termijn te leiden tot een energetisch rendabel systeem. Over de economische rentabiliteit is nog niets te zeggen.

Opbouw kennissysteem
Voor het te ontwikkelen kennissysteem zijn verschillende modellen nodig (zie ook de rapportage over 1992). Er is een model nodig dat het gedrag van de bewaaromstandigheden in de bewaarplaats beschrijft (bewaarmodel), er is een model nodig dat de energetische consequenties van het gebruik van een bewaarplaats beschrijft (energiemodel), er is een model nodig dat de eigenschappen van de aardappelen beschrijft (kwaliteitsverloopmodel) en er is een model nodig dat de beïnvloeding van buitenaf op de bewaarplaats beschrijft (omgevingsmodel). Zie voor een overzicht van de onderlinge samenhang tussen de verschillende modellen en de beheerder van de bewaarplaats Afbeelding 1.

Het bewaarmodel
Het bewaarmodel, dat het afgelopen jaar is ontwikkeld, beschrijft het verloop van temperatuur en luchtvochtigheid in de bewaarplaats in de loop van de tijd. Deze grootheden worden beïnvloed door het bewaarde produkt zelf en de gewenste en ongewenste uitwisseling met de omgeving buiten de bewaarplaats. Met dit model lukt het goed om het verloop van deze



Afbeelding 1: Verband tussen de verschillende modellen en de beheerder van een aardappelbewaarplaats.

grootheden over een heel bewaarseizoen te voorspellen. Daartoe moet het model geparametriseerd worden voor elke individuele bewaarplaats. Bij het gebruik van dit model voor regeling op korte termijn blijken er nog grote verschillen te zijn tussen de modeluitkomsten en de metingen. Deze worden veroorzaakt door veranderende omstandigheden tijdens de bewaring (deur open laten staan, deel van de partij verkocht, gewichtsverliezen door uitdroging). Oplossingen voor dit probleem worden gezocht in de richting van modelverfijning en/of "online" parametrisatie van het model. De laatste methode verdient de voorkeur, helaas is het "online" parametriseren van een model met meerdere variabelen statistisch zeer complex. In 1994 hopen wij hier extra aandacht aan te besteden. Zie voor een gedetailleerde beschrijving van het bewaarmodel en de resultaten van berekeningen uitgevoerd met dit model Bijlage 1.

Het energiemodel

Het energiemodel geeft voor een bepaalde bewaarplaats aan hoeveel energie het gaat kosten om het voorgestelde bewaartraject te handhaven. Daartoe simuleert dit model o.a. de regeling, dat is besturing, van de ventilatoren en eventueel de koeling. Deze simulatie resulteert in een aantal draaiuren voor de verschillende komponenten wat vervolgens weer maatgevend is voor het energieverbruik (zie rapportage 1992). De simulatie van de regelingen is gebaseerd op de huidig gangbare regelingen. Een door het kennissysteem voorgestelde regeling, die rekening houdt met de weersvoorspelling en de bewaarplanning, zal verhoudingsgewijs minder energie verbruiken dan de conventionele regelingen. De huidige versie van het energiemodel kan het energieverbruik van de regelingen van het kennissysteem nog niet uitrekenen. Zodra de regelingen van het kennissysteem een definitieve vorm hebben gekregen wordt die kennis ook in het energiemodel verwerkt.

Het kwaliteitsverloopmodel

Het kwaliteitsverloopmodel beschrijft het verloop van een aantal

belangrijke kwaliteitskenmerken van aardappelen tijdens de bewaring onder invloed van de bewaaromstandigheden. Voor pootaardappelen zijn die kwaliteitskenmerken groeikracht en produktmassa. Het verloop van die kwaliteitskenmerken kan zowel voorafgaand aan de bewaring, op basis van het geplande bewaartraject, als tijdens de bewaring op basis van het reeds afgelegde bewaartraject (op basis van meting van de bewaar-omstandigheden) en het nog af te leggen deel van het bewaartraject beschreven worden. Tijdens een bewaring kunnen de gerealiseerde bewaaromstandigheden af gaan wijken van de geplande bewaaromstandigheden. Met behulp van het kwaliteitsmodel is het mogelijk om het geplande verloop van kwaliteitskenmerken naast het werkelijke verloop van kwaliteitskenmerken te houden, waardoor er tijdig gealarmeerd kan worden en het bewaartraject kan worden aangepast.
Op basis van de resultaten van het onderzoek 92/93 wordt er in het onderzoek 93/94 (zie onderzoeksvoorstel 1994) speciale aandacht geschonken aan het verband tussen groeikracht en suikerconcentratie bij pootaardappelen. Een belangrijke rol spelen een aantal enzymconcentraties in het model voor bakkleur bij consumptieaardappelen. Deze enzymconcentraties zijn mogelijk een maat voor de groeikracht van pootaardappelen. Deze enzymconcentraties kunnen op een indirecte manier bepaald worden met behulp van het bakkleur model. Daartoe moet echter wel het model voor bakkleur geparametriseerd worden op de pootaardappelen en dat gaat via de bepaling van suikerconcentraties. Dit onderzoek brengt de kwaliteitsverloopmodellen van pootaardappelen en consumptieaardappelen dus dichter bij elkaar.
Voor een verdere beschrijving van het kwaliteitsverloopmodel zie Bijlage 2.

Het omgevingsmodel
Het omgevingsmodel beschrijft de verwachte omstandigheden buiten de bewaarplaats die het bewaarklimaat in de bewaarplaats beïnvloeden. Deze beschrijving wordt gebruikt voor het berekenen van de haalbaarheid van het geplande bewaartraject, de gevolgen voor het energiegebruik van het geplande bewaartraject en het optimaliseren van de regeling tijdens de uitvoering van het geplande bewaartraject. Het omgevingsmodel bestaat hoofdzakelijk uit klimatologische kengetallen en weersvoorspellingen. Hiervoor zijn contacten gelegd met Meteo Consult in Wageningen.

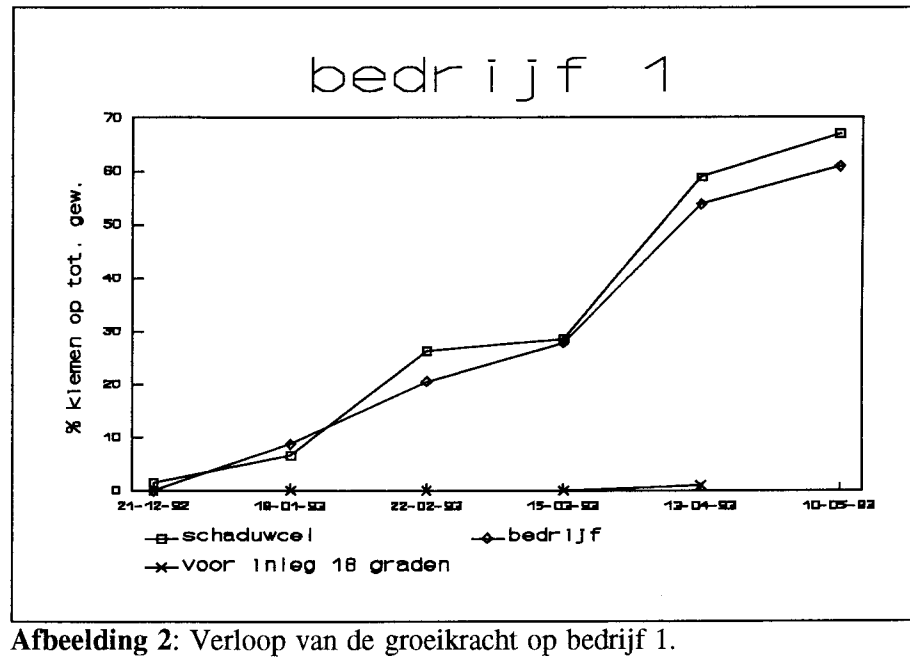
2. Samenwerking

Inleiding
Vanaf herfst 1992 zijn een viertal praktijkbedrijven gevolgd. Daarnaast was ook een zgn. schaduwcel op het ATO-DLO bij het onderzoek betrokken. In deze cel werd een constante temperatuur van 4°C gehandhaafd.

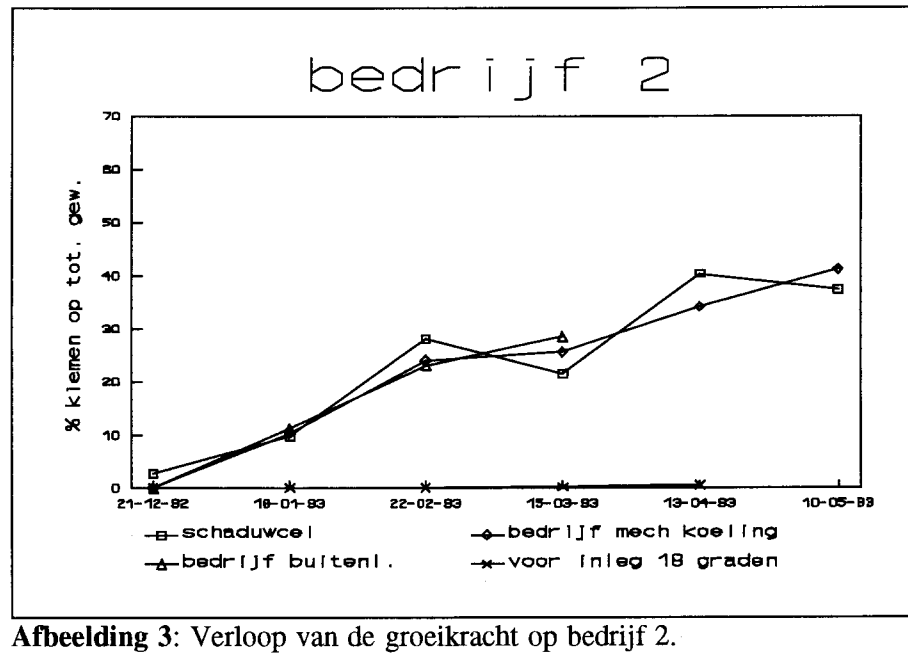
Materiaal en methode
Herfst 1992 zijn van een viertal bedrijven een aantal monsters pootgoed van het ras Désirée opgehaald en opgeslagen in een cel waarin een constante temperatuur van 4°C werd gehandhaafd.
Op de betreffende bedrijven werden van het overeenkomstige ras ook monsters samengesteld en bewaard op de bedrijven. In totaal waren op de vier bedrijven vijf bewaarplaatsen bij het onderzoek betrokken. Eén bedrijf beschikte namelijk over twee bewaarplaatsen waarvan er één mechanisch werd gekoeld en één met buitenlucht.
Op deze bedrijven is apparatuur geïnstalleerd voor het meten van temperaturen en energieverbruiken. Vanaf 23 november werden maandelijks monsters opgehaald uit de bewaarplaatsen van de praktijkbedrijven en werden ook monsters van de praktijkbedrijven uit de schaduwcel (constant 4°C) gehaald. Na wegen en bepalen van het knolgewicht en kiemgewicht werden deze monsters per controletijdstip vier weken bij 18°C geplaatst, waarna wederom het knolgewicht en kiemgewicht werden bepaald alvorens ze werden afgevoerd. Het gewichtpercentage van de kiemen ten opzichte van het totale gewicht is de maat voor groeikracht. De vierweekse periode bij 18°C diende om per tijdstip (per maand) de potentie tot kiemvorming (groeikracht) vast te kunnen stellen en tevens om na te gaan of er grote verschillen optreden als gevolg van uiteenlopende bewaaromstandigheden in de praktijk.

Resultaten produktzijdig
Het verloop van de kiemontwikkeling (groeikracht) op het pootgoed van het ras Désirée bewaard op het bedrijf en in de schaduwcel is per bedrijf grafisch weergegeven. Bij nadere beschouwing van deze gegevens blijkt dat er over het algemeen geringe verschillen voorkomen in spruitgedrag tussen de aardappelen die bewaard werden op het praktijkbedrijf en in de schaduwcel. Afbeelding 2 tot en met Afbeelding 5 geven het verloop van de groeikracht op de verschillende bedrijven weer.

Bij vergelijking van de resultaten van de bedrijven onderling blijkt het spruitgedrag van de partijen van de bedrijven 3 en 4 sterke overeenkomst te vertonen. Bedrijf 3 beschikte over mechanische koeling en bedrijf 4 kon alleen gebruikmaken van buitenluchtkoeling.
De partij van bedrijf 1 (beschikt ook over mechanische koeling) vertoont met name tot ca. half maart een geringere en geleidelijkere toename aan spruiting, in vergelijking met de partijen van bedrijf 3 en 4.
De partijen van bedrijf 2 vertonen een vrijwel gelijk spruitgedrag tot half maart. Dit komt vrijwel overeen met dat op bedrijf 1. Na half maart is de spruitontwikkeling minder explosief en tot een aanzienlijk lager eindniveau in vergelijking met de andere bedrijven.
Aan het feit of een bedrijf al of niet over mechanische koeling beschikte kunnen hier geen verschillen in spruitgedrag worden toegeschreven. Het

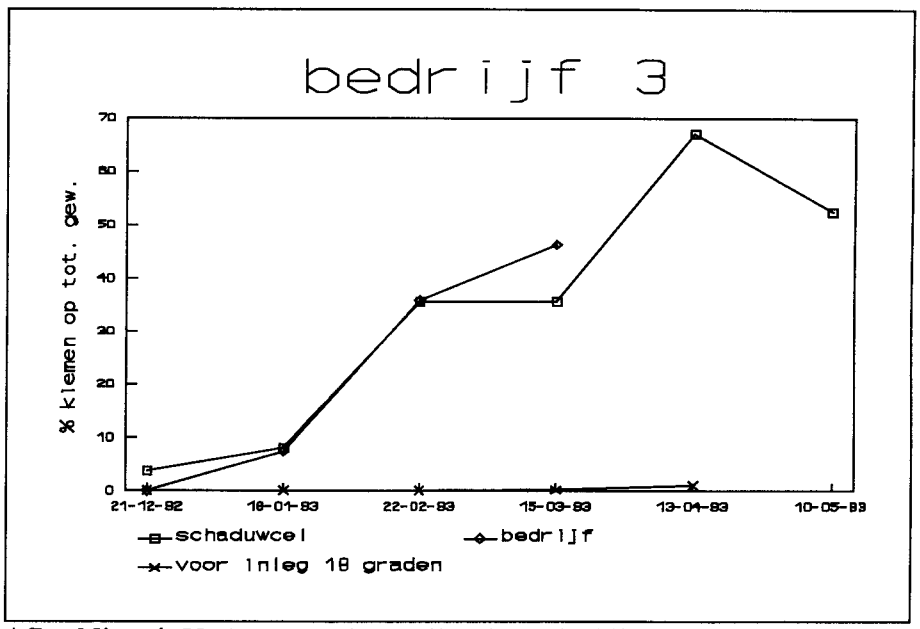


Afbeelding 2: Verloop van de groeikracht op bedrijf 1.

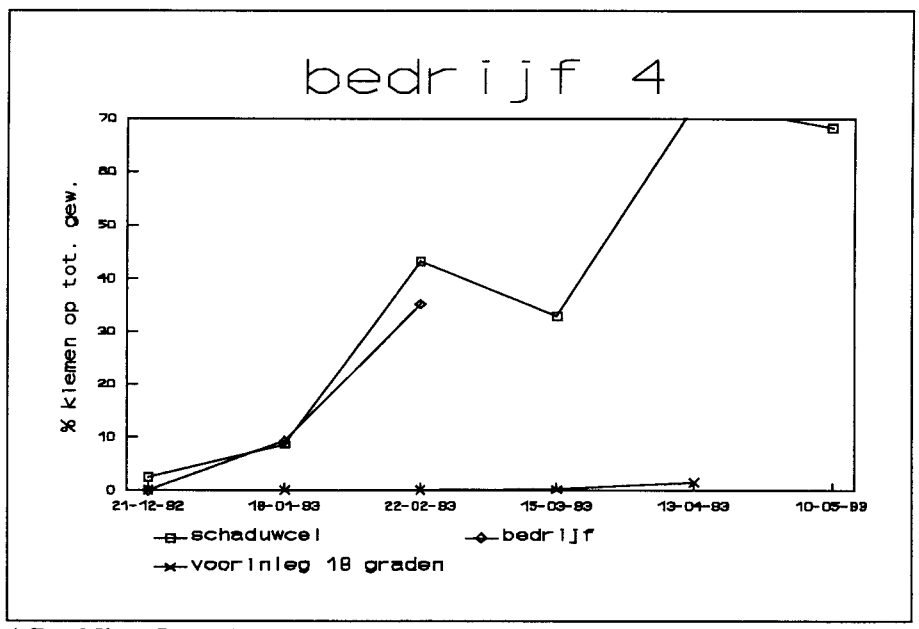


Afbeelding 3: Verloop van de groeikracht op bedrijf 2.

tijdstip van sorteren en daadwerkelijk bewaren bij mechanische koeling zal van veel grotere invloed zijn geweest op het spruitgedrag. Daar i.v.m. de beschikbaarheid en de installatie van de apparatuur op de bedrijven pas in november met dit onderzoek kon worden begonnen, zijn dit jaar geen temperatuurgegevens bekend over de periode van oogst tot november. Het temperatuurverloop in deze periode heeft wel grote invloed gehad op het latere spruitgedrag van de partijen. Dit kon namelijk worden afgeleid uit het gedrag van de proefvarianten van het ras Désirée van de schaalproef. Deze waren vanaf de oogst (augustus 1992) direct bij 2, 4, 6, 8 en 12°C opgeslagen en hiervan werd ook maandelijks de groeikracht vastgesteld. In het vervolgonderzoek zal worden getracht ook op de praktijkbedrijven data te verzamelen vanaf het begin van de opslag, zodat een betere vergelijking mogelijk is.



Afbeelding 4: Verloop van de groeikracht op bedrijf 3.



Afbeelding 5: Verloop van de groeikracht op bedrijf 4.

Resultaten energetisch

Gedurende het seizoen 92/93 zijn metingen verricht bij 5 bewaarplaatsen voor pootaardappelen. In die bewaarplaatsen zijn de temperatuur, de luchtvochtigheid, de ventilatieacties en de koelmachineactiviteit gemeten. Tabel 1 geeft een overzicht van de gemeten energieverbruiken. In de laatste kolom van die tabel is het energieverbruik per ton per maand bewaring aangegeven, deze kolom is het meest geschikt voor onderling vergelijk van de bewaarplaatsen.

Tabel 1: Overzicht van de energieverbruiken bij de bewaring van pootaardappelen. (BL = buitenlucht koeling, MK = mechanische koeling)

Bedrijf nr.	kWh totaal (kWh)	tonnage (ton)	duur (mnd)	energieverbruik kWh/ton/mnd
1 MK	16896,7	480	6	5,8670
2 BL	667,9	115	3,4	1,7082
2 MK	10626,2	300	6	5,9035
3 BL&MK	8848,7	480	6,7	2,7515
4 BL	209,2	110	3	0,6340

Op de bedrijven 1,2 en 3 wordt gebruik gemaakt van een mechanische koeling voor het conditioneren van de bewaarplaats. Op bedrijf 3 wordt de mechanische koeling gebruikt als ondersteunende koeling. Op de bedrijven 1 en 2 is de mechanische koeling als volledige mechanische koeling geïnstalleerd. In vergelijk met de bedrijven 1 en 2 wordt daardoor de mechanische koeling bij bedrijf 3 pas later in het seizoen aangeschakeld. Dit resulteert duidelijk in een lager energieverbruik. Ondanks dat de verschillen in energieverbruik tussen de bedrijven groot zijn, is er weinig verschil in de kwaliteit van bewaring.

Voor het seizoen 93/94 zijn metingen opgezet bij 3 bewaarplaatsen voor pootaardappelen. 2 Bewaarplaatsen zijn uitgevallen in verband met bedrijfsbeëindiging. Op de overige bedrijven worden dezelfde metingen verricht als in seizoen 92/93.

3. Proefmateriaal

Het onderzoek werd uitgevoerd, conform de planning, met zes rassen die verschilden in potentiële snelheid van fysiologische veroudering. Dit waren de rassen:
Eersteling, Jaerla, Spunta, Bintje, Désirée en Alpha.
Van Eersteling is bekend dat dit ras snel veroudert en van Alpha dat het langzaam veroudert, de overige rassen zitten daartussen in. De teelt van deze rassen heeft plaats gevonden van april tot augustus op de proeflocatie "De Eest" te Nagele (NOP). Van alle rassen werden knollen gebruikt van de sortering 40 - 45 mm.

4. Bewaaronderzoek

Zoals in de planning aangegeven is er onderzoek gedaan naar bewaarregimes voor pootaardappelen, het nut van CA-bewaring bij pootaardappelen en het effekt van etherische oliën op de kieming bij pootaardappelen. Van elk van deze onderzoeken volgt hieronder een beschrijving.

Schaalproeven
Voor het bepalen van de invloed van temperatuur en bewaarduur op de groeikracht werden de verschillende rassen opgeslagen bij 2, 4, 6, 8 en

12°C. De bewaring vond plaats van 19 augustus '92 tot 7 juli '93. Vanaf 23 november werden maandelijks monsters per ras en bewaartemperatuur gewogen en het kiemgewicht ervan bepaald. Daarna werden deze monsters per controletijdstip vier weken bij 18°C geplaatst, waarna wederom het gewicht en het kiemgewicht werden bepaald alvorens ze af te voeren. Deze vierweekse periode bij 18°C diende om per tijdstip de potentie tot kiemvorming (de groeikracht) vast te kunnen stellen. De laatste bepaling hiervoor (monsters van juli) vond plaats op 4 augustus 1993. Zie voor de resultaten van dit onderzoek hoofdstuk 6 (kwaliteit).

Pootgoed en CA-bewaring
Met het oog op energiebesparing en investeringskosten is langdurige CA-bewaring van pootaardappelen niet interessant (zie rapportage 1992). Anders is het gesteld met zeer kortdurende CA-bewaring t.b.v. het doorbreken van de kiemrust.
Na de oogst verkeren pootaardappelen voor een bepaalde periode in kiemrust (dormancy). Afhankelijk van met name het ras en de bewaartemperatuur kan deze periode variëren van ca. 10 - 25 weken. Voor vroege export (afzet in de herfst) is kiemrustbreking/stimulering van de kieming van belang voor vergroting van de afzetmogelijkheden.
Uit onderzoek van het ATO-DLO komt naar voren dat tijdelijke bewaring bij zowel verhoogde koolzuur als verlaagde zuurstof concentraties (Controlled Atmosphere) de kiemrust verbreken en de spruitgroei stimuleren. Het accent van het ATO-onderzoek ligt op een verdere optimalisering van de mogelijkheden voor kiemrustbreking met tijdelijke (enkele weken) lage zuurstofconcentraties. In de periode na de oogst, waarin kiemrustbreking m.b.v. CA gewenst is, kan waarschijnlijk gebruik worden gemaakt van dan nog leegstaande fruitbewaarcellen.
Tot nu toe wordt in de praktijk bewaren bij hoge temperaturen toegepast om de kiemrust te breken. Dit kost de nodige energie en leidt lang niet bij alle rassen tot snelle resultaten.

Tijdelijke kiemremming bij pootaardappelen met etherische oliën
Op laboratoriumschaal is onderzocht of etherische oliën, met name carvon, aangewend kunnen worden voor het tijdelijk onderdrukken van kiemgroei bij pootaardappelen. Deze etherische oliën worden gewonnen uit karwijzaad. Omdat deze etherische oliën uit natuurlijke grondstoffen worden gewonnen neemt men aan dat ze niet schadelijk zijn. De toelating van deze middelen als gewasbeschermingsmiddelen beslaat een lang traject en een definitief standpunt is nog niet bekend. De dampen van deze etherische oliën moeten in bepaalde concentraties aanwezig zijn in de bewaaratmosfeer voor een kiemremmend effect. Het instand houden van deze werkzame concentraties is tegenstrijdig aan het gebruik van buitenlucht voor de koeling van de bewaarplaats. Mogelijk moeten deze etherische oliën toegepast worden in mechanisch gekoelde bewaarplaatsen, waarbij de bewaartemperatuur hoger kan zijn dan gebruikelijk, ± 6° in plaats van ± 3°. Wat de gevolgen voor het energieverbruik zijn is nog niet bekend.
Inmiddels lopen proeven op semi-praktijkschaal met meerdere rassen, waarbij het effect van een dergelijke behandeling op de nateelt (geoogst op zowel poot- als consumptiedatum) zal worden bekeken. De gegevens hiervan zijn nog niet beschikbaar.

5. Sensoren

Zie consumptieaardappelen.

6. Kwaliteit

In grote lijnen worden de resultaten van het onderzoek van seizoen 1991/1992 bevestigd. Dat wil zeggen: wanneer voor Nederlandse omstandigheden bewaring tot ca. half maart als uitgangspunt wordt genomen, geven de resultaten van twee achtereenvolgende seizoenen aan dat bij handhaving van constante bewaartemperaturen een hoger temperatuurniveau kan worden aangehouden dan de nu vaak gehanteerde vuistregel van 3 à 4°C. Dit geldt met name voor de rassen Spunta, Bintje, Désirée en Alpha. Dit opent perspectieven voor energiebesparing. Een hogere bewaartemperatuur vraagt minder koelcapaciteit en biedt meer mogelijkheden voor buitenluchtkoeling al of niet in combinatie met ondersteunende mechanische koeling.
Toepassing van buitenluchtkoeling met een slim meet- en regelsysteem in plaats van bewaring met behulp van mechanische koeling kan ook van belang zijn voor beperking van de gewichtsverliezen. Bewaring bij mechanische koeling leidt nl. vaak tot meer uitdroging (vochtafgifte). Het beperken van de gewichtsverliezen is van direkt economisch belang omdat de verhandeling van produkt altijd per gewichtseenheid plaatsvindt.
Met buitenluchtkoeling waarbij mede gestuurd wordt op handhaving van een gering dampspanningsdeficit zouden de gewichtsverliezen voor lang te bewaren partijen waarschijnlijk aanzienlijk beperkt kunnen worden. Ook dit zou van direct economisch belang zijn voor de bewaarder.
In seizoen 1993/1994 is dit onderzoek voortgezet met wat hogere bewaartemperaturen en meerdere rassen. Binnen ATO-DLO is voor consumptie-aardappelen onderzoek gaande naar mogelijkheden van een modelmatige beschrijving van de suikerhuishouding tijdens de bewaring. De achtergronden van dit model zijn ook geldig voor pootaardappelen. Wanneer dit model gekoppeld zou kunnen worden aan kieming biedt dit perspektief voor de besturing tijdens de bewaring. Met het oog hierop worden in seizoen 1993/1994 oriënterenderwijs bij een beperkt aantal rassen op ieder monstertijdstip de gehalten aan reducerende suikers en sucrose bepaald.

7. Voorlopige conclusies en aanbevelingen

De tot dusverre ontwikkelde modellen lijken een stevige grondslag te vormen voor het in ontwikkeling zijnde kennissysteem. Door het baseren van het kennissysteem op modellen en de gekozen structuur van het kennissysteem is de onderhoudbaarheid van het kennissysteem zeer goed.
Uit het tot dusverre verrichte onderzoek kan geconcludeerd worden dat ook pootaardappelen zeer goed bewaard kunnen worden in met buitenlucht geventileerde schuren. Daarbij moet wel aangetekend worden dat er grote rasverschillen zijn t.a.v. de optimale bewaartemperatuur. Bij temperaturen lager dan 4°C neemt de bruikbaarheid van buitenlucht geventileerde schuren af. Uit het oogpunt van energieverbruik is de mengvorm, buitenlucht geventileerde schuren met ondersteunende koeling, het meest aantrekkelijk voor deze lage temperaturen.
Uit de verrichte metingen blijkt duidelijk dat het bewaren van pootaardappelen, bij temperaturen boven 4°C, in mechanisch gekoelde schuren, zes maal zoveel energie kost als de bewaring in buitenlucht geventileerde schuren, zonder dat dit nadelige gevolgen voor de kwaliteit van het bewaarde produkt heeft.
Voor het verhogen van de bedrijfszekerheid bij het gebruik van met buitenlucht geventileerde schuren valt het gebruik van een intelligente regeling sterk aan te raden.
Dit resulteert in een tweevoudige energiebesparing:

- Minder schuren uitgerust met mechanische koeling.
- Minder energieverbruik bij die schuren die uitgerust zijn met een intelligente regeling.

B. Consumptieaardappelen

Inleiding

Consumptieaardappelen zijn die aardappelen die bedoeld zijn voor de industriële verwerking tot voorgebakken produkten. Een groot deel van de zogenaamde tafelaardappelen zijn consumptieaardappelen die om prijstechnische en/of kwalitatieve redenen niet aan de industrie afgezet worden. Tafelaardappelen vormen echter maar een klein deel van de totale hoeveelheid consumptieaardappelen die jaarlijks bewaard worden.
In de praktijk komen regelmatig partijen aardappelen voor die, soms zelfs al vroeg in het bewaarseizoen, een slechte bakkleur voor frites hebben. De indruk bestaat dat dit probleem zich meer lijkt voor te doen in moderne/goed geoutilleerde dan in oudere bewaarplaatsen.
Om inzicht te krijgen of de aard van de problemen in de praktijk zijn toe te schrijven aan de bewaarplaats (gasdichtheid), aan het gebruik ervan (temperatuurbeheer), of aan de herkomst van de bewaarde partijen, wordt op het ATO-DLO te Wageningen met een viertal verschillende rassen gedetailleerd onderzoek uitgevoerd naar:

- De effecten van verhoogde CO_2 concentraties op de verwerkingskwaliteit.
- De invloed van de wijze van afkoelen en temperatuurbeheersing tijdens de bewaring op de verwerkingskwaliteit.
- Fysiologische veranderingen die tijdens de bewaring in aardappelen optreden als gevolg van koude- of ouderdomsverzoeting met als doel intrinsieke parameters op te sporen t.b.v. de kwaliteitsbewaking.

Aansluitend hierop worden een zestal praktijkbedrijven gevolgd, waaronder bedrijven waar zich meer of minder regelmatig problemen voordoen m.b.t. de verwerkingskwaliteit. Dit om te bezien of de daaruit verkregen resultaten kunnen worden verklaard met de gegevens van het achtergrondonderzoek. Het uiteindelijke doel van het geheel aan onderzoekinspanningen is zodanige besturingen van het bewaarproces te kunnen aangeven en ontwikkelen dat de verwerkingskwaliteit volledig te beheersen is en het gebruik van natuurlijke hulpbronnen minimaal is.

1. Kennisverzameling en kennissysteem

Zie pootaardappelen.

2. Samenwerking

Inleiding
In seizoen 1992/1993 werden, evenals in het voorgaande seizoen, zes praktijkbedrijven gevolgd, drie van seizoen 1991/1992 en drie andere bedrijven. Naast de zes praktijkbedrijven was ook een zgn. schaduwcel op het ATO-DLO proefbedrijf "De Eest" bij dit onderzoek betrokken (bedrijf 7). In deze cel werd een constante bewaartemperatuur van 6,5°C gehandhaafd. De bewaring onder vaste condities in deze cel was bedoeld om vast te kunnen stellen of eventuele problemen met de bakkwaliteit het gevolg waren van de bewaring of van de grondstof (partij verschillen).
Het uitgangspunt was dat de aardappelen (ras: Bintje) op alle deelnemende

bedrijven tot mei 1993 of langer bewaard zouden worden. Door de Phytophthora problemen van herfst 1992 moesten twee partijen reeds vóór maart 1993 worden geruimd. De laatste partij werd eind juni geruimd.

Materiaal en methode

Op 28 september 1992 zijn van een partij aardappelen van het ras Bintje, verbouwd op 'De Eest', na homogenisering een groot aantal bewaarmonsters samengesteld. Een deel van deze proefmonsters werd zo snel mogelijk na het vullen van de bewaarplaats van ieder deelnemend bedrijf in de bovenste produktlaag ingegraven. Een ander deel van de proefmonsters werd opgeslagen in de schaduwcel. Van de partij van ieder deelnemend bedrijf werden ook monsters samengesteld. Deze monsters werden deels bij de proefmonsters op het bedrijf zelf en deels in de schaduwcel opgeslagen.

Het inbrengen van de monsters op de verschillende bedrijven vond plaats tussen 29 september en 3 oktober 1992. Hierbij is rekening gehouden met behandeling met kiemremmingsmiddelen.

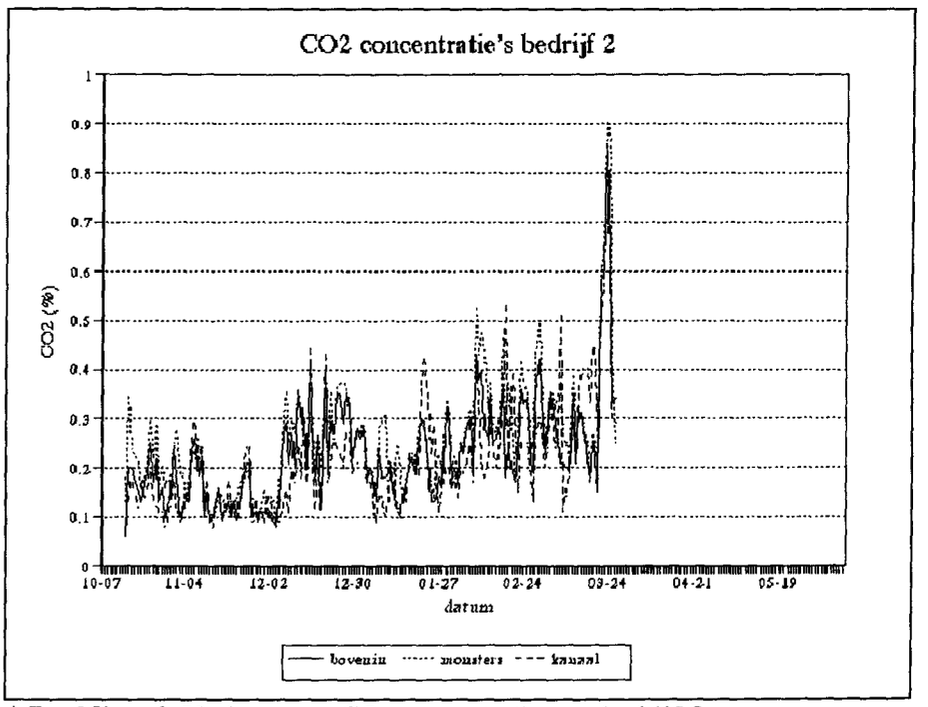
Tijdens de bewaarperiode is het verloop van de bakkleurindex en het gewicht gevolgd. Voorts is het temperatuurverloop gemeten in de onmiddellijke omgeving van de monsters, op drie meter onder het bovenoppervlak en van de buitenlucht en zijn metingen verricht om het energieverbruik vast te kunnen stellen. Op twee bedrijven werd ook het verloop van de CO_2 concentratie in de bewaarplaats gemeten.

Resultaten produktzijdig

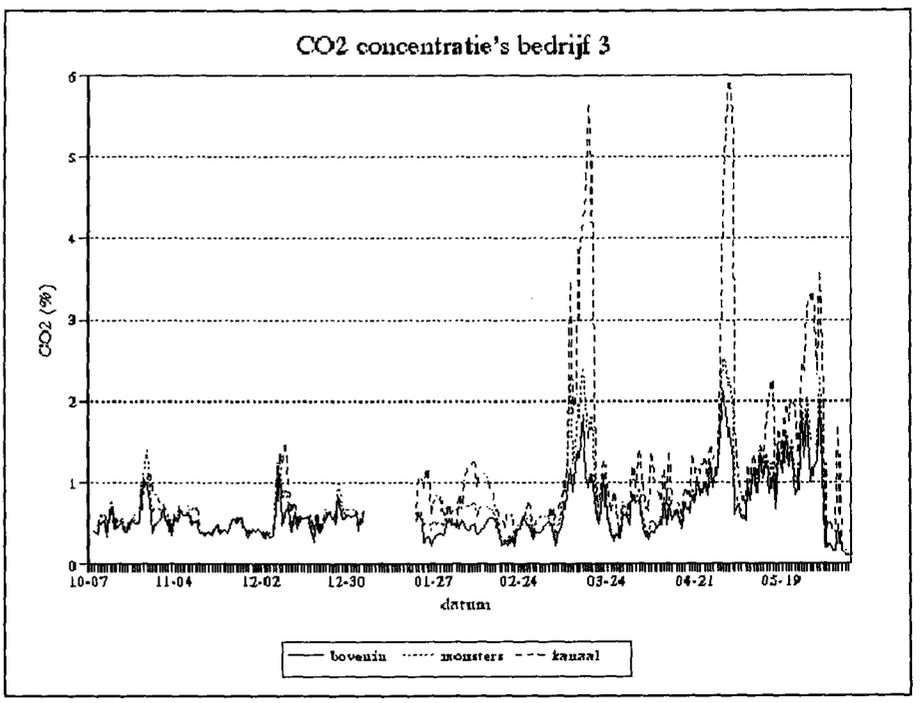
Tussen de gemeten temperatuurverlopen op de verschillende bedrijven kwamen verschillen voor t.a.v. de snelheid van afkoelen, de diepte van afkoelen en opgetreden temperatuurschommelingen. Tevens werden verschillen geconstateerd in temperatuurniveau onder en boven in de hoop bij de deelnemende bedrijven.

CO_2 metingen in een doorsnee bewaarplaats en in een zeer dichte bewaarplaats, die om die reden frequent werd geventileerd, leverden aanzienlijke verschillen op. In de doorsnee bewaarplaats was de CO_2 concentratie steeds laag (0,1 tot maximaal 0,5%). Alleen gedurende de opwarming voor afleveren (m.b.v. oliekachels) trad een piek op tot 0,9%. In de dichte bewaarplaats varieerde de CO_2 concentratie van 0,5 tot 2,5%. Afbeelding 6 geeft een beeld van de CO_2 concentratie op bedrijf 2. Afbeelding 7 geeft een beeld van de CO_2 concentratie op bedrijf 3. Let op het verschil in de schalen van de y-as.

In het verloop van de bakkleur op de bedrijven traden verschillen op die kunnen worden verklaard door het gerealiseerde temperatuurregime per bedrijf. Afbeelding 8 geeft het verloop van de bakkleur van de aardappelen op de verschillende bedrijven weer. Wederom bleek de invloed op de verwerkingskwaliteit sterker afhankelijk van de wijze van bewaren (temperatuurregime) dan van de uitgangskwaliteit van de partijen. Voor één bedrijf kon n.a.v. het gevoerde temperatuurregime geen goede verklaring worden gevonden voor het verloop van de bakkleur. Verondersteld wordt dat hier CO_2 effecten een rol hebben gespeeld. Op bedoeld bedrijf werden CO_2 concentraties gemeten van 0,5 tot 2,5% Uit achtergrondonderzoek op het ATO-DLO zijn aanwijzingen verkregen dat korte perioden met verhoogde CO_2 concentraties tijdens de herfst en begin winter een negatief effect op de bakkleur kunnen hebben. In de latere bewaarperiode lijkt het effect hiervan geringer te zijn. Op bedoeld bedrijf

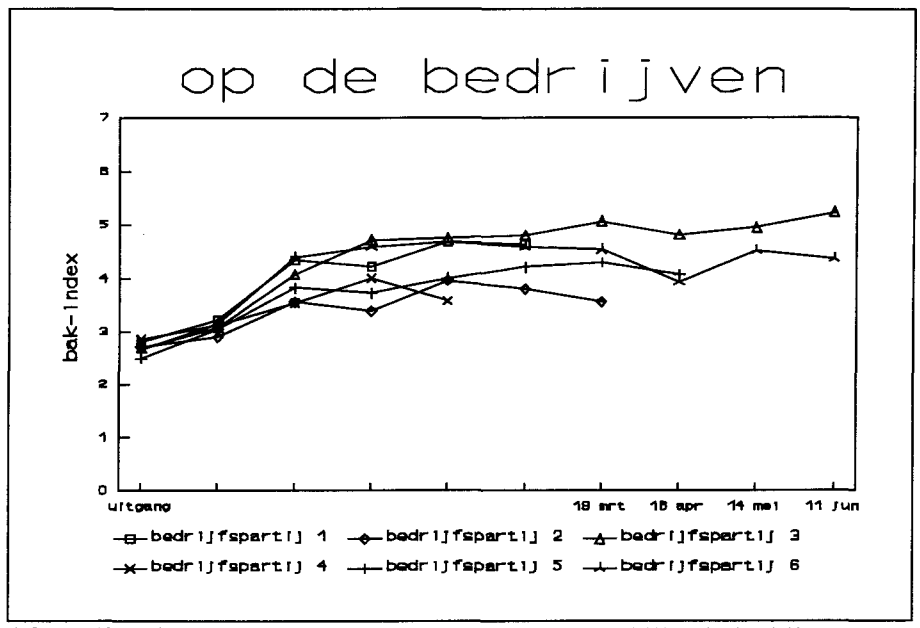


Afbeelding 6: Verloop van CO_2 concentraties op bedrijf 2.



Afbeelding 7: Verloop van CO_2 concentraties op bedrijf 3.

lag de bakkleur-index bij afleveren (begin juni '93) op 4,9.
Op vier van de overige vijf bedrijven hadden de partijen bij afleveren, tussen eind januari en begin mei, een acceptabele bakkleur-index (< 4). Op het bedrijf waar de aardappelen eind juni werden afgeleverd was de bakkleurindex onacceptabel. Dit kan worden toegeschreven aan ouderdomsverzoeting.
De gewichtsverliezen namen, zoals gebruikelijk, tijdens de bewaring geleidelijk toe. Met uitzondering van bedrijf 3 kunnen de gewichtsverliezen van de bedrijfsmonsters als heel redelijk worden



Afbeelding 8: Verloop van de bakkleur op de verschillende bedrijven.

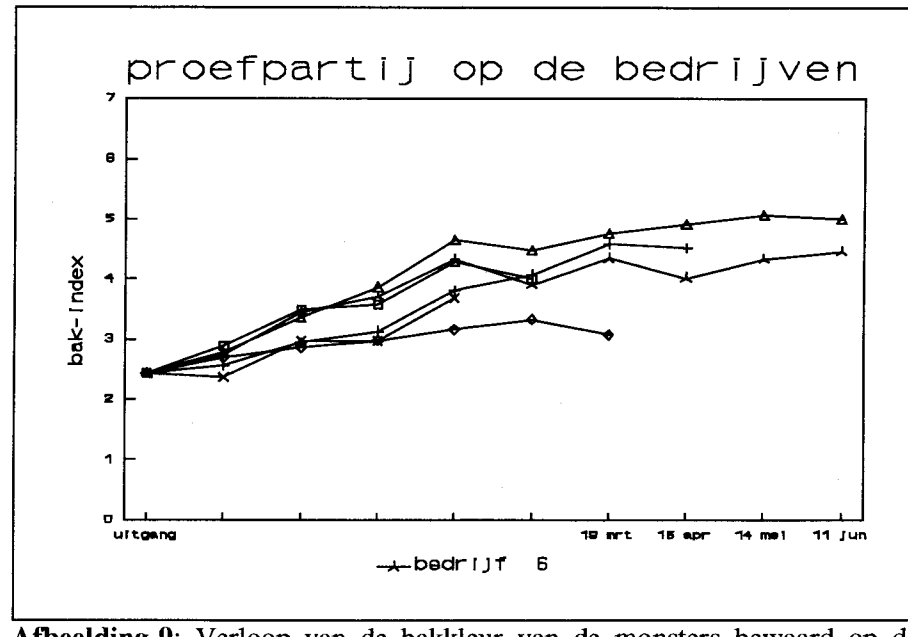
gekwalificeerd. De partij op bedrijf 3 werd eind juni geruimd. De sterke stijging van de gewichtsverliezen aan het eind van het bewaarseizoen kunnen, met name op bedrijf 3, aan spruiting worden toegeschreven.
In seizoen 1993/1994 is het onderzoek voortgezet op dezelfde bedrijven. Het monsterschema is er op gericht meer gegevens over de eerste periode en de periode van opwarmen en afleveren te verzamelen. Tevens wordt getracht op het ATO-DLO het temperatuur- en CO_2 regime van bedrijf 3 van afgelopen seizoen te simuleren om na te gaan of dit opnieuw tot een slecht verloop van de bakkleur leidt en wat de invloed is van de afzonderlijke factoren (wisselende temperaturen en hogere/wisselende CO_2 concentraties).

Ter illustratie zijn de afbeeldingen 6 t/m 11 opgenomen. Afbeelding 10 en 11 geven het temperatuurverloop op respectievelijk bedrijf 2 en 3 weer. De afbeeldingen 6 en 7 geven het verloop van de CO_2 concentratie op resp. bedrijf 2 en 3 weer. De afbeeldingen 8 en 9 geven het verloop van de bakkleurindices weer voor resp. de bedrijfspartijen bewaard op de afzonderlijke bedrijven en voor de proefpartij bewaard op deze bedrijven.

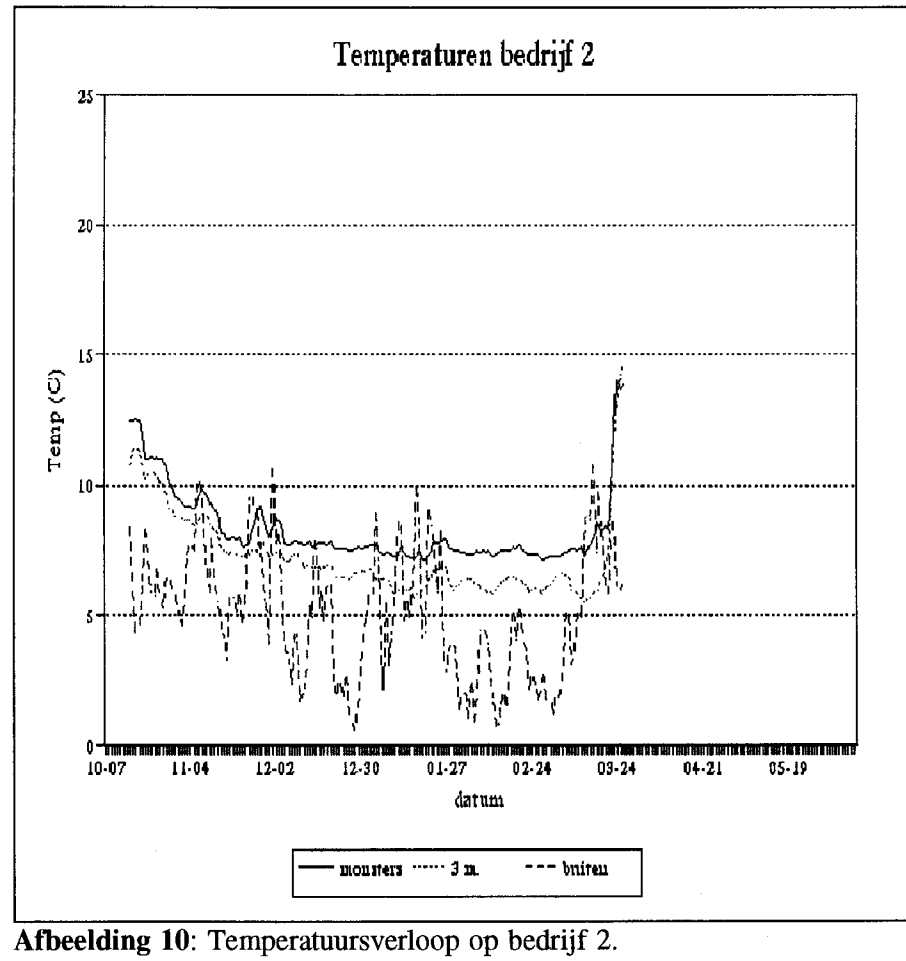
Resultaten energetisch

Gedurende het seizoen 92/93 zijn metingen verricht bij 6 bewaarplaatsen voor consumptieaardappelen. In die bewaarplaatsen zijn de temperatuur, de luchtvochtigheid, de ventilatieacties en in twee bewaarplaatsen de CO_2 concentraties gemeten. Tabel 2 geeft een overzicht van de gemeten energieverbruiken. In de laatste kolom van deze tabel is het energieverbruik per ton per maand bewaring aangegeven: deze kolom is het meest geschikt voor onderlinge vergelijking van de bewaarplaatsen.

Er lijkt geen verband te bestaan tussen het energieverbruik en de kwaliteit van de bewaring. Bedrijf 2 gebruikt weinig energie en heeft een goede bewaarkwaliteit, terwijl bedrijf 3, die ongeveer evenveel energie verbruikt als bedrijf 2, een veel slechtere bewaarkwaliteit heeft. De technische



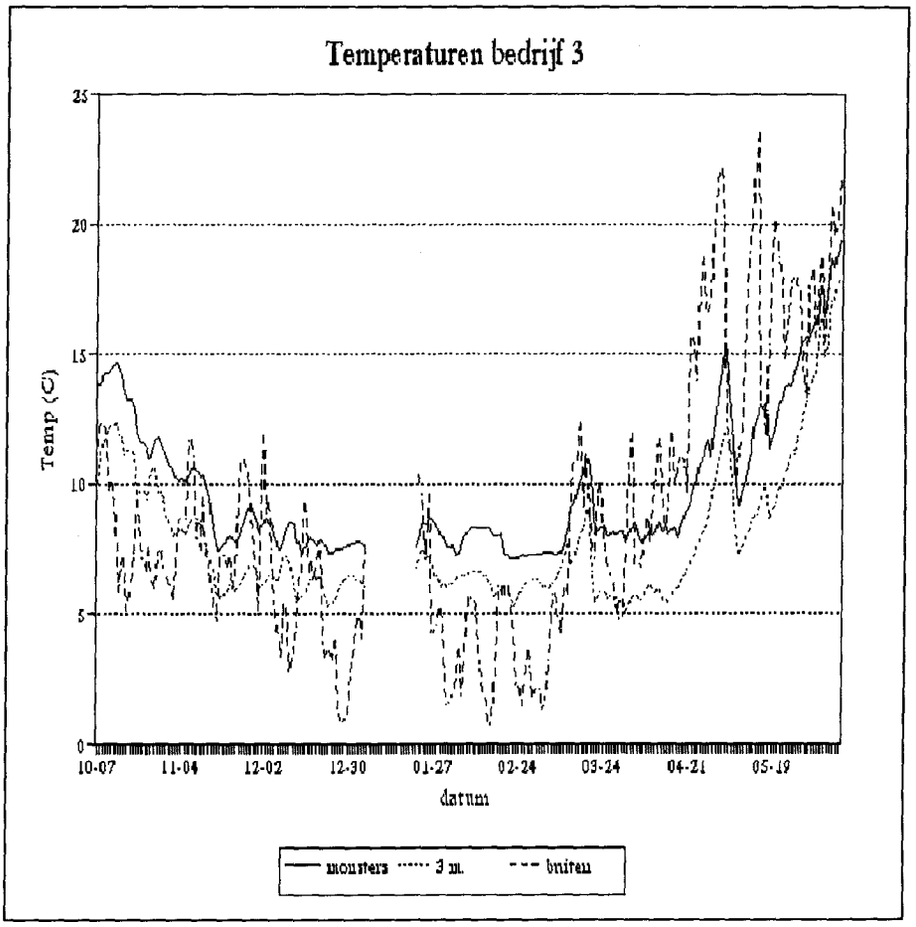
Afbeelding 9: Verloop van de bakkleur van de monsters bewaard op de verschillende bedrijven.



Afbeelding 10: Temperatuursverloop op bedrijf 2.

uitrusting van de bewaarplaats en het gebruik ervan lijken belangrijker voor de kwaliteit van bewaring dan de hoeveelheid gebruikte energie.

3. Proefmateriaal



Afbeelding 11: Temperatuursverloop op bedrijf 3.

Tabel 2: Overzicht van de energieverbruiken bij de bewaring van consumptieaardappelen.

Bedrijf nr.	kWh totaal (kWh)	tonnage (ton)	duur (mnd)	energieverbruik kWh/ton/mnd
1	6567.8	1250	4.5	1.1676
2	1116.0	375	5.3	0.5615
3	5900.0	1000	8	0.7375
4	7536.5	1900	3.3	1.202
5	9668.1	1150	6	1.4012
6	6916.9	650	8.7	1.2232

Het onderzoek werd uitgevoerd met dezelfde vier rassen als in seizoen 1991/1992, nl. Bintje, Agria, Saturna en Van Gogh. Deze aardappelen werden verbouwd op het ATO-DLO proefbedrijf 'De Eest" te Nagele (NOP). De bemesting is uitgevoerd overeenkomstig het advies na grondmonstername. Op het oogsttijdstip waren de aardappelen goed

afgerijpt en afgehard. Voor het onderzoek werd gebruik gemaakt van de sortering voor frites (≥ 55 mm). Het drogen/wondhelen werd bij alle partijen op overeenkomstige wijze uitgevoerd. Tijdens de bewaring werd voor alle temperatuurvarianten een zelfde dampspanningsverschil nagestreefd. Door activiteiten verband houdend met de nieuwbouw van ATO-DLO moesten de monsters van alle temperatuurvarianten rond 9 december '92 worden verplaatst naar nieuwe cellen in een andere locatie. Dit heeft aanvankelijk wat calamiteiten gegeven bij het regelen van de dampspanning en het temperatuurverloop in de geleidelijke cel. Door onze werkwijze, waarbij gebruik wordt gemaakt van modellen, heeft dit geen nadelig effect op de bruikbaarheid van de proeven. Tijdens de bewaarperiode, lopend van 23 september '92 tot 20 augustus '93, werd bij alle temperatuurvarianten carvon toegepast als kiemremmingsmiddel.

4. Bewaaronderzoek

Schaalproeven
De bewaring werd uitgevoerd van 23 september 1992 tot 20 augustus 1993 in zeven proefcellen. In één van de proefcellen werd een glijdend temperatuurverloop gerealiseerd. Door verplaatsen van de monsters werden de volgende temperatuurvarianten verkregen:

- Direct afkoelen naar 4, 6, 8, 10 en 14°C en hierop handhaven.
- Direct afkoelen naar 4°C en vanaf half april[1] geleidelijk naar 10 en 14°C.
- Direct afkoelen naar 6°C en vanaf begin april geleidelijk naar 10 en 14°C
- Direct afkoelen naar 8°C en vanaf begin mei geleidelijk naar 10 en 14°C.
- Direct afkoelen naar 10°C en vanaf eind mei geleidelijk naar 14°C.
- Tot 20 december geleidelijk afkoelen naar 4°C en vanaf half maart geleidelijk naar 10 en 14°C.
- Tot begin december geleidelijk afkoelen naar 6°C en vanaf begin april geleidelijk naar 10 en 14°C.
- Tot half november geleidelijk afkoelen naar 8°C en vanaf begin mei geleidelijk naar 10 en 14°C.
- Tot eind oktober geleidelijk afkoelen naar 10°C en vanaf eind mei geleidelijk naar 14°C.

Via maandelijkse bemonsteringen werden het verloop van de bakkleur-index, het gewichtsverlies en de spruiting gevolgd.

Een ander deel van het onderzoek bestond uit het volgen van de concentraties aan glucose en fructose (reducerende suikers, ook wel aangeduid met hexose) en de niet-reducerende suiker sucrose. Sucrose is een potentiële bron voor de vorming van glucose en fructose en wordt in verband gebracht met het verouderingsproces. De hexoses worden op hun beurt verantwoordelijk gehouden voor de bruinverkleuring tijdens het bakproces.
Vierwekelijks zijn de concentraties glucose, fructose en sucrose bepaald,

[1] Volgens planning vanaf half maart met geleidelijke temperatuurverhoging beginnen. Door calamiteiten bij het verplaatsen enige weken later omgezet.

zowel direct als na twee weken reconditioneren bij 18°C, van de volgende temperatuurvarianten van de rassen Bintje en Saturna van de schaalproef:

- De constante bewaartemperaturen van 4, 6, 8, 10 en 14°C
- De geleidelijke regimes:
  14°C > 4°C > 10°C
  14°C > 4°C > 14°C
  14°C > 6°C > 10°C
  14°C > 6°C > 14°C

Door de suikerbepalingen uit te voeren zowel vóór als na reconditioneren kan onderscheid gemaakt worden tussen koudesuikers en verouderingssuikers. De suikerbepalingen zijn steeds uitgevoerd aan dezelfde knollen waarvan ook de bakkleur werd bepaald.
Tevens is bij aardappelen van het ras Bintje en Saturna, die voor inductie van veroudering bij 18°C zijn bewaard, gedurende een deel van de bewaarperiode gekeken naar de polariteit (de verdeling van de suikers door de knol) en de ademhalingsactiviteit door de knol heen. Dit is aan het eind van het bewaarseizoen ook gedaan aan aardappelen die bij 10°C werden bewaard.

Een deel van de resultaten van dit onderzoek zijn niet direct te vertalen in kwaliteit en worden daarom hier weergegeven.

Gedurende de eerste 150 dagen van de bewaring accumuleren de suikers als gevolg van koudeverzoeting omgekeerd evenredig aan de hoogte van de bewaartemperatuur tot een bepaald maximum. Bewaring bij 4°C leidde tot een hoogste niveau van 1,5% aan reducerende suikers (Bintje) en 1% sucrose (Saturna), terwijl bewaring bij 14°C een produkt opleverde met minimale hoeveelheden sucrose en vrijwel geen reducerende suikers. De opgehoopte koudesuikers verdwijnen vervolgens weer gedeeltelijk.
Na ca. 150 dagen bewaren begint, afhankelijk van de bewaartemperatuur, ouderdomsverzoeting op te treden. Dit leidt eerst tot sterk stijgende sucrosegehalten, gevolgd door stijgende hexosegehalten. De mate waarin deze stijgingen zich voltrekken is afhankelijk van de hoogte van de bewaartemperatuur. De aanvang van de ouderdomsverzoeting schuift naar achteren naarmate de bewaartemperatuur lager is. Reconditioneereffecten zijn bij koudeverzoeting doorgaans groot. Bij Bintje kan hierdoor de hexose-ophoping worden gehalveerd terwijl bij Saturna het hexoseniveau kan worden teruggebracht met 80 à 90%. Wanneer er sprake is van ouderdomsverzoeting neemt het effect van reconditioneren op het reducerend suikergehalte af en wordt in een aantal gevallen negatief. Wat met name opvalt in dergelijke gevallen zijn de sterk negatieve effecten van reconditioneren op het sucrosegehalte. Sucrose-ophoping loopt vooruit op de hexose-ophoping.
Naast de beoordeling van suikers op het niveau van de hele knol is ook gekeken naar de verdeling door de knol. De reducerende suikers zijn egaal door de knol verdeeld. Bij veroudering ontwikkelt zich echter een verschil in sucroseconcentratie tussen basis en apex.

Consumptie-aardappelen en gassamenstelling van de bewaaratmosfeer
In verband met het te ontwikkelen kennissysteem is gekeken naar de invloed van (tijdelijk) verhoogde CO_2 concentraties op de kwaliteit. Daartoe werden in de wondheel- en bewaarperiode een aantal experimenten uitgevoerd met de rassen Bintje, Saturna en Agria. Deze aardappelen werden in de wondheelperiode, in de vroege en late bewaarfase tijdelijk bewaard bij CO_2 concentraties van 0 tot 9% gecombineerd met even grote verlagingen van de zuurstofgehalten. In de heelperiode werd vier weken onder deze condities bewaard bij 18 en 12°C. In de verschillende bewaarfasen werd enkele maanden onder genoemde condities bewaard bij 6°C.
Bij een gebruikelijke wondheelperiode van 10 à 14 dagen had een verhoogde CO_2 concentratie geen negatieve invloed op de bakkwaliteit. Bij een langere wondheelperiode (tot 4 weken) bleken verhoogde CO_2 concentraties een licht negatieve invloed te hebben op de bakkwaliteit. Tevens bleek dat bij een verblijftijd van meer dan twee weken bij 18°C een verhoogde CO_2 concentratie de kieming stimuleerde.
Verhoogde CO_2 concentraties in de vroege bewaarfase resulteerden in een duidelijk negatief effect op de bakkleur en stimuleerden de kieming.
In de late bewaarfase is de invloed van verhoogde CO_2 concentraties op de bakkleur en kieming minder duidelijk.
De voorlopige conclusie uit dit onderzoek is dat koolzuurverhoging in het algemeen de bakkleur nadelig kan beïnvloeden en de kieming kan bevorderen. De effecten zijn afhankelijk van de concentratie en het tijdstip waarop ze optreden. Voor de praktische bewaring dient ophoping van CO_2 in de bewaaratmosfeer zoveel mogelijk vermeden te worden.

Kiemonderdrukking bij consumptie-aardappelen met etherische oliën
Hiervoor kan worden verwezen naar rapport 359. Opgemerkt kan nog worden dat bij bewaring met buitenluchtkoeling de spruitdruk kan worden beperkt door planmatige bewaring via een slim meet- en regelsysteem. Hiermee kunnen grote temperatuurfluctuaties worden voorkomen. Er zijn aanwijzingen dat regelmatige, kortdurende temperatuurschokken tijdens de bewaring een stimulerende invloed hebben op de kieming. Een regelmatig temperatuurverloop tijdens de bewaring is dus zowel bij toepassing van IPC/CIPC als carvon van belang.

5. Sensoren

Als bruikbare mogelijkheden voor het vroegtijdig signaleren van ouderdomsverzoeting kunnen worden genoemd:

Sucrose
Aan de hand van de gegevens van de eerste twee jaar is een experimenteel monitorsysteem opgesteld. Het systeem wordt actief vanaf 150 dagen bewaren, het tijdstip waar vanaf we problemen met ouderdomsverzoeting kunnen gaan verwachten. Maandelijks worden hierbij suikergehalten bepaald aan monsters uit de partij. Dit systeem kent twee alarmfasen. De eerste gaat in op het moment dat het sucrosegehalte begint te stijgen. Men moet nu reeds alert zijn. De tweede alarmfase gaat in wanneer óók het gehalte aan reducerende suikers begint te stijgen. Op dit moment is vaak nog geen achteruitgang van de bakkleur te zien. Hoe snel de partij een onacceptabele bakkleur gaat krijgen hangt af van het absolute niveau aan

reducerende suikers. Om te kunnen af leveren met een acceptabele bakkleur kan gebruik worden gemaakt van de alarmfasen.

Sucrosepolariteit
De sucrosestijging tijdens de veroudering gaat gepaard met een zich ontwikkelende polariteit. Wanneer deze op een goede manier gekwantificeerd kan worden, kan een bepaling op één moment (i.p.v. het volgen in de tijd) informatie geven over het fysiologische ontwikkelingsstadium. Een aanzet hiervoor wordt gegeven tijdens bewaarseizoen 1993/1994. In genoemd bewaarseizoen wordt de sucrose-polariteit van een aantal regimes gevolgd, gebruik makend van een betere bemonsteringsmethode.

Vochtgehalte
Onlangs heeft het IMAG een meetmogelijkheid voor capaciteiten en weerstanden geïntroduceerd gebaseerd op een ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Met deze meetmethode is het waarschijnlijk mogelijk het vochtgehalte in een aardappel en op een aardappel te bepalen. Voorstellen om de bruikbaarheid van deze sensor als maat voor oppervlaktevocht te bepalen zijn opgesteld en resulteren hopelijk binnenkort in uitvoering.

6. Kwaliteit

Na twee proefseizoenen ('91/'92 en '92/'93) kunnen de volgende voorlopige conclusies worden getrokken:

* Gedurende het bewaarseizoen kan het verloop van de bakkleur sterk worden beïnvloed door het temperatuurregime in de bewaarplaats.
* Een snelle afbouw van de temperatuur na de wondheelperiode tot waarden van 6°C en lager resulteert in onacceptabele bakkleurindices vroeg in het bewaarseizoen.
* Naarmate vroeger in het bewaarseizoen tot een lagere temperatuur wordt afgekoeld en naarmate langer bij een lagere temperatuur wordt bewaard kan via een geleidelijke temperatuurverhoging moeilijker weer een acceptabele bakkleur worden verkregen.
* Voor temperatuurniveaus van 4, 6 en 8°C resulteren glijdende verlopen (regimes) veelal in betere bakkleurindices in voorjaar en zomer dan overeenkomstige constante bewaartemperaturen.
* Bij glijdende temperatuurverlopen (regimes) lijkt een geleidelijke verhoging naar 14°C geen negatief effect te hebben op de bakkleur, de spruiting en de gewichtsverliezen t.o.v. een verhoging naar 10°C. Voor langdurige bewaring met buitenluchtkoeling benadert een geleidelijke verhoging naar 14°C in de voorzomer meer de realiteit dan naar 10°C.
* Voor kortdurende bewaring van oogst tot maart/april komen met het oog op een goede bakkwaliteit tot nu toe de volgende varianten als beste naar voren voor:
    - Agria bewaren bij constant 10°C en/of na de wondheelperiode tot ca. half november geleidelijk afkoelen naar 8°C en daarop handhaven.
    - Saturna bewaren bij constant 8 à 10°C en/of zoals bij Agria is aangegeven, geleidelijk afkoelen naar 8°C.
    - Bintje idem als Saturna.

- Van Gogh na de wondheelperiode geleidelijk afkoelen naar 10°C en daarop handhaven en/of bewaren bij constant 10°C.

* Voor langdurige bewaring van oogst tot juni/juli komen m.b.t. de bakkleur, de kieming en de gewichtsverliezen tot nu toe de volgende varianten als beste naar voren voor:
- Agria een glijdend regime 14°C > 8°C > 14°C en 14°C > 6°C > 14°C.
- Saturna een glijdend regime 14°C > 6°C > 14°C en 14°C > 4°C > 14°C.
- Bintje een glijdend regime 14°C > 8°C > 14°C tot ca. eind juni.
- Van Gogh een glijdend regime 14°C > 8°C > 14°C.

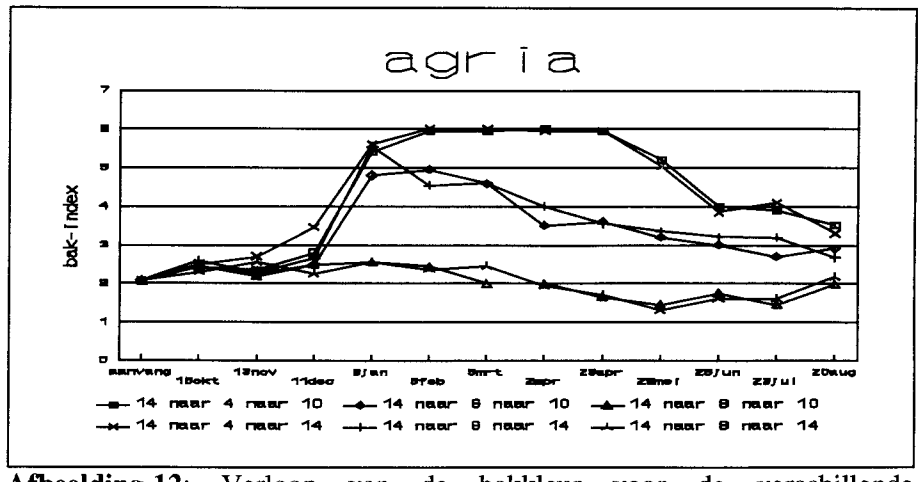
Ter illustratie zijn de afbeeldingen 12 t/m 20 opgenomen. Hierin zijn respectievelijk voor de rassen Agria, Saturna, Bintje en Van Gogh de hiervoor aangegeven regimes voor lange bewaring af te leiden. Tevens kan in deze afbeeldingen worden gezien dat de resultaten van een temperatuurstijging naar 10 en 14°C in het voorjaar elkaar vrijwel overlappen.

Tot slot kan nog worden opgemerkt dat het mogelijk wordt geacht, op grond van het complete beeld dat volgt uit de schaalproef, een wiskundig beschrijvend model te ontwikkelen. Een eerste globaal model bleek reeds 97% van de gegevens te kunnen verklaren. Het gaat hierbij niet om een statistisch model dat over de gegevens wordt gelegd, maar om een dynamisch model dat actief kan worden doorgerekend en waarmee aan de hand van een karakterisering van de grondstof (ras, temperatuur-gevoeligheid, etc.) en gegevens omtrent de bewaring, de te verwachten suikerophoping in het produkt kan worden doorgerekend.
Dit opent grote perspectieven m.b.t. de bewaarplanning, keuze van partijen voor lange bewaring etc.
In het onderzoek van seizoen 1993/1994 wordt veel aandacht besteed aan het verzamelen van gegevens die noodzakelijk zijn voor deze modelontwikkeling en aan een systeem voor tijdige signalering van veroudering.

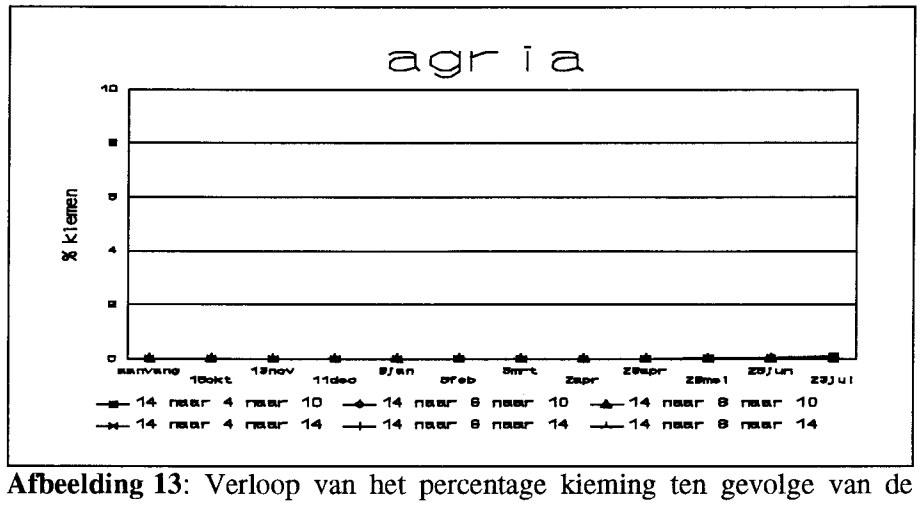
7. Voorlopige conclusies en aanbevelingen

Uit de onderzoeken blijkt dat een bewaring van aardappelen bij hogere temperaturen goed mogelijk is. Daarbij moet echter een evenwicht gevonden worden tussen bakkleur, kieming, gewichtsverliezen, veroudering en energieverbruik. Tot dusverre werd er door de meeste bewaarders slechts gelet op de bakkleur, deze werd met inzet van alle middelen zolang mogelijk laag gehouden. Daardoor verouderden de aardappelen te snel en treden grotere gewichtsverliezen op dan noodzakelijk. Hogere bewaartemperaturen resulteren in een lager energieverbruik en verminderen de noodzaak van het gebruik van mechanische koelingen voor de bewaring.
Met het in ontwikkeling zijnde kennissysteem voor de bewaring van aardappelen is het mogelijk de gevolgen van de geplande bewaring vooraf te overzien. Het zal echter de nodige begeleiding vragen om dan de bewaring zo te plannen dat juist op het moment van aflevering de bakkleur en het afleveringsgewicht optimaal zijn, en niet de gebruikelijke bewaring te volgen waarbij geprobeerd wordt vanaf het begin van de

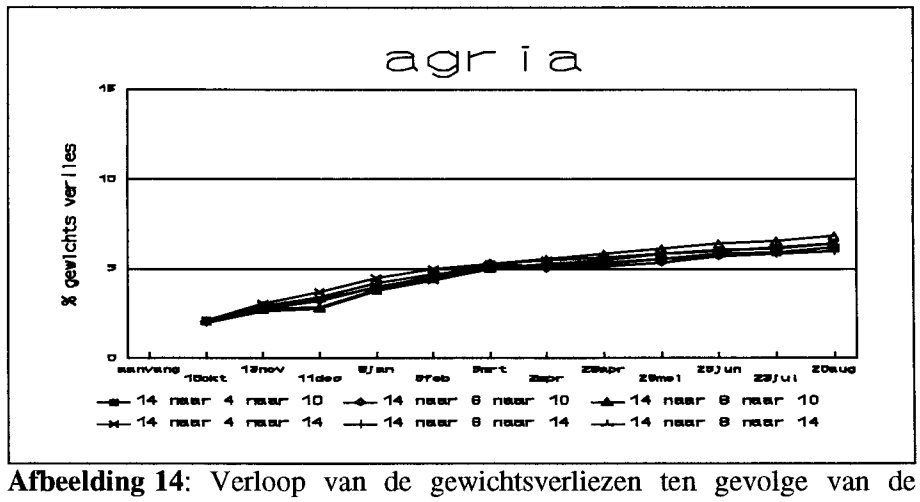
bewaring de bakkleur zolang mogelijk acceptabel te houden. Bij gebruik van het kennissysteem op de juiste manier resulteert dit in lagere energieverbruiken en hogere produktkwaliteit op het moment van afleveren.



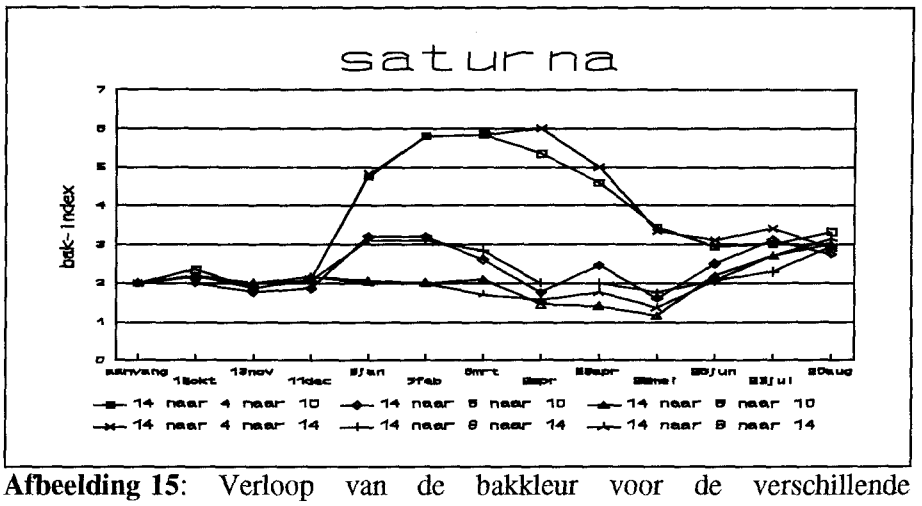
Afbeelding 12: Verloop van de bakkleur voor de verschillende bewaartrajecten.



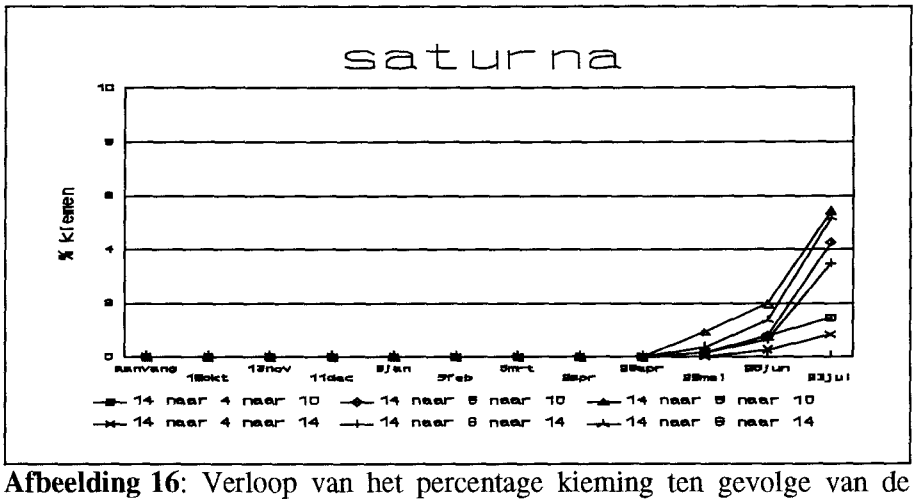
Afbeelding 13: Verloop van het percentage kieming ten gevolge van de verschillende bewaartrajecten.



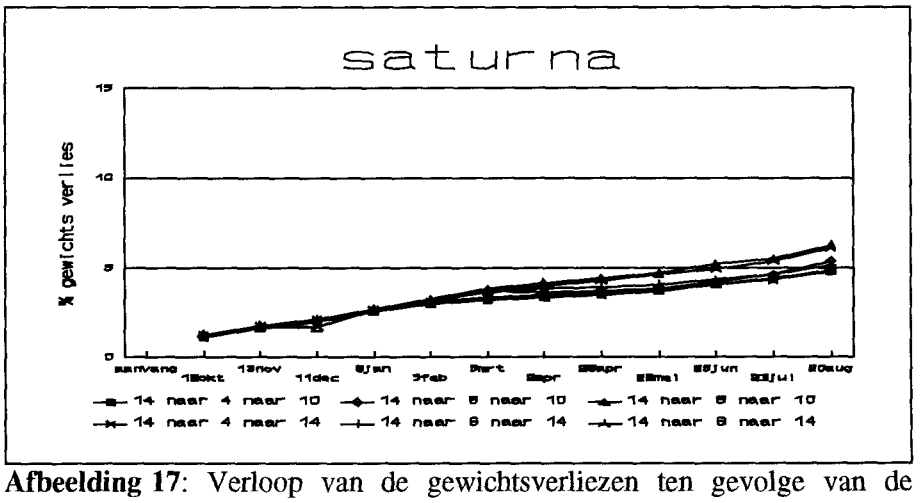
Afbeelding 14: Verloop van de gewichtsverliezen ten gevolge van de verschillende bewaartrajecten.



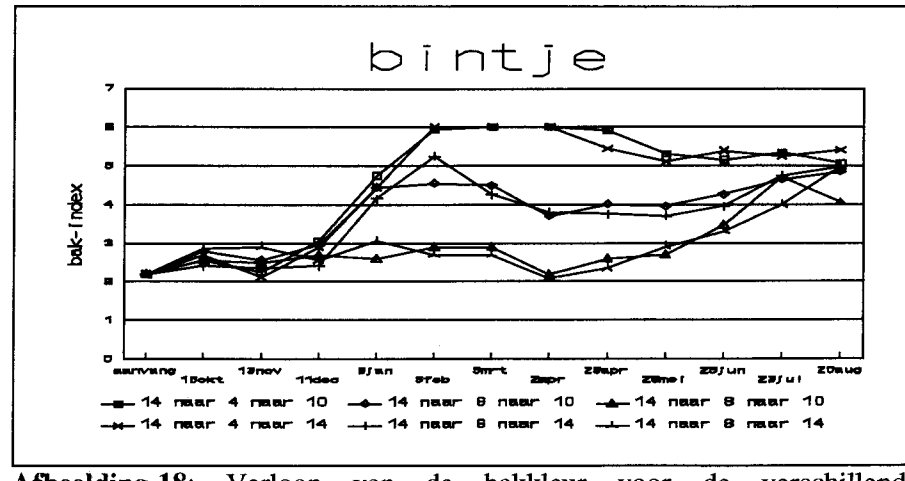
Afbeelding 15: Verloop van de bakkleur voor de verschillende bewaartrajecten.



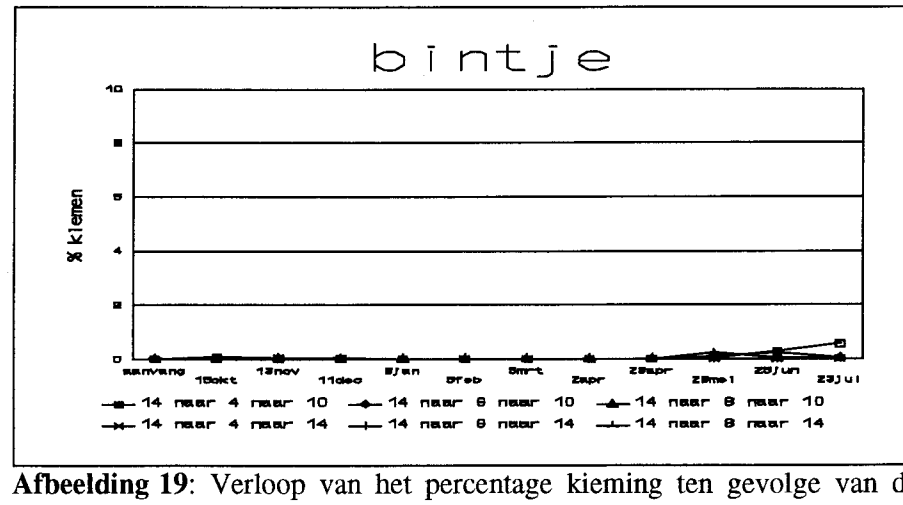
Afbeelding 16: Verloop van het percentage kieming ten gevolge van de verschillende bewaartrajecten.



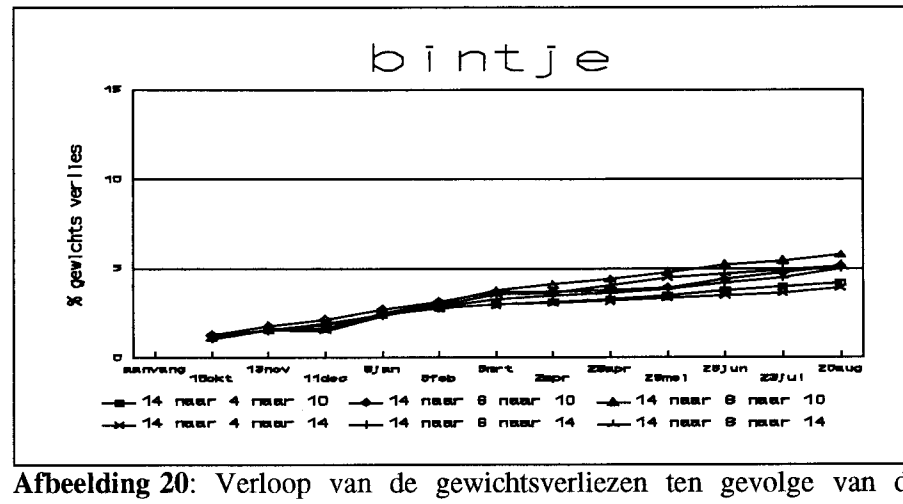
Afbeelding 17: Verloop van de gewichtsverliezen ten gevolge van de verschillende bewaartrajecten.



Afbeelding 18: Verloop van de bakkleur voor de verschillende bewaartrajecten.



Afbeelding 19: Verloop van het percentage kieming ten gevolge van de verschillende bewaartrajecten.



Afbeelding 20: Verloop van de gewichtsverliezen ten gevolge van de verschillende bewaartrajecten.

Conclusies en aanbevelingen

De conclusies uit het eindrapport 1992 worden bevestigd door de nieuwe onderzoeksresultaten.
Zowel pootaardappelen als consumptieaardappelen kunnen minder koud bewaard worden dan gebruikelijk, waarbij de eindkwaliteit vergelijkbaar is of zelfs beter. Verder onderzoek naar rasinvloeden en modelvorming moet dit verder onderbouwen.

Het gebruik van mechanische koeling kost zes maal meer energie dan het gebruik van buitenluchtkoeling. Het nodeloos gebruik van mechanische koeling moet daarom afgewezen worden.
De bruikbaarheid en inzetbaarheid van buitenluchtkoeling voor de bewaring van aardappelen dient verder onderzocht en onderstreept te worden. De manier van gebruik van de technische installatie lijkt van grotere invloed op de kwaliteit van bewaring dan de technische installaties zelf.

Aan de hand van de resultaten van de onderzoeken van seizoen 92/93 is een opzet voor een kennissysteem voor de bewaring van aardappelen gedefinieerd. Deze opzet is hoofdzakelijk gebaseerd op vier modellen. Het bewaarmodel, het energiemodel, het kwaliteitsverloopmodel en het omgevingsmodel. De onderzoeken voor seizoen 93/94 zijn zodanig ingericht dat de resultaten te gebruiken zijn voor het invullen van de verschillende modellen. Dit zal in de eerste helft van 1994 leiden tot een prototype van het kennissysteem.

Voor het beoordelen van de bruikbaarheid van duurzame energie bij de bewaring van aardappelen lijkt het opzetten van additioneel onderzoek noodzakelijk.

Kennisoverdracht aan de sektor heeft plaatsgevonden middels:
- Seminar georganiseerd door het ATO-DLO te Wageningen.
- Lezingen voor de Adviescommissie Akkerbouw.
- Lezingen op verzoek van DLV.

Bij alle kennisoverdracht is en dient de aantekening gemaakt dat alle adviezen pas definitief zijn aan het eind van het onderzoeksproject en na goedkeuring door de begeleidingscommissie.

Bijlage 1: Het bewaarmodel

TEMPERATUURMODEL van een AARDAPPELBEWAARPLAATS

Nomenclatuur
1. Warmtestromen in een aardappelbewaarplaats
1.1. Produktwarmte
1.2. Instraling
1.3. Ventilatorwarmte
1.4. Ontdooiwarmte
1.5. Buitenluchtkoeling
1.6. Mechanische koeling
2. Theorie
2.1. Warmtebalans
2.2. Temperatuurmodel
2.3. Temperatuurgedrag
2.4. Variabele isolatie
2.5. Autonome afkoeling
3. Praktijk
3.1. Massa
3.2. Temperatuur
3.3. Warmteproduktie
3.4. Instraling
3.5. Koeling
3.6. Onbekende warmtestromen
3.7. Model
4. Simulaties
4.1. Thermostaatregeling
4.2. Draaiuren
4.3. Temperatuurgedrag
5. Parametrisering van de warmteproduktie
5.1. Kleinste kwadratenmethode
5.2. Filtering
6. Metingen
6.1. Consumptie bedrijf 3
6.2. Consumptie bedrijf 1
6.3. Consumptie bedrijf 4
6.4. Pootgoed bedrijf 4
6.6. Pootgoed bedrijf 2 (buitenluchtkoeling)
6.6. Pootgoed bedrijf 2 (mechanische koeling)
6.7. Consumptie bedrijf 5
6.8. Pootgoed bedrijf 1
6.9. Consumptie bedrijf 2
6.10. Pootgoed bedrijf 3
6.11. Consumptie bedrijf 6
7. Conclusies

NOMENCLATUUR

$\bar{a}$	= de verwachtingswaarde van a	
a_{max}	= de maximale waarde van a	
a_{min}	= de minimale waarde van a	
a^t	= de waarde van a op tijdstip t	
A	= oppervlakte waardoorheen warmte-uitwisseling plaatsvindt	m^2
β	= koelfaktor	1
c	= warmtecapaciteit van aardappels	J/kg K
c_q	= warmteproduktiefaktor	1
H	= enthalpie van lucht	J/kg
k	= isolatiewaarde	W/m^2K
M	= massa aardappels	kg
P_{compr}	= vermogen van de compressor	W
P_{koel}	= koelvermogen	W
ρ	= soortelijke massa van lucht	kg/m^3
Q_{instr}	= instralingswarmte	J
Q_{ontd}	= ontdooierwarmte	J
Q_{prod}	= produktwarmte	J
Q_{vent}	= ventilatorwarmte	J
Q/s	= warmtestroom	J/s, W
q_W	= soortelijke warmteproduktie	W/kg
T	= temperatuur	°C
T_{in}	= binnen temperatuur	°C
T_{uit}	= buiten temperatuur	°C
v	= hoeveelheid ventilatielucht per seconde per kg aardappels	m^3/s kg

1. Warmtestromen in een aardappelbewaarplaats

In een aardappelbewaarplaats treden de volgende warmtestromen op die samen de temperatuur in de aardappelhoop bepalen:

1.1. Produktwarmte

Bij de ademhaling van aardappels komt o.a. warmte vrij. De verschillende geraadpleegde literatuurbronnen zijn niet eenduidig over de warmteproduktie per ton bij aardappels q_{prod} als functie van de temperatuur. Wel vertoont het globale verloop overeenkomsten, nl. dat de warmteproduktie bij een paar *°C* boven *0* minimaal is. Richting het vriespunt stijgt de warmteproduktie sneller dan richting warmere temperaturen. Bij ongeveer *20 °C* is globaal een verdubbeling bereikt van de warmteproduktie per ton. Door de meetwaarden van Burton & Rastovski is een polynoom gefit welke als basis gebruikt wordt in het model:

$$q_W(T) = 18 - 3.7667T + 0.55333T^2 - 3.1333\times10^{-2}T^3 + 6.6667\times10^{-4}T^4 \quad \left[\frac{W}{ton}\right]$$

soortelijke warmteproduktie **(1)**

Meetwaarden van Burton:

T [°C]	*1*	*5*	*10*	*15*	*20*
q_{prod} *[W/ton]*	*20*	*9,7*	*10,6*	*12,9*	*20,1*

De totale warmteproduktie wordt nu gegeven door:

$$\frac{Q_{prod}}{s} = q_{prod}(T)M \quad [W = \frac{W}{kg}kg]$$

warmteproduktie **(2)**

1.2. Instraling

Warmte-uitwisseling met de omgeving via oppervlakte *A* is afhankelijk van het temperatuurverschil met buiten en de isolatiewaarde *k* volgens:

$$\frac{Q_{instr}}{s} = Ak\,\Delta_{inf/uit}T \quad [W = m^2\frac{W}{m^2K}K]$$

instraling **(3)**

Ook vindt warmte-uitwisseling met de grond plaats. Voor de grond wordt een constante temperatuur van *8*°C aangehouden. Deze komt dicht in de buurt bij de gemiddelde temperatuur van een heel aardapppelbewaarseizoen. Van oktober tot juni was in het seizoen '92/'93 de gemiddelde buitentemperatuur *8,29 °C*.

1.3. Ventilatorwarmte

Ventilatorwarmte wordt veroorzaakt door het gebruik van ventilatoren in de bewaarplaats voor circulatie, buitenluchtkoeling en het doorblazen van de verdamper bij mechanische koeling. Het volledige opgenomen elektrische vermogen wordt in warmte omgezet.

1.4. Ontdooiwarmte

Ontdooiwarmte wordt veroorzaakt door de elektrische ontdooiers bij mechanische koeling. Een alternatief is persluchtontdooiing. Hierbij moet de compressor extra vermogen leveren. De nutteloze warmte-ontwikkeling in de compressor blijft dan buiten de bewaarplaats. Bij een elektrische ontdooier komt alle energie in de bewaarplaats terecht: de smeltwarmte en de schadelijke warmte. De smeltwarmte komt weer vrij als vocht in de bewaarplaats opnieuw aanvriest op de verdamper.

Bovengenoemde factoren, die tezamen een verhoging van de temperatuur tot gevolg hebben, moeten gecompenseerd worden door
buitenluchtkoeling *en/of* mechanische koeling.

1.5.Buitenluchtkoeling

Buitenluchtkoeling kan plaatsvinden door op geschikte tijden lucht naar binnen te blazen met een lagere energie-inhoud. Als de absolute vochtigheid van de buitenlucht lager is dan de hoeveelheid vocht in de lucht binnen de bewaarplaats, dan heeft dit een uitdrogend effect op de aardappels, wat alleen in het begin van de bewaarperiode, als er gedroogd moet worden, gewenst is.
De standaardwaarde voor de ventilatorcapaciteit wordt gegeven door:

100 m^3 lucht per 1 m^3 aardappels per uur bij 150 Pa tegendruk
[Aardappelbewaring, v.d. Schild]

Het **debiet** v zoals verder wordt gebruikt, wordt gedefinieerd door **het aantal kubieke meters lucht per seconde per kilogram aardappels.**
De standaardwaarde bedraagt dan:

$$v = 3.7\times10^{-5} \quad \left[\frac{m^3}{kg\,s}\right]$$

debiet (4)

Het koelvermogen van buitenluchtkoeling wordt gegeven door het debiet maal het verschil in energie tussen binnen- en buitenlucht per kubieke meter:

$$P_{koel} = \frac{Q}{s} = vM\,\Delta_{in/uit}(H\rho) \quad \left[W=\frac{m^3}{s\,kg}kg\left(\frac{J}{kg}\frac{kg}{m^3}\right)\right]$$

buitenluchtkoeling (5)

1.6. Mechanische koeling

Als ondersteuning of enige koeling, met name bij pootaardappelen waarbij een lagere bewaartemperatuur gehandhaafd moet worden, wordt van mechanische koeling gebruik gemaakt. Het koelvermogen van een mechanische koelinstallatie, de hoeveelheid warmte die onttrokken kan worden, wordt gegeven door de koelfaktor β (coefficient of performance) maal het toegevoegde elektrische vermogen aan de compressor:

$$P_{koel} = \beta P_{compressor}$$

mechanische koeling (6)

De koelfaktor β kan berekend worden volgens:

De faktor *0,4* is een correctie op de maximaal haalbare ideale koelfaktor. Een ideale koelinstallatie kent o.a. geen temperatuursverschil over de compressor en het ventiel. In de praktijk is dit niet haalbaar. Voor een aardappelbewaarplaats geldt nu:

$$\beta = 0.4 \times \frac{T_{verdamp}}{T_{condens} - T_{verdamp}}, \quad \left[1 = \frac{K}{K}\right]$$

koelfaktor **(7)**

$$p = 0.4 \frac{T_{verd.}}{T_{cond.} - T_{verd.}} = 0.4 \frac{270}{315-270} = 2.4$$

koelfaktor voor aardappelbewaring **(8)**

2. Theorie

2.1. Warmtebalans

De warmtebalans is weergegeven in de formule :

$$Q_{prod} + Q_{instr} + Q_{vent} + Q_{ontd} = Q_{mech.koeling} + Q_{buitenl.koeling}$$

energiebalans **(9)**

In de praktijk treden continu verstoringen op waardoor de hoeveelheid warmte toe- of afneemt.

2.2. Temperatuurmodel

De verandering van temperatuur wordt gegeven door:

$$dT_{in} = \frac{dQ}{Mc} = d\left(Q_{prod} + Q_{instr} + Q_{vent} + Q_{ontd} - Q_{mech.koel.} - Q_{buitenl.koel.}\right)\frac{1}{Mc}$$

$$\left[K = \frac{J}{kg\frac{J}{kg \cdot K}}\right]$$

storing **(10)**

waarbij c de warmtecapaciteit van aardappels is:

$$c = 3600 \quad \left[\frac{J}{kgK}\right]$$

warmtecapaciteit **(11)**

Als functie van de tijd kan nu geschreven worden:

$$dT_{in}^{t} = \frac{dt}{Mc}\Big(Mq_{prod}(T_{in}^{t}) + A_{uit}k_{uit}(T_{uit}^{t} - T_{in}^{t}) + A_{grond}k_{grond}(T_{grond} - T_{in}^{t})$$
$$+ P_{vent.}^{t} + P_{ontd.}^{t} - pP_{comp.}^{t} - Mv^{t}\left\{\rho H(T_{in}^{t}, RV_{in}^{t}) - \rho H(T_{uit}^{t}, RV_{uit}^{t})\right\}\Big)$$

model **(12)**

Analytisch is deze differentiaalvergelijking niet op te lossen vanwege het discontinuë karakter van functies als P^t en v^t. Deze geven respectievelijk het verbruikte vermogen en het ventilator-debiet weer op tijdstip t. Bovendien is de buitentemperatuur een onzekere factor. Omgezet naar een differentievergelijking kan hiermee wel bij benadering het temperatuurverloop, stap voor stap, berekend worden als de buitencondities en de startwaarde bekend zijn.

2.3. Temperatuurgedrag

Beschouw nu een aardappelbewaarplaats met een warmtecapaciteit die gelijk is aan een volle schuur, maar zonder warmteproduktie en koeling. Stel bijvoorbeeld dat de koeling evenveel warmte afvoert als dat de produktwarmte oplevert. De differentiaalvergelijking wordt nu:

$$dT_{in}^{t} = \frac{dt}{Mc}\left([Ak]_{uit}T_{uit}+[Ak]_{grond}T_{grond}-([Ak]_{uit}+[Ak]_{grond})T_{in}^{t}\right)$$

vereenvoudigd model **(13)**

Stel nu dat de buitentemperatuur T_{uit} constant is. De vergelijking is dan op te lossen:

$$T_{in}(t) = \frac{[Ak]_{uit}T_{uit}+[Ak]_{grond}T_{grond}}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}+\left(T_{in}^{0}-\frac{[Ak]_{uit}T_{uit}+[Ak]_{grond}T_{grond}}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}\right)e^{\frac{-([Ak]_{uit}+[Ak]_{grond})t}{Mc}}$$

(14)

of:

$$T_{in}(t) = T_{in}^{\infty} + (T_{in}^{0}-T_{in}^{\infty})e^{-\alpha t}$$

(15)

met limietwaarde, als het evenwicht bereikt is:

$$T_{in}^{\infty} = \frac{[Ak]_{uit}T_{uit}+[Ak]_{grond}T_{grond}}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}$$

limietwaarde **(16)**

en een halfwaardetijd:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\alpha} = \frac{\ln 2\, Mc}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}$$

halfwaardetijd **(17)**

Een standaard geïsoleerde schuur (*k=0,3*) met *1000 ton* aardappels heeft aldus een halfwaardetijd van *32,8 dagen*. Dit wil zeggen dat een verschil van 5 *K* t.o.v. de evenwichtswaarde na een maand resulteert in een verschil van nog steeds 2,5 *K* t.o.v. de evenwichtswaarde.
Uit simulaties met een gemeten, en dus niet constante buitentemperatuur blijkt dat de evenwichtswaarde licht met het seizoen meeschommelt. Bij deze schuur wordt geen groter verschil dan 3 graden tussen zomer en winter geconstateerd. De halfwaardetijd blijkt constant *33[±0,5] dagen* te zijn, wat overeenkomt met de berekende waarde. Dit geeft aan dat bovenstaande oplossing wel bruikbaar is, ondanks de foutieve veronderstelling dat de buitentemperatuur constant is.
Voor verschillende isolatiewaarden is het temperatuurverloop berekend. Zoals te verwachten is zijn de schommelingen veel groter voor slechtere isolatiewaarden. Dit lijkt te duiden op een slechter, immers minder stabiel gedrag. De positieve aspecten van een slechte isolatie blijken uit het volgende.

We voegen aan het vereenvoudigde model een produktwarmte toe die onafhankelijk is van de temperatuur, wat slechts een eerste orde benadering is van de werkelijkheid:

$$dT_{in}^{t} = \frac{dt}{Mc}\left(Mq_{prod}+[Ak]_{uit}T_{uit}+[Ak]_{grond}T_{grond}-([Ak]_{uit}+[Ak]_{grond})T_{in}^{t}\right)$$

vereenvoudigd model met produktwarmte **(18)**

De oplossing van deze vergelijking is vrijwel identiek. Het enige verschil is dat het evenwicht een andere waarde aanneemt:

$$T_{in}^{\infty} = \frac{Mq_{prod}+[Ak]_{uit}T_{uit}+[Ak]_{grond}T_{grond}}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}$$

limietwaarde met produktwarmte **(19)**

Het verschil tussen de evenwichtswaarden met en zonder produktwarmte (of, in het laatste geval, wel produktwarmte, maar een koeling die hier gelijk aan is) is nu als volgt uit te drukken:

$$\Delta T_{in}^{\infty} = T_{in,Q_{prod}}^{\infty} - T_{in,0}^{\infty} = \frac{Mq_{prod}}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}$$

limietwaardenverschil **(20)**

Deze blijkt alleen afhankelijk te zijn van vaste parameters. Omdat de verwachtingswaarde van de buitentemperatuur, gemiddeld over een heel jaar, ongeveer gelijk is aan de grondtemperatuur, geldt dat de verwachtingswaarde van de temperatuur in de aardappelbewaarplaats gegeven wordt door:

$$\overline{T_{in}} = T_{grond}+\Delta T_{in}^{\infty} = T_{grond}+\frac{Mq_{prod}}{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}$$

verwachtingswaarde **(21)**

Hoe groter de *k*-waarde is, hoe lager de gemiddelde temperatuur zal zijn. Grafisch is voor 2 *k*-waarden het temperatuurverloop weergegeven. Voor *1000 ton* aardappels en een (gebruikelijke) *k*-waarde van *0,3* is het verschil *13,9 K*, bij een warmteproduktie van *15 W/ton*. Het verschil wordt *5,9 K* als de isolatie twintig maal minder wordt: *k=6,0*. Duidelijk is te zien dat variaties t.g.v. de wisselende buitentemperatuur optreden, maar dat het verschil met de situatie zonder produktwarmte constant blijft.

2.4. Variabele isolatie

Uit het voorgaande blijkt dat bij een slechte isolatie een grotere uitwisseling met de omgeving plaatsvindt, waardoor de produktwarmte beter afgevoerd kan worden als het binnen warmer is dan buiten. Een nadeel is dat de temperatuur ook sneller stijgt als het buiten warmer is dan binnen. Ideaal zou een tussenweg zijn: een goede isolatie als het binnen kouder is en een slechte isolatie als het binnen warmer is dan buiten. Gedacht kan dan worden aan isolerende matten die langs de muren omhoog of omlaag gehesen worden. Hier kleven ongetwijfeld de nodige praktische bezwaren aan, maar het resultaat op de temperatuur is positief. In een testrun is dit gesimuleerd door *k=6,0* te stellen als het binnen warmer is dan buiten en *k=0,3* als het binnen kouder is. De gekozen hoge *k*-waarde komt overeen met de isolatie-waarde van een bakstenen muur met een dikte van ±10 cm. Het resultaat is dat het verschil t.g.v. produktwarmte met ongeveer *50%* afneemt. Dit wordt dus geheel bereikt zonder mechanische en/of buitenluchtkoeling.

2.5. Autonome afkoeling

Bij een slechte isolatie zal in het geval van een langdurige vorstperiode de temperatuur in de bewaarplaats afnemen. Bij een goede isolatie zal de temperatuur juist toenemen omdat geen buitenluchtkoeling kan worden toegepast zolang het vriest. Koelen met menglucht is dan wel mogelijk, maar dit heeft een lager rendement. Er wordt immers gedeeltelijk energie gestopt in het rondpompen van lucht die al aanwezig was.
De buitentemperatuur $T_{uit,min}$ waarbij de gemodelleerde temperatuur toe noch afneemt zonder aktieve koeling toe te passen volgt eenvoudig uit de differentiaalvergelijking. Er geldt dan:

$$Mq_{prod}+[Ak]_{uit}T_{uit,min}+[Ak]_{grond}T_{grond}-([Ak]_{uit}+[Ak]_{grond})T_{in}^{t} = 0$$

temperatuursevenwicht **(22)**

En dus:

$$T_{uit,min} = \frac{[Ak]_{uit}+[Ak]_{grond}}{[Ak]_{uit}}T_{in} - \frac{Mq_{prod}+[Ak]_{grond}T_{grond}}{[Ak]_{uit}}$$

buitentemperatuur bij evenwicht **(23)**

Als een voorwaarde is dat de temperatuur niet autonoom mag afnemen is op basis hiervan en de minimum te verwachten buitentemperatuur uit te rekenen wat de maximale *k*-waarde mag zijn. Omdat ook voor een slecht geïsoleerde schuur de halfwaardetijd enkele dagen of meer bedraagt, hoeft geen rekening gehouden te worden met de absoluut te verwachten minimum-temperatuur. De minimale gemiddelde dagtemperatuur volstaat. Als uitgegaan wordt van een temperatuur in de bewaarplaats die gelijk is aan de grondtemperatuur (ongeveer 8 °C) dan vereenvoudigt bovenstaande vergelijking tot:

$$T_{uit,min} = T_{in} - \frac{Mq_{prod}}{[Ak]_{uit}}$$

buitentemperatuur bij evenwicht ($T_{in} = T_{grond}$) **(24)**

of:

$$k_{uit,max} = \frac{Mq_{prod}}{A_{uit}(T_{grond}-T_{uit,min})}$$

maximale *k*-waarde **(25)**

Voor een schuur met *1000 ton* aardappels en een te verwachten daggemiddelde minimum buiten temperatuur van -10 °C volgt hieruit dat $k_{uit,max} = 1,2$.

3. Praktijk

Een model dat de werkelijke temperatuur exact beschrijft is zo niet onmogelijk danwel in de praktijk zeker onhaalbaar. Een aantal moeilijkheden:

3.1. Massa

De beladingsgraad van een bewaarplaats is niet constant gedurende het seizoen door in- en uitschuren van produkt en vochtverlies door uitdroging gedurende het bewaarseizoen. Een goede schatting voor *M*, in feite M^t, is daarom, zeker achteraf, moeilijk te geven.

3.2. Temperatuur

Dé temperatuur in een aardappelbewaarplaats bestaat sowieso al niet. Midden in de hoop, aan de randen, bovenin, onderin, bij de muren, boven de hoop, in het ventilatiekanaal: overal is de temperatuur anders. Omdat de metingen maar een beperkt aantal punten omvat, zijn we alleen daarom al gedwongen om een eenvoudig model te kiezen.

3.3. Warmteproduktie

Welke factoren, en met name in welke mate, allemaal invloed hebben op de ademhaling en dus de warmteproduktie, is niet exact bekend. De literatuur is in ieder geval niet eenduidig. Behalve temperatuur hebben ook CO_2 concentratie, leeftijd, ras, ziekte, temperatuurverloop in het verleden, grootte van de knol, gebruik van kiemremmende middelen, beschadiging van de schil en andere factoren zoals de grondsoort, groeicondities voor de oogst en het al dan niet volwassen stadium van de knol op het moment van de oogst invloed op de warmteproduktie. [Schippers 1977]
De warmteproduktie per ton, en dat wordt in feite gemeten, is bovendien lager als de aardappels meer vervuild zijn met klei:

$$q_{prod,gemeten} = q_{prod,aardappel} \frac{M_{aardappel}}{M_{aardappel} + M_{vervuiling}}$$

vervuilde warmteproduktie **(26)**

Laboratoriummetingen aan aardappels worden gedaan met droge knollen van een bepaalde sortering. Grote knollen hebben een andere verhouding tussen oppervlak en inhoud en hebben daarom een lagere warmteproduktie per massa-eenheid. Ook is het effect van een natte omgeving op de ademhaling niet bekend.
In het gebruikte model wordt de functie $q_{prod}(T)$ vermenigvuldigd met een te parametriseren factor c_q. Een waarde van 1, wat een bevestiging van de theorie inhoudt, komt niet bij elke boer voor. Er zijn duidelijk waarneembare verschillen in warmteproduktie tussen de verschillende praktijkproeven. Zie ook het hoofdstuk 'parametrisering van de warmteproduktie'.

3.4. Instraling

De moeilijkheid bij een juiste bepaling van de instraling is dat de *k*-waarde niet constant is over het hele oppervlak van de bewaarplaats. Omdat de temperatuur ook varieert over het oppervlak (schaduw, zon, op het dak, vlak bij de grond...) is het theoretisch ook niet mogelijk om met een gemiddelde *k*-waarde te werken. Praktisch gezien is er geen keus. Een bijkomend probleem is dat de *k*-waarde varieert met het weertype: nat, droog, sneeuw, wind....
Een andere moeilijkheid is als in een bewaarplaats nog meer produkt wordt bewaard. Welk percentage van de instraling is verantwoordelijk voor opwarming van de aardappels waar het model betrekking op heeft? Er is uitgegaan van de gedachte dat alleen stukken buitenmuur die direkt contact hebben met de model-aardappel-box een bijdrage leveren aan de instraling, en alleen dat gedeelte van het dak dat zich recht boven de bewuste aardappelbox bevindt. De overige kanten van de box hebben immers contact met ander produkt van nagenoeg dezelfde temperatuur en leveren netto dus geen bijdrage aan de totale instraling van warmte op de aardappels.

3.5. Koeling

Het probleem bij koeling is dat de koelfaktor en/of het debiet niet precies bekend zijn. Dit moet uit de metingen blijken. Het debiet is ook weer afhankelijk van de beladingsgraad, de knolgrootte en de hoeveelheid klei tussen de knollen. Deze bepalen namelijk de tegendruk.

3.6. Onbekende warmtestromen

Naast de genoemde warmtestromen zijn er in het algemeen nog meer oorzaken voor een temperatuursverandering: tocht door kieren, open deuren, ventilatieluiken; lampen die aan staan; kachels die gedurende het begin of einde van het bewaarseizoen gebruikt worden voor droging resp. opwarming...

3.7. Model

Omdat de *RV* in de aardappelhoop praktisch altijd *95%* is, wordt deze in het model constant beschouwd. Corresponderend met de meetseries wordt een tijdstap van *600 sec.* aangehouden. t^t_x Is de tijd dat installatie x gedurende periode $[t,t+600]$ aan heeft gestaan. Het model wordt nu:

$$T_{in}^{t+600} = \frac{1}{Mc}\Big(600\Big\{Mc_q q_{prod}(T_{in}^t)+A_{uit}k_{uit}(T_{uit}^t-T_{in}^t)+A_{grond}k_{grond}(8^oC-T_{in}^t)\Big\} + \sum_{omtd} t_o^t P_o - \sum_{comp} t_c^t p P_c + \sum_{vent} t_v^t\Big(P_v - Mv\Big\{\rho H(T_{in}^t, 95\%) - \rho H(T_{uit}^t, RV_{uit}^t)\Big\}\Big)\Big)$$

praktisch model (27)

4. Simulaties

Op basis van het praktische model, gemeten buitentemperaturen, reële parameters en een eenvoudige thermostaatregeling, aangebracht in de software, wordt het effect van verschillende instellingen en isolatiewaarden onderzocht voor een heel bewaarseizoen en vergeleken met de theorie.

4.1. Thermostaatregeling

Bij deze eenvoudige regeling wordt met buitenlucht geventileerd als aan de volgende voorwaarden voldaan wordt:

1. $T_{in} > T_{uit} + Marge$,
2. $T_{uit} > 0\ °C$
3. a. $T_{in} > T_{set} + Band$ òf
   b. $(T_{in} > T_{set})$ èn $(Ventilatie=aan)$ òf
   c. $00h^{00} < tijd < 00h^{20}$

Marge is het minimale verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur. Deze heeft een typische waarde van 1 of 2 *K*.
Band is de bandbreedte, vanaf Tset, waarbinnen de koeling niet uit- of aanslaat zolang de buitencondities gunstig blijven. Deze heeft een typische waarde van 0,2 *K*.
Bij gunstige buitencondities wordt bovendien elke nacht 20 minuten geventileerd.

4.2 Draaiuren

Voor verschillende setpoints, marges en k-waarden is een heel seizoen gesimuleerd, waarbij o.a. het totaal aantal draaiuren berekend is. Behalve een maat voor de hoeveelheid verbruikte energie is het ook een maat voor het vochtverlies. Hoe meer draaiuren, hoe meer energiekosten en hoe meer vochtverlies, waarmee een tegenvoorbeeld is gegeven van de wet van toe- en afnemende ellende.
Enkele trends die duidelijk uit de grafiek volgen:

- Bij een hoog setpoint (8 à 9 °C) heeft de isolatie geen invloed op het aantal draaiuren. Dit is te begrijpen, omdat de gemiddelde buitentemperatuur niet hoger is dan de gemiddelde binnentemperatuur. Bij een laag setpoint (±5 °C) neemt het aantal draaiuren toe met 10 à 20%. Zie grafiek.
- De minimale marge met de buitentemperatuur heeft de grootste invloed op het aantal draaiuren. Een marge van 0,2 i.p.v. 2 *K* heeft globaal een verdubbeling van het aantal draaiuren tot gevolg, ongeacht de isolatie en het setpoint. Zie grafiek.

4.3. Temperatuurgedrag

Behalve het aantal draaiuren, is het feitelijke temperatuurgedrag voor een bepaalde instelling zeker net zo belangrijk. Eén voorwaarde voor een goed temperatuurgedrag is dat de temperatuur niet onder het setpoint mag komen, ook niet gedurende een lange vorstperiode. Uit de simulaties volgt dat hieraan voldaan wordt, binnen een marge een paar tienden graad, bij een k-waarde 1,75 of lager (bij *1000 ton* aardappels, een setpoint van *8 °C* en *±15 W/ton* warmte produktie). Dit is in overeenstemming met de berekende waarde (zie Theorie en grafiek).
Goede isolatie levert gedurende vorstperioden positieve pieken op. Met mengluchtkoeling zou dit ondervangen kunnen worden. Het rendement van mengluchtregeling is echter wel lager dan van pure buitenlucht.
In het seizoen '92/'93 is vanaf mei geen enkel setpoint onder de 10 °C haalbaar meer. Een laag setpoint (5 °C) levert verspreid over het hele seizoen pieken op die tegen de 8 graden aanlopen. Een slechte isolatie heeft nog iets hogere pieken tot gevolg. Zie ook grafieken.

5. Parametrisering van de warmteproduktie

Gedurende een autonome periode, d.w.z. een periode waarin niet geventileerd wordt, spelen alleen instraling en warmteproduktie een rol. Van deze twee heeft de warmteproduktie de grootste invloed op het temperatuurgedrag. Als nu de instraling, op basis van de gemeten temperaturen en de isolatiewaarden, als bekend wordt verondersteld, dan is alleen de warmteproduktie een onbekende faktor. Deze is op een enkelvoudig autonoom gebied relatief eenvoudig te parametriseren.

5.1. Kleinste kwadraten methode

Een niet slimme (lees: niet snelle) methode om de waarde van c_q te vinden waarvoor de som van de gekwadrateerde fouten minimaal is, is om voor een hele range van waarden van c_q deze som uit te rekenen en dit evt. te herhalen voor een meer compacte range rond de beste waarde. De convergentie van deze methode is zeer laag.

De (niet lineaire) vergelijking is van een zodanige aard dat bij een te grote waarde van c_q de fout t.o.v. de gemeten temperatuur positief is en in de tijd alleen maar groter wordt. Een te kleine waarde levert een steeds groter wordende negatieve fout op. De oplossing levert geen rechte op, maar door de fout als functie van de tijd kan wel met enige zin een rechte lijn getrokken worden met behulp van de bekende formules voor een optimale lineaire fit m.b.t. de kleinste kwadraten. Dit leidt tot een indirekte methode voor minimalisatie.
Gestart wordt met 2 waarden van c_q, $c_{q0,min}$ en $c_{q0,max}$, waarbinnen de beste c_q moet liggen. Voor het gemiddelde c_{q1} wordt het model doorgerekend en de som van de gekwadrateerde fouten uitgerekend. Is de richtingscoëfficient van de rechte door de fout als functie van de tijd negatief, dan wordt c_{q1} de ondergrens $c_{q0,min}$ en anders de bovengrens $c_{q0,max}$, waarna opnieuw voor het gemiddelde het model wordt doorgerekend en vergeleken met de gemeten waarden.
Deze methode convergeert met een faktor 2 naar een waarde van c_q waarvoor de fout in de tijd gemiddeld niet toe of af neemt.
Voor de rechte lijn door de fout als functie van de tijd kan aangenomen worden dat deze door de oorsprong gaat, wat inhoudt dat een fout op $t=0$ niet aanwezig is, of dat bij deze lijn een tijdsonafhankelijke constante moet worden opgeteld. De eerste methode levert een waarde van c_q op waarbij de fout gemiddeld in de tijd 0 is. De andere methode zou wellicht een betere oplossing opleveren omdat de resolutie van de gemeten temperatuur, en dus ook de start-temperatuur, beperkt is. Een fout die positief of negatief is, maar wel constant blijft, komt dan overeen met de waarde van c_q waarnaar geconvergeerd wordt.
Beide methoden zijn met elkaar vergeleken en met de direkte methode om de fout te minimaliseren in de zin van de kleinste kwadraten. De methode met toegevoegde constante levert een kleinere spreiding op gedurende het seizoen, terwijl de direkte minimalisatie vrijwel exact overeenkomt met de methode zonder toegevoegde constante. De conclusie is dan ook dat de indirekte, maar wel snellere, methode inderdaad een geminimaliseerde kleinste kwadraten oplossing oplevert en dat de methode met toegevoegde constante bovendien nauwkeuriger is. Grafisch is voor een specifieke meetsituatie weergegeven waar de beide indirekte methoden op neer komen.
Met de direkte kleinste kwadratenmethode is voor alle boeren met buitenluchtkoeling gedurende perioden dat langer dan een bepaald aantal uren niet gekoeld wordt, de warmteproduktie geparametriseerd. De resultaten hiervan staan in hoofdstuk 'Metingen' naast de parametriseringen die eerder "met de hand" zijn uitgevoerd.

5.2. Filtering

In principe is het niet duidelijk of de gemeten waarden van de warmteproduktie op werkelijke wisselingen van de warmteproduktie gebaseerd zijn, waarvan de oorzaken dan in ieder geval niet duidelijk zijn, of dat de variaties alleen op meetfouten en onnauwkeurigheden gebaseerd zijn. Omdat er geen direkt verband lijkt te bestaan tussen twee opeenvolgende metingen, waardoor het in de praktijksituatie niet mogelijk is om de laatste meting te

gebruiken voor de huidige warmteproduktie, moet een filter gebruikt worden om op basis van de laatste n metingen en de juiste gewichtsfaktoren een 'beste' schatting te maken van de warmteproduktie. Hier moet de globale trend, over het hele jaar gezien, wel in terug te vinden zijn, maar de lokale snelle wisselingen niet meer. Voor verschillende filters zijn de resultaten in een grafiek verwerkt.
Een rechthoekig filter, een window-filter, wordt berekend volgens:

$$F_t = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} f_{t-i}$$

window filter **(28)**

waarbij F_t de gefilterde waarde is van de meetwaarde f_t.
∞-Dynamische filtering houdt in dat de nieuwe filterwaarde voor een deel uit de huidige meetwaarde bestaat en voor het overige deel uit de oude filterwaarde. F_t^{∞} wordt op deze manier berekend. Hoe verder in de tijd terug, hoe kleiner de invloed is op de filterwaarde. De meest recente meting heeft de grootste invloed op de filterwaarde F_t^{∞}. Alle meetwaarden werken echter door in de berekening. Een combinatie van het window-filter en de ∞-dynamische filtering levert n-dynamische filtering F_t^n op: alleen de laatste n waarden leveren een bijdrage. Het voordeel is dat fouten of wezenlijke veranderingen van de situatie na een bepaalde tijd niet meer doorwerken in het antwoord.

$$\begin{aligned}
\overset{\infty}{F}_t &= \alpha f_t + (1-\alpha)\overset{\infty}{F}_{t-1} \\
&= \sum_{i=0}^{\infty}(1-\alpha)^i \alpha f_{t-i} \\
&= \sum_{i=0}^{n-1}(1-\alpha)^i \alpha f_{t-i} + (1-\alpha)^n \overset{\infty}{F}_{t-n} \\
&= (1-(1-\alpha)^n)\overset{n}{F}_t + (1-\alpha)^n \overset{\infty}{F}_{t-n}
\end{aligned}$$

$$\overset{n}{F}_t = \frac{1}{1-(1-\alpha)^n}\left(\overset{\infty}{F}_t - (1-\alpha)^n \overset{\infty}{F}_{t-n}\right)$$

Dynamisch filter **(29)**

6. Metingen

In het seizoen '92/'93 is op een elftal boerderijen gemeten.
Om het model te testen is op basis van de gemeten buitentemperaturen, *RV*-waarden en koelgedrag van de boer gecontroleerd of de modeltemperatuur in de aardappelhoop een gelijk gedrag vertoont met de gemeten temperatuur in de hoop. Deze laatste is alleen als startwaarde gebruikt. Daarna is de modeltemperatuur als invoer gebruikt voor de temperatuurafhankelijke grootheden één tijdstap later.
Een wezenlijk probleem hierbij is dat niet precies bekend is wat de boer gedaan heeft. Te constateren valt of een ventilator gedraaid heeft, maar of dat interne danwel externe ventilatie was, is niet bekend. Uit de verschillende temperatuurmetingen valt wel iets af te leiden over het soort koeling, maar ergens moet een grens getrokken worden en die is niet eenduidig. Elke boer heeft vorstbeveiliging op z'n installatie, maar of de sensor daarvan, die op een andere plek zit, dezelfde waarde aangeeft en of de beveiliging bij *0°C* of een iets andere

waarde aanslaat, is niet bekend. Gemengde binnen-/buitenlucht koeling is in dit opzicht nog problematischer omdat niet bekend is in welke stand de kleppen staan.
Mechanisch gekoelde bewaarplaatsen hebben het probleem dat de verdamper, hangend aan het plafond, niet één specifieke partij koelt waaraan gemeten wordt, maar alle partijen die zich in de ruimte bevinden. Als dan ook niet bekend is hoe groot de totale massa van gekoeld produkt is, en deze varieert bovendien, dan wordt het er niet beter op.

In de volgende meetseries worden de volgende maanden gebruikt:

Maand:	1	van	8 sept. t/m	7 okt. 1992
	2		8 okt.	6 nov.
	3		7 nov.	6 dec.
	4		7 dec.	5 jan. 1993
	5		6 jan.	4 feb.
	6		5 feb.	6 mrt.
	7		7 mrt.	5 apr.
	8		6 apr.	5 mei
	9		6 mei	4 jun.
	10		5 jun.	4 jul.
	11		5 jul.	3 aug.

6.1. Consumptie bedrijf 3

consumptieaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	10	
Massa:	1000 ton	
c_q:	1	1,5 (1,2)[2]
(A_{uit} k_{uit}):	210	
(A_{grond} k_{grond}):	680	
v_{totaal}:		5,0 x10^{-5}
$P_{vent,totaal}$:	22299	
P/M:	22,3	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
1	4	0,4	11,364	0,011	0,289
2	100	39,2	1049,672	1,050	1,051
3	100	42,2	1130,196	1,130	1,130
4	$95_{/100}$	$38,1_{/40,1}$	1020,927	1,021	1,072
5	$52_{/100}$	$20,4_{/39,2}$	545,885	0,546	1,056
6	100	34,1	913,514	0,914	0,914
7	100	32,9	880,037	0,880	0,882
8	100	26,6	713,176	0,713	0,713
9	100	12,6	336,481	0,336	0,337
10	14	0,0	0,000	0,000	0,000

Meting [dgn]	229,5
Draaiuren per ventilator [uren]	246,5
Draaiuren per dag [uren/dag]	1,07
Energie [kWh]	6601,251
Energie per ton [kWh/ton]	6,601
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	0,863

Afmetingen: 21x24,3x4 m. en de box is 21x17x4 m. Goed geïsoleerd. Potdicht.

[2] Programmatisch.

6.2. Consumptie bedrijf 1

consumptieaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	9	
Massa:	1250 ton Bintje	
c_q:	1	0,6 (0,71)[3]
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	240	
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	800	
v_{totaal}:		9,0 x10^{-5}
$P_{vent,totaal}$:	28911	
P/M:	23,1	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	97	84,7	2548,049	2,038	2,090
3	100	60,5	1883,444	1,507	1,507
4	100	55,6	1681,010	1,345	1,345
5	60	29,6	868,831	0,695	1,149
6	42	39,0	1211,226	0,969	2,308

Meting [dgn]	120,0
Draaiuren per ventilator [uren]	269,3
Draaiuren per dag [uren/dag]	2,24
Energie [kWh]	8192,559
Energie per ton [kWh/ton]	6,554
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	1,639

Dak 15 cm tempex en alu foli. Achter- en voorgevel 15 cm tempex en alufoli. Zijwanden 15 cm glaswol, 10 cm beton en 18 mm multiplex. Schuifdeuren 5 cm dupanel. Box 23x23,5x4m. Ventilatoren: EMI KEA 4270 3 pk 19000 m^3 bij 15 muk???. Betonnen vloer, 12 cm. met kanalen en grond afwisselend onder het oppervlak.

[3] Programmatisch.

6.3. Consumptie bedrijf 4

consumptieaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	9	
Massa:	1900 ton Bintje	
c_q:	1	0,4
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	200	
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	930	
v_{totaal}:		$0{,}9 \times 10^{-5}$
$P_{vent,totaal}$:	29604	
P/M:	15,6	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	28	31,2	1019,458	0,537	1,908
3	100	117,1	3775,252	1,987	1,988
4	100	64,4	2106,307	1,109	1,109
5	98	128,9	4197,487	2,209	2,250

Meting [dgn]	97,9
Draaiuren per ventilator [uren]	341,7
Draaiuren per dag [uren/dag]	3,49
Energie [kWh]	11098,507
Energie per ton [kWh/ton]	5,841
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	1,790

Afmetingen 23x27x4,75, vloer op lucht, muur: 2 maal 5 cm beton 10 cm pur, 8 cm tempex(hout), dak: 14 cm tempex, alufoli.

6.4. Pootgoed bedrijf 4

pootaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	1	
Massa:	110 ton Desiree	
c_q:	1	0,27 (0,24)[4]
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	30	
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	75	
v:		3,5 x10^{-5}
P_{vent}:	3564	
P/M:	32,4	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	81	26,6	94,921	0,863	1,066
3	100	29,5	104,961	0,954	0,954
4	88	24,2	86,111	0,783	0,887
5	26	5,5	19,684	0,179	0,696

Meting [dgn]	88,5
Draaiuren per ventilator [uren]	85,8
Draaiuren per dag [uren/dag]	0,97
Energie [kWh]	305,677
Energie per ton [kWh/ton]	2,779
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	0,942

Plafond: 12 cm tempex, muren: 12 cm glaswol, vloer: niet. Een box van 5x10x3 in de hoek van een grotere schuur die vol zit met boxen. Eén kanaal onder de partij.

[4] Programmatisch.

6.5. Pootgoed bedrijf 2 (buitenluchtkoeling)

pootaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	1	
Massa:	115 ton	
c_q:	1	1,3 (2,2)[5]
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	250	± 250
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	75	
v:		3,0 x10^{-5}
P_{vent}:	3704	
P/M:	32,2	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	3	0,0	0,000	0,000	0,000
3	69	39,9	147,799	1,285	1,872
4	100	87,4	323,606	2,814	2,815
5	100	49,2	182,203	1,584	1,585
6	41	30,6	113,408	0,986	2,389

Meting [dgn]	93,9
Draaiuren per ventilator [uren]	207,1
Draaiuren per dag [uren/dag]	2,21
Energie [kWh]	767,016
Energie per ton [kWh/ton]	6,670
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	2,130

Een box van (lxbxh) 10x5x? in de hoek van een grotere schuur. (geschat op het oog)

[5] Programmatisch.

6.6. Pootgoed bedrijf 2 (mechanische koeling)

pootaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	6	
verdampervent.:	3	
ontdooiers:	3	
compressoren:	4	
Massa:	300 ? ton, variabel	
c_q:		0,5
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	220	
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	600	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
3	46	51,6	2529,081	8,430	21,833
4	98	49,7	2003,166	6,677	6,835
5	100	33,7	1218,616	4,062	4,062
6	100	17,8	810,586	2,702	2,703
7	100	44,5	1851,809	6,173	6,177
8	100	44,2	2305,127	7,684	7,696
9	31	5,8	353,654	1,179	5,560

Meting [dgn]	172,5
Draaiuren per vent/comp/cond/ontd/..[uren]	247,4
Draaiuren per dag [uren/dag]	1,43
Energie [kWh]	11072,041
Energie per ton [kWh/ton]	36,907 ?
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	6,419 ?

Alleen interne ventilatie (behalve evt. aan het begin van de bewaarperiode, als er nog niet mechanisch gekoeld wordt). Bovendien een wisselende lading gedurende het seizoen. Met pallets wordt de lading opgeslagen.

6.7. Consumptie bedrijf 5

consumptieaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	6	
Massa:	1150 ton	
c_q:	1	0,9 (0,63)[6]
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	260	
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	760	
v_{totaal}:		1,8 x10^{-5}
$P_{vent,totaal}$:	22893	
P/M:	19,9	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	31	30,4	695,204	0,605	1,924
3	100	78,5	1796,320	1,562	1,563
4	100	112,1	2564,638	2,230	2,230
5	100	75,0	1716,267	1,492	1,492
6	100	76,7	1755,396	1,526	1,531
7	100	77,7	1777,518	1,546	1,546
8	75	125,8	2879,479	2,504	3,355

Meting [dgn]	181,7
Draaiuren per vent. [uren]	576,2
Draaiuren per dag [uren/dag]	3,17
Energie [kWh]	13184,820
Energie per ton [kWh/ton]	11,465
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	1,893

Afmetingen: 19x22x4 m. Isolatie: 10 cm pur, vol vent. kanaal.

[6] Programmatisch.

6.8. Pootgoed bedrijf 1

pootaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
verdampervent.:	3	
compressoren:	1	
Massa:	480 ? ton	
c_q:	1	
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	200	
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	480	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	55	15,5	680,562	1,418	2,592
3	81	173,6	5050,103	10,52	12,919
4	52	60,5	2304,556	4,801	9,165
5	52	112,1	3051,752	6,358	12,245
6	100	112,5	4025,369	8,386	8,398
7	100	104,2	3892,775	8,110	8,138
8	29	26,2	1039,225	2,165	7,537

Meting [dgn]	140,6
Draaiuren per comp./ontd./vent./... [uren]	604,7
Draaiuren per dag [uren/dag]	4,30
Energie [kWh]	20044,338
Energie per ton [kWh/ton]	41,759
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	8,910

Wisselende belading gedurende het seizoen. Afmetingen 15x21,5x4,5 ?(geschat).

6.9. Consumptie bedrijf 2

consumptieaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	2	
Massa:	375 ton	
c_q:	1	0,75 (0,73)[7]
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	240	± 240
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	240	
v_{totaal}:	$2{,}3 \times 10^{-5}$	
$P_{vent,totaal}$:	10593	
P/M:	28,3	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	77	22,2	346,129	0,923	1,191
3	100	29,6	470,398	1,254	1,254
4	100	26,2	402,981	1,075	1,075
5	100	23,1	353,979	0,944	0,944
6	100	20,2	317,477	0,847	0,847
7	64	40,8	648,890	1,730	2,701

Meting [dgn]	162,5
Draaiuren per ventilator [uren]	162,2
Draaiuren per dag [uren/dag]	0,998
Energie [kWh]	2539,855
Energie per ton [kWh/ton]	6,773
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	1,251

Een box van 13x10,5x3,5 m. in de hoek van een grotere ruimte. Alleen de andere lange zijde grenst aan een andere partij. Vloer: tegels. Muur: 15 cm steenwol. Aan de korte buitenkant een ventilatieruimte tussen de partij en de buitenmuur.

[7] Programmatisch.

6.10. Pootgoed bedrijf 3

pootaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	2	
verdampervent.:	2	
compressoren:	2	
ontdooiers:	2	

Massa:	100/ 480 ? ton, variabel
c_q:	1
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	30
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	75

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
2	74	2,4	90,656	0,907	1,222
3	100	81,0	1970,547	19,705	19,778
4	87	180,6	3047,551	30,476	35,107
5	100	156,5	2786,808	27,868	27,867
6	100	134,1	1938,575	19,386	19,390
7	100	103,7	1565,024	15,650	15,653
8	100	5,1	152,597	1,526	1,527
9	8	0,0	0,000	0,000	0,000

Meting [dgn]	200,6
Draaiuren per comp./vent./ontd./.. [uren]	663,5
Draaiuren per dag [uren/dag]	3,31
Energie [kWh]	11551,760
Energie per ton [kWh/ton]	115,518/ 24,066 ?
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	17,279/ 3,599 ?

Wisselende belading gedurende het seizoen. De mechanische koeling koelt ook een andere partij. Afmetingen van de box (100 ton) met buitenluchtkoeling (weliswaar gesloten dmv kleppen): 5x10x2,5. Isolatie: ±20 cm. gespoten spul ??

6.11. Consumptie bedrijf 6

consumptieaardappelen

	bekend/berekend	geparametriseerd
produktventilatoren:	7	
Massa:	650 ton	
c_q:	1	0,66 (0,75)[8]
$(A_{uit}\ k_{uit})$:	62	± 60
$(A_{grond}\ k_{grond})$:	180	
v_{totaal}:		2,8 x10^{-5}
$P_{vent,totaal}$:	15615	
P/M:	24,0	

Maand (=30dgn)	%gemeten (meet/mnd)	draaiuren	kWh	kWh/ton	kWh/(ton.30dgn)
1	1	0,0	0,000	0,000	0,000
2	100	78,5	1400,163	2,154	2,155
3	100	41,9	747,642	1,150	1,151
4	100	41,8	745,601	1,147	1,147
5	100	25,0	446,046	0,686	0,686
6	100	31,8	567,019	0,872	0,873
7	100	60,2	1273,855	1,960	1,961
8	100	90,5	1955,674	3,009	3,009
9	100	69,0	1544,876	2,377	2,377
10	78	84,3	1830,644	2,816	3,604

Meting [dgn]	263,6
Draaiuren per ventilator [uren]	522,8
Draaiuren per dag [uren/dag]	1,98
Energie [kWh]	10511,521
Energie per ton [kWh/ton]	16,172
Energie per ton per 30 dgn [kWh/ton.mnd]	1,840

Afmetingen: 14x17x4. Muren: 10 cm p.u., spouw, vast wand. Dak: 15 cm polystyreen, 5 cm glaswol, pannen en asbest.

[8] Programmatisch.

7. Conclusies

Geconcludeerd kan worden dat bij met name de buitenluchtgekoelde bewaarplaatsen, waarvan de verschillende grootheden beter bekend zijn, het gedrag redelijk tot zeer goed met het huidige model gesimuleerd kan worden. Een probleem is wel dat de warmteproduktie bij verschillende boeren verschillende waarden aanneemt. Het is dus zaak om in de praktijk on-line de warmteproduktie en het ventilatiedebiet te parametriseren. Gedurende het seizoen worden aldus betere waarden verkregen.

Bijlage 2: Het kwaliteitsverloopmodel

Aardappelen.
Verzoeting, kwaliteit en houdbaarheid.

L. Tijskens.
12 juli 1993

Versie 2.
Opdracht: K. Pleysier.

I. Inleiding.

Ten behoeve van de ontwikkeling van een DSS systeem (*Aardappelen in bewaring*) dient een globaal en zeer algemeen model beschikbaar te komen dat kwaliteit en houdbaarheid van aardappelen in bewaring bij verschillende temperaturen beschrijft.

Het belangrijkste kwaliteitsaspect van aardappelen, althans voor de verwerkende industrie, is het gehalte aan reducerende suikers. Deze reducerende suikers condenseren bij hoge temperatuur (bakken, frituren) tot bruine polymeerverbindingen (denk aan carameliseren). Uiteraard speelt de algemene kwaliteitsvermindering een belangrijke rol in het totaal van de acceptatie, maar dit aspect is (voorlopig) uit deze beschouwing gelaten: deze zijn bij normale bewaarcondities niet echt belangrijk.

II. Waargenomen fenomenen.

Bij bewaring bij 'normale' temperaturen blijkt slechts een zeer kleine hoeveelheid suikers op te hopen. Er is dus ook geen sprake van bruinverkleuring bij bakken. Bij bewaren bij lage temperaturen wordt de totale houdbaarheid van het produkt wel verlengd, maar vindt er ophoping niet alleen van reducerende suikers plaats, met alle gevolgen van dien, maar ook van sucrose. Om de bakkwaliteit van deze aardappelen toch nog (enigszins?) op peil te krijgen, worden deze aardappelen vóór verwerking een korte periode bij hoge(re) temperatuur bewaard. Dit is bekend als het reconditioneren.

Bij langdurige bewaring treedt er tenslotte nog een kieming op. Deze gaat gepaard of loopt parallel aan de zogenaamde ouderdomsverzoeting. Deze verzoeting is *niet* weg te werken door reconditioneren. Aangezien hierover zeer weinig inzichten noch gegevens aanwezig zijn, is dit aspect eveneens buiten beschouwing gelaten in het model. Toch zal men vroeg of laat een onderscheid moeten kunnen maken tussen opslagverzoeting en ouderdomsverzoeting om niet een verkeerd reconditioneringsadvies te geven. Een aanzet tot gedachtenvorming op modelmatig niveau wordt gegeven in VII.

III. Beschrijving globaal model.

Zetmeel wordt gedurende de gehele bewaring, al of niet enzymatisch, afgebroken tot sucrose in een snel verlopend dynamisch evenwicht. De gevormde sucrose wordt onder invloed van een enzyme omgezet tot glucose. Glucose op zijn beurt staat in permanent evenwicht met fructose. Dit evenwicht wordt hier verder niet behandeld. De hoeveelheid fructose wordt gelijk verondersteld met de hoeveelheid aanwezig glucose. De geproduceerde suikers (glucose, fructose) worden (onder meer) verbruikt in de ademhaling voor produktie van energie en ATP (zie respiratie model: Uitgebreid model voor respiratie, L. Tijskens & H. Peppelenbos, 22 feb 1993). Het enzyme is onderhevig aan een denaturatie door veroudering.

Deze globale beschrijving van de optredende fenomenen en processen strookt niet geheel met de bekenden biochemische en fysiologische 'feiten': zetmeel wordt niet afgebroken tot sucrose, maar direct tot glucose cq maltose. Deze staat in permanent evenwicht onder werking van invertase met fructose, die vervolgens samen (ook weer in evenwicht) sucrose vormen.

Het hier opgestelde globale model is slechts een denkpatroon om tot een oplossing van het probleem te geraken. Uit de afleiding (zie form (34)) volgt slechts dat er een permanente instroom van glucose moet zijn vanuit een constante bron, die echter wel temperatuurafhankelijk is. Deze constante bron wordt hier het sucrose evenwicht genoemd, maar dit kan ook een andere component zijn, of het sucrose evenwicht wordt door de knol op een constant niveau gehouden met behulp van een tot nu toe onbekend mechanisme.
Het model kan voorgesteld worden met de volgende reacties:

$$\mathbb{Z} \underset{k_{z2}}{\overset{k_{z1}}{\rightleftharpoons}} \mathbb{S}$$

$$\mathbb{S} + \mathbb{E} \xrightarrow{k_s} \mathbb{G} + \mathbb{F} + \mathbb{E}$$

$$\mathbb{G}\ (\text{en } \mathbb{F}) \xrightarrow{k_g} \text{verbranding}$$

$$\mathbb{E} \xrightarrow{k_d} \mathbb{E}_{na}$$

(30)

Alle reactiesnelheidsconstanten (k_{z1}, k_{z2}, k_g, k_s en k_d) worden temperatuurafhankelijk volgens Arrhenius verondersteld:

$$k = k_{ref} * e^{\frac{EA}{R} * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{abs}}\right)}$$

(31)

De totale hoeveelheid zetmeel neemt door deze reacties wel af, maar kan toch constant verondersteld worden, relatief aan de hoeveelheid aanwezige suikers (overmaat zetmeel aanwezig). Een ander argument om de hoeveelheid zetmeel in de reactiekinetiek constant te houden is het feit dat zetmeel niet in oplossing is, maar vast. Het totale oppervlak waar zetmeel gehydrolyseerd kan worden blijft gedurende de gehele periode ongeveer gelijk.

Aangezien de vorming van sucrose uit zetmeel snel wordt verondersteld, is de aanwezige hoeveelheid sucrose uitsluitend bepaald door het dynamisch evenwicht, waarvan de hoogte temperatuurafhankelijk is volgens Arrhenius. Het dynamisch evenwicht heeft (bij iedere temperatuur) nl. de volgende waarde:

$$S_e = \frac{k_{z1} * Z}{k_{z2}} \tag{32}$$

Aangezien de hoeveelheid zetmeel constant wordt verondersteld, en beide reactiesnelheden k_{z1} en k_{z2} (uitsluitend) afhankelijk zijn van de temperatuur volgens Arrhenius, is ook het evenwicht aan sucrose (uitsluitend) temperatuurafhankelijk volgens Arrhenius.

Dit resulteert dus in een, voor iedere temperatuur verschillende, constante instroom van glucose in het verbrandingssysteem. Gelijktijdig neemt de hoeveelheid actief enzyme af, eveneens afhankelijk van de temperatuur:

$$\frac{dG}{dt} = k_s * E * S_e - k_g * G$$
$$\frac{dE}{dt} = -k_d * E \tag{33}$$

Een gedeelte van deze suikers zijn reducerende suikers (glucose + fructose eventueel via evenwicht), een ander gedeelte zijn niet-reducerende suikers (sucrose). Aangezien de verhouding glucose en fructose constant is (ca 0,8 F/G), en deze verhouding dynamisch in stand wordt gehouden, wordt er in het model geen onderscheid gemaakt tussen deze twee typen.

Onder de hier geschetste aannamen is dit stelsel differentiaalvergelijkingen bij constante temperatuur simpel op te lossen:

$$E = E_0 * e^{-k_d * t}$$
$$G = G_0 * e^{-k_g * t} + \frac{k_s * E_0 * Se}{k_g - k_d} * \left(e^{-k_d * t} - e^{-k_g * t}\right) \tag{34}$$

Formule (34) kan dus gebruikt worden om gegevens, verzameld bij constante temperatuur, statistisch te analyseren met nonlineaire regressie, en om het model statisch door te rekenen (bv met LOTUS).

Het geschetste probleem is echter inherent dynamisch in temperatuur: Het kernpunt in het hele model is namelijk de verschillende afhankelijkheid met de temperatuur van het evenwicht (S_e) en de beide reacties van glucose nl. produktie (k_s) en verbruik (k_g). Ook de toepassing van reconditioneren is dynamisch in temperatuur.

Het evenwicht (S_e) zal een relatief kleine en negatieve activeringsenergie (EA) hebben. Dit wil zeggen dat de vorming van sucrose uit zetmeel een kleiner activeringsenergie heeft dan vorming van zetmeel uit sucrose (zie form (32)). Hierdoor zal bij lage temperatuur de weliswaar trager gevormde (k_{z1}) suiker S_e toch niet opgebruikt worden, en hoger zijn dan bij hogere temperaturen. De wet van de massa werking van S_e bepaalt vervolgens hoe snel het evenwicht (produktie - verbruik) in glucosehoeveelheid wordt benaderd.

Door om te schakelen van de ene temperatuur op de andere wordt telkens weer een nieuw evenwicht in S_e ingesteld, dat op zijn beurt weer bepaalt hoeveel glucose er gevormd dan wel verbruikt zal worden, en het niveau van het glucose-evenwicht, dat dynamisch in de tijd wordt benaderd.

De houdbaarheid (gedefinieerd bij constante temperatuur) bepaald door suikers is dus temperatuurafhankelijk, niet ongelijk aan een LTB-effect, maar wel omkeerbaar. Het kwaliteitsaspect dat de totale senescence bepaalt, zal echter meer parallel verlopen aan de totale zetmeel en/of glucose afbraak:

$$\frac{dQ}{dt} = -k_s * G \tag{35}$$

IV. Parameterschatting.

A. Statistische schatting.

De afgeleide formules ((32) en (34)) voor constante temperatuur kunnen, zoals gezegd, gebruikt worden voor statistische analyse indien gegevens beschikbaar zijn. Ook voor model validatie en verificatie zijn deze afleidingen nuttig of noodzakelijk.

De voorbewaring (conditionering) is uitgevoerd bij 14 °C gedurende 14 dagen om ervoor te zorgen dat iedere partij in eenzelfde initiële toestand is. Dit verzekert niet alleen een constante begintoestand, maar een zeer laag niveau aan initieel glucose en niveau van sucrose. De eerste term (met G_0) zou dus verwaarloosd kunnen worden bij de statistische schatting. G_0 kan echter ook berekend worden aan de hand van de dan geldende schattingen voor de verschillende parameters, en gebaseerd op de tijd (14 d) en temperatuur (14 °C) van de preconditionering.

Met behulp van GENSTAT nonlineaire regressie kunnen de parameters geschat worden. Echter k_s, E_0 en S_e komen niet separaat voor in de formule. Er kan dus ook slechts een gecombineerde parameter geschat worden.

Met behulp van formule (32) kunnen de gemeten gegevens aan sucrose, als een evenwicht en zijn temperatuurafhankelijkheid, geanalyseerd worden. Door een combinatie van beide schattingen is er toch een scheiding aan te brengen tussen S_e en k_s wat betreft de temperatuurafhankelijkheid. Veel praktische betekenis heeft dit echter niet, aangezien S_e in formule (34) niet onafhankelijk voorkomt in de parameters.

In appendix 1 is een overzicht gegeven van de verkregen schattingen samen met de gebruikte GENSTAT command file (appendix 2).

In appendix 3 is een overzicht gegeven van de verkregen schattingen samen met de gebruikte GENSTAT command file voor het sucrose evenwicht.

De opgestelde formules ((32) en (34)) zijn ook geschikt te maken om de dynamische experimenten, en de reconditioneringsgegevens te analyseren in één grote dataset. Dit zal de betrouwbaarheid van de parameters, en dus ook van het model verhogen. De analyse is echter (nog) niet uitgevoerd: het is vrij arbeidsintensief en hoort meer thuis bij het experimentele onderzoek.

B. Expertiseschatting.

Het opgestelde model is echter zó simpel dat men ook met interviewtechnieken tot een redelijke schatting moet kunnen komen: De temperatuur waarop suikers beginnen op te hopen (deze moet bekend zijn bij de experts), bepaalt de concentratie aan S_e, en dus de schijnbare activeringsenergie, uit formule (32). Ook moet men een redelijk beeld kunnen krijgen hoe snel de reducerende suikers ophopen tot een onaanvaardbaar niveau bij lage

temperatuur, en wat dit niveau is in arbitraire eenheden. Hieruit kan dan S en EA_{se} geschat worden. Tevens moet de globale houdbaarheid bij temperaturen zonder suikerophoping bekend zijn. Hieraan kan namelijk het begin van ouderdomsverzoeting (toepasbaar gebied) gekoppeld worden.

Initiële hoeveelheden cq. concentraties zullen wat moeilijker te achterhalen zijn, maar kunnen eventueel empirisch vastgesteld worden: het model beoogt geen verklaring maar slechts een beschrijving van de verschijnselen. Concentraties en hoeveelheden moeten niet persé correct te zijn, voor een toepassing als beschrijvend model in een DSS.

V. Toepassing in het houdbaarheidsmodel.

Het geheel van het model kan in het gepresenteerde houdbaarheidsmodel ingepast worden als een drietermige kwaliteitsafname. Bij lage temperatuur overheerst de suikerophoping boven de glucose afbraak (S_e overheerst), bij normale temperatuur overheerst de glucose afbraak (k_g*G overheerst), samen met de normale houdbaarheidsafname. Deze kan bv. gevonden worden in de afbraak van zetmeel, maar hiervoor kan ook een 'eigen' kwaliteitsconstante ingevoerd worden:

$$\int_{Q_0}^{Q} dQ = \int_{HBH}^{0} \left(k_s * S_e * E - k_g * G + k_Q\right) * dt \qquad (36)$$

Het eigene aan deze formulering ten opzichte van de 'normale' houdbaarheidsformule is het feit dat een kwaliteitsbepalende component (glucose) in de HBH formule voorkomt. Hieruit volgt dus dat de houdbaarheid afhankelijk van een kwaliteitscomponent berekend wordt. Dit aspect zelf dient dus ook geschat te worden!! Een ander gevolg cq probleem is dat de glucose ophoping weer kan verdwijnen door reconditioneren. Hierdoor is in feite niet meer voldaan aan één van de premissen van het houdbaarheidsmodel nl. (redelijk) constante bewaarcondities.

VI. Dynamisch model.

Een dynamisch model, betreffend de suikerophoping en afbraak, is opgesteld en geprogrammeerd in PROSIM (**ZAKT** = het **Z**oet worden van **A**ardappelen bij **K**oude **T**emperaturen). De HBH is hierin nog niet opgenomen. Het model moet eerst enigszins gevalideerd worden voor er meer tijd en moeite geïnvesteerd wordt. Met dit model is het echter wel mogelijk het algemene beeld van het gedrag bij verschillende temperatuurscenario's door te rekenen en te bekijken.

Bestuderen van de reconditioneringseffecten zijn hierdoor onder de voorgestelde modelvoorwaarden mogelijk. Wel moet ernstig rekening gehouden worden met de (nog) niet beschreven ouderdomsverzoeting (zie VII).

VII. Ouderdomsverzoeting.

Voor het beschrijven van ouderdomsverzoeting en eventuele kieming is een idee geformuleerd langs welke weg een dergelijk ingewikkeld proces zou kunnen verlopen. Er wordt uitdrukkelijk op gewezen dat dit idee nog niet is uitgewerkt, maar het vertoont nu reeds interessante mogelijkheden.

Bij het verouderen van de bewaaraardappel zullen allerlei processen in een terminale fase terecht komen. Het gedrag van het produkt zal drastisch veranderen. Of deze verandering veroorzaakt wordt door opkomende of reeds aanwezige kieming, of beide processen parallel

gestuurd worden door een zelfde proces (scenescence), is duidelijk noch relevant. Voor de beschrijving van het fenomeen gaan we uit van een oorzakelijk verband.

Gedurende de normale bewaarperiode zal de aardappel zich zo goed mogelijk beschermen tegen invloeden van buitenaf. Hierbij hoort een antivries systeem in de vorm van ophopende suikers bij lage temperatuur. In de eindfase van de bewaring zal allengs spruitvorming (in potentie) optreden. De tijd waarop dit proces begint en de snelheid ervan zijn afhankelijk van de temperatuur. Voor deze spruitvorming zijn veel bouwstenen en energie noodzakelijk. Aangezien spruitvorming sneller verloopt bij hogere temperatuur, zal de suikervorming dientengevolge ook toenemen met toenemende temperatuur. Een spruitgeoriënteerd enzymsysteem zal dus geleidelijk de controle over de ademhaling, suikervorming en afbraak overnemen. Hierdoor komt er dus een fase in de bewaring van de aardappel dat een koude-verzoetingssysteem geleidelijk wordt omgezet in een warmteverzoetingssysteem. Wanneer de kiemen daadwerkelijk verschijnen worden veel, zoniet alle gevormde suikers verbruikt door de kiemen. Wanneer de kiemen niet kunnen verschijnen door (te veel) aan kiemremmers, zal de suiker zich ophopen in de aardappelen.

De overgangsperiode tussen de bewaarfase en de terminale fase, met een zeer onduidelijke temperatuurafhankelijkheid bepaalt dus in hoge mate of reconditioneren van de koudebewaarde aardappelen nog zin heeft.

Een beeld als hierboven geschetst kan beschreven worden als een suikerafbrekend enzyme E1, dat een negatieve temperatuurafhankelijkheid heeft. Geleidelijk wordt dit enzyme omgezet tot een enzyme E2, dat een positieve temperatuurafhankelijkheid heeft.

Oriënterende berekeningen met een logistische (sigmoide) curve voor deze omzetting, samen met een temperatuurafhankelijke snelheid en start, geeft een beeld als algemeen verwacht voor de onduidelijke overgangsfase. Wanneer we, op basis van dit Enzyme Inversie Systeem, deze periode beter kunnen beschrijven, zal een voorspellen van reconditioneren ook beter gefundeerd gegeven worden.

Mathematisch is dit idee nog *absoluut niet* uitgewerkt. Globaal als volgt te beschrijven:

$$
\begin{aligned}
& Z \underset{k_{z2}}{\overset{k_{z1}}{\rightleftarrows}} S \\
& S + E_1 \xrightarrow{k_{s1}} G + F + E_1 \\
& S + E_2 \xrightarrow{k_{s2}} G + F + E_2 \\
& G \text{ (en } F) \xrightarrow{k_g} \text{verbranding} \\
& E_1 \xrightarrow{k_v} E_2
\end{aligned}
\tag{37}
$$

Voor het sucrose evenwicht levert dit op:

$$S_e = \frac{k_z * Z}{k_{s1} * E_1 + k_{s2} * E_2} \tag{38}$$

Het verloop van deze functie is met behulp van LOTUS berekend aan de hand van volkomen imaginaire parameters.

VIII. Symbolen.

S	: concentratie sucrose
Z	: hoeveelheid zetmeel
k_{z1}	: reactie snelheidsconstante zetmeelafbraak tot glucose
k_{z2}	: reactie snelheidsconstante zetmeelvorming uit glucose
k_s	: reactie snelheidsconstante sucroseafbraak
k_g	: reactie snelheidsconstante glucoseafbraak
E,	
E_1,E_2	: enzymen
HBH	: houdbaarheid
Q	: algemene kwaliteitsindex
t	: tijd
T_{ref}	: referentie temperatuur (gesteld op 2 °C)
T_{abs}	: temperatuur (K)
EA	: activeringsenergie van de betreffende reactie
R	: gasconstante

Appendix 1: Verkregen schattingen Glucose

==========

***** Nonlinear regression analysis *****

*** Summary of analysis ***

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.
Regression	6	19,0501	3,175019	1091,71
Residual	78	0,2268	0,002908	
Total	84	19,2770	0,229488	

Percentage variance accounted for 96,7

* MESSAGE: The following units have large standardized residuals:

11	-3,36
97	-2,58
109	-3,11

*** Estimates of parameters ***

	estimate	s.e.
Ed	-53429,	9561,
Ese	-3705,	5662,
Eg	51020,	4409,
kdref	0,00838	0,00158
Seref	0,015286	0,000679
kgref	0,00456	0,00101

Appendix 2: GENSTAT command file Glucose

```
==========================================
Job Glucose_in_aardappel

open 'suiker4.asc';channel=2
skip [channel=2] 3

read [channel=2;setnval=yes]  Tijdvr,Tempvr,Tijdna,Tempna, \
                den,Suiker

scalar ks0,Se0,kg0

expression suiker_eq[1...10]; value= \
    !E(Se=Seref*exp(Ese*(1/tref-1/tabs))) ,\
    !E(kg=kgref*exp(Eg *(1/tref-1/tabs))), \
    !E(kd=kdref*exp(Ed *(1/tref-1/tabs))), \
    !E(Se0=Seref*exp(Ese*(1/tref-1/287))) ,\
    !E(kg0=kgref*exp(Eg *(1/tref-1/287))), \
    !E(ks0=kdref*exp(Es *(1/tref-1/287))), \
    !E(G0=ks0*Se0/kg0) , \
    !E(G =G0*exp(-kg*Tijdvr) +Se*(exp(-kd*Tijdvr) - \
            exp(-kg*Tijdvr)) /(kg-kd))

" opmerking: 1. Se staat voor Se*E0*ks !!!!
            2. Suiker staat voor gluces en fructose samen:                verdubbeling aantal
waarnemingen"

scalar tref
calc tref=2+273
calc tabs=Tempvr+273

scalar [value= -12500] Ese
scalar [value= -44000] Ed
scalar [value=  47000] Eg
scalar [value=    ,03] G0
scalar [value=  0,016] Seref
scalar [value=   0,01] kdref
scalar [value=0,00012] kgref

restrict Tijdvr,Tempvr,Tijdna,Tempna,den,Suiker ; \
                condition= (Tijdna .eq. 0)

model Suiker;fitted=G
rcycle [max=40] Ed,Ese,Eg,kdref,Seref,kgref
fitnonlinear [calc=suiker_eq;print=mon,sum,est,fitt]

endjob
stop
```

Appendix 3: GENSTAT command file & SCHATTING Sucrose

```
Job Sucrose_in_aardappel

open 'suikers.asc';channel=2
skip [channel=2] 3

read [channel=2;setnval=yes]  Tijdvr,Tempvr,Tijdna,Tempna, \
                Sucrose,Glucose,Fructose,Bakkleur

expression sucrose_eq[1...10]; value= \
    !E(Se=Seref*EXP(Ese*(1/tref-1/tabs)))

pointer[value=Sucrose,Glucose,Fructose,Bakkleur ] Qual

scalar tref
calc tref=2+273
calc tabs=Tempvr+273
restrict Tijdvr,Tempvr,Tijdna,Tempna, \
                Sucrose,Glucose,Fructose,Bakkleur ; \
                condition= (Tijdna .eq. 0)

scalar [value=-12000] Ese
scalar [value=   1,8] Seref


model Sucrose;fitted=Se
rcycle [max=40] Seref,Ese
fitnonlinear [calc=sucrose_eq;print=mon,sum,est,fitt]

endjob
stop

***** Nonlinear regression analysis *****

*** Summary of analysis ***

            d.f.      s.s.      m.s.      v.r.
Regression    2      4,8638    2,431878   719,24
Residual     40      0,1352    0,003381
Total        42      4,9990    0,119024

Percentage variance accounted for 81,2

* MESSAGE: The following units have large standardized residuals:
              2      2,42
             48      3,10


*** Estimates of parameters ***

              estimate      s.e.
Seref           0,4933     0,0164
```

Ese	-13299,	1094,

Bijlage 3: Literatuur

Algemene Energieraad, Duurzame energie; advies over de knelpunten bij de introduktie van duurzame energiebronnen, uitgebracht aan de minister van economische zaken op 5 juli 1982, 1982, 199 p., 's-Gravenhage.

Bakema, G., A.L. Snijders, Opslag van koude in grond vrijwel altijd mogelijk, Energie- en milieuspectrum, vol (1993)9, 26-29 p.

Lange, J.M., Toepassing van grondbuizen ten behoeve van de ventilatie in varkensstallen, 1988, 37 p., IMAG rapport nr. 97

Loon, C.D., Kou verlengt soms kiemrust, Landbouwmechanisatie, vol 46(1992)6, 42-43 p.

Rastovski, A., Het beheersen van bewaaromstandigheden in aardappelbewaarplaatsen, Landbouwmechanisatie, vol 26(1975)9, 1015-1024 p.

Rastovski, A., A. van Es et al, Storage of potatoes, 1987, 453 p., Wageningen.

Ridder, J.K., Bewaren en voorkiemen bij pootaardappelen, 1987, 16 p., PAGV verslag nr. 66.

Rudolphij, J.W., Energieverbruik bij koeling, droging, bewaring en transport van onbewerkte land- en tuinbouwprodukten; waar liggen kansen op verbetering van de efficiency?, 1992, ATO-DLOrapport 307.

Schaper, L.A., Subermax: an expert system on the suberization phase of potato storage, 1990, ASEA paper no. 90-6514.

Scheer, A., Mechanisch koelen van poot- en consumptieaardappelen, Landbouwmechanisatie, vol 41(1990)8, 7-10.

Scheer, A., Mechanische koeling van aardappelen, Landbouwmechanisatie, vol 42(1991)1, 64-66 p.

Schild, J.H.W. van der, Aardappelbewaring, 1986, 297 p., Wageningen.

Schillhorn van Veen, A.H., Ontwikkeling van een expertsysteem voor de aardappelbewaring met betrekking tot de processen afkoelen en bewaren, 1989, 57 p., Wageningen.

Schouten, S.P., Koolzuur in de heelperiode en de kwaliteit van aardappelen, Aardappelwereld, vol 46(1992)8, 35-38 p.

Wigginton, M.J., Effects of temperature, oxygen tension and relative humidity on the wound-healing process in the potato tuber, Potato Res., vol 17(1974), 200-214 p.