

REGELTECHNISCH ONDERZOEK BIJ HET VERWARMEN VAN KASSEN
MET BEHULP VAN REST- EN KETELWARMTE

door

Ing. P.W.T. Verwaaijen

Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen
Wageningen



SIGN: R606-91
EX. NO:
MLV: 8751011

SAMENVATTING

De doelstelling van het regeltechnisch onderzoek is als volgt geformuleerd: Het bepalen van de regeltechnische haalbaarheid van restwarmte als energiebron in de glastuinbouw. Uitgangspunt hierbij is dat zowel de restwarmtebron als de ketelwarmtebron worden aangesloten op een apart verwarmingssysteem. Binnen het restwarmte onderzoek zijn de volgende randvoorwaarden gesteld:

- Aanvoertemperatuur aan afnemerszijde bedraagt 80 oC.
 - Retourwater temperatuur van de restwarmtebron mag maximaal 40 oC bedragen.
 - De warmtelevering van de restwarmtebron is 30 % van de ontwerpbelasting. Dit komt neer op 54 W/m² teeltoppervlak.
- Voor de te ontwerpen regelalgorithmen gelden ten aanzien van het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte, de volgende eisen:
- De regeling moet voldoen aan teeltkundige- en regeltechnische eisen.
 - De restwarmtebron dient optimaal te worden gebruikt, wat inhoudt dat pas ketelwarmte geleverd mag worden wanneer het restwarmtenet volledig open staat.
 - Het regelalgorithme moet zorg dragen voor een soepele bij/afschakeling van ketelwarmte.
 - Indien een overschrijding van de maximale retourtemperatuur van het restwarmtenet plaatsvindt, dient de regeling hierop in te grijpen.

Voor de regeling en sturing van de afdelingen wordt gebruik gemaakt van een PDP 11/34 computer. Deze maakt deel uit van een decentraal kasklimaatregelsysteem. Op PDP-nivo worden de regelalgorithmen ontwikkeld en uitgetest. Uit een voorafgaande orientatie kon worden geconcludeerd, dat de op dat moment bestaande regelalgorithmen niet voldeden aan het toepassingsgebied waar het onderzoek voor stond. Het gebruik van twee warmtebronnen, aangesloten op regeltechnisch uiteenlopende verwarmingssystemen (verschillende aanvoer- en retourtemperaturen, vermogens, tijdconstanten etc.), met specifieke voorwaarden en eisen, vraagt om nieuwe regelalgorithmen. Op basis van de randvoorwaarden en de regeltechnische eisen

is als regelconfiguratie een meervoudige cascade-regeling toegepast. De specifieke eisen voor het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte zijn hierin opgenomen.

De regeltechnische haalbaarheid van restwarmte in combinatie met ketelwarmte is hoofdzakelijk verwarmingssysteem gebonden. Een algemeen kenmerkende voorwaarde is dat bij een optimaal gebruik van restwarmte gestreefd moet worden naar zo min mogelijk sprongvormige verstoringen (verandering instellingen setpoints) in het regelproces. Indien het ontwerpvermogen van een verwarmingssysteem gering is (restwarmtenet), zijn de systeemparameters gevoeliger voor o.a. storingen van het buitenklimaat, stand van het gewas, hoeveelheid instraling ect. Het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte leidt in alle gevallen tot een verlaging van de regelparameters, die op grond van theoretische instellingen verwacht zouden mogen worden.

De temperatuurregeling met behulp van luchtverwarming in afdeling 5 is regeltechnisch gezien een optimaal regelproces. Het heeft een snel regelgedrag, en is door de geringe warmtecapaciteit van het verwarmingssysteem minder gevoelig voor niet-lineairiteiten (afkoelgedrag van de kas niet veel trager dan opwarming). De combinatie verwarmde betonvloer met het ALCOA-net in afdeling 6, heeft weliswaar een aanvaardbaar regelgedrag, maar dit is vooral te danken aan het snelle ALCOA-net. Door de te grote tijdconstante van de verwarmde vloer, kan op geen enkele wijze een regelalgorithme worden ontworpen, dat regeltechnisch haalbaar kan worden geacht. In vervolg-onderzoek zal dan ook door een eenvoudige installatietechnische ingreep met een gewijzigde opzet worden gewerkt.

Het ALCOA-pijpen-systeem in combinatie met een 51 mm stalen pijpen net, biedt de tuinder een goede mogelijkheid om met minimale investeringskosten restwarmte te gebruiken. Regeltechnisch is dit een haalbaar systeem, wat echter nog wel de nodige aandacht vergt ten aanzien van variaties in de proces-parameters. Evenals bij het ontwerp van een regelalgorithme voor de verwarmde betonvloer, zal ook hier het gebruik van dynamische modellen in het vervolgonderzoek een belangrijk item vormen.

INHOUD

SAMENVATTING

1.	<u>Inleiding</u>	4
2.	<u>Beschrijving regeltechnische problemen</u>	5
2.1	Stand van zaken regelalgorithmen verwarming in kassen	5
2.1.1	Conventionele regelalgorithmen	5
2.1.2	Adaptieve regelingen	6
2.2	Uitgangspunten regeling	7
2.2.1	Algemene regeltechnische eisen verwarmingsregeling	7
2.2.2	Randvoorwaarden bij het onderzoek	8
2.2.3	Toepasbaarheid bestaande regelalgorithmen	9
3.	<u>Bepaling overdrachtsfunctie van een proces</u>	11
4.	<u>Regelalgorithme luchtverwarming met gebruik van restwarmte</u>	13
4.1	Beschrijving luchtverwarmingssysteem	13
4.2	Bepaling systeemeigenschappen	13
4.3	Regelprogramma luchtverwarming	21
4.4	Beoordeling regeling afd. 5	27
5.	<u>Regelalgorithme verwarmde vloer in combinatie met ALCOA-net</u>	40
5.1	Beschrijving verwarmingssysteem vloer/ALCOA-net	40
5.2	Bepaling systeemeigenschappen vloer/ALCOA-net	40
5.3	Regelprogramma vloer/ALCOA-net	47
5.4	Beoordeling regeling afdeling 6	50
6.	<u>Regelalgorithme ALCOA-net in combinatie met 51 mm-net</u>	58
6.1	Beschrijving verwarmingssysteem ALCOA/51 mm-net	58
6.2	Bepaling systeemeigenschappen ALCOA/51 mm-net	58
6.3	Regelprogramma ALCOA/51 mm-net	61
6.4	Beoordeling regeling afdeling 7	63
7.	<u>Conclusies regeltechnisch onderzoek</u>	72
8.	<u>Literatuur</u>	74

1. Inleiding

Jaarlijks komt in ons land een hoeveelheid rest- en afvalwarmte vrij die gelijk is aan drie maal (Sonneveld, 1983) de totale warmtevraag van de Nederlandse glastuinbouw. Kassengebieden, met een concentratie van veel grote warmtegebruikers op een klein grondgebied, zijn bij uitstek geschikt om van deze onbenutte warmtebron gebruik te maken.

Met financiële steun van de Energiebeleidscommissie van het Ministerie van Landbouw en Visserij, zijn in 1984 de volgende onderzoeken gestart.

Het Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek (CABO) doet fysiologisch onderzoek, het Landbouw Economisch Instituut (LEI) bekijkt de economische haalbaarheid, de Proefstations in Aalsmeer en Naaldwijk doen teeltkundig onderzoek en het Instituut voor Mechanisatie Arbeid en Gebouwen (IMAG) te Wageningen warmte- en regeltechnisch onderzoek.

Het doel van het regeltechnisch onderzoek is bij de start in 1984 geformuleerd als: "Het bepalen van de regeltechnische haalbaarheid van restwarmte als energiebron in de glastuinbouw" (Verwaayen, 1984).

Op het IMAG-terrein is in 1985 een nieuwe onderzoekkas gebouwd mede voor het restwarmteonderzoek. Het onderzoek vindt plaats in de afdelingen 5 t/m 7. In deze afdelingen zijn verwarmingssystemen geïnstalleerd, die volgens de toenmalige inzichten geschikt waren voor het gebruik van restwarmte. In dit rapport wordt een antwoord gegeven op de vraag of deze verwarmingssystemen regeltechnisch gezien een aanvaardbaar klimaat kunnen realiseren in de betreffende afdelingen.

2. Beschrijving regeltechnische problemen

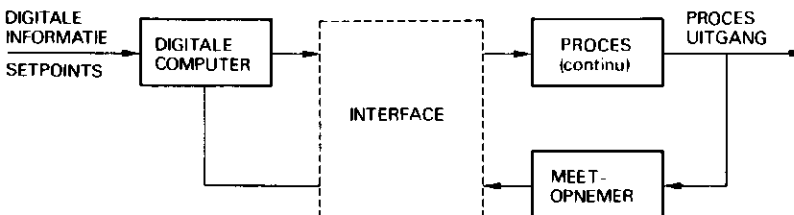
2.1 Stand van zaken regelalgorithmen verwarming in kassen

2.1.1 Conventionele regelalgorithmen

Alvorens in te gaan op de regeltechnische problemen die bij het gebruik van restwarmte in combinatie met een bestaande ketelin-stallatie ontstaan, zal een korte beschrijving worden gegeven van de bestaande verwarmingsregelingen.

Op veel bedrijven wordt in Nederland voor het verwarmen van kassen gebruik gemaakt van twee verwarmingssystemen. Deze systemen kunnen bestaan uit b.v. 51 mm stalen pijpen, gevinde aluminium pijpen, soms in combinatie met tabletverwarming of een grondverwarming. Deze verwarmingssystemen worden gesplitst in een ondernet en een bovennet. Het is gebruikelijk dat eerst met het ondernet wordt geregeld; dit vanwege teelttechnische en energie-economische redenen. Wanneer de capaciteit van het ondernet onvoldoende is, treedt het bovennet in werking. (Valentin en Van Zeeland, 1980) Dit regelen en overschakelen wordt met behulp van een computer gerealiseerd. De regelacties worden in de vorm van regelalgorithmen in de computer opgeslagen; door middel van deze regelalgorithmen worden aan de hand van meetwaarden en de gewenste set-points stuursignalen berekend. De regelalgorithmen die toegepast worden, zijn discrete regelalgorithmen.

De analoge regelaars, die voor de computerregelingen gebruikelijk waren, hebben als kenmerk dat op elk tijdstip de grootte van elk signaal bekend was. De computerregelingen die nu al veel toegepast worden, vertonen geen continu karakter. De informatie afkomstig uit een te regelen proces is alleen op bepaalde, discrete, tijdstippen bekend. De regelsystemen gebaseerd op dit principe worden bemonsterde systemen (sampled-data-systems) genoemd. Op het IMAG wordt gebruik gemaakt van een digitale procescomputer voor de kasklimaatregeling (Gielsing en van Meurs, 1979). Het regelsysteem ziet er schematisch als volgt uit:



DIGITALE COMPUTER ALS PROCESREGELEAAR

Meerdere regelsystemen kunnen tegelijk gebruik maken van deze digitale 'rekenmachine'. Door middel van een multiplexer worden de gebruikers c.q. regelsystemen sequentieel afgetast (scanning) en hun informatie verwerkt. Gedurende een bemonsteringsperiode, dit is de tijd tussen twee opeenvolgende bemonsteringen van het zelfde signaal, worden meerdere systemen afgetast. De bemonsteringsfrequentie is in hoge mate afhankelijk van de dynamica van de te regelen processen. Voor een proces waarin een dominerende tijdconstante T_1 van het geregelde systeem optreedt en een aanwezige looptijd vele malen kleiner is dan T_1 , geldt voor de bemonsteringstijd de praktische keuze:

$$T_{scan} < T_1 / 10$$

De IMAG-regelcomputer is ingesteld op een bemonsteringstijd van twee minuten.

De bestaande verwarmingsregelingen hebben een master/slave configuratie, geïmplementeerd in een klimaat-regelcomputer.

De masterregelaar berekent het setpoint voor de buistemperatuur, waarbij naar het bovennet geschakeld wordt, wanneer dit setpoint de maximum temperatuur van het ondernet overschrijdt. Het ondernet en het bovennet worden dan door aparte slaveregelaars op de gewenste buistemperatuur geregeld. De master-regelaar bestaat uit een discrete PI-regelaar, de slaveregelaars uit discrete P-regelaars. (Udink ten Cate, 1983) De master/slave regelaar (cascade-regeling) is vooral van nut wanneer het hoofdproces (de te regelen kasluchttemperatuur) een voortplantingstijd bevat. Door de slave-kring worden storingen in de aanvoertemperatuur van de warmtebron snel weggeregeld. Zonder slave-kring zouden deze storingen zich pas na de voortplantingstijd in het uitgangssignaal (de geregelde kasluchttemperatuur) manifesteren, waardoor het wegregelen veel moeilijker wordt. Ook een niet-lineair gedrag van de regelklep, en parametervariaties binnen het slave-proces (de geregelde buistemperatuur, met inbegrip van de regelklep) komen in de totale overbrengingsverhouding slechts in geringe mate tot uitdrukking, zodat in de master-regeling van deze effecten weinig hinder wordt ondervonden.

Voor de PI-regelaar is het 'DOG-LEAD' principe toegepast, wat het weglopen van de integratoruitgang (windup) tegengaat (Udink ten Cate en Van Zeeland, 1981). De PI-regelactie wordt toegepast wanneer de tijdconstante van het te regelen proces gelijk of tot een factor tien maal zo groot is als de dode tijd van dit proces en een tweede orde karakter van het proces nauwelijks aanwezig is. Aan deze voorwaarden wordt bij een temperatuurregeling voor het verwarmen van kassen voldaan. De overbrengingsverhouding buistemperatuur $\rightarrow$ kasluchttemperatuur bestaat uit een aantal eerste orde systemen met een dode tijd, waarbij duidelijk een dominant eerste orde systeem bestaat. De in te stellen regelacties worden aan de hand van dit dominante eerste orde systeem met dode tijd bepaald (Tantau, 1984).

2.1.2 Adaptieve regelingen

De laatste jaren is eveneens de nodige aandacht gevestigd op het adaptief regelen (self-adaptive, self-tuning, self-adjusting). De reden hiervoor is dat het geregelde proces tijd-afhankelijke parameters bevat. Deze variëren op een dusdanige wijze, dat

het regelalgoritme bijgesteld zal moeten worden om een verregaande optimalisatie van het geregelde proces te bewerkstelligen. Hier kunnen verschillende methoden van aanpak aan ten grondslag liggen.

Een adaptieve regeling kan gebaseerd zijn op kennis van de variaties van de systeemp parameters van het proces vooraf (a priori knowledge). Deze vorm van adaptief regelen is in de praktijk al wel toegepast. Uitvoering hiervan is de zgn. "gain-scheduling method" (Astrom, 1981). Bij deze methode wordt uitgegaan van b.v. de verandering die optreedt in de statische versterking van de overbrengingsverhouding van het te regelen proces, onder invloed van variërende systeemp parameters. M.a.w. een voorspelling van het foutsignaal dat mogelijk op gaat treden.

Het probleem bij een dergelijke methode is dat de grootte waarbinnen procesparameters zich wijzigen moeilijk te voorspellen is. Een ander probleem is ook dat het te regelen proces moeilijk te identificeren is.

Een methode voor adaptief regelen is voor dit doel ontwikkeld, die werkt zonder vooraf benodigde kennis van de variërende parameters (no a priori knowledge). De relevante parameters worden namelijk met een on-line procedure geschat.

Een van deze methoden is een schatting van de parameters van het dynamische gedrag van het proces. Het schattings-algoritme is gebaseerd op stabiliteitscriteria (Udink ten Cate, 1983).

Deze geschatte methoden van ontwerpen van adaptieve regelingen geven helaas nog niet de verwachte verbeteringen ten aanzien van de niet-adaptieve regelingen. Er zal daarom nog het nodige onderzoek moeten worden verricht om met behulp van dit terrein van de regeltechniek een aanvaardbaar kasklimaat te realiseren.

2.2 Uitgangspunten regeling.

2.2.1 Algemene regeltechnische eisen verwarmingsregeling.

De regeling van de temperatuur in de kas heeft als onderdeel van de totale klimaatregeling verreweg de meeste aandacht gekregen. Dit is evenals de relatieve luchtvochtigheid, een van de belangrijkste te regelen grootheden. Wanneer deze temperatuur onder een bepaald setpoint komt, zal een verwarmingssysteem dit trachten op te heffen. Stijgt de luchttemperatuur boven een tweede setpoint uit (ventilatie temperatuur), dan zal de ventilatieregeling dit trachten tegen te gaan.

Het verwarmingssysteem kan al of niet uit meerdere netten bestaan, die successievelijk worden geregeld. Gewas-technische redenen zullen de aanleiding zijn, dat de buistemperaturen aan een maximum, maar in sommige omstandigheden ook aan een minimum gebonden zijn. Om condensatie op het gewas te voorkomen, moet de luchttemperatuur al enige uren voor zonsopgang stijgen.

Voor de regeling van de kasluchttemperatuur kan men de volgende eisen stellen:

- De kasluchttemperatuur mag niet significant (een aantal graden) beneden het dag-setpoint komen. Het regelalgoritme moet zodanig functioneren, dat storingen (buitenklimaat) en setpoint-

- wijzigingen aan deze voorwaarde geen afbreuk doen.
- Het setpoint voor de kasluchttemperatuur moet 's nachts nauwkeurig gevolgd kunnen worden. Het setpoint zal een groot gedeelte van de nacht constant zijn, en het buitenklimaat heeft maar een geringe invloed (geen instraling) op de geregelde grootheid. Dit moet resulteren in een foutsignaal kleiner dan ongeveer 0,4 °C.
 - Er dient zo weinig mogelijk overshoot op te treden, zeker als deze overshoot een gevolg is van de warmte geleverd door het verwarmingssysteem.
 - Setpoint-veranderingen dienen nauwkeurig gevolgd te worden, om een zo optimaal mogelijke gewasgroei te bewerkstelligen. Op een soortgelijke wijze zijn in het algemeen een aantal regeltechnische voorwaarden te formuleren. Deze zijn:
 - Het regelsysteem moet voldoende damping bezitten. Het doorschot dat bij stapvormige verstoringen op zal treden, mag niet meer dan 25 % van deze verstoring bedragen.
 - Het regelsysteem moet snel kunnen reageren. De gewijzigde setpoints moeten adequaat gevolgd worden.
 - Er dient een zo klein mogelijke statische afwijking op te treden. Het foutsignaal, setpoint minus gemeten waarde, dient over langere perioden klein te zijn.
 - Instabiliteit van het geregelde proces mag niet optreden. Wanneer parameter variaties of een veranderend buitenklimaat een storende invloed op het geregelde proces uitoefenen, mag dit niet tot oscilleren van de te regelen grootheid leiden.

2.2.2 Randvoorwaarden bij het onderzoek

Echter, voor de regelalgorithmen die ontworpen zijn ten behoeve van het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte, zijn niet alleen door het gewas bepaalde condities van belang. Het gebruik van restwarmte is afhankelijk van de leveringscondities hiervan. Deze leveringscondities kunnen sterk uiteenlopen bij de verschillende restwarmteleveranciers. Mede op grond van diverse studies van de NEOM (Sonneveld, 1983) naar de haalbaarheid van restwarmte toepassingen in de glastuinbouw zijn door het IMAG de volgende uitgangspunten gekozen:

1. Aanvoertemperatuur aan de afnemerszijde bedraagt 80 °C.
2. Retourwater-temperatuur is maximaal 40 °C.

De restwarmte retourwater-temperatuur mag per afdeling niet boven 40 °C komen. Er wordt naar gestreefd de retourwatertemperatuur zo ver mogelijk onder de grens van 40 °C te brengen.

3. Warmtelevering van de restwarmtebron is maximaal 30 % van de ontwerpbelasting bij afkoeling tot 40 °C. Voor de afdelingen 5 t/m 7 is dit 30 % van 180 W/m² = 54 W/m².

Restwarmte kan maar 30 % van de maximale warmtevraag dekken; er is dus een extra verwarmingsbron nodig, die de overige 70 % voor zijn rekening neemt; in de praktijk is dit de reeds bestaande ketelinstallatie.

In het onderzoek zullen de restwarmte- en de ketelwarmtebron worden gevormd door separate circuits, aangesloten op de centrale ketel (Knies 1984).

ad 1) Het restwarmtenet met een aanvoertemperatuur van 80 °C wordt via een voorregeling uit de ketelinstallatie gesimuleerd. Deze voorregeling zal onder alle omstandigheden de aanvoertem-

peratuur van 80 oC zo goed mogelijk dienen te handhaven. Elk onderzoekcompartiment wordt als een aparte afdeling beschouwd, zodat de uitgangspunten gelden voor de afdelingen afzonderlijk.

ad 2) De NEOM gaat ervan uit dat bij een aanvoertemperatuur van 80 oC het voor een tuinder redelijkerwijs haalbaar moet worden geacht de retourwater-temperatuur tot maximaal 40 oC terug te brengen. Hierbij worden de tuinders via de warmteprijs gestimuleerd het water verder af te koelen dan 40 oC. Het regel-algorithme dient er voor zorg te dragen dat de restwarmte-temperatuur zo goed mogelijk beneden 40 oC blijft. Indien de grens van 40 oC overschreden wordt dan dient de retourtemperatuur van het restwarmtenet op 40 oC geregeld te worden. Het ketelwarmtenet zal de daardoor verminderde warmtelevering van het restwarmtenet dienen op te vangen.

ad 3) De restwarmte wordt beschouwd als de hoofdverwarming, daardoor zal deze warmtebron altijd als eerste aangesproken dienen te worden. Pas wanneer deze bron volledig is uitgestuurd, mag het ketel-net worden ingeschakeld, tenzij andere randvoorwaarden in het geding komen.

De eisen die hier gelden voor de toepassing van restwarmte in combinatie met ketelwarmte, dienen op een dusdanige wijze gerealiseerd te worden, dat de door het gewas bepaalde condities niet in het geding komen.

2.2.3 Toepasbaarheid bestaande regelalgorithmen

Elke afdeling van de restwarmtekas is voorzien van twee verwarmingssystemen: een verwarmingssysteem dat door restwarmte wordt gevoed en een verwarmingssysteem dat door ketelwarmte wordt gevoed.

Op basis van twee vrijwel identieke verwarmingssystemen, een onder- en een bovennet, is een "split-range" regeling ontworpen, hetgeen in de praktijk goed voldoet. Deze regeling werkt zoals gezegd volgens het master/slave-principe, doch met een gecombineerde master-regelaar voor beide netten. Het uitgangssignaal van de master-regelaar geeft een setpoint aan voor de slave-regelaar: de aanvoertemperatuur van het betreffende verwarmingsnet.

Elk verwarmingsnet heeft een eigen slave-regelaar, die de buistemperatuur als geregelde grootte heeft (Valentin en Van Zee-land, 1980). Doordat het identieke verwarmingssystemen zijn, is het uitgangssignaal van de master-regelaar, het ingangssignaal voor de slave-regelaars, geschikt voor beide netten. Hierdoor kan een gecombineerde master-regelaar voor beide netten toegepast worden. Aan het regelen c.q. bijkomen van het tweede verwarmings-net is een restrictie gesteld. Dit houdt in dat dit tweede net pas bij mag komen, als het setpoint voor de buistemperatuur, ge-dirigeerd door de master-regelaar, de maximale buistemperatuur van het eerste verwarmingsnet overschrijdt.

Doordat bij het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte, twee verschillende verwarmingssystemen (afwijkende aanvoer- en retourtemperaturen, tijdconstanten, vermogens etc.)

in een afdeling geïnstalleerd zijn, is het regeltechnisch gedrag gecompliceerder dan wanneer men te maken heeft met twee vrijwel identieke systemen aangesloten op dezelfde warmtebron. Een gecombineerde master-regelaar voor statisch en dynamisch uiteenlopende regelsystemen, zou zonder verregaande modificaties niet kunnen worden toegepast. Deze modificaties bestaan uit een aanpassing van de regelaar ten aanzien van het uitgangssignaal op basis van het momentane regelgedrag. De verschillende randvoorwaarden die binnen dit onderzoek gelden, geven eveneens aanleiding tot het ontwerpen van nieuwe regelalgorithmen en strategieën.

Het regelen op basis van het master/slave principe is, zoals aangegeven, de mogelijkheid bij uitstek om een hoofdproces te regelen dat een voortplantingstijd bevat. Dit betekent dat dit regelprincipe wederom zijn toepassing zal vinden.

Aan adaptieve regelingen moet nog het nodige onderzoek worden verricht voor er sprake kan zijn van een praktische toepassing. Voor het onderhavig onderzoek is maar een stookseizoen beschikbaar; hetgeen betekent dat geen aandacht kan worden besteed aan adaptieve regelingen.

Bij de toepassing van restwarmte in combinatie met ketelwarmte kan men een aantal specifieke regelsituaties schetsen met betrekking tot de gestelde uitgangspunten, waaraan de ontworpen regelalgorithmen moeten voldoen.

1. De belasting van de kas is kleiner dan 54 W/m^2 ; de warmtelevering vindt plaats d.m.v. het restwarmtenet.
2. De belasting wordt groter dan 54 W/m^2 ; er moet een soepele overschakeling plaatsvinden naar de situatie waarbij restwarmte in combinatie met ketelwarmte wordt geleverd.
3. De belasting is groter dan 54 W/m^2 ; de kasluchttemperatuur wordt geregeld m.b.v. rest- en ketelwarmte.
4. De belasting wordt kleiner dan 54 W/m^2 ; er dient een soepele afschakeling van het ketelwarmtenet plaats te vinden.
5. Bij alle hiervoor aangegeven situaties kan een overschrijding plaatsvinden van de gestelde grens van 40°C aan de retour-temperatuur van het op restwarmte geschakelde verwarmingssysteem. In dit geval zal het restwarmtenet geregeld worden op deze grens, wat een vermindering van de hoeveelheid restwarmte tot gevolg zal hebben. Het verwarmingsnet dat gevoed wordt met ketelwarmte, zal deze "storing" adequaat dienen te reduceren.
6. In alle situaties geldt, dat eerst het restwarmtenet volledig opengestuurd moet zijn, alvorens tot warmtelevering via het ketelwarmtenet mag worden overgegaan.
7. In de verschillende regelsituaties die optreden, zullen de regelalgorithmen moeten voldoen aan de hiervoor vermelde algemene regeltechnische eisen.

Indien de ontwerpcondities worden gerelateerd aan de toepasbaarheid van de bestaande regelalgorithmen, kunnen globaal de volgende tekortkomingen worden aangemerkt.

- De toepassing van regeltechnisch uiteenlopende verwarmingssystemen.
- Het niet conditioneel en soepel over- en afschakelen van de twee verwarmingssystemen om te komen tot een optimaal gebruik van de restwarmtebron.
- Het afhandelen van regelsituaties die optreden doordat de retourwater-temperatuur van het restwarmtenet aan bepaalde grenzen is gebonden.

3. Bepaling overdrachtsfunctie van een proces

Voor het bepalen van regeltechnische eigenschappen van het geregelde proces, is de bepaling van de overdrachtsfunctie van dit proces een vereiste. Uit deze overdrachtsfuncties worden de systeemparameters van het ongeregelde proces afgeleid.

De overdrachtsfunctie is belangrijk omdat deze een universele mogelijkheid biedt om met behulp van gestandaardiseerde schrijfwijzen en methoden een werkelijk systeem weer te geven.

De bepaling van de overdrachtsfunctie kan op verschillende manieren plaatsvinden. Voor de analyse van een regelsysteem is het mogelijk aan het werkelijke proces te meten. Hiervoor bestaan verschillende methoden die leiden tot de bepaling van de overdrachtsfunctie. In sommige gevallen kan het echter de voorkeur verdienen om een mathematisch model te ontwerpen. Redenen kunnen zijn dat het minder risico's geeft, eenvoudiger en sneller te beoordelen is en vaak een betere oplossing geeft, en vooral ook inzicht verschaft in de fysische (deel)processen die optreden.

- Mathematisch model.

Elk willekeurig proces kan theoretisch worden bepaald, door de afzonderlijke procesdelen te beschrijven door wiskundige betrekkingen. Hierbij gaan algebraïsche vergelijkingen, die de statische toestand (evenwichtstoestand) van een proces beschrijven, over in differentiaalvergelijkingen die een dynamische beschouwing geven. In deze differentiaalvergelijkingen zou zich alle informatie moeten bevinden, die voor de overdrachtsfunctie van belang is. Het is echter zeer moeilijk om alle fysisch optredende verschijnselen te vatten in vergelijkingen. Al gauw zal door de complexiteit van deze benaderingsmethode, de hiervan afgeleide praktisch bruikbare regeling nog veel te wensen overlaten. Meestal wordt gewerkt met een vereenvoudiging van het mathematisch model. Dit model wordt dan via Laplace-transformaties omgezet in regeltechnische overdrachtsfuncties (overbrengingsverhouding). Een overdrachtsfunctie geeft de verhouding aan tussen de geregelde variabele (uitgangsgrootte van het proces) en de ingangsvariabele. Een theoretisch bepaalde overdrachtsfunctie moet met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Niet-lineaire effecten kunnen een belangrijke wijziging van de overbrengingsverhouding tot gevolg hebben.

- Systeemmetingen aan het proces ter bepaling van de overdrachtsfunctie.

Als het mathematisch model niet ter beschikking staat, of vanwege de complexiteit moeilijk te bepalen is, moeten van het systeem gegevens worden verzameld om daaruit de overdrachtsfunctie af te leiden. Voor de bepaling van de overdrachtsfunctie staan verschillende testsignalen ter beschikking. Stapvormige verstoringen van het ingangssignaal van het systeem geven de mogelijkheid tot een analyse in het tijddomein, sinusvormige verstoringen, een analyse in het frequentiedomein. Bij een analyse in het tijddomein wordt gekeken naar de amplitude van het uitgangssignaal als functie van de tijd; bij een analyse in het frequentiedomein naar de amplitude en het faseverschuivingsverloop als functie van de frequentie. Naast de responsie die het systeem geeft op een aangebracht ingangssignaal, zullen er in deze res-

ponstie gevolgen van storingscomponenten voorkomen die voor de beoordeling van het regelsysteem als ongewenst zijn te beschouwen. Voorbeelden van deze componenten zijn: veranderende windsnelheid, buitentemperatuur, zon-instraling, bewolkingsgraad, maar ook regenbuien.

Er kan voor een groot gedeelte storingsonafhankelijk worden gemeten, doordat de metingen 's nachts zowel met open als met gesloten schermen plaatsvinden.

4. Regelalgorithme luchtverwarming met gebruik van restwarmte

4.1 Beschrijving luchtverwarmingssysteem

In afdeling 5 wordt de benodigde warmte toegevoerd met behulp van een luchtverwarmingssysteem. De daarvoor gebruikte luchtbehandelingsunit is buiten de afdeling opgesteld. Luchtverwarming is zeer geschikt om te worden gebruikt in combinatie met een restwarmtenet. In de warmtewisselaar van een luchtverhitter is namelijk een groot verwarmend oppervlak in een klein volume samengepakt. Bovendien kan in een luchtverhitter een groot temperatuurverschil worden aangelegd, zonder dat hierdoor luchttemperatuurgradiënten ontstaan.

Via een hoofdkanaal, dat langs de buitengevel van de afdeling ligt, wordt de verwarmde lucht naar geperforeerde polyetheen slurven geleid. Het perforatiepatroon is zodanig aangepast dat voor de drukval in de slurven, hetgeen tot uiting zou komen in een ongelijkmatige temperatuurverdeling, gecompenseerd wordt. De slurven liggen in het midden van de planrijen. Om een goede warmteverdeling te waarborgen, zijn langs de zijgevels twee slurven met een kleinere diameter en een aangepast gatenpatroon aangebracht.

Waterzijdig zijn de restwarmtebron en de ketel parallel op de warmtewisselaar aangesloten. Bij een belasting $< 54 \text{ W/m}^2$ wordt de warmtewisselaar gevoed door restwarmte. Indien de belasting de 54 W/m^2 overschrijdt, wordt deze gevoed door zowel restwarmte als ketelwarmte.

4.2 Bepaling systeemeigenschappen

Met systeemeigenschappen worden bedoeld, alle eigenschappen van een proces (systeemparameters) die nodig zijn voor het bepalen van instellingen voor regelparameters. De regelparameters zijn de constanten waarmee het regelalgorithme een bepaalde actie uitvoert. Deze actie kan bestaan uit een proportionele, integrerende of differentierende werking, of een combinatie hiervan. Welke actie er in het regelalgorithme wordt toegepast, is afhankelijk van de overdrachtsfunctie van het te regelen proces. Bij het verwarmen van kassen is als 'master-regelaar' een proportionele- in combinatie met een integrerende regelactie van toepassing, als 'slave-regelaar' een proportionele actie (cascade-regeling). De master-regelaar dirigeert een setpoint voor de slave-regelaar; de slave-regelaar een stuursignaal voor het corrigerend orgaan. Wanneer de geregelde grootheden bekend zijn, kan men de bijbehorende systeemeigenschappen bepalen. In de afdeling waar luchtverwarming wordt toegepast, zijn als geregelde grootheden uiteraard de kasluchttemperatuur en de uitblaasttemperatuur van de luchtbehandelingsunit gekozen. Deze temperaturen zijn gemeenschappelijke parameters van zowel het restwarmte- als het ketelwarmte-regelsysteem. Dit is een reden waarom voor de regelconfiguratie is gekozen, zoals aangegeven in fig. 4.2.1.

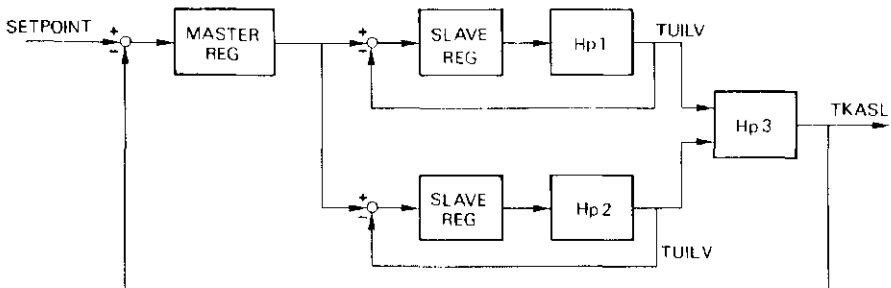


fig. 4.2.1

De regelconfiguratie bestaat uit een master en slave regelprincipe (cascade-regeling), echter met een combinatie van twee slave-regelaars. De master-regeling brengt en houdt de luchttemperatuur in de kas (TKASL) op de gewenste waarde. De eerste slave-regelaar wordt gebruikt voor het realiseren van de gewenste uitblaasstemperatuur van de luchtverhitter (TUILV), wanneer deze op restwarmte is geschakeld, en een tweede slave-regelaar met dezelfde functie voor wanneer ook het ketelwarmtenet wordt bijgeschakeld.

Dit betekent dat het totale proces uiteen valt in een aantal deelprocessen. Van deze deelprocessen moeten nu afzonderlijk de systeemeigenschappen worden bepaald, om te komen tot de overdrachtsfuncties hiervan. Doordat gekozen is voor een cascade-regeling met als regelparameters TKASL en TUILV, hebben we te maken met de volgende overdrachtsfuncties:

- $TUILV = f(\text{VALVE RW})$: TUILV als functie van de restwarmte-regelklep (Hp1)
- $TUILV = f(\text{VALVE KW})$: TUILV als functie van de ketelwarmte-regelklep (Hp2)
- $TKASL = f(TUILV \text{ rw})$: TKASL als functie van TUILV, wanneer restwarmtenet/ketelwarmte in bedrijf is (Hp3)

De systeemeigenschappen worden bepaald aan de hand van stapresponsies; de ingangssignalen van de deelprocessen ondergaan een stapvormige verstoring, waarbij het uitgangssignaal wordt geanalyseerd. De conditie waarin een kas zich bevindt, kan nogal verschillen. Indien van deze vorm van ingangssignalen gebruik wordt gemaakt, moeten deze condities voldoen aan een aantal voorwaarden. Deze voorwaarden houden in dat de systeemparameters op een zodanige wijze worden bepaald dat, bij variërende buitenomstandigheden, instabiliteit van het geregelde proces niet kan optreden. In regeltechnische bewoordingen houdt dit in dat de maximale procesversterkingsfactoren en de omstandigheden waarbij de kleinste tijdconstanten optreden, bepaald moeten worden.

Nu zijn er een aantal parameters die van invloed zijn op de maximale procesversterking en de grootte van de tijdconstanten. Aan de hand van een vereenvoudigde weergave van het fysisch proces in de kas, zal een en ander worden toegelicht.

Voor de warmtebalans van TKASL geldt:

$$\frac{dTKASL}{dt} = -H_{Fairgl} - H_{Fvent} + H_{Fluve} + H_{Fsoair} + H_{Fplair}$$

waarbij:

C_{air} = Warmtecapaciteit van de kaslucht en de aanwezige kasconstructiedelen per m².

H_{Fairgl} = convectieve warmtestroom van de kaslucht naar het dek.

H_{Fvent} = Warmtestroom ten gevolge van luchtuitwisseling met de buitenlucht door natuurlijke ventilatie (lekstroom).

H_{Fluve} = Warmtestroom geleverd door de luchtverhitter.

H_{Fsoair} = Warmtestroom ten gevolge van de convectieve warmteoverdracht topplaat bodem en de kaslucht.

H_{Fplair} = Convectieve warmtestroom tussen planten en kaslucht.

In deze warmtebalans komen middels een aantal genoemde warmtestromen, variërende buitenomstandigheden tot uitdrukking. De verdamping van het gewas is hier buiten beschouwing gelaten. Sterk afhankelijk van de buitenomstandigheden zijn H_{Fvent} en H_{Fairgl} . Wanneer de windsnelheid toeneemt, zal de natuurlijke ventilatie van een kas volgens een bepaalde functie toenemen (Bot), en hierdoor een vergroting van de warmtevraag met zich meebrengen. Evenals de windsnelheid, zal ook de buiten- en hemeltemperatuur een belangrijke bijdrage in de kasbelasting leveren. De warmtebehoefte van een kas kan op een vereenvoudigde wijze worden gekarakteriseerd als:

$$Q = Kk \cdot (TKASL - T_{buiten})$$

waarin: Q = kasbelasting [W/m² teeltoppervlak]

Kk = overdrachtscoëfficiënt kas [W/m².K]

Zo geldt voor het vermogen van dit verwarmingssysteem:

$$Q_{in} = K_v \cdot (T_{uILV} - TKASL) \quad [W/m^2]$$

waarin: K_v = overdrachtscoëfficiënt verwarmingssysteem [W/m².K]

Wanneer dit wordt ingevuld in de warmtebalans:

$$\frac{dTKASL}{dt} = K_v \cdot (T_{uILV} - TKASL) - Kk \cdot (TKASL - T_{BUIT})$$

Wanneer in deze differentiaalvergelijking veranderingen ten opzichte van een bepaalde stationaire situatie worden beschreven (gereduceerde vergelijking), en de buitentemperatuur wordt in het meestgebied constant verondersteld, dan wordt de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie (zie Appendix):

$$\frac{TKASL(s)}{T_{uILV}(s)} = \frac{K_v}{K_v + Kk} \cdot \frac{-T_d \cdot s}{(t \cdot s + 1)}$$

Waarin:

- De dode tijd van het proces wordt gekarakteriseerd door T_d .

- De procesversterkingsfactor is: $K_p = \frac{K_v}{K_v + K_k}$

- De eerste orde tijdconstante is: $t = \frac{C_{air}}{K_v + K_k}$

Indien in de procesversterkingsfactor K_p de overdrachtscoëfficiënt van de kas K_k nu kleiner wordt (schermen sluiten, lagere windsnelheid), dan zal de factor K_p toenemen. In de tijdconstante wordt bij het sluiten van de schermen K_k kleiner, maar ook C_{air} wordt kleiner. De invloed in de praktijk van deze variërende parameters zal blijken uit de verrichte responsiemetingen.

De overdrachtsfunctie van het proces is nu vereenvoudigd weergegeven als een looptijd in combinatie met een dominerend eerste orde gedrag. De maximale versterking van dit proces, treedt op als de schermen gesloten zijn (K_k zo klein mogelijk) en de windsnelheid praktisch gelijk aan nul is. Is nu de buitentemperatuur constant gedurende de responsietijd, dan zal de overbrengingsverhouding bij benadering een eerste orde gedrag vertonen. Deze overbrengingsverhouding geeft TKASL als functie van TUILV, wat het te regelen 'master-systeem' voorstelt.

Daar het 'slave-systeem': $TUILV = f(\text{VALVE } rw/kw)$ vele malen sneller is dan dit master-systeem, wordt in de totale regellus aangenomen, dat het setpoint TUILV dat de master-regelaar dirigeert, gelijk is aan de gemeten TUILV.

De slave-regeling ziet er uit volgens fig. 4.2.2.

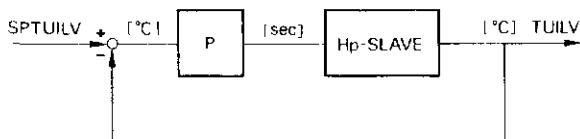


fig. 4.2.2

De beoordeling van responsies van het 'master-systeem' kan nu onafhankelijk van het 'slave-systeem' plaatsvinden, omdat voor het 'slave-systeem' geldt: $TUILV / SPTUILV = 1$.

De stapresponsie-metingen zijn herhalingsmetingen, waarbij afwisselend het restwarmte- of ketelwarmtesysteem wordt aangeschakeld. Hierbij is met het schaduw- en het energiescherm open, of met beide schermen dicht gemeten. De invloed van de verdamping van het gewas

is tot uitdrukking gekomen door met en zonder gewas te meten.
De gegevens voor de afdeling met luchtverwarming zijn als volgt
weergegeven:

AFDELING 5

RESPONSIE RESTWARMTE-NET: 0 - > 100 % LUCHTVERWARMING

Datum	SC	TIJDC [min]	Tdifl [oC]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Tkls [oC]
280886	CL	55	13	2,5	6	*17,2
290886	CL	58	13,3	1,2	6	*17,8
230986	OP	60	11,6	0.5	6	*14,8
260986	OP	60	10,3	0.2	6	*13,0

zonder planten in de kas:

151086	OP	35	8,2	2	6	*18,5
191086	OP	35	9,7	2,8	6	*12,3
251086	CL	30	12,0	3,5	6	*15,3
021186	CL	30	14,5	0,0	6	*15,3

RESPONSIE KETELWARMTE-NET: 0 - > 100 % LUCHTVERWARMING

Datum	SC	TIJDC [min]	Tdifl [oC]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Tkls [oC]
270886	OP	45	10	5,0	6	*18,3
030986	CL	50	15	2,0	6	*18,0
190986	CL	58	20,5	0,0	6	\$13,5
270986	OP	58	15,7	0.2	6	*14,6

zonder planten in de kas:

161086	OP	50	14,0	1	6	@15,8
171086	OP	48	14,8	1,3	6	*16,2
271086	CL	30	17,7	3,5	6	*18,2
281086	CL	30	19,1	1,9	6	*15,8

Waarin:

- SC: Indicatie schermen open 'OP', schermen gesloten 'CL'.
- TIJDC: De grootte van de gemeten eerste orde tijdconstante.
- Tdifl: Het gerealiseerde temperatuurverschil TKASL-TBUIT, waarbij TBUIT de gemiddelde buitentemperatuur gedurende de responsie is.
- WINDSP: De gemeten windsnelheid (gemiddelde waarde binnen de laatste 15 minuten).
- Td: De gemeten dode tijd van het proces.
- Tkls: statische waarde kaslucht-temperatuur bij het begin van de verstoring. Het verloop van de luchttemperatuur tot het moment van de stapvormige verstoring heeft een beoordeling gekregen in hoeverre deze inderdaad stationair is. De beoordeling is als volgt:
 - @ = niet stationair (zeer veranderlijke toestand)
 - \$ = globaal stationair te veronderstellen
 - * = stationair (verandering van TKASL in de tijd is kleiner dan 0,3 °C per 3 uur)

Het verloop van de responsie is gecorrigeerd aan de hand van de beoordeling van het stationair zijn van de kaslucht-temperatuur, de buitentemperatuur en de windsnelheid. Met andere woorden: er is rekening gehouden met het opwarmen of afkoelen van de kas door andere factoren dan het verwarmings-systeem.

De tijdconstante van het proces is nu bepaald door op verschillende tijdstippen raaklijnen aan de responsie af te schatten. De tijdconstante over de verschillende tijdstippen moet overeenkomen met de uit de afgeschatte eindwaarde bepaalde tijdconstante (63 % waarde).

Naar aanleiding van de de responsiemetingen kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt.

- De invloed van de windsnelheid op de overdrachtscoëfficiënt van de kas Kk, is bij gesloten schermen aanzienlijk kleiner dan wanneer de schermen open zijn. Dit komt door het feit dat indien de schermen gesloten zijn, de natuurlijke ventilatie van de kas veel kleiner wordt. Indien een stationaire situatie ontstaat, als gevolg van een stapvormige verstoring van TUILV, dan is de parameter Tdifl een parameter die rechtstreeks een maat is voor de grootte van de factor Kk.
- De eerste orde tijdconstante (TIJDC) van het proces is bij de metingen onafhankelijk gebleken van het wel of niet open zijn van de schermen, dit zowel bij het gebruik van restwarmte als bij het gebruik van ketelwarmte.
- De dode tijd (Td) van het proces is onafhankelijk van de variatie van buitenomstandigheden. Het openen of sluiten van de schermen, alsmede het gebruik van rest- of ketelwarmte hebben hierop geen invloed. Het blijkt uit de responsies, wat natuurlijk ook te verwachten was, dat de dode tijd een parameter is, die voortvloeit uit de keuze van een bepaald verwarmingssysteem.
- Er bestaat een duidelijke afhankelijkheid tussen de grootte van de tijdconstante van het restwarmtesysteem en de aanwezigheid van een gewas in de kas. De responsiemetingen zijn uitgevoerd met een volgroeid gewas in de kas, en met een geheel lege kas. De lege kas reageert aanzienlijk sneller op stapvormige verstoringen dan wanneer deze gevuld staat met

een gewas. Dit betekent dat de grootte van de tijdconstante afhankelijk is van het stadium waarin het gewas zich bevindt. De aanwezigheid van planten in relatie tot de overdrachtscoëfficiënt van de kas Kk is niet duidelijk zichtbaar. Dit wordt veroorzaakt doordat de responsmetingen 's nachts zijn uitgevoerd, wanneer de gewasverdamping klein is, en een grote variatie van windsnelheden tussen de verschillende nachten optrad.

De opmerkingen gemaakt ten aanzien van het 'master-restwarmte-systeem' komen overeen indien ketelwarmte wordt toegediend.

Worden nu de metingen waarbij gedurende de responsmeting een invloedrijke windsnelheid, of een sterk variërende buitentemperatuur optrad buiten beschouwing gelaten, dan geldt voor de gemiddelde waarde bepaling van de procesversterkingsfactor Kp:

Kp-rw [schermen open] = 0.82
 Kp-rw [schermen gesloten] = 0.86
 Kp-kw [schermen open] = 0.80
 Kp-kw [schermen gesloten] = 0.78

Uit de bepaalde gegevens voor rest- en ketelwarmte, blijkt dat de tijdconstanten, procesversterkingsfactoren en dode tijden voor de beide warmtebronnen ongeveer gelijk liggen. Dit betekent dat de regelaarinstellingen voor het 'master-systeem' dezelfde kunnen zijn. Met andere woorden: er zou in principe maar een master-regelaar nodig zijn. De uiteindelijke regelconfiguratie is dan ook op deze wijze uitgevoerd.

Voor de beoordeling van het 'slave-systeem' wordt en behoeft ook geen rekening gehouden te worden met het totale regelsysteem. Dit systeem kan als een onafhankelijke regeling ingesteld worden. Het 'slave-systeem' bestaat zoals eerder vermeld uit twee regelaars. Dit houdt in dat de overdrachtsfuncties van de volgende processen bepaald moeten worden:

- TUILV = f (VALVE rw)
- TUILV = f (VALVE kw)

De overdrachtsfuncties worden weer bepaald met gebruikmaking van stapvormige verstoringen van het ingangssignaal: de positie van de regelklep, en onder dezelfde condities als bij het 'master-systeem'. De gegevens die uit de responsmetingen komen zijn:

RESPONSIEMETINGEN SLAVE SYSTEEM RESTWARMTE afdeling 5

DATUM	SC	TIJDC [min]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Kps [s/oC]
151086	OP	5	2	2	0,072
181086	OP	5,5	4,5	2	0,075
251086	CL	5	3.5	2	0.083
261086	CL	5	1.4	2	0.085

RESPONSIEMETINGEN SLAVE SYSTEEM KETELWARMTE afdeling 5

DATUM	SC	TIJDC [min]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Kps [s/oC]
161086	OP	5	1,0	2	0,18
171086	OP	5	1,3	2	0,18
030986	CL	5	2,0	2	0,20
080986	CL	5	0,0	2	0,19

Waarin:

- SC: Indicatie schermen open 'OP', schermen gesloten 'CL'.
- TIJDC: De grootte van de gemeten eerste orde tijdconstante.
- WINDSP: De gemeten windsnelheid. (gemiddelde waarde binnen de laatste 15 minuten).
- Td: De gemeten dode tijd van het proces.
- Kps: De berekende procesversterkingsfactor.

Uit de bovenstaande gegevens kunnen de volgende conclusies worden afgeleid.

Het openen en sluiten van de schermen heeft maar een gering effect op de procesversterkingsfactor Kps. Als gevolg van een stapvormige verstoring aan de ingang van het proces, is het verloop van TUILV in de tijd beoordeeld. Het verloop wordt benaderd door een regelsysteem met een dominerend eerste orde gedrag, in combinatie met een dode tijd. De figuren 4.2.3 en 4.2.4 illustreren dat deze benadering dicht in de buurt komt van de werkelijk gemeten waarde.

De afgeleide eerste orde tijdconstante (TIJDC) is onafhankelijk van het openen of sluiten van de schermen. De windsnelheid heeft eveneens praktisch geen invloed op het proces.

De dode tijd (Td) wordt veroorzaakt door het regelproces en het gebruik van een directe digitale regeling. De hiervoor gedefinieerde minimale bemonsteringstijd $T_{scan} < TIJDC/10$, voldoet bij dit proces niet aan de praktische normen. Het bestaande kas-klimaatstelsel is echter uitgevoerd met een niet instelbare bemonsteringstijd van 2 minuten. Aangezien bij een bemonsteringstijd van $T_{scan} = 2 * TIJDC$, waarbij TIJDC de kleinste tijdconstante van het proces is, theoretisch het meetsignaal nog te reconstrueren is, is dit geen onoverkomelijk probleem.

Een aantal voorbeelden van responsies zijn gegeven in fig. 4.2.5 en fig. 4.2.6.

Uit de responsiemetingen blijkt dat ook deze overdrachtsfunctie goed te benaderen is door een dominant eerste orde proces.

Installatie-technisch ziet het verwarmingssysteem er schematisch uit als weergegeven in fig. 4.2.7.

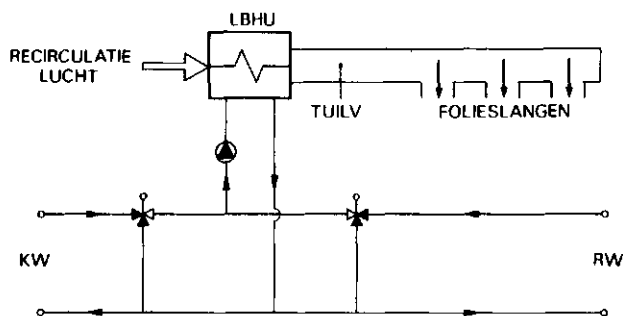


fig. 4.2.7

De primaire lucht voor de luchtbehandelingsunit (LBHU) is in dit onderzoek volledige recirculatielucht. Er is echter ook een mogelijkheid aanwezig om een te regelen hoeveelheid buitenlucht bij te mengen. Dit is in dit onderzoek niet aan de orde gekomen.

4.3 Regelprogramma luchtverwarming

Alvorens nader in te gaan op het ontworpen regelalgoritme voor afdeling 5, eerst een aantal aspecten met betrekking tot luchtverwarming met behulp van folieslangen. Er is door deze uitvoering van het verwarmingssysteem meer luchtbeweging rondom de planten. Dit maakt de noodzaak van het handhaven van een minimum buistemperatuur, bij pijpenverwarming gebruikelijk voor het actief houden van het gewas, niet meer noodzakelijk. De bladtemperatuur bij het toepassen van een dussdanige uitvoering van luchtverwarming, kan tot 2 oC lager zijn dan de luchttemperatuur. Dit is een gevolg van het sterk verminderde stralingsaandeel van luchtverwarming ten opzichte van pijpenverwarming. Doordat het gehele luchtverwarmingssysteem een kleine warmtecapaciteit heeft, zal het systeem aanmerkelijk sneller reageren dan een conventioneel 51 mm pijpenverwarmingssysteem. Dit is in de responsiemetingen duidelijk tot uiting gekomen.

Uit de verhouding T_{IJDC} / T_d van het 'master-proces', blijkt dat de master-regelaar als PI-regelaar uitgevoerd dient te worden. De bemonsteringstijd benodigd voor het 'master-proces' moet ongeveer $T_{scan} < 30 / 10 = 3$ minuten bedragen. Voor dit proces is de ingestelde bemonsteringstijd van 2 minuten voldoende kort. Voor het ontwerp van het regelalgoritme voor deze afdeling kun kort samengevat de volgende voorwaarden worden genoemd:

- Doordat de overdrachtsfunctie van het 'master-proces' $TKASL = f(TUILV)$ voor restwarmte en voor ketelwarmte bij benadering ongeveer gelijk is, kan een enkelvoudige master-regelaar worden toegepast.

- Doordat het luchtverwarmingssysteem is aangesloten op twee verschillende warmtebronnen, is het gebruik van twee slave-regelaars noodzakelijk.
- De randvoorwaarde: de maximale retourtemperatuur van het restwarmtenet is 40 oC, zal vanwege het ontwerp van het verwarmingssysteem in deze afdeling niet worden bereikt. Hierdoor heeft in het regelalgoritme met deze eis dan ook geen rekening te worden gehouden.
- Het restwarmtenet wordt beschouwd als hoofdverwarming, zodat dit altijd als eerste dient te worden aangesproken. Pas wanneer dit net volledig is uitgestuurd, mag ketelwarmte worden geleverd.
- Er dient een soepele overschakeling plaats te vinden op het moment dat het restwarmtenet is uitgestuurd en de warmtevraag niet meer kan dekken. Dit overschakelen geldt eveneens indien de belasting zodanig is, dat weer kan worden volstaan met restwarmte.

De gegeven voorwaarden leiden tot het ontwerp van het regelalgoritme, waarvan het principeschema is weergegeven in fig. 4.3.1.

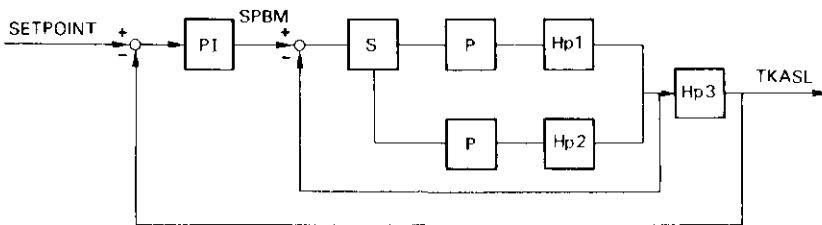


fig. 4.3.1

Waarin:

- SPBM = Setpoint voor de slave-regelaar gedirigeerd vanuit de master-regelaar.
- S = Omschakel-criterium voor het gebruik van restwarmte, dan wel rest- en ketelwarmte.
- Hp1 = De bepaalde overdrachtsfunctie $TUILV = f(\text{VALVE } rw)$
- Hp2 = De bepaalde overdrachtsfunctie $TUILV = f(\text{VALVE } kw)$
- Hp3 = De overdrachtsfunctie $TKASL = f(TUILV)$, die uit de afgeleide responsies voor beide warmtebronnen gelijk is.

Het omschakel-criterium kan in woorden als volgt worden weergegeven. Wanneer het signaal SPBM groter is dan $TUILV + x$, en de restwarmteklep volledig is uitgestuurd ($\text{VALVE } rw = 100\%$), dan wordt een in te stellen vertragingstijd aangesproken. Hierbij is de parameter x een in te geven temperatuur: een minimaal foutsignaal is nodig op het moment van overschakelen. In de hierop volgende scan wordt gecontroleerd of dit minimale foutsignaal nog aanwezig is, en de vertragingstijd niet is verstre-

ken. Is dit wel het geval, dan wordt de tweede slave-regelaar in werking gesteld, en blijft het restwarmtenet 100% open. Wordt nu de belasting van het verwarmingssysteem kleiner in het geval dat rest- en ketelwarmte zijn ingeschakeld, dan zal een soortgelijke actie plaatsvinden.

Indien de master-regelaar nu nader wordt gezien, zal het setpoint voor de slave-regelaar SPBM gelijk zijn aan de te regelen temperatuur van de slave-regelaar TUILV. Met andere woorden: de uitgang van de slave-regelaar is gelijk aan hetingangssignaal zodat voor de bepaling van de regelacties van de master-regelaar geen rekening gehouden hoeft te worden met het 'slave-proces'. De master-regelaar bestaat uit een proportionele actie, en een integrerende actie. Het proportionele deel heeft als doel het proces zodanig te beïnvloeden dat het verschil tussen de geregelde grootte (TKASL) en de gemeten waarde zo klein mogelijk wordt. Een proportionele actie kan echter het foutsignaal, het setpoint minus de gemeten waarde, niet reduceren tot nul. Theoretisch zou dit het geval zijn wanneer deze 'proportionaliteitsfactor' oneindig groot zou zijn. De grootte van deze factor wordt echter bepaald door stabiliteitscriteria. De integrerende actie wordt nu aangewend om in statische toestand het foutsignaal te elimineren. Deze actie integreert het foutsignaal door middel van een bepaalde constante: de integratieconstante $1/KBINT$. Wordt nu het foutsignaal gelijk aan nul, dan zal de master-regelaar een constant (stationair) signaal afgeven. In zijn principevorm is de parallelle PI-regelaar weergegeven in fig. 4.3.2.

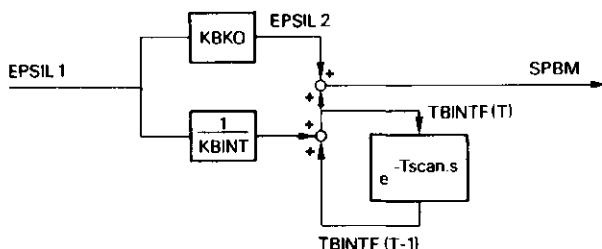


fig. 4.3.2

Voor de bijdrage van de proportionele actie geldt:

$$EPSIL2 = KBKO * EPSIL1$$

Voor de integrerende actie kan men schrijven:

$$TBINTF(T) = TBINTF(T-1) + EPSIL1 * 1/KBINT$$

De som van de twee acties vormt het uitgangssignaal SPBM. Deze regelalgorithmen zijn afgeleid van de realisaties bij continue regelaars. Bij directe digitale regeling (DDC), wat hier het geval is, blijft een proportionele regelactie een vermenigvuldiging van het foutsignaal met een constante factor (propor-

tionaliteitsfactor). Een integrerende actie ontstaat in principe uit het bepalen van de som van een aantal bemonsteringswaarden van het foutsignaal.

Het effect van signaalbemonstering en reconstructie van een bemonsterde regellus, kan worden verdisconteerd in een extra dode tijd, ter grootte van de halve bemonsteringstijd. Hiermee wordt de in het proces aanwezige dode tijd vermeerderd. Nu kunnen de instelregels voor continue regelsystemen gehanteerd worden voor de bepaling van de regelparameters.

Indien de regelparameters van de DDC-regeling worden afgestemd op de regelparameters bij continue regelsystemen, dan kan men voor de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie schrijven:

Continue parallelle PI-regelaar:

$$Hr(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right)$$

Instellingen discrete PI-regelaar:

$$1 / KBINT = KBKO * Tscan / T_i$$

$$KBKO = K_r$$

Op deze wijze zijn met de instelregels voor continue regelsystemen de regelparameters voor een discrete regeling te bepalen. Wanneer geen aanvullende restricties aan het integratie-algorithme worden gesteld, zal de temperatuurregeling niet tot de gewenste resultaten leiden.

Het uitgangssignaal van het integratie-algorithme TBINTF wat in dit geval het setpoint voor de geregelde grootheid TUILV is, zal begrensd moeten worden op een fysisch realiseerbare waarde. Blijft namelijk, door bijvoorbeeld instraling van de zon, de temperatuur in de kas een bepaalde periode boven de setpoint-waarde, dan zal wanneer geen restricties gesteld zijn het integratie-algorithme zichzelf 'wegintegreren'. Ontstaat nu een situatie dat weer warmte gevraagd wordt, is het signaal TBINTF dusdanig negatief, dat eveneens de proportionele werking van de regelaar weggedrukt wordt. Dit verschijnsel wordt wel 'windup' genoemd, en leidt tot onnauwkeurigheden in de regeling. In principe ontstaat dit verschijnsel doordat een computer-regeling geen fysische grenzen kent voor wat betreft de uitsturing. Hierdoor kan het uitgangssignaal onbeperkt toenemen in tegenstelling tot analoge regelaars, die worden begrensd door een voedingsdruk of -spanning.

De restricties die nu gedefinieerd zijn gelden voor uiterste standen (absolute grenzen) van de regelklep. Wordt echter de dynamica van het proces in ogenschouw genomen, dan zullen deze absolute grenzen niet voldoende zijn. Dit als gevolg van het feit dat de uitgang van de integrator in een dynamische overgangssituatie een waarde voor het setpoint van de slave-regelaar bepaalt die als gevolg van de traagheid van het proces, te hoog of te laag zou oplopen in relatie tot de geregelde grootheid. Men spreekt nu van dynamische grenzen die aan de uitgang van de integrator worden gebonden.

Is nu het foutsignaal EPSIL1 positief (te koud in de kas), dan wordt bepaald of TBINTF(T-1) groter is dan de actuele waarde van de te regelen grootte TUILV plus een temperatuurmarge. Indien dit het geval is, dan wordt $TBINTF(T-1) = TUILV + \text{temp. marge}$. Is het foutsignaal negatief, dan geldt een zelfde beschouwing. De methode van begrenzing van het uitgangssignaal van de integrator wordt de 'DOG-LEAD' methode genoemd (Udink ten Cate, 1983). Om nu het 'windup' verschijnsel van de integrator te onderdrukken, worden in plaats van de genoemde statische (fysisch realiseerbare) grenzen ook de dynamische grenzen gebruikt. Worden nu de absolute grenzen aangesproken, dan zal de master-regelaar in het gebied $TUILV_{\min} - \text{Temp.marge}$ of in het gebied $TUILV_{\max} + \text{Temp.marge}$ zich even als P-regelaar gedragen. Dit komt doordat de integrator zichzelf uit dit gebied moet werken. Dit levert in de regeling praktisch geen onnauwkeurigheden op. Het regelalgoritme van de master-regelaar ziet er met de restricties uit zoals is gegeven in fig. 4.3.3.

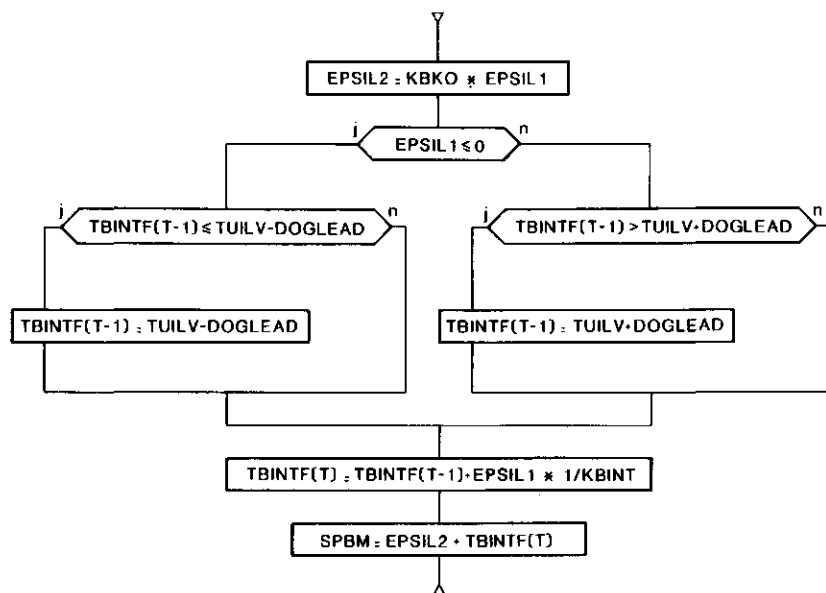


fig. 4.3.3

Uit de stapresponsies is afgeleid dat het master-proces bij benadering te schrijven is als een eerste orde systeem in combinatie met een looptijd. Het regelgedrag moet nu zodanig zijn, dat het proces onder alle omstandigheden stabiel blijft. Dit leidt tot de aangegeven waarden voor de procesparameters. Het regelschema kan nu in zijn eenvoudigste vorm worden weergegeven in fig. 4.3.4.

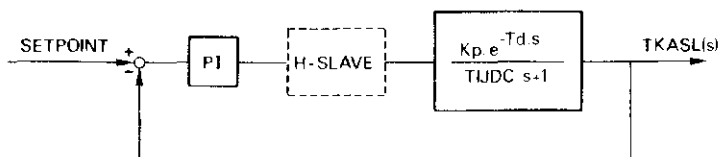


fig. 4.3.4

Hierin is:

T_{IJD} = Tijdconstante eerste orde systeem masterproces.

T_d = dode tijd van het regelsysteem, inclusief de dode tijd geïntroduceerd door de DDC-regeling.

K_p = De statische versterking van het master-proces.

Indien de regelparameters van de DDC-regeling afgestemd worden op de regelparameters bij continue regelsystemen dan kan men schrijven:

$$KBKO = \frac{T_{IJD}}{K_p \cdot T_d} = \frac{35}{0.8 * 7} = 6.25$$

$$T_i = 3.3 * T_d = 3.3 * 7 = 23 \text{ min}$$

$$KBINT = \frac{T_i}{KBKO * T_{scan}} = 1.8$$

Met deze instellingen zou een aanvaardbaar geregeld proces moeten optreden.

Het 'slave-proces' valt uiteen in twee delen, namelijk het restwarmte- en het ketelwarmteproces. Aangezien beide systemen proces technisch aan elkaar gelijk zijn, zal hier alleen worden ingegaan op het restwarmtesysteem. Zoals reeds vermeld is de bemonsteringstijd van twee minuten aan de hoge kant, zeker voor het geoorloofd gebruik van stabiliteitscriteria. Het moge duidelijk zijn dat voor instellingen van de regelparameters van dit proces, heuristische oplossingen gekozen zijn.

Aan de hand van de karakteristiek van de regelklep die zich in het 'slave-proces' bevindt, is een gemodificeerde tijdproportionale regeling aangewend. De proportionaliteitsfactor van de slave-regelaar is afhankelijk gemaakt van de actuele stand van de regelklep. Binnen de overdrachtsfunctie klepstand-TUILLV zijn nu drie lineaire gebieden te onderscheiden, te weten: 0 - 20 %, 20 - 80 % en 80 - 100 % van de klepstand. In het eerste en het laatste gebied is de procesversterking lager dan in het werkgebied van 20 % - 80 %.

Een duidelijke verbetering treedt eveneens op, wanneer de dode

slag van de regelklep wordt overbrugd. Wanneer het foutsignaal positief is, en de klepstand is 0 %, dan zal een aantal scans verloren gaan alvorens de klep uit zijn zitting komt. Dit komt tot uitdrukking in een extra undershoot ten gevolge van dit vertraagd inkomen van de regelklep. Indien nu voor de eerste maal dat er warmte wordt gevraagd, een uitsturing ter grootte van deze dode slag plaatsvindt, zal deze extra vertraging niet meer optreden. Met andere woorden: de regelklep wordt geforceerd in zijn werkgebied gebracht. Het prinsipschema van de slave-regeling is weergegeven in fig. 4.3.5.

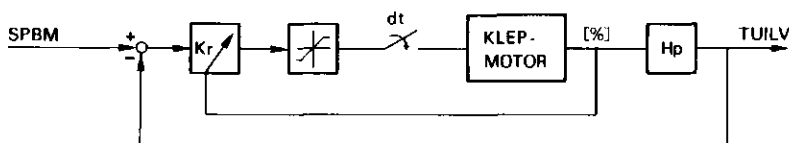


fig. 4.3.5

Waarin:

- K_r = Proportionaliteitsfactor van de slave-regelaar
- H_p = overdrachtsfunctie $TUILV = f(\text{VALVE rw of kw})$
- dt = aansturing klep in seconden

De tijdsduur van aansturing van de klep is gelijk aan de proportionaliteitsfactor maal het foutsignaal $dt = K_r (SPBM - TUILV)$. Met andere woorden evenredig met de afwijking van TUILV met het setpoint SPBM gedirigeerd door de master-regelaar. De minimale aansturing van de regelklep bedraagt 1 seconde, de maximale aansturing is gelijk aan de bemonsteringstijd (2 min). De looptijden van de klepmotoren zijn alle 140 seconden.

4.4 Beoordeling regeling afdeling 5

Het regelsysteem in afdeling 5 zal worden beoordeeld aan de hand van actieve regelomstandigheden die hebben plaats gevonden.

Doordat op het moment van installatie van de regelalgorithmen ook het gewas in de afdeling werd geplaatst, was het niet mogelijk de slave-regelaars onafhankelijk van het master-systeem te beoordelen. De eerste fase van de teelt is namelijk erg gevoelig voor grote temperatuurwisselingen, wat betekent dat een gecombineerde beoordeling plaats dient te vinden van zowel het master-systeem als het slave-systeem.

In de startperiode van de teelt werd al snel duidelijk dat voor deze afdeling de instelregels voor continue regelsystemen voor de master-regelaar goed voldeden, maar bij de slave-regelaars leidden tot oscillatie van de geregelde grootheid. Dit hield in dat de proportionaliteitsfactoren KBLINM en KBLINS sterk verkleind moesten worden.

De instellingen voor de master-regelaar zijn: proportionele versterking $KBK_0 = 6.0$, de integratieconstante $KBINT = 1.8$. Een onbevredigend resultaat werd echter bereikt doordat het integre-

rende deel van de regelaar niet als 'DOG-LEAD' integrator was uitgevoerd. De aangelegde dynamische en absolute grenzen voor de uitgang van het integratie-algoritme zijn basiswaarden van de temperatuurregeling in een kas. Met voor de DOG-LEAD een temperatuurmarge van 10 °C reageerde de regeling op bijna overeenkomstige wijze als zonder toegevoegde DOG-LEAD. Een temperatuurmarge van 5 °C werd als een gunstige waarde gezien. Dit is na een aantal meetdagen dan ook vrijwel direct opgenomen in het regelalgoritme.

In de beginperiode van de teelt was de warmtebehoefte van de kas erg groot. Dit betekent dat in die periode het restwarmtenet volledig openstond.

Met de startinstellingen voor de master-regelaar geïmplementeerd in het regelalgoritme, is nu de slave-regelaar voor de levering van ketelwarmte beoordeeld. Met behulp van een eerste beoordeling is de P-factor voor deze regelaar afgeschat op $KBLINS = 0.5$. Het geregelde proces, met de vermelde instellingen voor de regelacties, is gegeven in fig. 4.4.1.

Na 20:00 uur ontstaat een regelsituatie waarbij de ramen en schermen 's nachts gesloten blijven. Het setpoint voor de luchttemperatuur SPKL is tot 4:00 uur constant. Hierna neemt SPKL lineair met de tijd toe, tot het setpoint om 8:00 uur 21 °C is. In fig. 4.4.1 ziet men dat wanneer het setpoint constant is, TUILV redelijk goed dit setpoint SPBMF volgt. Treedt nu een dynamische overgangssituatie op, dan is echter een minder gedempt uitgangssignaal het resultaat. Als gevolg van het foutsignaal SPBMF - TUILV wordt de ketelwarmteklep te sterk aangestuurd, wat het minder gedempte uitgangssignaal TUILV als resultaat heeft. Op basis van deze gegevens zou een optimale versterkingsfactor van $KBLINS = 0.3$ verwacht mogen worden. Een gecombineerde beoordeling van een geregeld en een slaveproces is echter een twijfelachtige zaak. Vandaar dat in een experiment de P-factor van deze slave-regelaar is verhoogd van 0.5 naar $KBLINS = 1.0$. Wanneer de eerder gemaakte veronderstelling juist is, zal nu het geregelde proces een sterk oscillerend verloop moeten vertonen. De responsie van de betreffende meetnacht is weer gegeven in fig. 4.4.2.

Hierin is overduidelijk het beschreven gedrag te constateren.

De locatie van de temperatuur-sensor voor de geregelde luchttemperatuur is echter bij deze uitvoering van luchtverwarming sterk bepalend voor de overdrachtsfunctie van het verwarmingssysteem. In het begin van het stookseizoen is deze sensor, die zich ongeveer in het midden van de kas bevindt, geplaatst op ongeveer 0.75 m boven de kasbodem. Doordat het gewas na verloop van tijd groter en dichter wordt, zal in de onderste laag waar zich de sensor bevindt, een snellere reactie van de luchttemperatuur plaatsvinden ten gevolge van variaties van TUILV. Doordat de locatie van de sensor voor TKASL met het groeipunt van het gewas meebeweegt, zal wanneer deze sensor wordt verplaatst naar 1.5 m hoogte, dit een invloed hebben op de tijdconstante van het master-proces. In fig. 4.4.3 is een meetnacht gegeven waarbij de sensor voor TKASL is verplaatst naar 1.5 m, maar waarbij de regelparameters dezelfde zijn als in fig. 4.4.2.

De sterke oscillatie zoals in fig. 4.2.2 is nu voor een groot

gedeelte gereduceerd. Dit is te danken aan het groter worden van de tijdconstante van het proces, waardoor de versterkingsfactor waarbij instabiliteit optreedt ook hoger komt te liggen. Indien gedurende de teelt de plaats van de temperatuur-sensor afhankelijk wordt van het groeipunt, zal instabiliteit als gevolg van variaties van de procesparameters in relatie tot het volgroeien van het gewas worden voorkomen.

Tot nu toe was bij de beoordeling van het ketelwarmtenet de regelklep 's nachts in zijn werkgebied. In fig. 4.4.4 is gedurende de nacht zo'n geringe kasbelasting, dat het restwarmtenet bij- en afgeschakeld wordt. Doordat de procesversterking kleiner is wanneer de regelklep zich in het gebied van 0 - 20 % bevindt, zou men aannemen dat in dit gebied de proportionaliteitsfactor van de bijbehorende slave-regelaar overeenkomstig verhoogd mag worden (gemodificeerde slave-regelaar). In fig. 4.4.4 is de P-factor van de slave-regelaar voor dit werkgebied met 20 % verhoogd. Dit betekent dus een extra aansturing voor klepstanden tot 20 %. Dit resulteert weliswaar in een vrij geringe afwijking tussen de gemeten en gewenste waarde, maar is mechanisch niet bevorderlijk voor het functioneren van de regelklep. Vandaar dat in dit gebied gekozen wordt voor een verlaging van de versterkingsfactor. In fig. 4.4.4 is de extra dode tijd sturing duidelijk herkenbaar. Zodra het foutsignaal positief is, zal vrijwel direct de regelklep openen. Indien de regelklep een stand aanneemt tussen 20 en 80 %, dan is de waarde van de P-factor $KBLINM = 1.0$.

In fig. 4.4.5 zijn in een meetnacht beide slave-regelaars beoordeeld. Vanaf 21:00 uur tot ongeveer 1:00 uur is de slave-regelaar restwarmte actief. Op het moment dat $SPBMF > TUILV$ wordt de restwarmteklep snel geopend om vervolgens in zijn werkgebied te komen, waardoor TUILV het setpoint SPBMF vrij nauwkeurig volgt. Is het restwarmtenet volledig open, dan volgt de omschakelprocedure. Indien deze omschakeling plaats heeft gehad, zal TUILV weer SPBMF volgen, maar nu gestuurd door de slave-regelaar voor ketelwarmte. Samenvattend kan nu voor de slave-regelaar restwarmte gezegd worden dat in het klepstandgebied van 0 - 20 % de P-factor 20 % wordt verlaagd om het aan/uit karakter bij geringe kasbelasting te vermijden. In het gebied 20 - 80 % is de P-factor $KBLINM = 1.0$. Boven deze klepstand van 80 % wordt de P-factor eveneens verlaagd met 20 %, om in het overschakelgebied zo lang mogelijk van de restwarmte gebruik te kunnen maken.

Voor de slave-regelaar ketelwarmte geldt in het klepstandgebied 0 - 20 %: $KBLINS = 1.2 * KBLINS(20-80\%)$. Indien KBLINS in dit gebied niet wordt verhoogd, zal bij overschakelen van rest- naar rest- en ketelwarmte een te grote undershoot ontstaan. Mede door het feit dat overschakeling meestal plaatsvindt op het moment dat van nacht- naar dag-setpoint wordt overgegaan. Dit geeft nog eens een keer extra problemen wanneer niet aan deze voorwaarde zou worden voldaan. Is de klepstand $20\% < VALVE-KW < 80\%$, dan is de optimale instelling voor de P-factor $KBLINS = 0.3$. Bij een klepstand $> 80\%$, geldt ook $KBLINS = 1.2 * KBLINS(20-80\%)$. Zoals reeds vermeldt, dient voor beide regelkleppen een extra pulssturing gegeven te worden op het moment dat de betreffende klep voor de eerste maal een open commando krijgt.

De pulslenkte die vereist is bedraagt 55 seconden.

Met deze modificaties gedragen de slave-regelaars zich voldoende nauwkeurig.

In fig. 4.4.6 is een meetnacht weergegeven waarbij de warmtebelasting zodanig is, dat beide warmtebronnen aangesproken worden. Vanuit een afkoelingsfase van de kas is om ongeveer 23:00 uur de gemeten waarde TKASL onder de setpoint-waarde SPKL gekomen. Het restwarmtenet wordt nu aangeschakeld. In de responsie treedt een undershoot op van 0.75 oC. Dit als gevolg van de volgende factoren.

- De dode tijd aanwezig in het slave-proces levert een vertraging. Het zal enige tijd duren voordat de regelklep opengestuurd is en TUILV hierop reageert.
- Het setpoint voor de slave-regelaar SPBMF, dat is samengesteld uit een proportioneel deel en een integrerend deel, moet groter worden als de geregelde variabele TUILV. Dit betekent dat een gedeelte van de temperatuurmarge die is aangebracht in de integrator (DOG-LEAD) eerst 'weggeïntegreerd' moet worden.
- Voordat de regelklep opengaat, wordt eerst een impulssturing gegeven om de klep uit de zitting te krijgen.
- De dode tijd aanwezig in het 'master-proces' geeft eveneens een extra vertraging.

Gezien het grote aantal factoren dat op deze undershoot van invloed is, wordt een waarde van 0.75 oC als acceptabel verondersteld. De master-regelaar zorgt ervoor dat TKASL nu snel naar het setpoint SPKL toe gaat. Om ongeveer 1:30 uur neemt de belasting dusdanig toe (snelle variatie van het buitenklimaat, wat met open energiescherm een grote storende invloed heeft op TKASL), dat het restwarmtenet binnen afzienbare tijd is uitgestuurd. Voordat naar ketelwarmte wordt geschakeld moet aan de volgende voorwaarden worden voldaan.

- Het restwarmtenet moet 100 % open zijn.
- Een vertragingstijd van 4 * de bemonsteringstijd is verstreken.
- Gedurende de ingeschakelde vertragingstijd wordt het fout-sigitaal SPBMF - TUILV groter dan 0.2 oC.

Is aan deze voorwaarden voldaan, dan zal de regelklep voor ketelwarmte worden aangestuurd met een impulssigitaal. De hierop volgende scans zal de regeling door middel van restwarmtelevering de temperatuurregeling overnemen. De undershoot ten gevolge van het overschakelen van rest- naar rest- en ketelwarmte is, zoals te zien in fig. 4.4.6, minimaal.

In fig. 4.4.7 is een soortgelijke meetnacht weergegeven, maar nu is de kasbelasting tijdens opstoken zo groot, dat het ketelwarmtenet volledig wordt opengestuurd. Hieruit blijkt dat een enkelvoudige master-regelaar in deze afdeling voor zowel rest- als rest- en ketelwarmte in verschillende werkpunten voor de regeling uitstekend voldoet.

Indien de overschakeling van rest- naar rest- en ketelwarmte niet plaats vindt op het moment van een dynamische overgangssituatie, ondervindt de luchttemperatuur in de kas nauwelijks enige beïnvloeding van dit overschakelen, terwijl ook hier de schermen in geopende toestand verkeren.

Onder invloed van uiteraard andere buitenomstandigheden is de meting in fig. 4.4.8 opgenomen. De luchttemperatuur in de kas vertoont een zelfde verloop als bij andere meetdagen. Tenslotte is aan de ingang van het geregelde proces een stap-

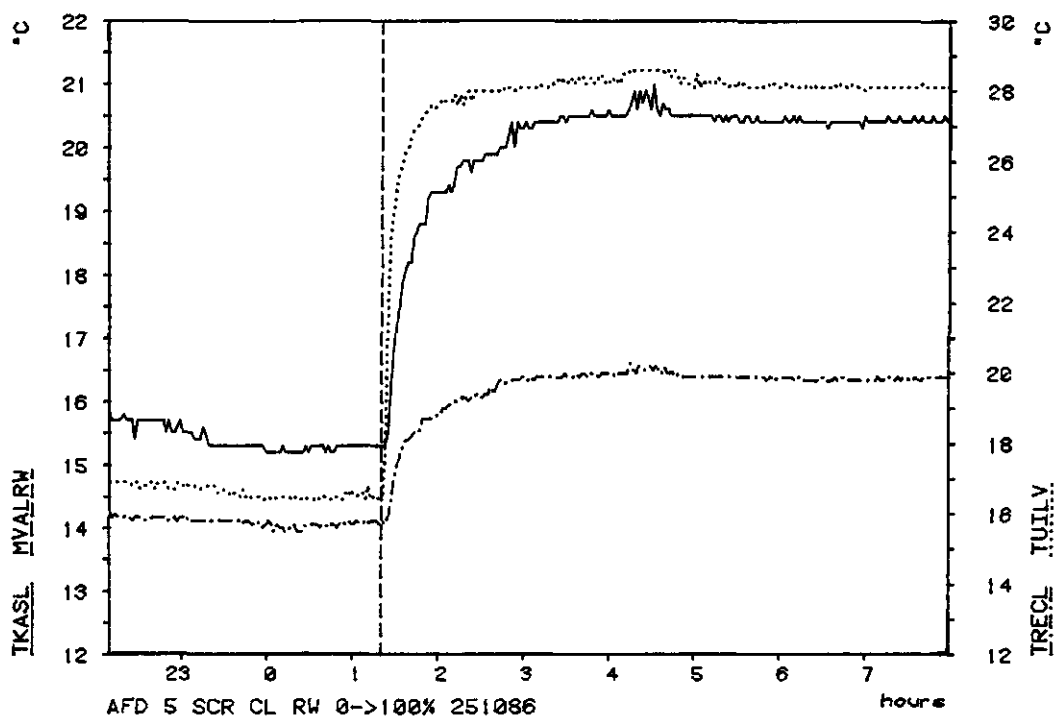


Fig. 4.2.3

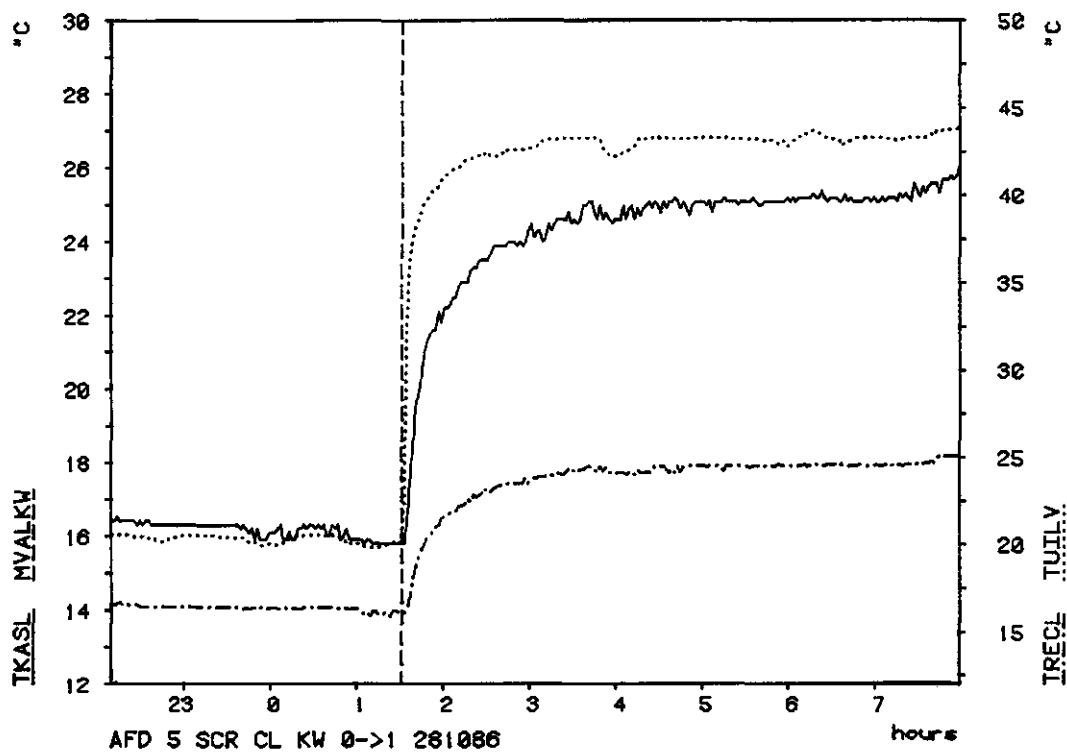


Fig. 4.2.4

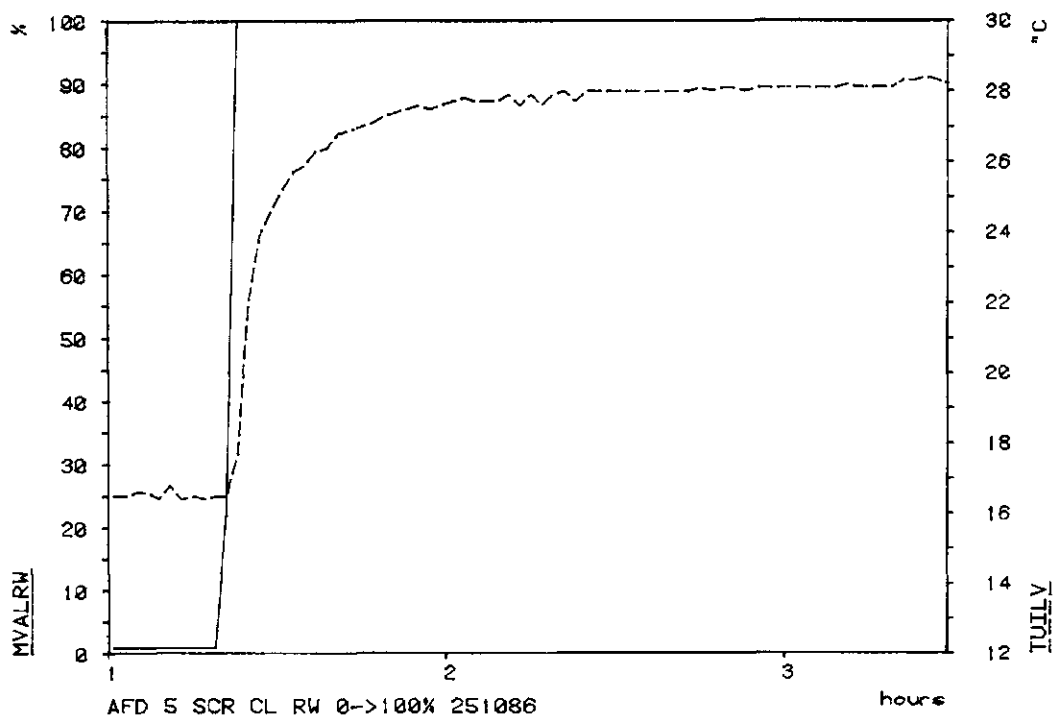


Fig. 4.2.5

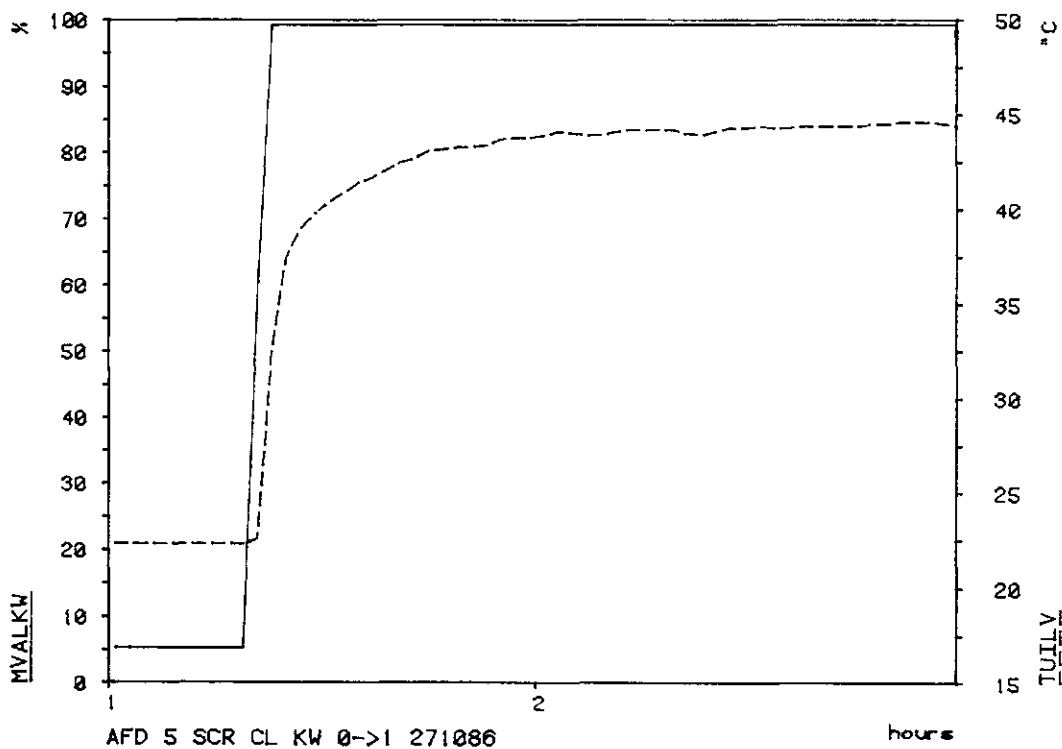


Fig. 4.2.6

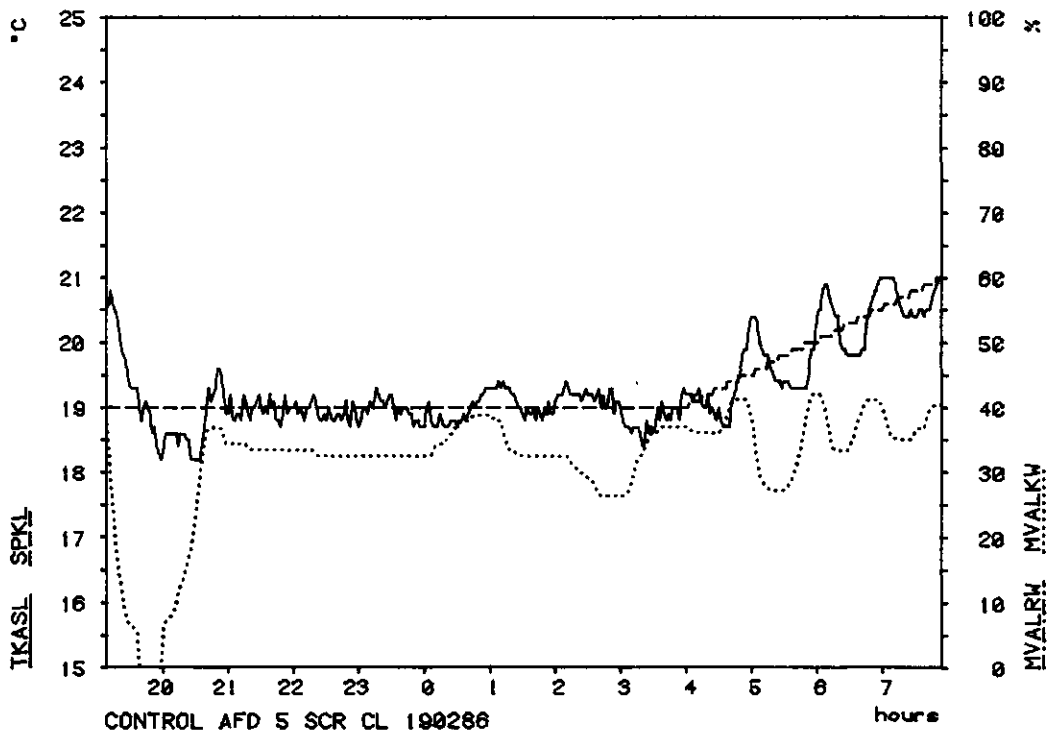
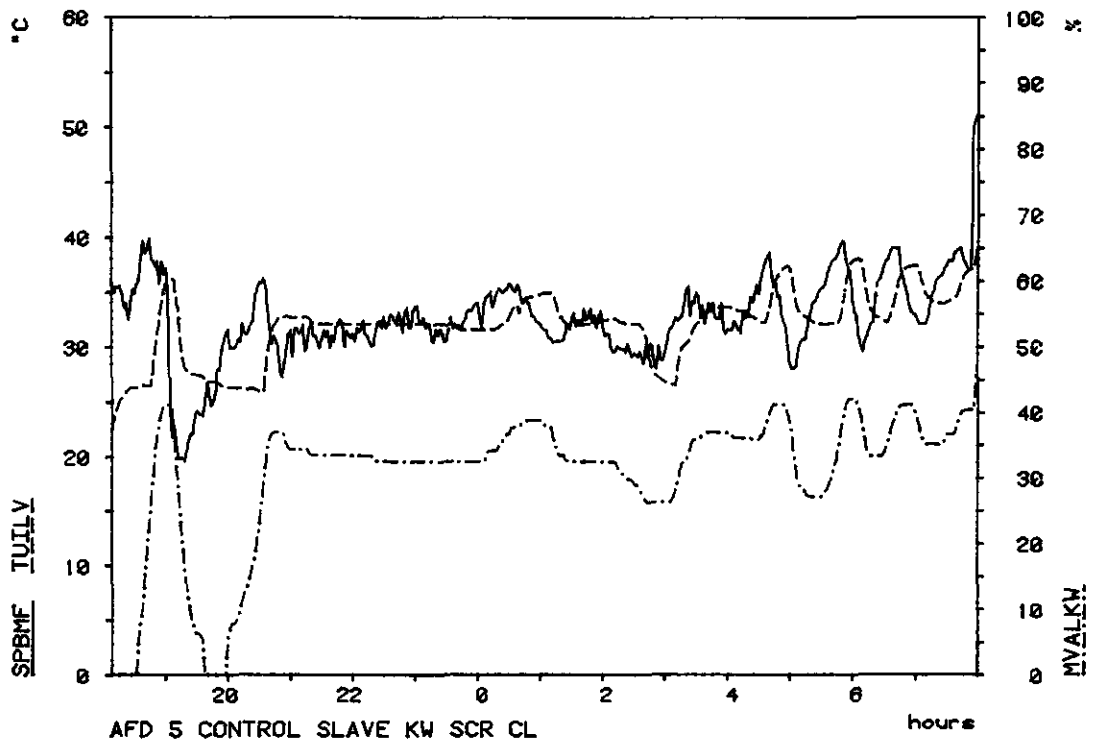


Fig. 4.4.1

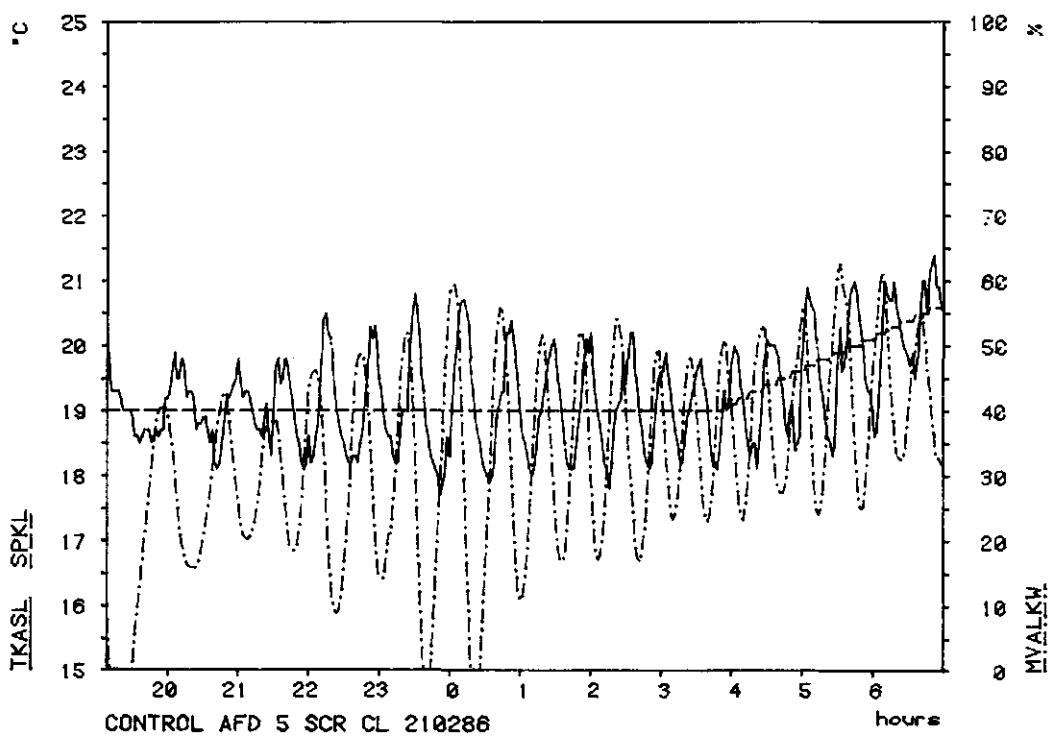
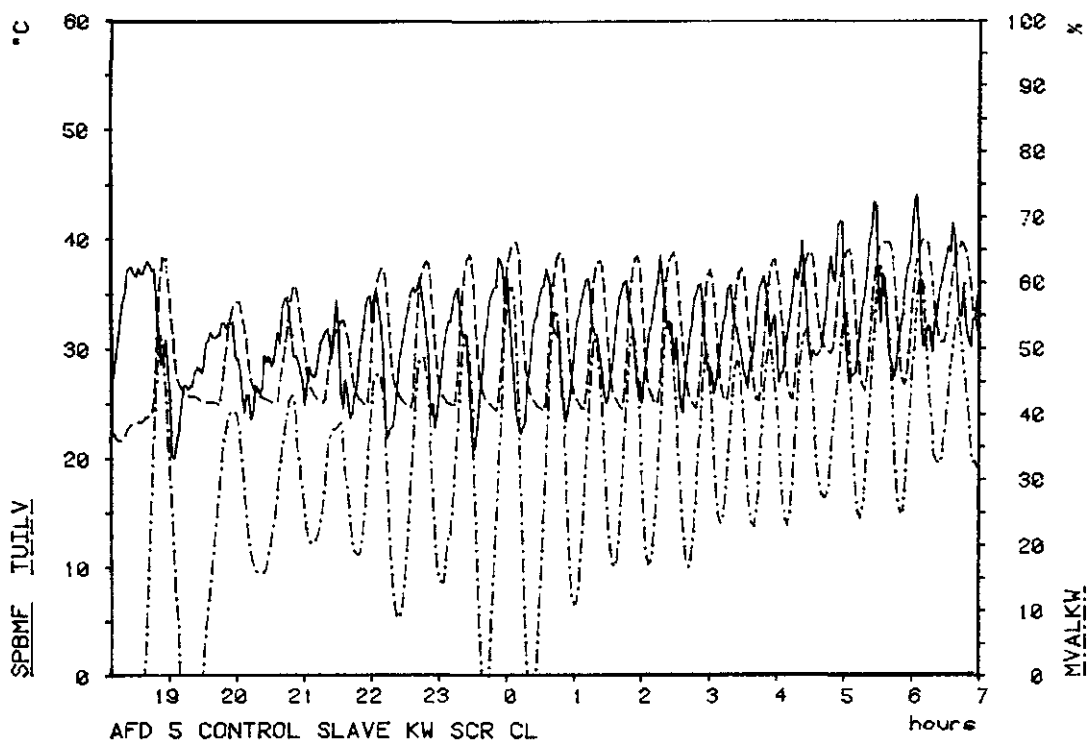


Fig. 4.4.2

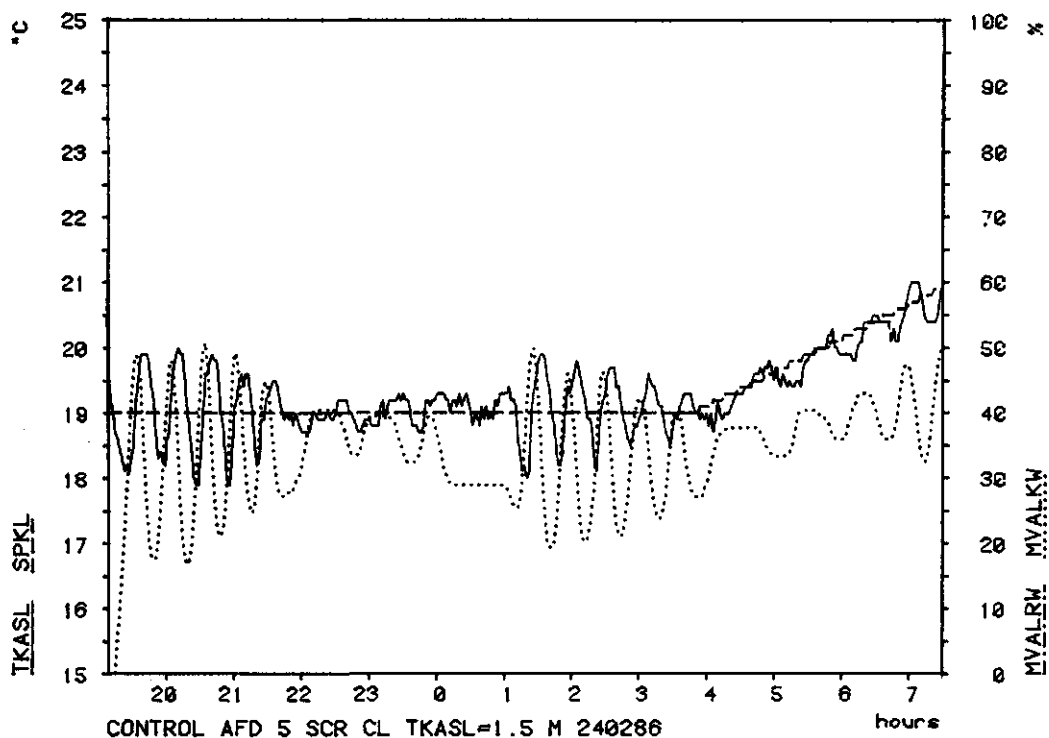


Fig. 4.4.3

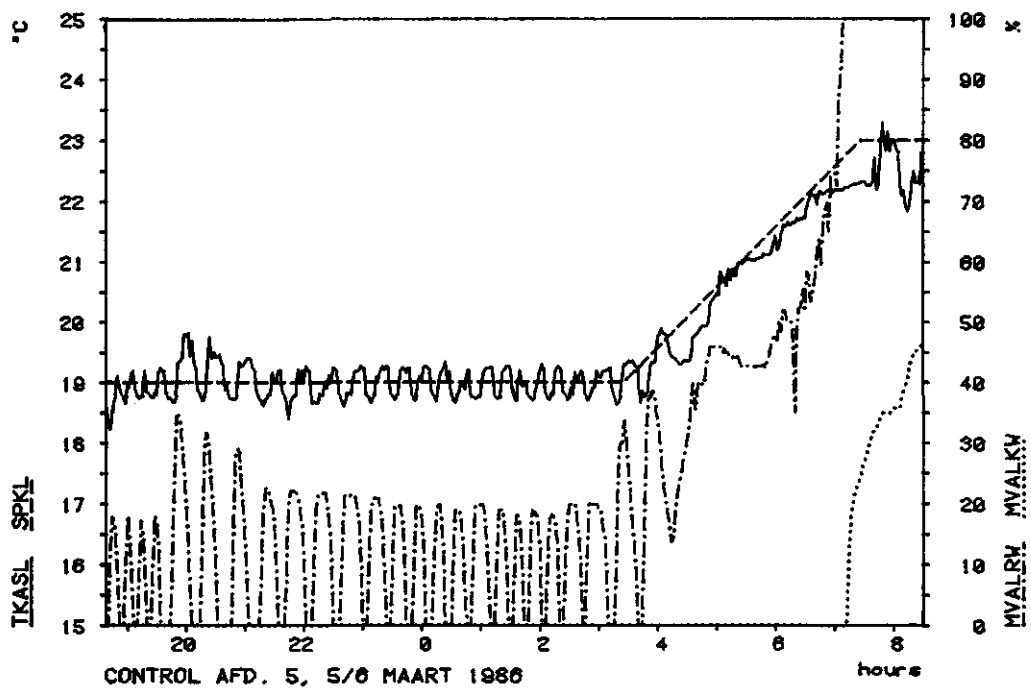


Fig. 4.4.4

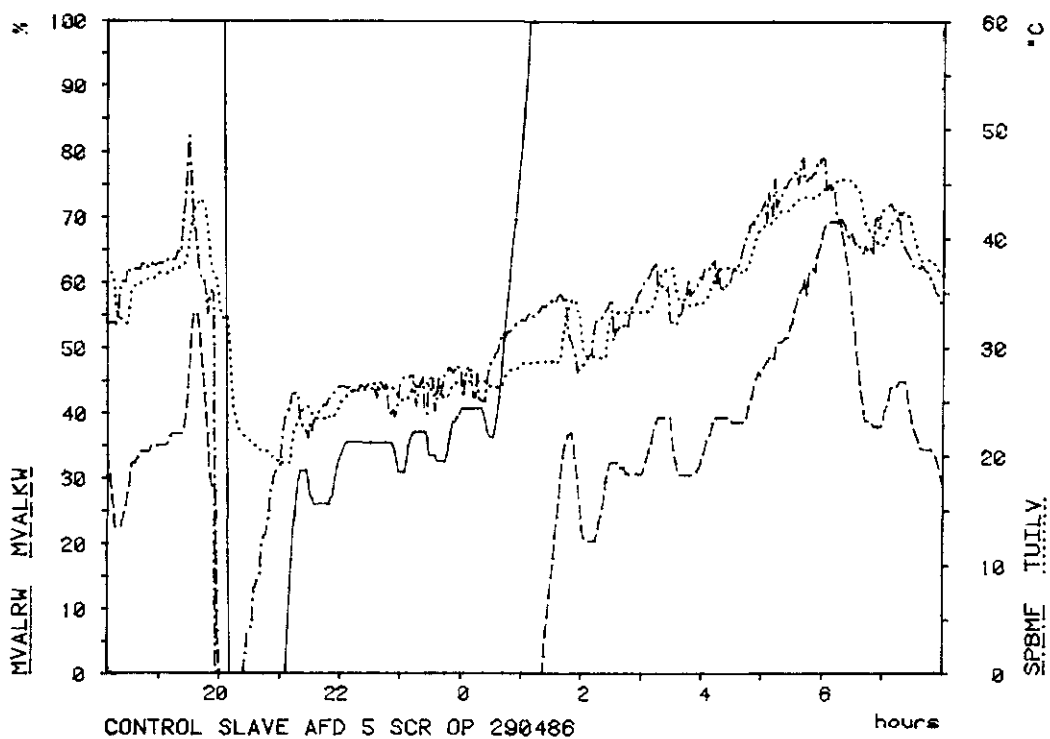


Fig. 4.4.5

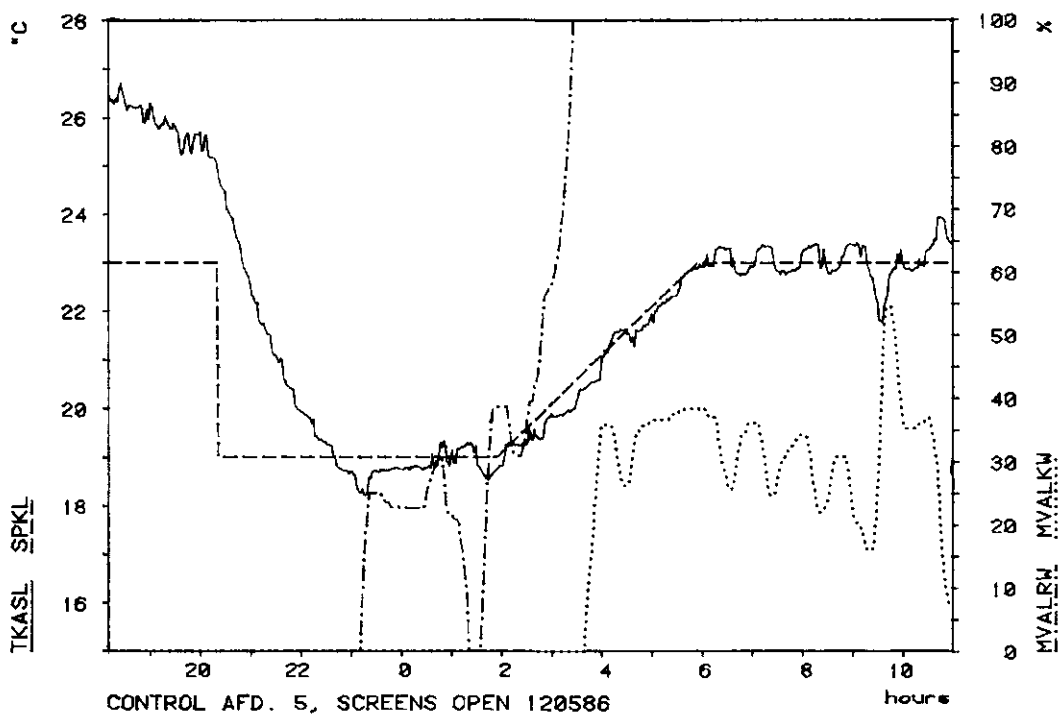


Fig. 4.4.6

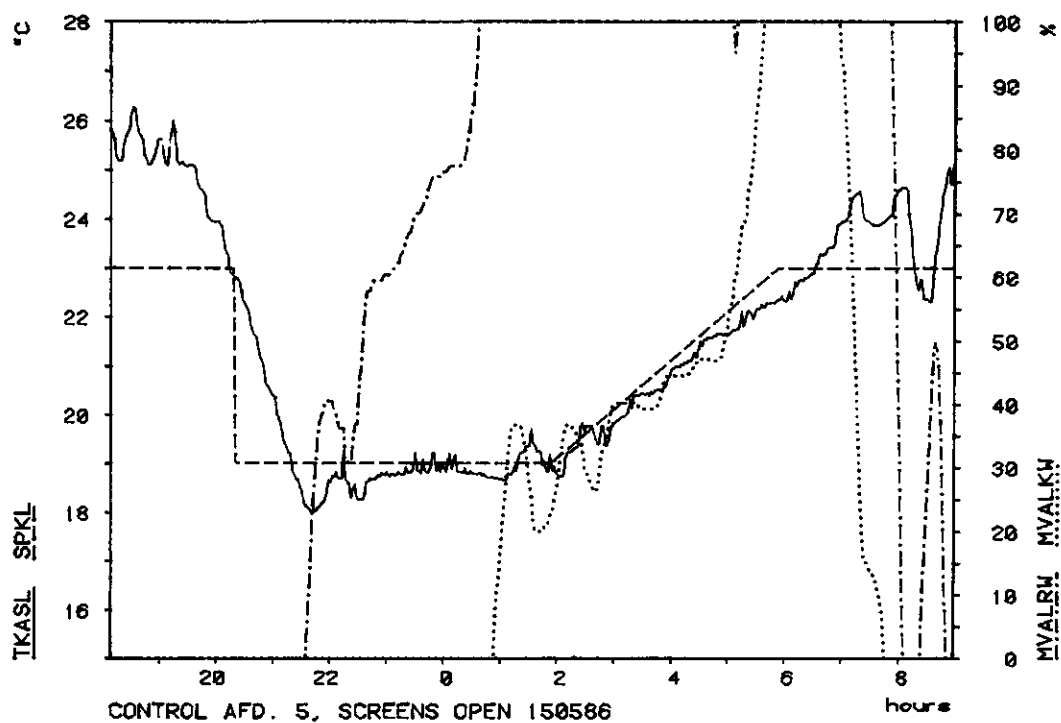


Fig. 4.4.7

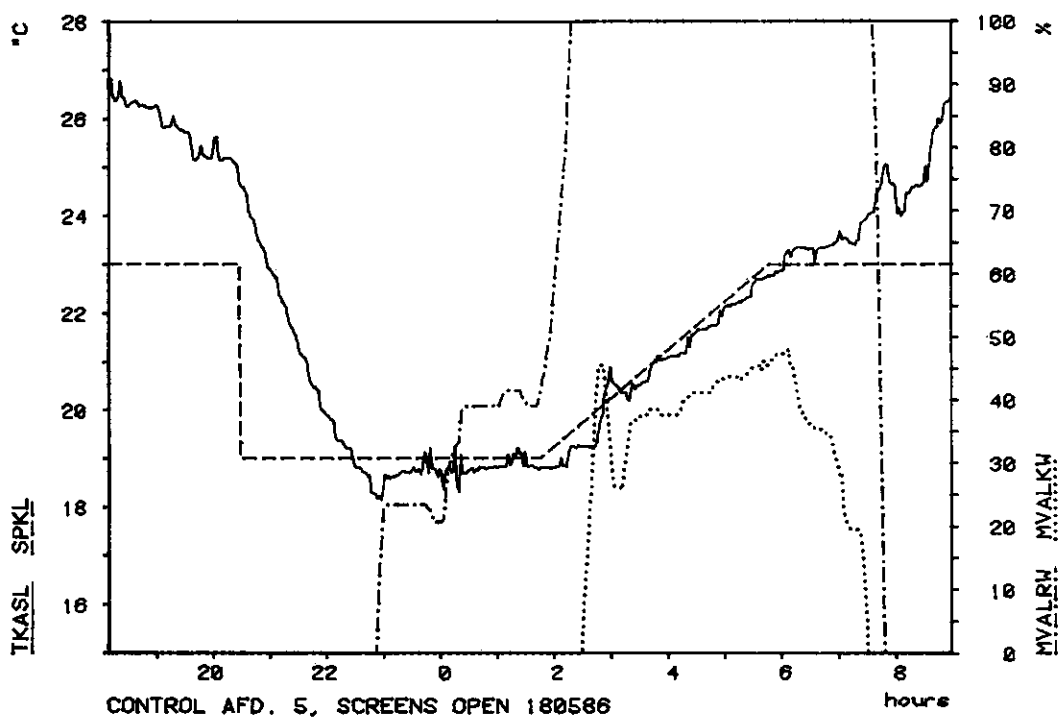


Fig. 4.4.8

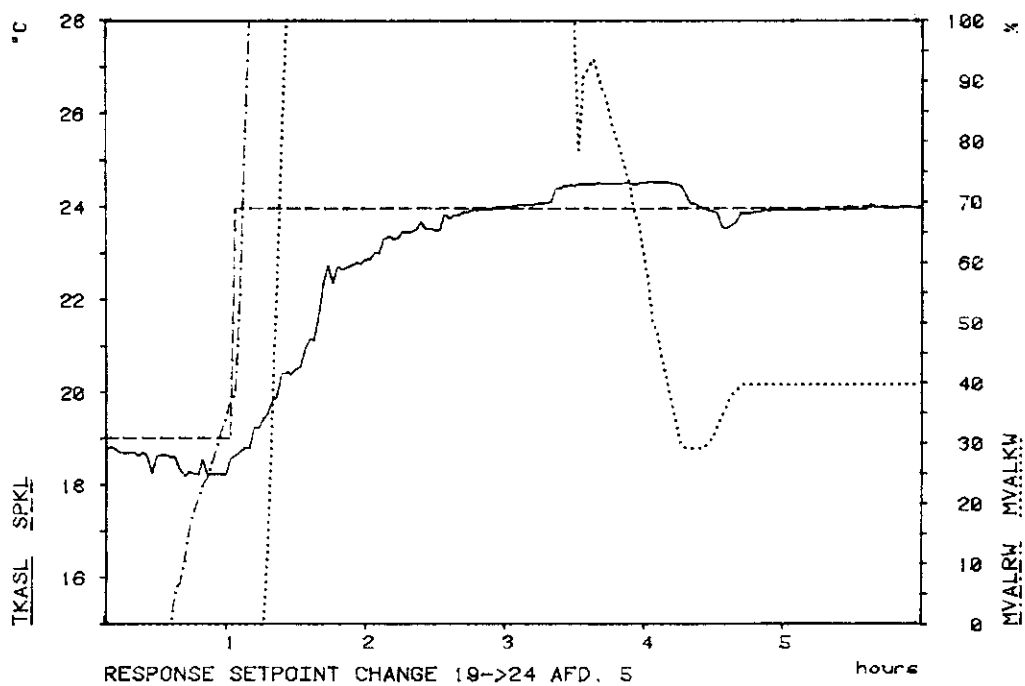


Fig. 4.4.9

vormige verstoring aangebracht. Het verloop van de geregelde waarde TKASL ten gevolge van deze verstoring is weergegeven in fig. 4.4.9. Vanuit een bepaalde beginsituatie, alleen het restwarmtenet is in bedrijf, treedt een sprongvormige verandering van het setpoint op van 19- $\rightarrow$ 24 oC. Het restwarmtenet wordt nu snel geheel opengestuurd, waarna het ketelnet het zelfde ondergaat. Het maximaal beschikbare vermogen wordt nu aangewend om zo snel mogelijk het nieuwe setpoint te bereiken. De overshoot die hierbij optreedt is 0.5 oC, wat zeer gering mag worden genoemd. De statische afwijking is door toepassing van een integratie-algoritme in de master-regelaar gelijk aan nul geworden. De nieuwe evenwichtssituatie is nu zodanig dat de ketelwarmteklep op een klepstand van 40 % komt.

5. Regelalgorithme verwarmde vloer in combinatie met ALCOA-net

5.1 Beschrijving verwarmingssysteem vloer/ALCOA-net

Een verwarmde betonvloer is als verwarmingssysteem bijzonder geschikt om te worden gebruikt in combinatie met restwarmte. Met een relatief lage watertemperatuur kan door het grote oppervlak voldoende warmte worden afgegeven. In de vloer is een verwarmingsnet van polybuteen buizen aangebracht. Deze buizen bevinden zich op een afstand van 20 cm van elkaar. De dikte van de verwarmde betonvloer is 10 cm. Naast de restwarmte moet er op momenten dat de warmtevrage $> 54 \text{ W/m}^2$ is ketelwarmte geleverd worden. In de kas is naast de verwarmde betonvloer, die alleen met restwarmte wordt gevoed, een verwarmingsnet van gevinde aluminium pijpen (ALCOA-pijpen) geïnstalleerd. Dit verwarmingsnet wordt gevoed door ketelwarmte.

5.2 Bepaling systeemeigenschappen vloer/ALCOA-net.

Doordat de systeemeigenschappen van het 'master-proces' in afdeling 5 voor rest- en ketelwarmte ongeveer gelijk zijn, kon hier worden volstaan met een enkelvoudige master-regelaar. Bij afdeling 6 is dit niet het geval. Wat op voorhand mag worden aangenomen is dat de verwarmde betonvloer, zowel statisch als dynamisch een ander karakter vertoont dan het ALCOA-pijppennet. Deze veronderstelling leidt tot het gebruik van een meervoudige master-regelaar binnen het regelalgorithme. Er is een master-regelaar nodig indien alleen restwarmte wordt geleverd, en een zelfde regelaar voor de regeling van de luchttemperatuur in de kas, indien ook ketelwarmte wordt geleverd. Beide regelaars zijn uitgevoerd als PI-regelaar. Als regelconfiguratie wordt weer uitgegaan van het master en slave principe (cascade-regeling). Evenals de door lucht verwarmde afdeling worden ook hier twee slave-regelaars gebruikt die een hulpparameter regelen. Deze parameter is voor beide regelaars de betreffende aanvoertemperatuur na de mengklep van het verwarmingssysteem (TANVL en TANALC). Met behulp van de gestelde uitgangspunten resulteert dit in de regelconfiguratie volgens fig. 5.2.1.

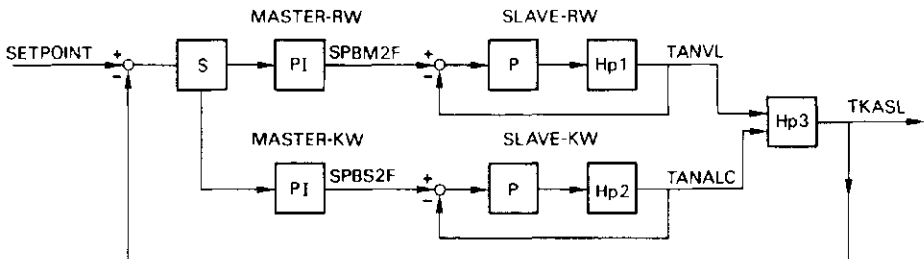


fig. 5.2.1

Hierin zijn:

- S: Omschakelalgorithme van rest- naar ketelwarmte.
- SPBM2F: setpoint voor aanvoertemperatuur vloer (TANVL).
- SPBS2F: setpoint voor aanvoertemperatuur ALCOA-net (TANALC).
- HP1: Overdrachtsfunctie TANVL = f(VALVE RW).
- HP2: Overdrachtsfunctie TANALC = f(VALVE KW).
- HP3: Overdrachtsfunctie TKASL = f(TANVL, TANALC).

De master-regelaar regelt de langzaam variërende luchttemperatuur in de kas, terwijl de slave-regelaar de veel snellere aanvoer-temperatuur van het verwarmingssysteem voor zijn rekening neemt.

Uitgaande van de regelconfiguratie komt men tot het bepalen van de volgende overdrachtsfuncties:

- TANVL = f(VALVE RW)
- TANKW = f(VALVE KW)
- TKASL = f(TANVL)
- TKASL = f(TANALC)

De systeemeigenschappen zijn ook hier bepaald aan de hand van stapvormige verstoringen aan de ingang van het proces. Hiervoor gelden voor het gebruik dezelfde voorwaarden als bij de responsies voor de luchtverwarmde afdeling.

Alvorens in te gaan op de responsies van afdeling 6 volgt een fysische beschouwing van het vereenvoudigde master-proces rest-warmte en het master-proces rest- en ketelwarmte.

Voor de warmtebalans van de luchttemperatuur in de kas, indien alleen de verwarmde betonvloer warmte levert, geldt:

dTKASL

$$\text{Cair} \cdot \frac{dT}{dt} = - \text{HFAirgl} - \text{HFvent} + \text{HFvlair} + \text{HFplair}$$

Waarin:

Cair = Warmtecapaciteit van de kaslucht met inbegrip van de aanwezige kasconstructie delen in [J/K.m2].

HFAirgl = Convectieve warmtestroom van de kaslucht naar het glasdek in [W/m2].

HFvent = Warmtestroom ten gevolge van luchtuitwisseling met de buitenlucht door natuurlijke ventilatie (lekstroom) in [W/m2].

HFvlair = Warmtestroom ten gevolge van de convectieve warmte-overdracht van de betonvloer naar de kaslucht in [W/m2].

HFplair = Convectieve warmtestroom tussen de planten en de kaslucht in [W/m2].

Op een zelfde wijze geldt voor de oppervlakte-temperatuur van de verwarmde betonvloer:

dTvloer

$$\text{Cvloer} \cdot \frac{dT}{dt} = \text{HFpivl} - \text{HFvlair} - \text{HFvlpl} - \text{HFvlg1} + \text{HFKI} - \text{HFeva}$$

Waarin:

Cvloer = Warmtecapaciteit van de betonvloer inclusief de steenwol-matten in [J/K.m2].

HF_{pivl} = Conductieve warmtestroom geleverd door het restwarmtenet in $[W/m^2]$.
 HF_{vlair} = Convectieve warmtestroom naar de kaslucht in $[W/m^2]$.
 HF_{vlpl} = Langgolvige stralingswarmte van de vloer naar de planten in $[W/m^2]$.
 HF_{vlgl} = Langgolvige stralingswarmte van de vloer naar het glasedek in $[W/m^2]$.
 HF_{KI} = Kortgolvige stralingswarmte door de vloer geabsorbeerd in $[W/m^2]$.
 HF_{eva} = Warmtestroom ten gevolge van verdamping van water op de vloer (eb/vloed systeem) in $[W/m^2]$.

Om te komen tot een overdrachtsfunctie, zullen een aantal vereenvoudigingen en voorwaarden worden gesteld. Indien de metingen 's nachts worden uitgevoerd, vervalt de kortgolvige stralingsterm HF_{KI} . Aangezien in het onderzoek niet wordt gewerkt met een eb/vloed systeem, vervalt eveneens de term HF_{eva} . De conductieve warmtestroom die door het restwarmtenet wordt geleverd, wordt benaderd door de term: $HF_{pivl} = C_1 \cdot (T_{pipe} - T_{vloer})$, waarin C_1 = warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen de gemiddelde pijptemperatuur T_{pipe} en de oppervlaktetemperatuur van de betonvloer T_{vloer} , per m^2 vloeroppervlak. De afgegeven warmte door de betonvloer en de warmtestroom HF_{vlair} wordt geconcentreerd in HF_{vlair} . Indien tijdens de metingen de ramen gesloten blijven, is HF_{vent} het warmteverlies dat door natuurlijke ventilatie optreedt. De termen $HF_{airgl} + HF_{vent}$ worden nu beschouwd als een bepaalde kasbelasting $HF_{out} = HF_{airgl} + HF_{vent}$. Deze kasbelasting wordt nu benaderd door $HF_{out} = K \cdot (T_{kasl} - T_{buit})$, waarin T_{buit} de optredende buitentemperatuur is en K de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kas. Voor de door de betonvloer geleverde warmte kan nu worden geschreven: $HF_{vlair} = \alpha (T_{vloer} - T_{kasl})$, waarin α de overdrachtscoëfficiënt van de vloer is. Voor beide warmtebalansen geldt nu:

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_{kasl}}{dt} &= \frac{C_{air}}{V_{air}} = \alpha (T_{vloer} - T_{kasl}) - K (T_{kasl} - T_{buit}) \\
 \frac{dT_{vloer}}{dt} &= \frac{C_{vloer}}{V_{vloer}} = C_1 (T_{pipe} - T_{vloer}) - \alpha (T_{vloer} - T_{kasl})
 \end{aligned}$$

De overdrachtsfunctie van de gemiddelde buistemperatuur naar de kasluchttemperatuur valt nu uiteen in twee gedeeltes. Indien T_{buit} constant wordt verondersteld, geldt voor de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie T_{kasl} als gevolg van T_{vloer} :

$$\begin{aligned}
 \frac{T_{kasl}(s)}{T_{vloer}(s)} &= \frac{-T_{dl} \cdot s \cdot e}{t_1 \cdot s + 1} \\
 \text{Waarbij: } t_1 &= \frac{C_{air}}{\alpha + K} \quad \text{en} \quad K_{pl} = \frac{\alpha}{\alpha + K}
 \end{aligned}$$

Waarin:

t1 = eerste orde tijdconstante.

Kp1 = Procesversterkingsfactor.

Wanneer in het deelproces : variatie van Tvloer ten gevolge van Tpipe, de Tkas1 constant wordt verondersteld, is voor de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie van dit deelproces te schrijven:

$$\frac{Tvloer(s)}{Tpipe(s)} = \frac{Kp2 \cdot e^{-Td2.s}}{t2.s + 1}$$

$$\text{Waarbij: } t2 = \frac{Cvloer}{\alpha + C1} \quad \text{en} \quad Kp2 = \frac{C1}{\alpha + C1}$$

Waarin:

t2 = eerste orde tijdconstante.

Kp2 = Procesversterkingsfactor.

De totale overdrachtsfunctie Tkas1(s) ten gevolge van variaties van de gemiddelde buistemperatuur is een cascade-schakeling van twee eerste orde systemen. Doordat de tijdconstante van de vloer t1 een factor tien hoger is dan de tijdconstante van de kas t2, is hier in belangrijke mate sprake van een dominant 1e orde gedrag. De responsiemetingen die aan de verwarmde betonvloer zijn verricht, worden dan ook op deze wijze geïnterpreteerd. Doordat de regelparameter voor de slave-regelaar de aanvoer-temperatuur van de buis is (TANVLO), zal er eveneens een overdracht bepaald moeten worden van variaties van TANVLO ten gevolge van klepstandveranderingen. Dit 'slave-proces' wordt benaderd door een eerste orde systeem. Als ingangsgrootte voor het 'master-proces' is nu de aanvoertemperatuur van de vloer gedefinieerd. Uitgaande van de bepaalde overdrachtsfunctie, kan afgezien van sommige gewijzigde procesparameters, eenzelfde eerste orde functie in combinatie met een dode tijd voor de overbrengingsverhouding Tkas1(s)/TANVLO(s) worden geschreven. De bepaling van de overdrachtsfunctie van het 'master-proces' indien ketelwarmte wordt toegediend, kan op gelijke wijze als in hoofdstuk 4.2 voor afdeling 5 gevonden, worden geschreven:

$$\frac{Tkas1(s)}{TANKW(s)} = \frac{Kp \cdot e^{-Td.s}}{t.s + 1}$$

De responsies van het 'master-proces' voor restwarmte en ketelwarmte zijn hieronder vermeld:

AFDELING 6

RESPONSIES RESTWARMTE-NET: 0 -> 100 % VERWARMEDE BETONVLOER

DATUM	SC	TIJDC [uur]	WINDSP [m/s]	Td [uur]	Tkls [oC]	Tbuit [oC]
150986	CL	12	0,5	5	*14,6	7,0

Zonder planten in de kas:

220986	CL	12	1.0	5,5	\$22,2	13
--------	----	----	-----	-----	--------	----

RESPONSIES KETELWARMTE-NET: 0 -> 100 % ALCOA-NET

DATUM	SC	TIJDC [min]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Tkls [oC]	Tdif1 [oC]	Tdif2 [oC]
300886	OP	46	3.0	14	*16,2	11,8	73,0
030986	CL	50	2,5	14	*18,0	15,8	72,0

Zonder planten in de kas:

240986	CL	30	0,5	14	*18,0	23,3	72,5
280986	OP	30	0,6	14	*14,8	16,5	72,0

Allereerst volgen een aantal opmerkingen naar aanleiding van de responsies van de verwarmde betonvloer. Uit een groot aantal meetnachten zijn er twee geselecteerd, waarbij een globaal eerste orde gedrag is af te schatten. Bij alle andere blijken de buiteninvloeden belangrijke storingsfactoren te zijn in relatie tot het ingebrachte vermogen (54 W/m²). Pas wanneer de buiten-temperatuur praktisch constant is, de windsnelheid een constante lage waarde heeft en geen neerslag optreedt, is een eerste orde gedrag te herkennen. De tijdconstante TIJDC die op deze wijze wordt gevonden bedraagt 12 uur. De dode tijd Td van dit regel-proces blijkt 5 uur te zijn. Evenals bij de tijdconstante is het bepalen van de proces-versterkingsfactor geen eenvoudige zaak. Aan de hand van het ingebrachte vermogen, het warmteverlies van de kas en de buitenomstandigheden, wordt een schatting gemaakt van de stationaire situatie die na een sprongvormige verandering aan de ingang van het proces zou optreden. Deze procedure is noodzakelijk doordat vanwege de grote traagheid van de verwarmde betonvloer de buitenomstandigheden een te grote invloed op de te meten Tkals uitoefenen. De stationaire situatie zal namelijk niet binnen een etmaal optreden. De afschatting van de procesparameters die op deze wijze plaatsvindt, is onvoldoende nauwkeurig om hierop de invloed

van het gewasstadium in rekening te brengen.

In fig. 5.2.2 is een responsie van de verwarmde betonvloer gegeven, met het bijbehorende buitenklimaat.

Het werkelijke fysische proces van de verwarmde betonvloer, is een complex hogere orde systeem, waarop allerlei storingen van invloed zijn (Verwaayen, 1985). Dit is echter voor het ontwerp van een praktische regeling niet zonder diepgaand onderzoek (simulatiemodellen) op een eenvoudige wijze hanteerbaar. Van daar dat voor de systeemidentificatie voor een eerste orde benadering is gekozen. Indien via het theoretisch bepaalde vereenvoudigde model de tijdconstante van het dominante eerste orde proces wordt berekend, dan volgt voor TIJDC een waarde van ongeveer 7 uur. Dit blijkt niet overeen te komen met de door middel van stapresponsies bepaalde waarde. Dit is een gevolg van de uitvoering van het verwarmingssysteem. Installatie-technisch ziet het verwarmingssysteem er uit als in fig. 5.2.3.

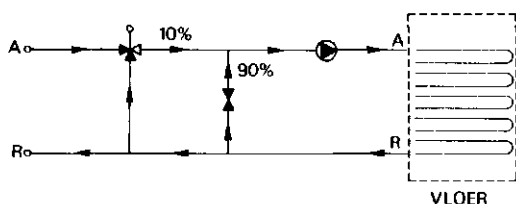


fig. 5.2.3

Doordat het geïnjecteerde debiet maar maximaal 10 % en het recirculatiedebiet 90 % van het totale debiet door de verwarmde betonvloer is, kan maar een geringe verhoging van het ingebrachte vermogen in de vloer tot stand worden gebracht. Bij de theoretisch bepaalde tijdconstante wordt er van uitgegaan dat stapvormige verstoring van de aanvoertemperatuur van het verwarmingssysteem mogelijk is. Dit is vanwege de uitvoering van het verwarmingssysteem niet het geval. Hierdoor is de tijdconstante van het regelsysteem regeltechnisch onaanvaardbaar geworden. In vervolgonderzoek zal met een gewijzigde opzet worden gewerkt.

Het 'master-proces' indien ketelwarmte is bijgeschakeld, wordt voldoende nauwkeurig beschreven door een eerste orde proces in combinatie met een dode tijd. Wanneer de schermen open zijn, is het verloop van T_{kas1} als gevolg van een stapvormige verstoring van de aanvoertemperatuur van het ketelwarmtenet TANALC zoals is weergegeven in fig. 5.2.4.

Worden nu de schermen gesloten, dan geldt de responsie in

fig. 5.2.5. Beide responsies zijn opgenomen met de aanwezigheid van een volgroeid gewas in de kas. Voor de kas zonder een gewas geldt met beide schermen open fig. 5.2.6 en met het schaduw- en energiescherm dicht fig. 5.2.7. Samengevat kunnen uit de responsiemetingen aan de verwarmde betonvloer de volgende conclusies worden getrokken.

- De gemeten tijdconstante van het regelproces is te groot in vergelijking met de theoretisch bepaalde waarde. De uitvoering van het verwarmingssysteem is hier verantwoordelijk voor. Regeltechnisch is dit een onaanvaardbare waarde.
- Door het geringe vermogen dat door de verwarmde betonvloer geleverd wordt, in combinatie met de grote tijdconstante, is door middel van responsiemetingen de invloed van het gewas op de procesparameters moeilijk af te schatten.

Indien ketelwarmte wordt toegediend gelden de volgende opmerkingen voor dit regelsysteem:

- Zijn de schermen geopend, dan heeft de windsnelheid invloed op de tijdconstante van het proces. Deze beïnvloeding wordt vrijwel teniet gedaan door het sluiten van de schermen.
- De dode tijd van het proces is onafhankelijk van de kasbelasting en de schermstanden. Dit is een parameter die gebonden is aan de keuze van een bepaald verwarmingssysteem.
- Het proces is aanzienlijk sneller indien er geen gewas aanwezig is. Dit komt duidelijk tot uiting in de responsiemetingen.
- Indien responsiemetingen worden verricht, waarbij hoge stationaire kasluchttemperaturen worden bereikt, zal bij een volgroeid gewas ook 's nachts de verdampingsenergie aanzienlijk toenemen (Stanghellini, 1987). Deze beïnvloeding komt sterk tot uitdrukking in de K-waarde van de kas.
- De tijdconstante TIJDC is praktisch onafhankelijk van de schermstanden.

Op een soortgelijke wijze als in afdeling 5 het geval is, kan in afdeling 6 voor de procesversterkingsfactoren worden gevonden:

$K_p\text{-restwarmte} = 0,7$

$K_p\text{-ketelwarmte} = 0,32$

Voor de bepaling van de overdrachtsfuncties van de 'slaveprocessen' zijn op de regelkleppen stapvormige verstoringen aangebracht. De ingangsgrootte van deze processen is de stand van de regelklep, de uitgangsgrootte is de aanvoertemperatuur van het betreffende verwarmingsnet. De gegevens die uit de responsiemetingen zijn bepaald worden aangegeven in de volgende tabel:

RESPONSIEMETINGEN SLAVE SYSTEEM RESTWARMTE afdeling 6

DATUM	SC	TIJDC	WINDSP	Td	Kps
	[min]	[m/s]	[min]	[oC/s]	
210886	CL	20	0.2	2	0.09
220886	CL	20	0.1	2	0.09

RESPONSIEMETINGEN SLAVE SYSTEEM KETELWARMTE afdeling 6

DATUM	SC	TIJDC	WINDSP	Td	Kps
		[min]	[m/s]	[min]	[oC/s]
030986	CL	3	0.2	2	0.5
190986	CL	3	0.0	2	0.5

De procesparameters van de beide systemen zijn herleid naar parameters van een eerste orde proces in combinatie met een dode tijd. Voor het 'slave-proces' van de regeling met de verwarmde betonvloer, geldt in principe hetzelfde als voor het 'master-proces' van de regeling. De mate van variatie van het buitenklimaat is vanwege de grote traagheden dusdanig groot, dat de bepaling van de procesparameters ook hier een benadering is. In fig. 5.2.8 is het verloop van TANVL ten gevolge van een variatie van de restwarmte-regelklep gegeven. In deze responsie is duidelijk een eerste orde gedrag te herkennen. De aanvoertemperatuur van het verwarmingssysteem dat door ketelwarmte wordt gevoed (ALCOA-pijpen), gedraagt zich zeer snel onder invloed van variatie van de bijbehorende regelklep. De tijdconstante van dit 'slave-proces' bedraagt ongeveer 3 minuten. Evenals bij het 'slave-proces' in de afdeling met luchtverwarming, voldoet de minimale bemonsteringstijd ook hier niet aan de gestelde eisen. Doordat het hier een volgregering betreft, is het evenwel mogelijk een kaslucht-temperatuurregeling te ontwerpen die aan stabiliteitscriteria voldoet. De bepaalde procesparameters van dit regelproces zijn onafhankelijk van variatie van het buitenklimaat en schermstanden.

5.3 Regelprogramma vloer/ALCOA-net

In principe is het ontwerp voor een regelalgorithme zo algemeen mogelijk opgezet. Dit zou moeten resulteren in een universeel toepasbaar regelalgorithme bij het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte. Bij het bepalen van de systeemparameters is gebleken, dat de tijdconstante van het regelsysteem indien restwarmte is ingeschakeld (verwarmde betonvloer) aanzienlijk groter is dan werd aangenomen. Aangezien het bij deze installietechnische uitvoering niet mogelijk is om binnen een etmaal het vermogen van de verwarmde vloer beschikbaar te krijgen, is een voorspellende regeling hier niet haalbaar. Evenals in afdeling 5, is voor de kaslucht-temperatuurregeling een 'feed-back' regeling van toepassing.

De geregelde grootheid voor de slave-regelaar ketelwarmte, (aan-

voertemperatuur ketelnet TANALC), kan echter sneller variëren dan volgens dit theorema toelaatbaar is. Dit houdt in dat zonder verdere maatregelen vervorming van het signaal op zal treden (distorsie). In het algemeen moet er voor gezorgd worden dat indien de bemonsteringsfrequentie niet hoog genoeg kan worden gekozen, de hoogfrequent componenten in het te bemonsteren signaal worden uitgefilterd voor de bemonstering. Dit filteren wordt ook wel 'anti aliasing filtering' genoemd, en dient om distorsie te voorkomen.

In de praktijk betekent dit dat bij de instelling van dit regelproces voorzichtigheid geboden is ten aanzien van de stabiliteit van het geregelde proces.

Doordat de verhouding van de tijdconstante en de dode tijd van de beide regelprocessen op een vergelijkbare waarde ligt als bij het regelsysteem in afdeling 5, kan ook hier een PI-regelaar als doelmatig worden beschouwd.

In het kort kunnen een aantal voorwaarden worden vermeld, die bepalend zijn voor de ontworpen regelconfiguratie.

- De verwarmde betonvloer en het ALCOA-net hebben ten opzichte van elkaar een sterk afwijkend regeltechnisch gedrag. Hierdoor is de toepassing van een meervoudige master-regelaar een vereiste.
- Evenals in afdeling 5, zal ook hier de gestelde maximale retourtemperatuur van het restwarmtenet door de toepassing van de verwarmde betonvloer niet worden bereikt. Doordat gestreefd is naar een universeel toepasbaar regelalgoritme, is deze voorwaarde (de maximale retourtemperatuur) echter wel aanwezig in de regeling. De beschrijving van deze voorwaarde in het regelalgoritme, zal in afdeling 7 aan de orde komen.
- Evenals in de andere afdelingen zal ook in deze afdeling de restwarmtebron als eerste moeten worden aangesproken. Ketelwarmte mag pas worden geleverd indien het restwarmtenet volledig is uitgestuurd. Het geheel zal volgens een soepele overschakeling moeten plaatsvinden. Het principeschema van de regelconfiguratie ziet er uit als fig. 5.2.1.

Doordat het in deze afdeling niet mogelijk is dat de maximale retourtemperatuur van het restwarmtenet wordt overschreden, valt het overschakelen uiteen in:

- Overschakeling van restwarmte naar rest- en ketelwarmte, indien de warmtevraag van de kas hiertoe aanleiding geeft.
- Vanuit deze situatie een terugschakeling naar alleen restwarmte, wanneer de vraag kleiner wordt.

In afdeling 5 had, doordat men hier te maken heeft met een enkelvoudige master-regelaar, het overschakelen van en naar de verschillende warmtebronnen geen invloed op de uitgang van de master-regelaar (setpoint voor de temperatuur van de uitblaaslucht van de luchtverhitter is voor zowel rest- als ketelwarmte een gezamenlijke parameter). Doordat voor afdeling 6 een meervoudige master-regelaar noodzakelijk wordt geacht, zal het overschakelen van en naar de verschillende warmtebronnen ook op deze keuze betrekking hebben. In het hierna volgende zal het overschakelalgoritme kort worden weergegeven.

Indien de kasbelasting zodanig is, dat het restwarmtenet de warmtebehoefte kan dekken, dan regelt de master-regelaar voor restwarmte met behulp van de verwarmde betonvloer de vereiste luchttemperatuur in de kas. Wordt door een belastingverhoging

het restwarmtenet 100 % open gestuurd, dan wordt het setpoint voor de buistemperatuur van dit net (uitgang master-regelaar restwarmte) gelijk aan deze buistemperatuur TANVL (aanvoertemperatuur RW-net). Dit betekent dat het stuursignaal voor de regelklep van de betonvloer nul wordt, m.a.w. de regelklep behoudt zijn positie. Is nu de afwijking tussen het setpoint en de gerealiseerde kasluchttemperatuur positief, maar niet groter dan een waarde X1, dan zal een vertragingstijd TOMS moeten verstrijken alvorens naar ketelwarmte wordt overgeschakeld. Wordt de afwijking gedurende de vertragingstijd wel groter dan X1, dan wordt direct overgeschakeld naar ketelwarmte. Indien aan een van de overschakelcondities wordt voldaan, dan zal de uitgang van het integratie-algoritme van de master-regelaar KW, gelijk worden aan de actuele buistemperatuur van het ketelwarmtenet (TANALC). Dit wordt nu het startpunt waarop deze regelaar gaat functioneren. Een indicatievariabele in het regelalgoritme geeft aan dat de master-regelaar KW in bedrijf is gekomen. Op deze wijze wordt een soepele overname gerealiseerd van het regelen op restwarmte naar het regelen met behulp van ketelwarmte. Wanneer zowel rest- als ketelwarmte wordt geleverd, en er treedt een situatie op waarbij de regelklep voor ketelwarmte weer op 0 % komt, dan heeft men te maken met de omschakeling naar alleen restwarmte. De schakelprocedure is als volgt. Wordt geconstateerd dat $VALVE-KW = 0 \%$, en het foutsignaal $EPSIL1$ ($EPSIL1 = \text{setpoint TKASL} - \text{gemeten TKASL}$) is negatief, maar niet negatiever dan een waarde X2, dan wordt een vertragingstijd TOMS ingeschakeld. Is aan een overschakelconditie voldaan, dan zal de uitgang van het integratie-algoritme van de master-regelaar RW gelijk worden aan de actuele buistemperatuur van het RW-net (TANVL). Van hieruit gaat de master-regelaar RW functioneren. Wanneer nu gedurende de overschakeling van restwarmte naar rest- en ketelwarmte het foutsignaal $EPSIL1$ van positief naar negatief verandert (te warm in de kas), dan wordt gelijktijdig teruggeschakeld naar restwarmte. Wordt bij overschakeling van rest- en ketelwarmte naar restwarmte $EPSIL1$ weer positief, dan wordt ook hier gelijktijdig teruggeschakeld naar rest- en ketelwarmte. Zowel de uitvoering van de master-regelaar voor restwarmte als die voor ketelwarmte, is gelijk aan de bij afdeling 5 beschreven regelaar.

Het uitgangssignaal van de master-regelaars is het setpoint voor de buistemperatuur van het betreffende verwarmingssysteem. Een slave-regelaar uitgevoerd met een proportionele regelactie, zorgt er in beide gevallen voor dat de buistemperatuur het uitgangssignaal van de bijbehorende master-regelaar zo goed mogelijk volgt. Doordat de overdrachtsfunctie van de regelklep een sterk niet-lineair gedrag vertoont, is hiervoor een aanpassing gemaakt. Deze aanpassing is afwijkend ten opzichte van de aanpassing van de slave-regelaar van afdeling 5, omdat het afkoelgedrag van de verwarmingssystemen in afdeling 6 sterker niet-lineair is. Beneden een klepstand van 10 %, is de klepversterking aanzienlijk kleiner dan bij een grotere klepstand. Door een algoritme zal nu, indien het stuursignaal positief is, de klep geforceerd in haar regelgebied worden gebracht volgens:

$$STKLM(S) = STKLM(S) + (10 - KLEPSTAND [\%])$$

Een soortgelijke actie vindt plaats indien het stuursignaal negatief is.

5.4 Beoordeling regeling afdeling 6

Er is al eerder op gewezen dat indien een verwarmingssysteem een tijdconstante bezit zodanig dat binnen een etmaal het volledige vermogen niet beschikbaar kan komen, dit regeltechnisch een onaanvaardbare situatie is. Niettemin is voor een feedback-control gekozen met behulp van een cascade-regeling. De parameters van deze regelacties zijn op een andere wijze bepaald dan gebruikelijk is. Door vanuit een bepaalde regelsituatie een afschatting te maken van het maximaal optredende verval van de luchttemperatuur, is een regeling mogelijk die door de adequate bijschakeling en regeling van het ketelwarmtenet met de betreffende installatie als doelmatig kan worden beschouwd. Dit houdt in dat wanneer bijvoorbeeld het signaal EPSILI (gewenste Tkasl - gemeten Tkasl) een bepaalde waarde overschrijdt, de betonvloer maximaal opengeregeld moet zijn. Op basis van een theoretische instelling zou de proportionaliteitsfactor van de master-regelaar restwarmte $K_r = 3.0$ moeten zijn. Echter bij deze instelling reageert de regelklep te traag om aan de bovengenoemde voorwaarde te voldoen. Een P-factor van $K_r = 9.0$ is als meest gunstig naar voren gekomen. De bijbehorende integratie-constante $KBINT = 22.0$. Duidelijk moge zijn dat de master-regelaar voor de verwarmde betonvloer maar een zeer geringe invloed uit kan oefenen op de te regelen grootte. Op deze wijze is echter wel een situatie gecreeerd, waardoor bij het regelen met de betonvloer geen grote undershoots zullen optreden. Door de te grote traagheden van het restwarmte-regelsysteem, zal in dynamische overgangssituaties, waarbij de warmtevraag $< 54 \text{ W/m}^2$ is, het ketelnet eerder bijgeschakeld worden. Dit bijschakelen van het ketelwarmtesysteem, terwijl het volledige vermogen van het restwarmtesysteem nog niet beschikbaar komt, is inherent aan de traagheid van de betonvloer in combinatie met het regelprincipe.

In eerste instantie lijkt hierdoor de hoeveelheid geleverde restwarmte aanzienlijk verminderd. Indien men dit echter niet momentaan, maar over een langere periode (aantal dagen) beschouwd, zal zich een bepaald gemiddeld niveau instellen. De hoogte van dit niveau is uiteraard afhankelijk van de kasbelasting, maar ook van het aantal dynamische overgangen binnen de beschouwde periode. Het spreekt voor zich dat het op deze wijze regelen vooral tot zijn recht komt, indien wordt gestreefd naar een zo stationair mogelijke setpointwaarde voor de luchttemperatuur in de kas.

Voor de proportionaliteitsfactor van de slave-regelaar restwarmte, is $KBLINM = 1.5$ als meest gunstige waarde gevonden. Doordat vanwege de hoeveelheid circulerend retourwater, de aanvoertemperatuur van de verwarmde betonvloer ook bijzonder traag reageert, zal de betrouwbaarheid van deze P-regeling gering zijn.

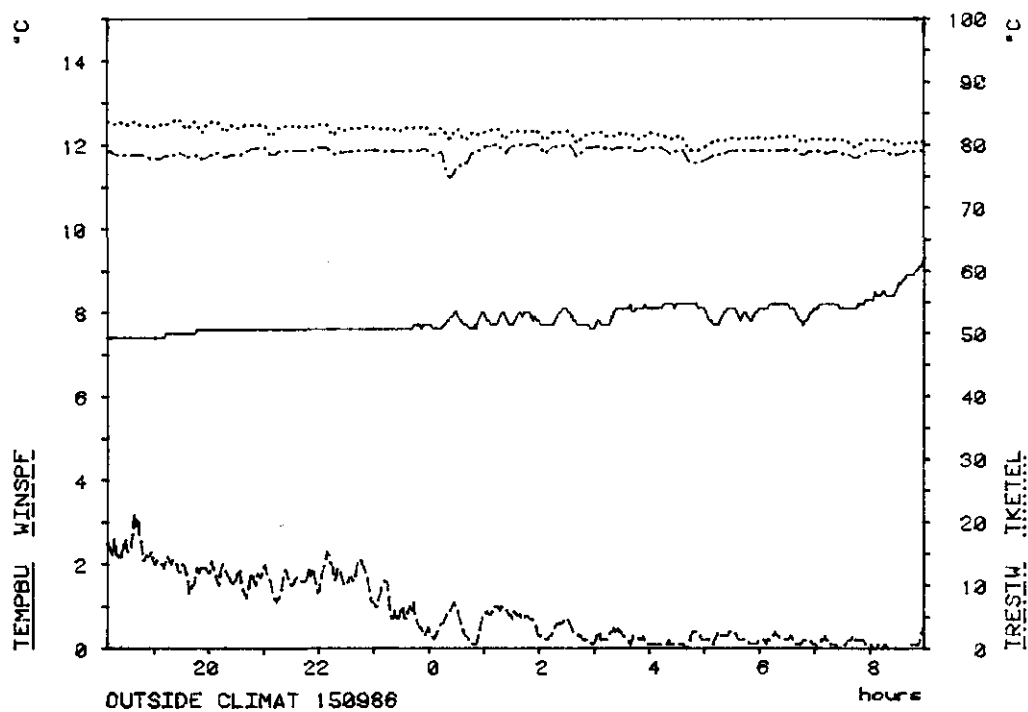
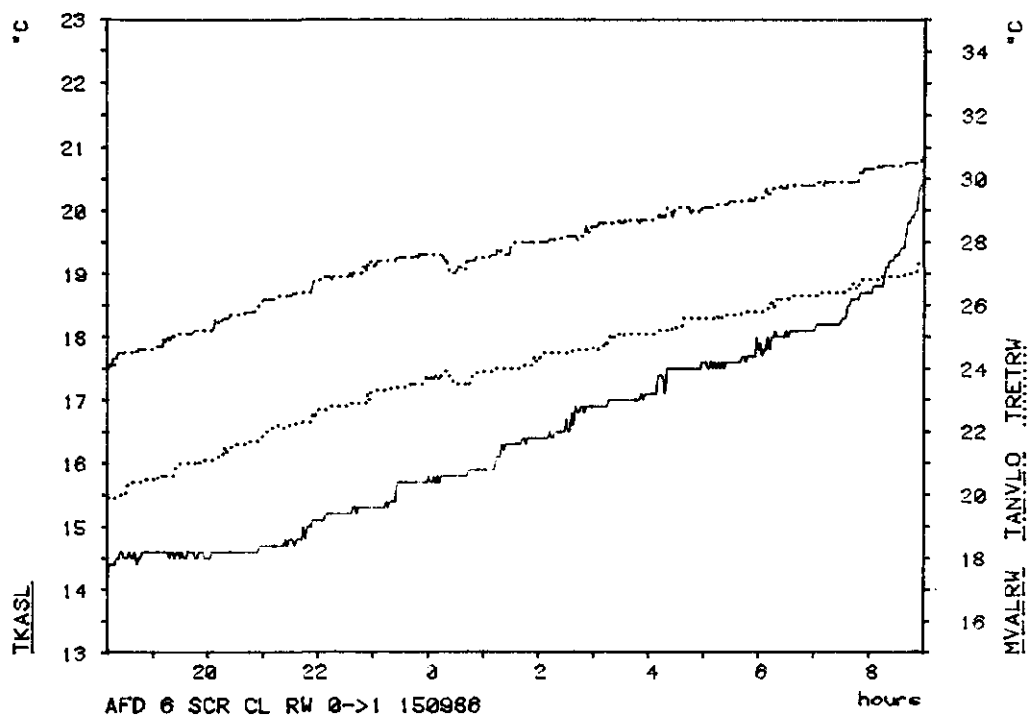


Fig. 5.2.2

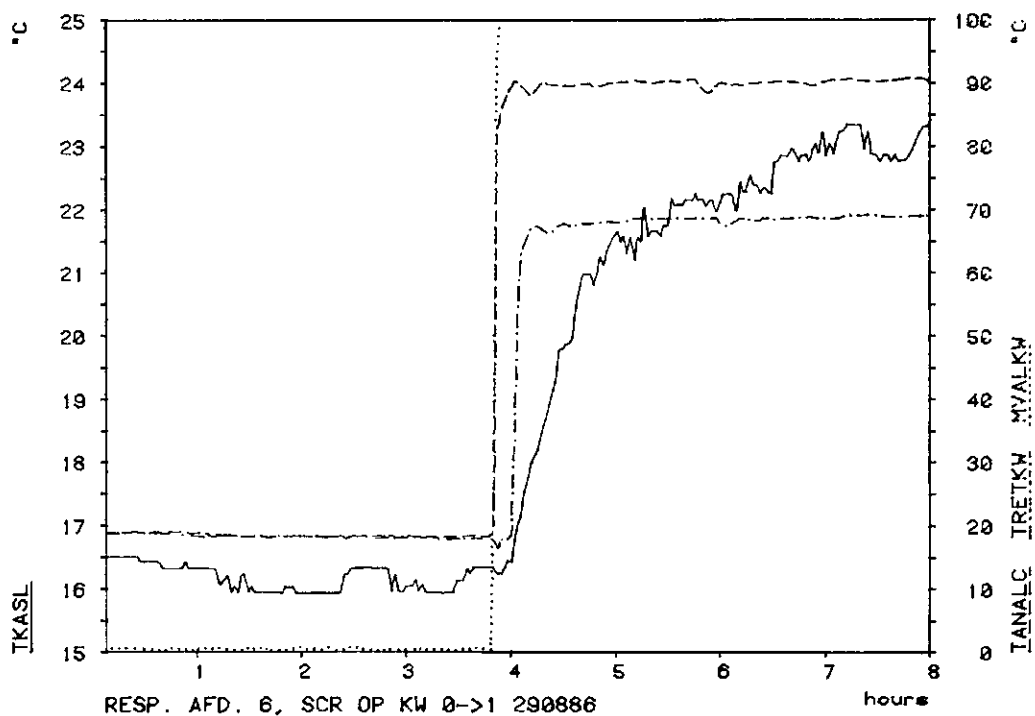


Fig. 5.2.4

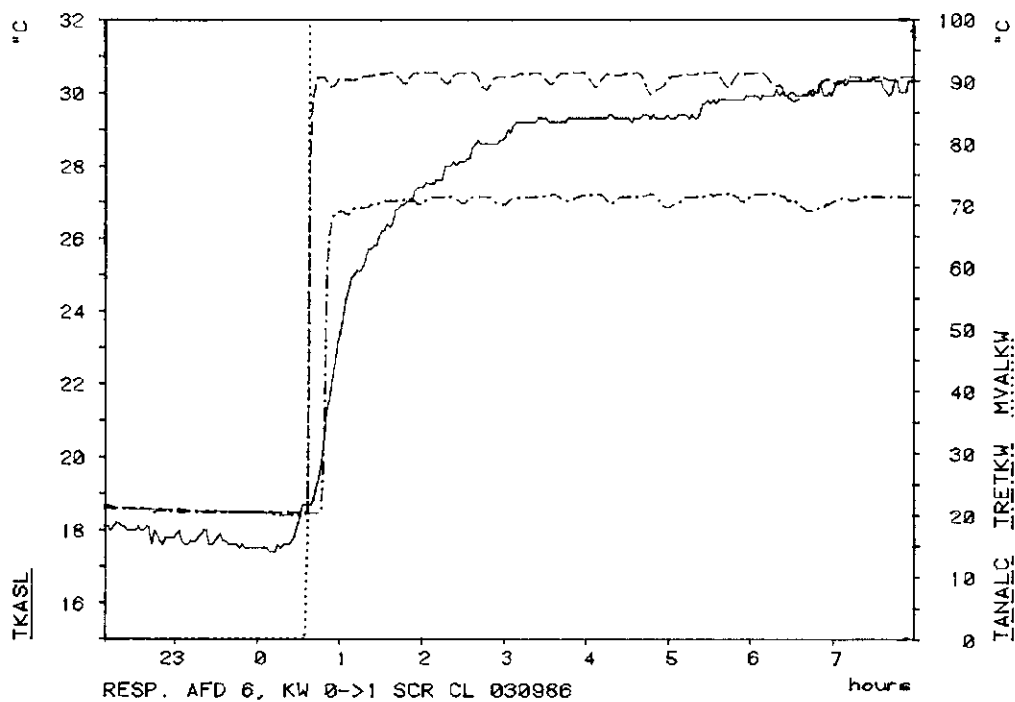


Fig. 5.2.5

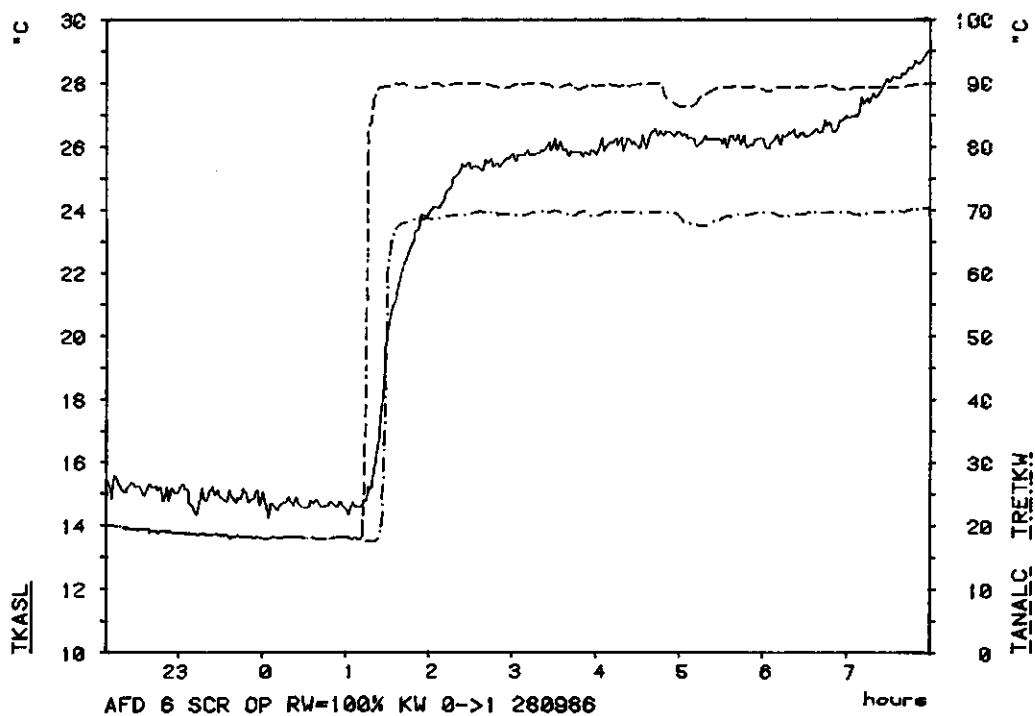


Fig. 5.2.6

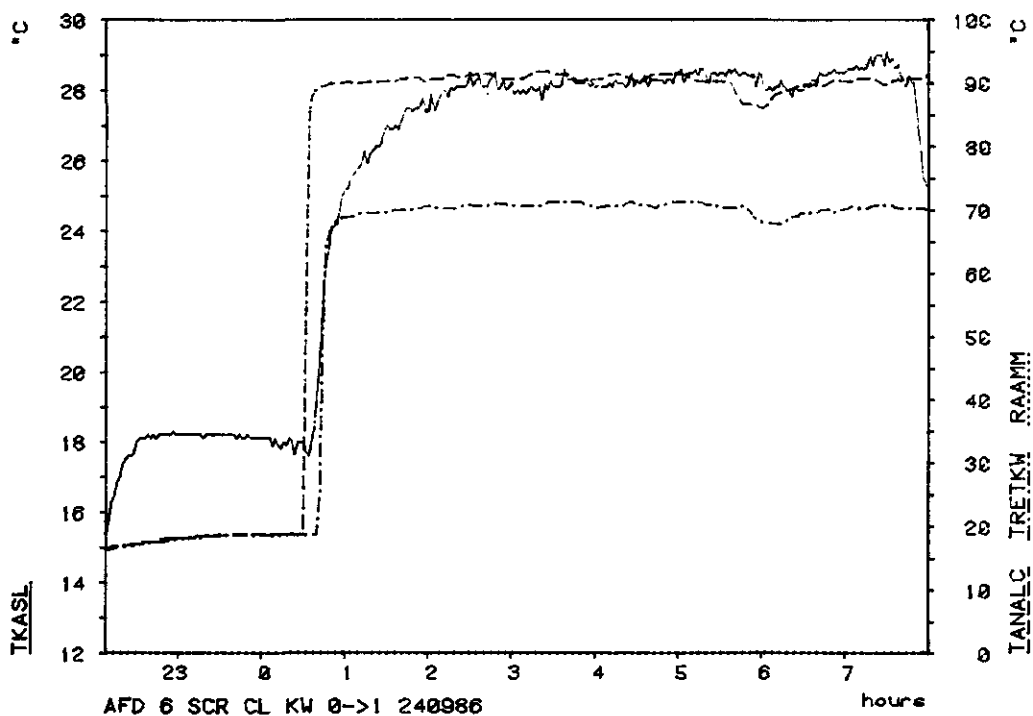


Fig. 5.2.7

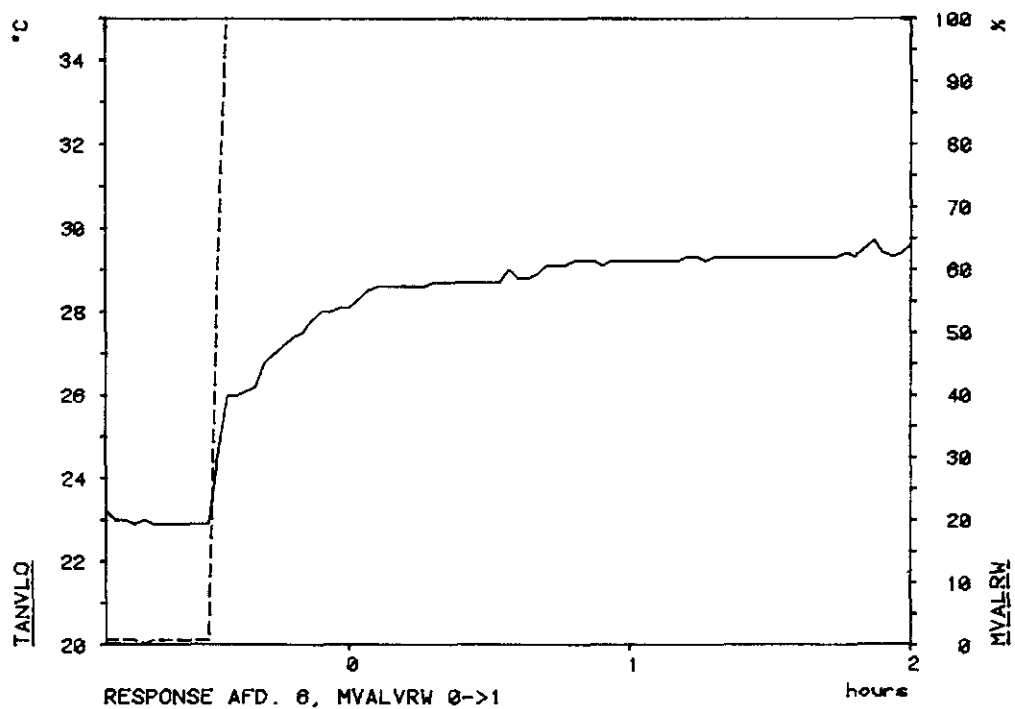


Fig. 5.2.8

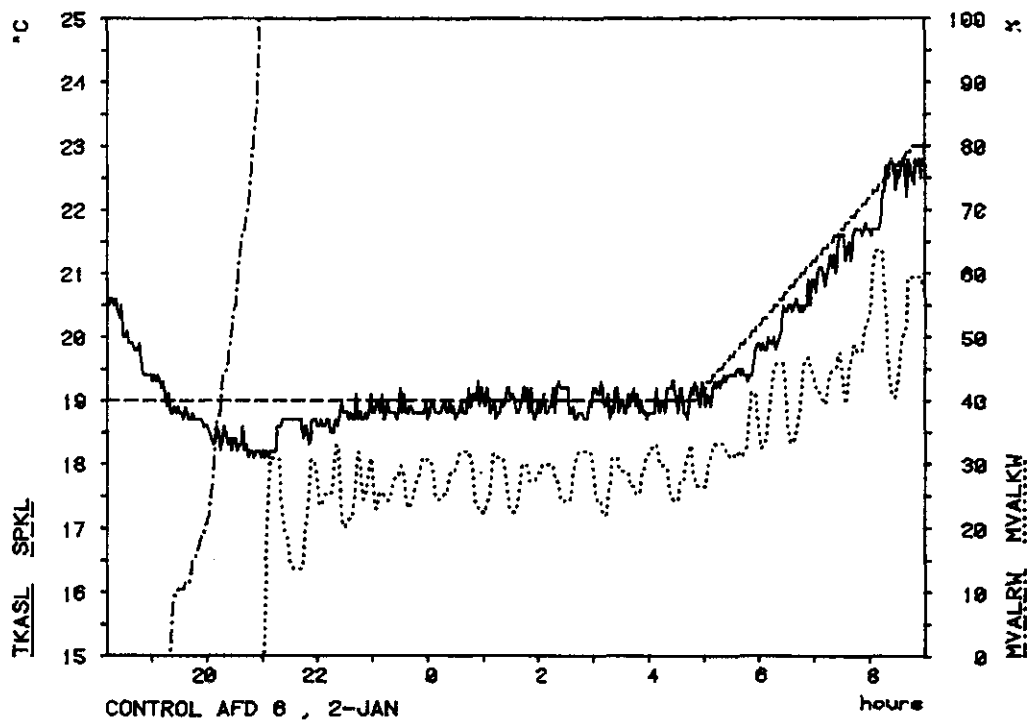


Fig. 5.4.1

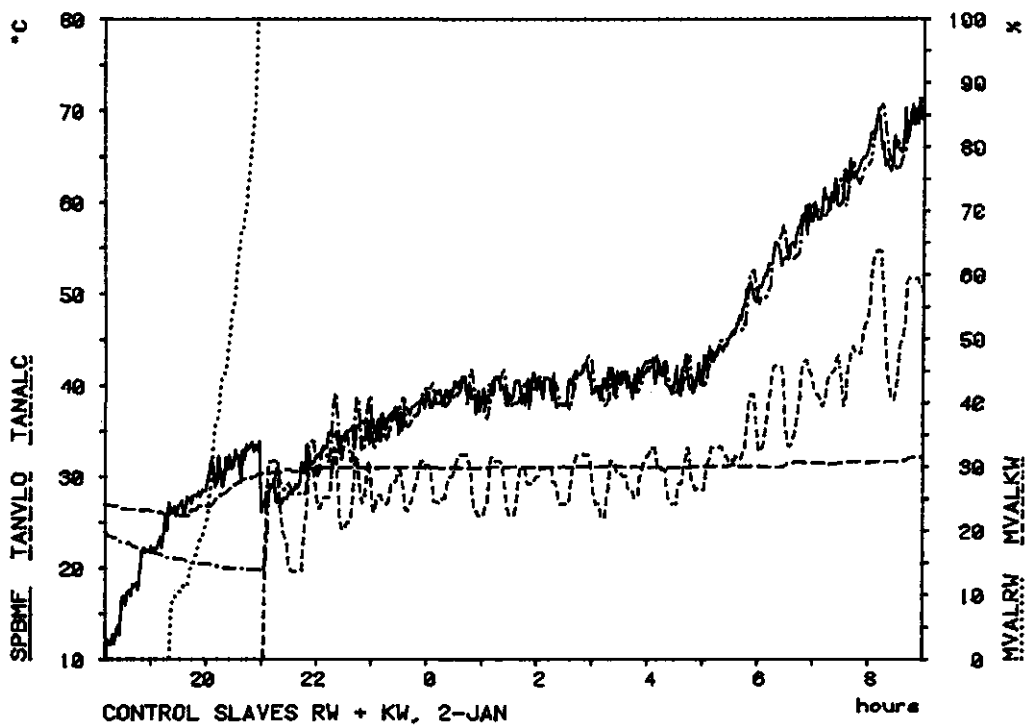


Fig. 5.4.2

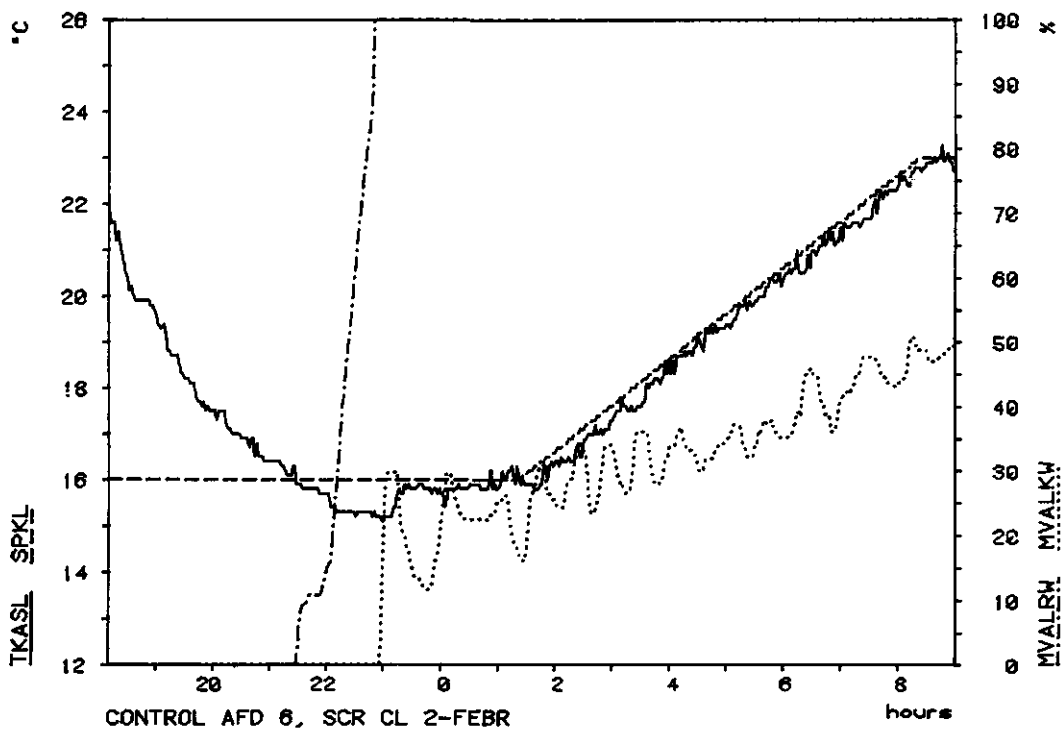


Fig. 5.4.3

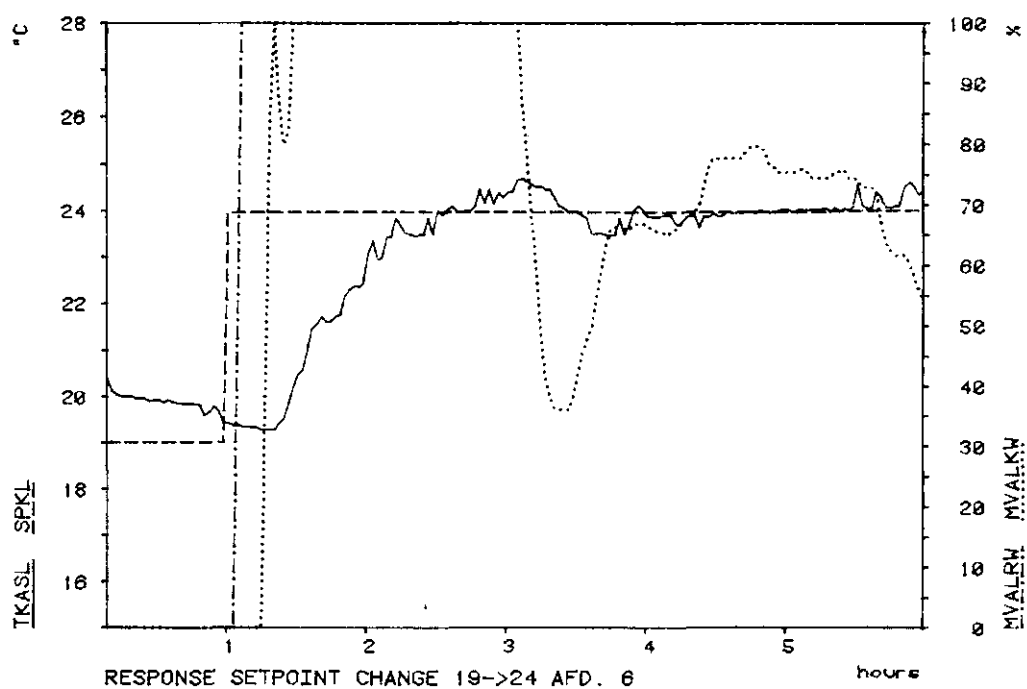


Fig. 5.4.4

Op basis van de gemeten systeemeigenschappen van het door ketelwarmte gevoede verwarmingsnet, werd voor de proportionaliteitsfactor $K_{kw} = 6.0$ en voor de integratieconstante $KBINT = 3.0$ gevonden. Nu blijkt dat bij dynamische overgangssituaties met het integratiealgoritme een zodanige vertraging ontstaat, dat dit bij het schakelen van en naar restwarmte ontoelaatbare overgangsverschijnselen veroorzaakt. Om deze reden is de bijdrage van het integratiealgoritme verhoogd, wat resulteert in een integratieconstante van $KBINT = 0.5$ ($KBINT$ is omgekeerd evenredig met de bijdrage van de acties). In combinatie met het aanwezige omschakelalgoritme levert dit een bevredigend resultaat. In fig. 5.4.1 en 5.4.2 is een meetnacht opgenomen waarbij de schermen in de kas geopend zijn. In fig. 5.4.1 is de geregelde kasluchttemperatuur $TKASL$ uitgezet met het setpoint en de standen van de restwarmte- en de ketelwarmteklep ($MVALRW$ en $MVALKW$). Indien er een foutsignaal ontstaat, zal de regeling eerst het restwarmtenet aanspreken. Zoals eerder vermeld, zijn de regelparameters van de master-regelaar restwarmte zodanig bepaald, dat de luchttemperatuur niet verder dan ongeveer $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ zakt onder het setpoint alvorens het ketelwarmtenet aangesproken wordt. De master-regelaar ketelwarmte zal bij het volledig opensturen van het restwarmtenet de regeling overnemen. In fig. 5.4.2 is het gedrag van de slave-regelaars afgebeeld. Indien het RW -net in bedrijf is, dan is $SPBMF$ het setpoint voor de gewenste aanvoertemperatuur van dit net. Is of komt het KW -net in bedrijf, dan is $SPBMF$ dit voor het KW -net. Vanaf ongeveer 19:20 uur, wordt $SPBMF$ groter dan de te regelen waarde $TANVLO$. Dit houdt in dat de slave-regelaar RW de regelklep van de vloer openstuurt. Aangezien er nog steeds een foutsignaal aanwezig is van de geregelde $TKASL$, zal na het volledig openen van de regelklep van de vloer om 21:00 uur het ketelwarmtenet aangestuurd worden. In het verdere verloop van de responsie is te zien dat $TANALC$ het setpoint $SPBMF$ uitstekend volgt, hetgeen betekent dat bij een instelling van $KBLINS = 2.0$, de slave-regelaar voldoet aan de eisen. In fig. 5.4.3 is een meetnacht weergegeven waarbij de schermen gesloten zijn. Ook hier is het adequate bijregelen van het ketelwarmtenet ($ALCOA$ -pijpen) waar te nemen. Tenslotte is in fig. 5.4.4 een responsiemeting te zien waarbij het setpoint voor de geregelde luchttemperatuur in de kas stapvormig verandert van $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ naar $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Het optredende doorschot en de snelheid van het regelsysteem valt binnen de gestelde marges.

6. Regelalgorithme ALCOA-net in combinatie met 51mm net

6.1 Beschrijving verwarmingssysteem ALCOA/51mm-net

De restwarmte is hier aangesloten op een net van gevinde aluminium pijpen (ALCOA- pijpen). Indien de belasting $> 54 \text{ W/m}^2$ is, wordt ketelwarmte ingebracht door middel van een net van 51 mm stalen pijpen.

In deze afdeling zijn de verwarmingssystemen zodanig gekozen, dat tuinders met een bestaand 51 mm net op simpele wijze de verwarmingsinstallatie aan kunnen passen voor het gebruik van restwarmte in combinatie met de conventionele ketelwarmte. Door een relatief eenvoudige ingreep, welke het aansluiten van het ALCOA-net omvat, wordt de verwarmingsinstallatie geschikt voor restwarmtetoeepassingen.

Het restwarmtesysteem is dusdanig kritisch ontworpen dat de re-
tourtemperatuur in bepaalde situaties de gestelde randvoorwaarde van Tretour $< 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ overschrijdt. Dit betekent dat het regelalgorithme hierop adequaat zal moeten reageren.

6.2 Bepaling systeemeigenschappen ALCOA/51mm-net

Zoals bij de beschrijving van het regelalgorithme van afdeling 6 reeds is vermeld, is in principe het regelalgorithme van afdeling 7 hieraan gelijk. Men heeft hier wederom te maken met twee verwarmingssystemen met verschillende regeltechnische eigenschappen, wat het gebruik van een meervoudige master-regelaar noodzakelijk maakt. Dit houdt in dat ook hier de regelconfiguratie in fig. 5.2.1 van toepassing is.

De systeemeigenschappen worden bepaald aan de hand van de volgende overdrachtsfuncties:

- TANALC = $f(\text{VALVE RW})$: 'slave-proces' restwarmte
- TAN51 = $f(\text{VALVE KW})$: 'slave-proces' ketelwarmte
- TKASL = $f(\text{TANALC})$: 'master-proces' restwarmte
- TKASL = $f(\text{TAN51})$: 'master-proces' ketelwarmte.

Voor beide verwarmingssystemen geldt de benadering dat de overdrachtsfuncties van de regelprocessen gezien kunnen worden als een dominant eerste orde proces, in combinatie met een dode tijd.

De systeemeigenschappen afgeleid uit de metingen, die met behulp van stapresponsies tot stand zijn gekomen, zijn hieronder in tabelvorm weergegeven.

AFDELING 7

RESPONSIE RESTWARMTE-NET: 0 - > 100% ALCOA-NET

DATUM	SC	TIJDC [min]	Tdif1 [oC]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Tkls [oC]
280886	CL	70	11,7	2,5	14	*18,2
290886	CL	75	11,3	1,2	14	\$18,3

Zonder planten in de kas:

220986	CL	80	14,2	1,0	14	*21,0
240986	CL	78	17,3	0,5	14	*17,8
260986	OP	88	12,5	0,2	14	*14,7
270986	OP	90	13,6	0,2	14	*15,2

RESPONSIE KETELWARMTE-NET: 0 - > 100% 51 MM PIJPEN-NET

DATUM	SC	TIJDC [min]	Tdif1 [oC]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Tkls [oC]
300886	OP	90	10,1	3,0	16	*17,0
030986	CL	92	16,3	2,5	16	*17,7

Zonder planten in de kas:

160986	CL	90	23,2	1,2	16	\$16,8
250986	OP	85	17,9	0,5	16	\$13,5

Tdif1 is het uiteindelijk gehaalde temperatuurverschil tussen TKASL en TBUITEN.

In fig. 6.2.1 en fig. 6.2.2 zijn twee responsies van de bovenstaande tabel weergegeven. Hierin is duidelijk een dominant eerste orde gedrag te herkennen.

Naar aanleiding van de responsiemetingen kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- Uit de verrichte metingen blijkt dat het dynamisch gedrag onafhankelijk is van windsnelheid en schermstand. Dit betekent dat de dode tijd en de eerste orde tijdconstante van het proces door deze storingsvariatiës niet worden beïnvloed. Het grote aantal responsiemetingen geeft echter wel een variatie in de meetgegevens. De oorzaak van deze spreiding is

- met de toegepaste systeemanalyse niet naar voren gekomen.
- Bij het gebruik van stapvormige responsiemethoden dient men, indien zich een gewas in de kas bevindt, rekening te houden met de eindwaarde van de luchttemperatuur. Bij een hoge luchttemperatuur kan zelfs 's nachts een grote plantverdamping optreden. Doordat de toegepaste schermen waterdamp doorlatend zijn, zal bij een koud kasdek aanzienlijk veel waterdamp kunnen condenseren. Hierdoor blijft de relatieve vochtigheid laag, wat in combinatie met een hoge luchttemperatuur in de kas stimulerend werkt op de plantverdamping (Stanghellini, 1987).
 - Vooraf wanneer weinig vermogen beschikbaar is, zoals met het restwarmtesysteem het geval is, kan dit behoorlijke afwijkingen geven door de grotere K-waarde van de kas.
 - Opmerkelijk is het systeemgedrag van het restwarmtenet in relatie tot het wel en niet aanwezig zijn van een gewas in de kas. Wat namelijk verwacht zou mogen worden, zoals bij het ketelwarmtenet van afdeling 6 ook het geval is, is dat het systeem zonder planten sneller zal reageren dan met een gewas. Dit is uit de responsiemetingen niet gebleken, integendeel.

Uit een groter aantal metingen dan hier in de tabel zijn opgenomen, blijkt dat de windsnelheid een veel geringere invloed heeft op het statisch gedrag van de kas bij gesloten schermen, dan bij geopende schermen.

Aan de hand van onder andere de in de tabel weergegeven meetgegevens, zijn de volgende systeemeigenschappen bepaald:

Restwarmtesysteem: versterkingsfactor $K_p = 0,3$
 tijdconstante $TIJDC = 75 \text{ min}$
 dode tijd $T_d = 14 \text{ min}$

Ketelwarmtesysteem: versterkingsfactor $K_p = 0,4$
 tijdconstante $TIJDC = 90 \text{ min}$
 dode tijd $T_d = 16 \text{ min}$

Hieruit blijkt dat het regeltechnisch gedrag van het ALCOA-net en het 51 mm-net verschillend is. Met behulp van deze waarden kunnen de afzonderlijke master-regelaars ingesteld worden. Zowel het restwarmte- als het ketelwarmtesysteem zijn uitgevoerd met een slave-regelaar, die de berekende aanvoertemperatuur van het betreffende net regelt. Ten behoeve van de instelling van deze regelaar is het noodzakelijk te weten wat de kenmerkende systeemp parameters zijn van het slave-systeem. Als ingang van het proces wordt het stuursignaal voor de regelklep gedefinieerd, als uitgang van het proces de bijbehorende aanvoertemperatuur van het verwarmingssysteem. De gegevens uit de onderstaande tabel zijn bepaald met gebruikmaking van stapvormige verstoringen van de regelklep.

RESPONSIE-METINGEN SLAVE-SYSTEEM RESTWARMTE afdeling 7

DATUM	SC	TIJDC [min]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Kps [oC/s]
220986	CL	9	1.0	4	0.32
260986	OP	9	0.2	4	0.35
270986	OP	9	0.2	4	0.36

RESPONSIE-METINGEN SLAVE-SYSTEEM KETELWARMTE afdeling 7

DATUM	SC	TIJDC [min]	WINDSP [m/s]	Td [min]	Kps [oC/s]
300886	OP	13	3.0	5	0.43
030986	CL	13	2.5	5	0.42
250986	OP	13	0.5	5	0.42

Voorbeelden van responsies van het slave-proces rest- en ketel-warmte worden gegeven in respectievelijk fig. 6.2.3 en fig. 6.2.4.

Uit het verloop van de responsie is af te leiden, dat de benadering van de overdrachtsfunctie van beide systemen door een eerste orde proces met een dode tijd (inclusief discretisering van de regeling), een voldoende nauwkeurige beschrijving is. De gemeten grootheden zijn onafhankelijk van schermstand en buitenklimaat. Ook voor het bemonsteren van deze regelproces-sen geldt dat de bemonsteringstijd beter korter had kunnen zijn (praktische keuze bemonsteringstijd, zie par. 2.1.1).

6.3 Regelprogramma ALCOA/51 mm net

De beschrijving van het regelalgorithme voor deze afdeling is in haar principevorm gegeven in par. 5.3, exclusief de regelacties die plaatsvinden wanneer de retourwater temperatuur van het restwarmtenet (TRETAL) de gestelde grens van 40 oC overschrijdt. Dit kan in afdeling 7 optreden. Indien overschrijding van de maximale TRETAL plaatsvindt, zal het regelalgorithme zodanig moeten reageren, dat de restwarmtelevering wordt vermindert teneinde TRETAL op de gestelde 40 oC te krijgen. Dit betekent een verminderde warmtelevering, die door het ketelwarmtenet dient te worden opgevangen. Indien TRETAL kleiner is dan 40 oC, mag pas ketelwarmte worden geleverd als het restwarmtenet volledig is uitgestuurd.

Aan de hand van de mogelijke situaties die op kunnen treden, zal de beschrijving van het regelalgorithme aan de orde komen.

Er kunnen zich de volgende regelsituaties voordoen:

1. Er wordt alleen restwarmte geleverd.
2. De belasting is zodanig dat rest- en ketelwarmte wordt geleverd.
3. De overschakeling vindt plaats van restwarmte naar rest- en ketelwarmte of omgekeerd.

Het is mogelijk dat in alle drie de situaties TRETAL groter kan worden dan 40 oC, maar ook kleiner.

De bij de beschrijving van het zgn. reductie-algorithme van belang zijnde parameters met hun betekenis zijn hieronder gegeven:

- T40: Indicatie $TRETAL > 40$ OC ($T40 = 1$) of $TRETAL < 40$ oC ($T40 = 0$).
- AB : Waarde van T40 vorige scan ($AB = T40(T-1)$).
- TELLE: Lopende teller van de omschakel-vertragingstijd.
- AA : Waarde van TELLE vorige scan ($AA = TELLE(T-1)$).
- TOMS: Omschakelvertragingstijd.
- SPBM2F: Setpoint voor de buistemperatuur van het restwarmtenet, gedirigeerd vanuit de master-regelaar.
- KBALG: Proportionaliteitsfactor voor het terugregelen van het restwarmtenet indien overschrijding van de maximale temperatuur optreedt.
- AC : $AC = 0$, de master-regelaar restwarmte (MR-RW) is in bedrijf, $AC = 1$ de regelaar voor ketelwarmte (MR-KW) is in bedrijf.
- TANRW: Aanvoertemperatuur van het restwarmtenet (ALCOA-net).
- TANKW: Aanvoertemperatuur van het ketelnet (51 mm net).
- TBINTF: Uitgang integratie-algorithme van MR-RW
- SPBML: Uitgang integratie-algorithme van MR-KW

Aan de hand van de vermelde regelsituaties kan het reductie-algorithme als volgt worden weergegeven.

ad 1.

Wanneer bij levering van alleen restwarmte een situatie optreedt waarbij $T40 = 1$ en $AB = 0$, dan wordt $AC = 1$ gemaakt (AC was nul want alleen restwarmtelevering) en SPBML wordt gelijk aan TANKW. Het setpoint voor de buistemperatuur van het restwarmtenet SPBM2F wordt nu niet langer bepaald door de MR-RW, maar door het reductie-algorithme dat er in formulevorm aldus uitziet:

$$SPBM2F(T) = SPBM2F(T-1) - KBALG (TRETAL - Tretmax) \quad [oC]$$

Doordat het setpoint voor de slave-regeling wordt verlaagd, treedt nu een vermindering op van de warmtelevering van het restwarmtenet. Deze is proportioneel afhankelijk van de overschrijding van de maximale retourtemperatuur.

De MR-KW zal nu de regeling van de luchttemperatuur in de kas op een soepele wijze overnemen. Bij de omschakeling zal geen vertragingstijd meer in acht worden genomen, verder geldt de reeds eerder vermelde omschakelprocedure. Op deze wijze zal een regelsituatie optreden waarbij het restwarmte-

net op een maximale retourtemperatuur wordt begrensd, en het ketelwarmtenet de luchttemperatuur-regeling overneemt. Wordt op een gegeven moment $TRETAL < 40$ oC, dus $T40 = 0$ en $AB = 1$, dan wordt in dezelfde scan $TBINTF(T) = TANRW$ en $AC = 0$, met andere woorden: de restwarmtelevering mag worden verhoogd. De levering van ketelwarmte wordt beëindigd, totdat het restwarmtenet de warmtevraag niet meer kan dekken, of totdat weer een overschrijding van $TRETAL$ plaatsvindt.

ad 2.

Indien het restwarmtenet 100 % open staat, het ketelwarmtenet op een bepaalde waarde en er treedt een overschrijding op van $TRETAL > 40$ oC, dan is $AB = 0$ en $T40 = 1$. Het setpoint voor de buistemperatuur van het restwarmtenet was gelijk aan de gemeten buistemperatuur, $SPBM2F = TANRW$ (regelklep blijft 100 % open). Nu zal dit setpoint worden bepaald door het reductie-algorithme, wat weer een begrenzing van de betreffende $TRETAL$ tot gevolg heeft. Wordt door het verlagen van de restwarmtelevering een foutsignaal geïntroduceerd in de geregelde luchttemperatuur, dan zal de MR-KW dit opvangen, immers deze regelaar was al in bedrijf. Wanneer de situatie zich voordoet dat $TRETAL < 40$ oC, dan wordt het restwarmtenet weer opengeregeld. Wordt het foutsignaal $EPSIL1$ sterk negatief (verlaging setpoint luchttemperatuur) terwijl $T40 = 1$ en de regelklep voor ketelwarmte dicht komt te staan, dan zal het reductie-algorithme afschakelen. De MR-RW komt dan in bedrijf, voor het realiseren van de verlaagde luchttemperatuur met behulp van restwarmte.

ad 3.

Er kan ook een overschrijding van $TRETAL > 40$ oC plaatsvinden, terwijl net de overschakelprocedure van restwarmte naar rest- en ketelwarmte is ingeschakeld. De regeling van $TANRW$ wordt gelijktijdig overgenomen door het reductie-algorithme, en de overschakelprocedure vindt haar verdere verloop. Voor de terugschakeling indien $TRETAL < 40$ oC, treedt een vergelijkbare toestand op als in regelsituatie 2 beschreven. Voor de slave-regelaars van deze afdeling is een zelfde regel-algorithme als in afdeling 6 aanwezig. Een proportionele regelaar regelt de betreffende aanvoertemperatuur van het verwarmingssysteem.

6.4 Beoordeling regeling afdeling 7.

Alvorens tot de beoordeling van het regelalgorithme over te gaan, volgt een opmerking ten aanzien van de ligging van de verwarmingssystemen in deze afdeling. De ALCOA-pijpen op restwarmte geschakeld, bevinden zich evenals de 51 mm stalen pijpen (ketelwarmte) aan weerszijden van het pad tussen de gewasrijen. Een randvoorwaarde voor het regelalgorithme is dat de temperatuur van het retourwater van het restwarmtenet de grens van 40 oC zo min mogelijk mag overschrijden. De verwarmingsinstallatie is uitgelegd op een retourtemperatuur van 38.5 oC. Door de locatie van beide verwarmings-

systemen zal indien het ALCOA-net volledig open staat, dit net worden beïnvloed door de warmte die door het 51 mm net wordt geleverd. Dit betekent dat de effectief geleverde warmte door het ALCOA-net zal worden verminderd, wat resulteert in een verhoogde retourtemperatuur van het ALCOA-net. Het gestelde maximum van 40 °C zal op deze wijze worden overschreden, wat een vermindering van de restwarmte tot gevolg zal hebben. Terwille van de beoordeling van het regelgedrag is dit een gunstige situatie, echter vanuit het oogpunt van maximale benutting van het restwarmtenet is dit een onaanvaardbare situatie. In vervolg onderzoek zal deze opzet dan ook dienen te worden vermeden.

Op basis van praktische instelregels zou de proportionaliteitsfactor voor de MR-RW: KBKO = 16.0 en de integratieconstante: KBINT = 1.45 moeten bedragen. Nu is een verwarmingsproces in een kas sterk niet-lineair. Het opwarmingsproces zal sneller verlopen dan het afkoelingsproces. Dit betekent dat wanneer een overshoot ten gevolge van verstoringen van het regelproces optreedt, deze moeilijk te onderdrukken is. Vanuit energetisch oogpunt zal dit dan ook tot een minimum beperkt moeten blijven. Deze keuze van instellingen zou voldoen aan stabiliteitsvoorwaarden, indien het restwarmtenet het enige verwarmingssysteem in de kas was, en de belasting van de kas niet groter zou worden dan de maximale warmtelevering van het restwarmtenet, namelijk 54 W/m². Men heeft in dynamische overgangssituaties echter te maken met veel grotere kasbelastingen, zodanig dat bijschakeling van ketelwarmte in veel gevallen een vereiste is. Indien de regelparameters zijn ingesteld volgens de praktische instelregels, dan zal er te snel worden overgegaan naar ketelwarmte. Voor het optimaal gebruik van restwarmte worden dus restricties gesteld aan de instellingen van de regelacties, veroorzaakt door de traagheid van het verwarmingssysteem. Door nu de regelacties van de MR-RW sterk te reduceren, zal dit een verlies aan snelheid, maar een groot voordeel in de hoeveelheid geleverde restwarmte tot gevolg hebben. De absolute waarde van de instellingen is een compromis met enerzijds de optimale inzet van restwarmte, en anderzijds het verbeteren van het regelgedrag.

Voor de regeling van ketelwarmte gelden de volgende theoretische instellingen: $K_r = 12.0$, $KBINT = 2.0$. Ook hier geldt dat zonder begrenzing van de acties niet alleen een te grote ongewenste overshoot in de regeling optreedt, maar bij een te grote overshoot wordt het restwarmtenet ook weer sneller teruggeregeld. Dit schakelen kan eveneens tot een instabiel regelsysteem leiden. In het algemeen geldt dus dat het regelen van een combinatie van pijpverwarmingssystemen met de vermelde eisen en randvoorwaarden bij toepassing van rest- en ketelwarmte, een sterke reductie van de theoretisch bepaalde regelparameters vereist is. Op het moment van de beoordeling is het regelprogramma uitgevoerd zoals het in dit rapport beschreven staat. Ook in afdeling 7 zal de beoordeling plaatsvinden in een actieve regelsituatie. Evenals de regeling die hier in gebruik is, is in het algemeen een cascade-regeling erg gevoelig voor een foute keuze van de regelinstellingen voor de slave-regelaar. Niet alleen een te grote proportionaliteitsfactor kan leiden tot instabiliteit van de geregelde kasluchttemperatuur, maar ook een te lage waarde hiervan (Udink ten Cate, 1983). In fig. 6.3.1 is een meetnacht opgenomen

waarin de MR-RW en de MR-KW zijn ingesteld volgens:

MR-RW : Kr = 5.0 , KBINT = 2.75

MR-KW : Kr = 8.0 , KBINT = 1.5

Voor de regelparameters van de slave-regelaars geldt:

KBLINM = 1.5

KBLINS = 0.75

Aan de responsie is duidelijk het instabiele gedrag van het regelsysteem te herkennen. De regelklep voor ketelwarmte MVALKW, vertoont naarmate de nacht vordert, een steeds sterker oscillerend verloop. Dit is voornamelijk te wijten aan het te sterk reduceren van de slave-versterking KBLINS van de ketelwarmte-regeling, terwijl ook de master-regelaar te wensen overlaat. Door nu KBLINS te verhogen naar 4.0, ziet de responsie eruit zoals is aangegeven in fig. 6.3.2. Omstreeks 19:30 uur treedt een positief foutsignaal in de geregelde TKASL op. Eerst wordt het restwarmtenet opgeregeld, totdat om 23:00 uur de belasting de maximale levering van het restwarmtenet overschrijdt. Indien aan de overschakelcondities is voldaan, zal de MR-KW in bedrijf komen (23:30 uur). Echter vlak na 1:00 uur is dit net weer dicht geregeld, waardoor de master-regelaar MR-RW weer in komt. Om 2:30 uur treedt opnieuw de eerder beschreven situatie op. Het ketelwarmtenet regelt nu de rest van de nacht de gewenste kasluchttemperatuur. Er is nog steeds een te sterke aansturing van de ketelwarmteklep te zien, die door het verlagen van KBLINS niet geheel onderdrukt is. Na 7:00 uur wordt het ketelwarmtenet praktisch in een keer van dicht naar open gestuurd. Doordat op dat moment de schermen worden geopend, zal hierdoor de kasluchttemperatuur snel dalen, wat het verwarmingssysteem op dient te van-gen. Als gunstigste waarde van de MR-KW is gekozen voor Kr = 4.0 en KBINT = 3.1.

De werking van de slave-regelaars is in fig. 6.3.3 te zien.

Tot ongeveer 22:00 uur en van ongeveer 23:00 tot 1:00 uur wordt met restwarmte geregeld. De resterende nacht is de ketelwarmteregeling MR-KW in bedrijf. De uitgang van de MR-RW als ook die van de MR-KW is de parameter SPBMF (het setpoint voor de aanvoertemperatuur van het betreffende verwarmingssysteem). Zowel de slave-regelaar voor restwarmte, als de slave-regelaar voor ketelwarmte draagt zorg voor een adequate volgregering.

Voor het reductiealgorithme, dat overschrijding van de maximale retourtemperatuur van het restwarmtenet tegengaat, dient een versterkingsfactor KBALG te worden bepaald. Uit experimentele bepalingen is hiervoor een waarde van KBALG = 0.6 geselecteerd. De werking van het reductiealgorithme zal worden verklaard aan de hand van fig. 6.3.4. De belasting van de kas is in deze nacht zodanig, dat vlak voor 4:00 uur wordt overgeschakeld van de MR-RW naar de MR-KW. Doordat de kas van een lager nachtsetpoint geleidelijk overgaat naar een hoger dagsetpoint, zal de geregelde kasluchttemperatuur langzaam hoger worden. Door o.a. de beïnvloeding van het ketelwarmtenet op het restwarmtenet, zal de retourtemperatuur van het restwarmtenet gaan stijgen. Om ongeveer 7:00 uur heeft deze temperatuur de maximale grens van 40 °C overschreden, wat betekent dat het reductiealgorithme in werking komt. Indien dit reductiealgorithme nader wordt beschouwd, dan blijkt dit een zuivere I-actie te zijn. Op elk bemonsteringstijdstip wordt een nieuwe waarde, evenredig met het foutsignaal (TRETAL - Tretmax), opgeteld bij de vorige uitgangswaarde. Het setpoint voor de buistemperatuur van het restwarmte-

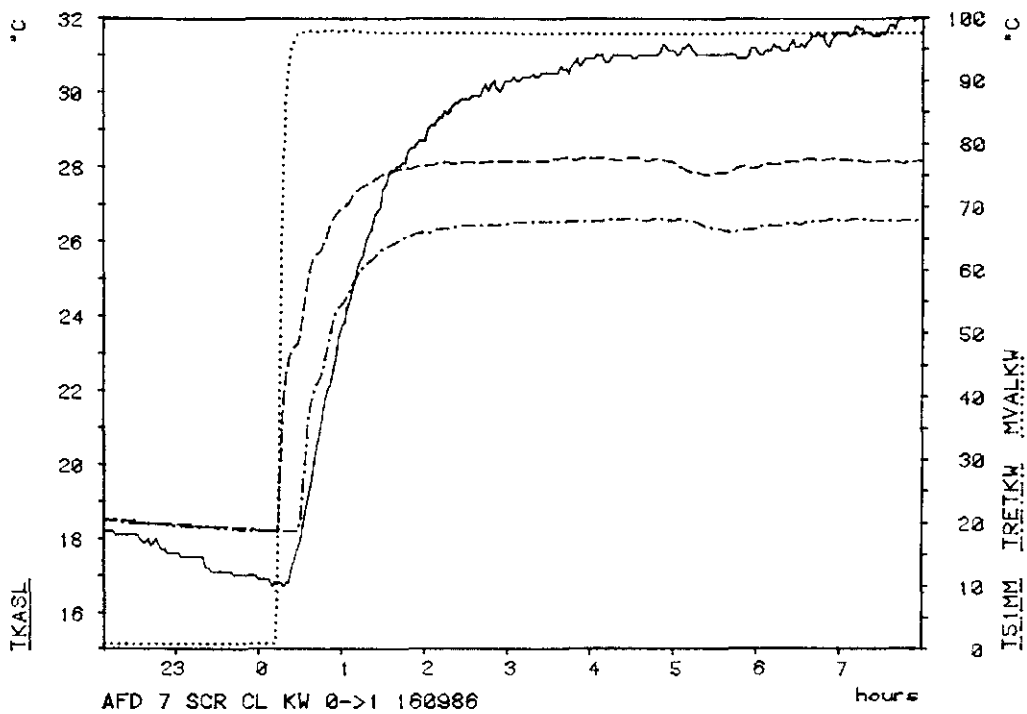


Fig. 6.2.1

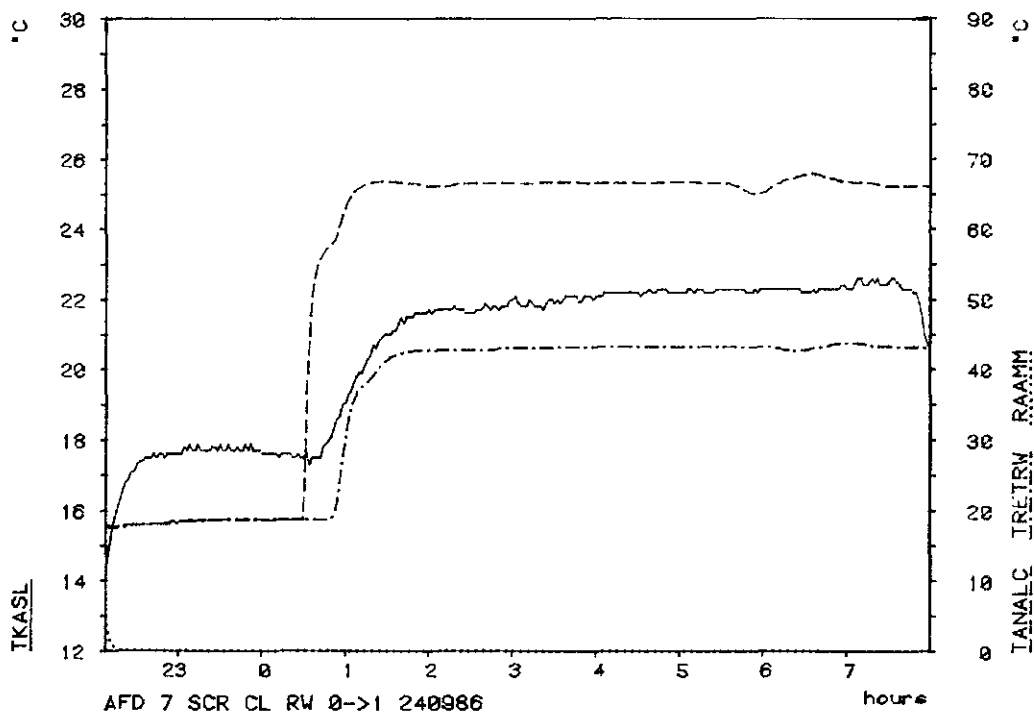


Fig. 6.2.2

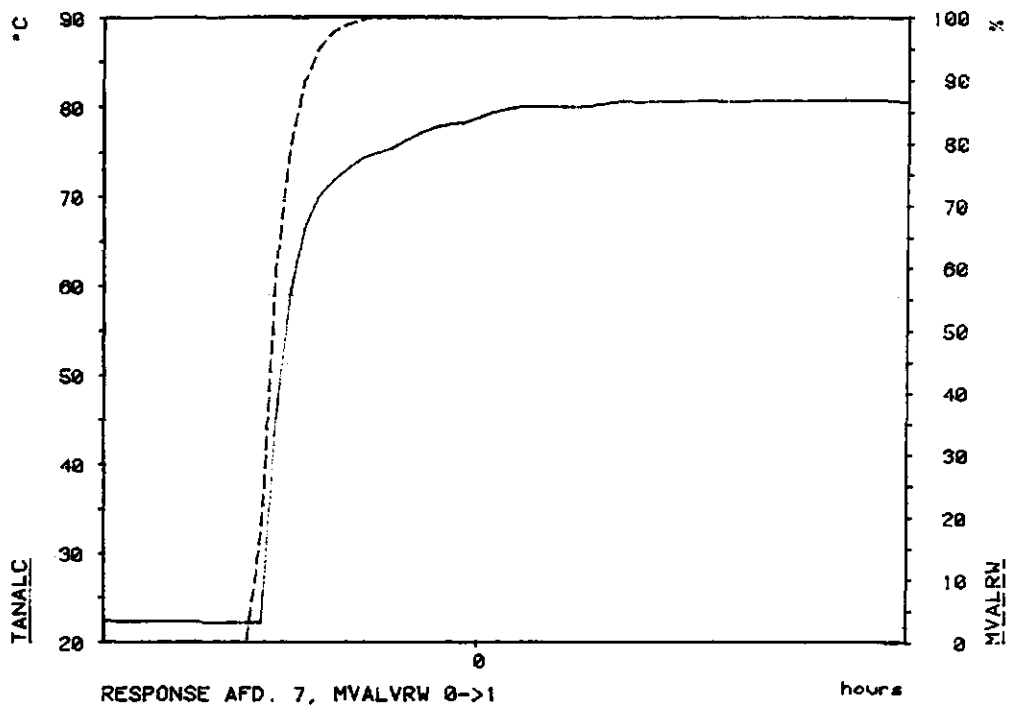


Fig. 6.2.3

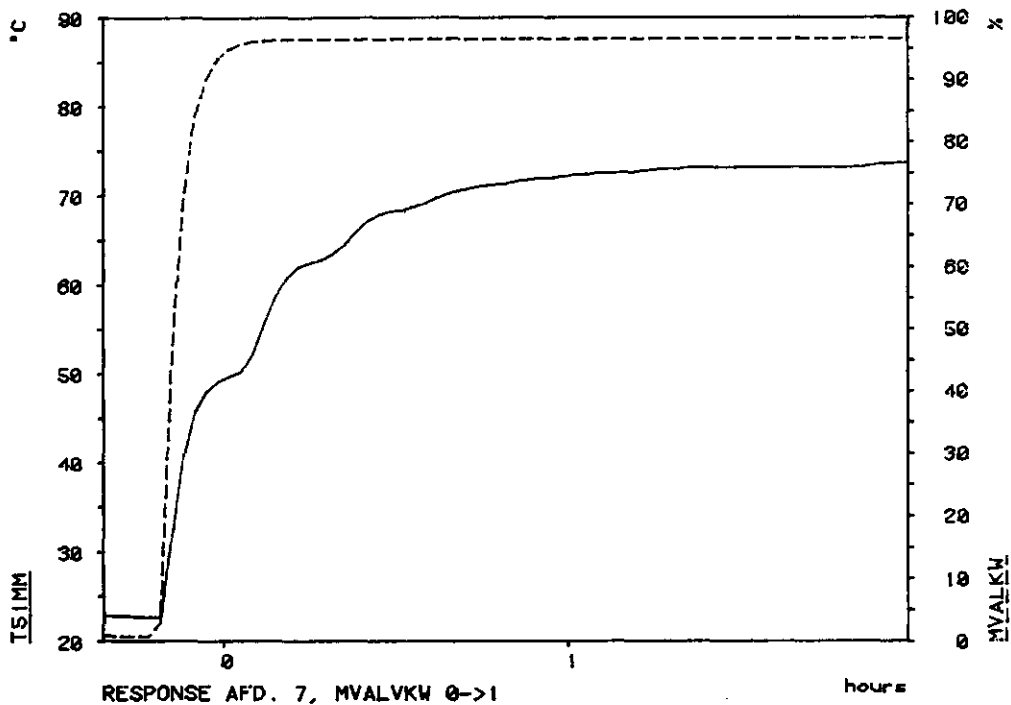


Fig. 6.2.4

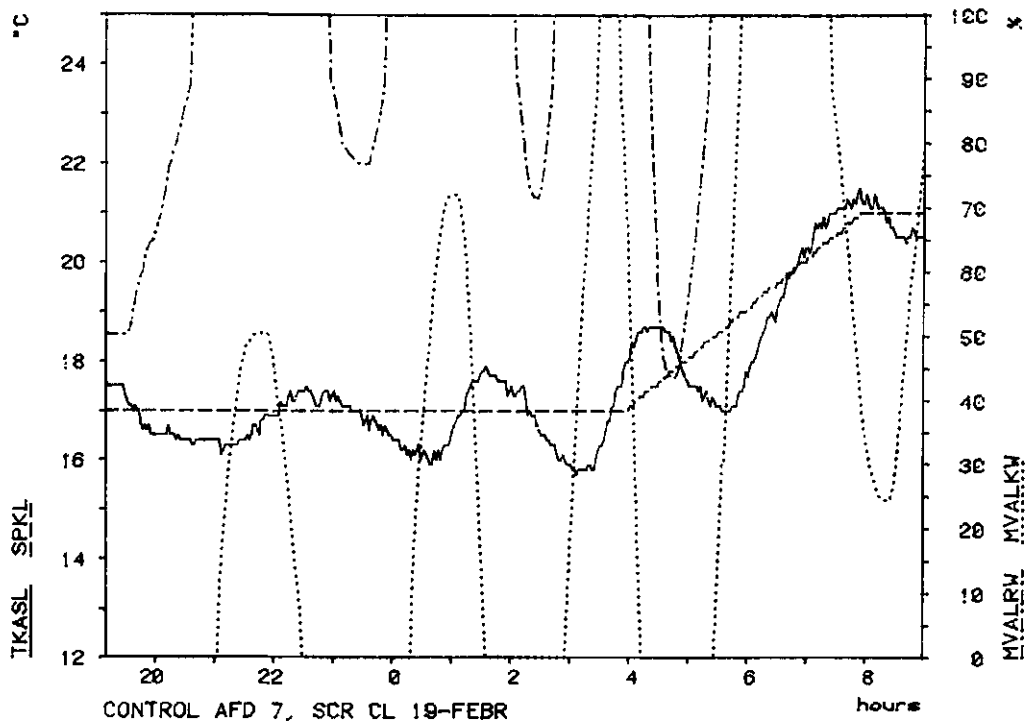


Fig. 6.3.1

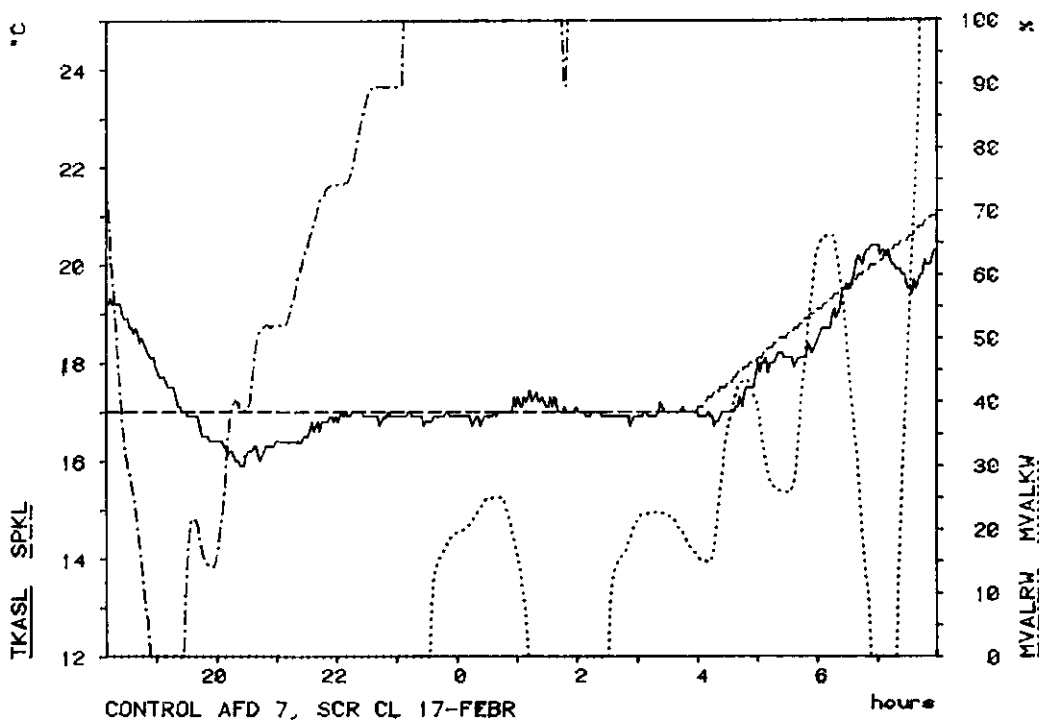


Fig. 6.3.2

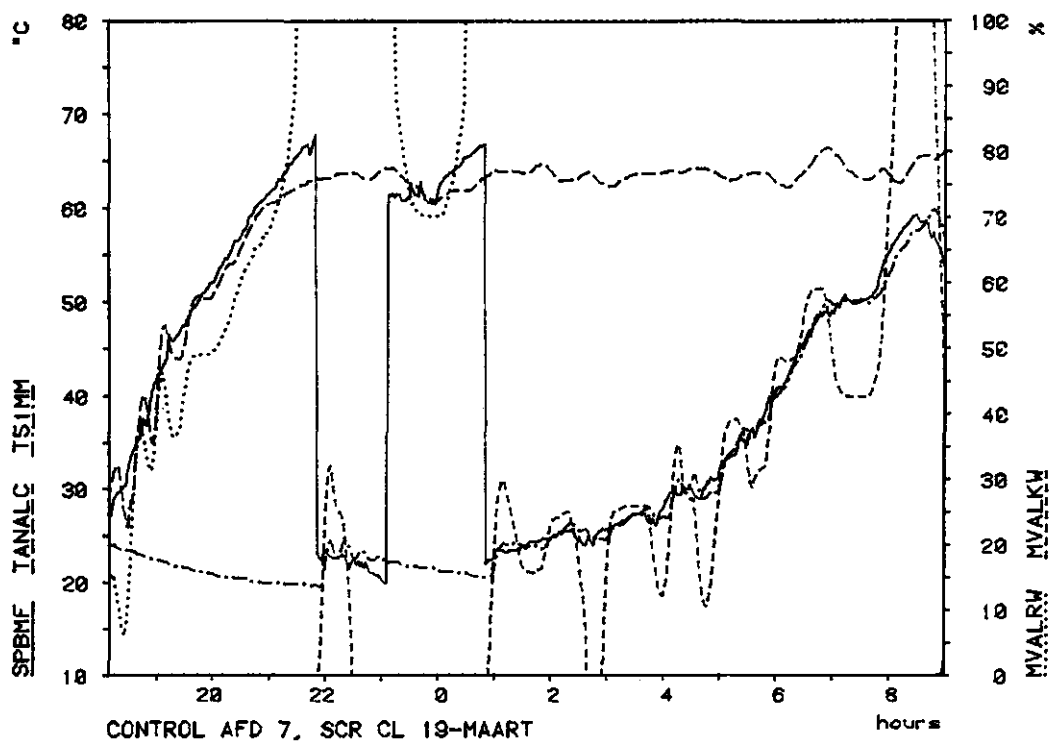


Fig. 6.3.3

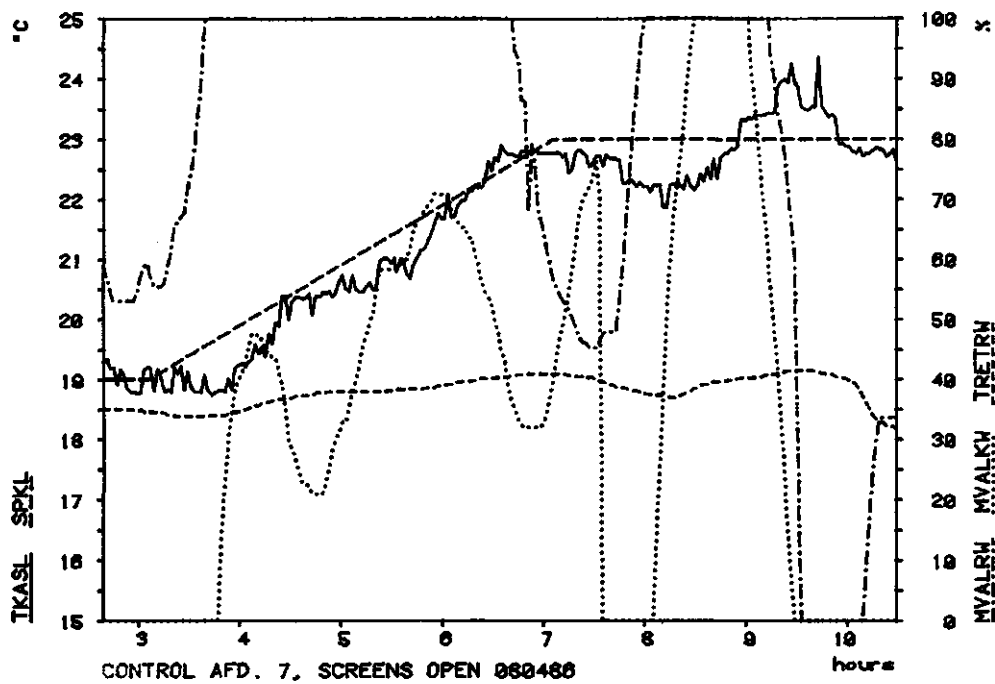


Fig. 6.3.4

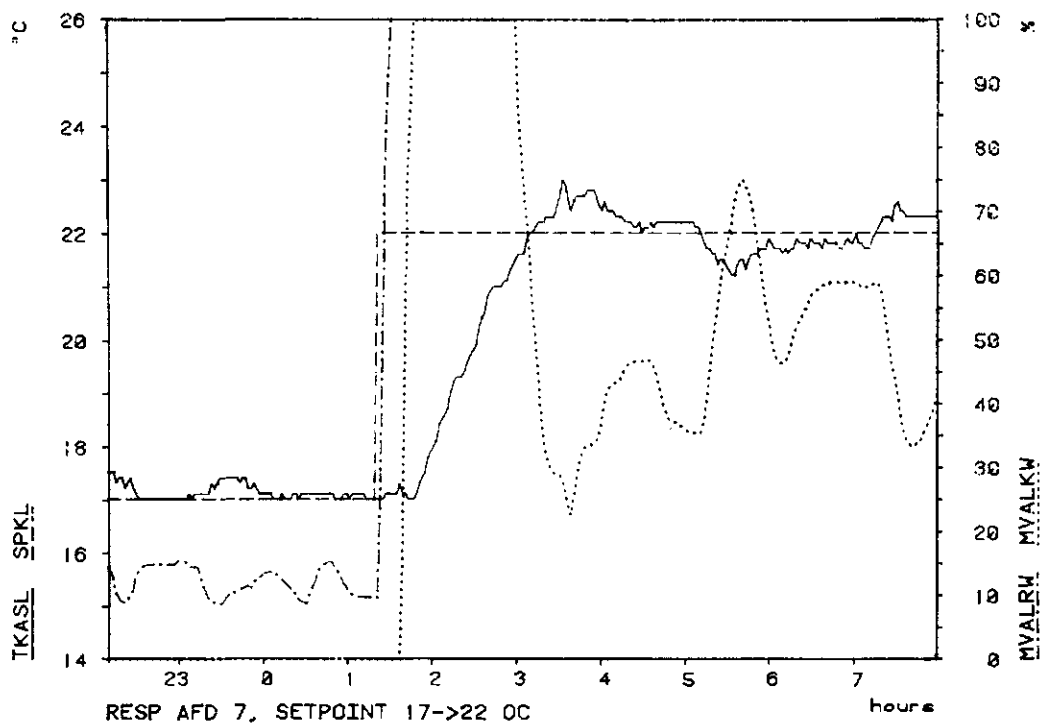


Fig. 6.3.5

net SPBM2F(T) dat gelijk was aan de gemeten temperatuur TANALC, wordt nu elke scan verlaagd met KBALG*(TRETAL-Tretmax). In de responsie is het terugregelen van het restwarmtenet duidelijk te herkennen. Dit heeft tot gevolg dat de totale warmtelevering wordt verminderd, wat als resultaat heeft dat het ketelwarmtenet verder wordt opengeregeld. Om ongeveer 7:30 uur is de situatie zodanig dat de retourtemperatuur van het restwarmtenet TRETRW weer beneden 40 oC komt. Nu treedt het moment op dat ketelwarmte wordt geleverd, terwijl het restwarmtenet nog niet volledig is benut. Dit is volgens de randvoorwaarden een te mijden situatie. Dit betekent dat het ketelwarmtenet wordt dichtgestuurd, en het restwarmtenet weer wordt opgeregeld. Wanneer de restwarmteklep MVALRW 100 % open staat, zal weer ketelwarmte worden bijgeleverd. Om 9:30 uur treedt eveneens een overschrijding van TRETRW op. Echter nu is het foutsignaal positief, wat tot gevolg heeft dat beide netten worden afgeschakeld. Duidelijk blijkt uit de beschreven situaties, dat de invloed van het ketelwarmtenet op het restwarmtenet een ongunstige uitwerking heeft op de totale warmte dekking met behulp van restwarmte. Er worden dan ook aanbevelingen gedaan om hierop een wijziging aan te brengen. In fig. 6.3.5 is een regeltechnische beoordeling gemaakt aan de hand van het stapvormig verstoren van het setpoint voor de gewenste kasluchttemperatuur SPKL. Vanuit een regelsituatie waarbij alleen het restwarmtenet bij staat, wordt uiteindelijk een situatie bereikt waarbij overgeschakeld is naar ketelwarmte. De optredende doorschot en snelheid van de regeling voldoet aan de gestelde normen (par. 2.2.1).

7. Conclusies regeltechnisch onderzoek

De doelstelling van het regeltechnisch onderzoek is als volgt geformuleerd: Het bepalen van de regeltechnische haalbaarheid van restwarmte als energiebron in de glastuinbouw. Uitgangspunt hierbij is dat de vereiste regelalgorithmen voldoen aan de gestelde randvoorwaarden voor het gebruik van restwarmte. Vanaf juli 1984 tot december 1985 zijn voorbereidende werkzaamheden verricht. Deze werkzaamheden omvatten o.a.:

1. Oriëntatie op het gebied van kasklimaatregelingen.
2. Een eerste ontwerp van de regelalgorithmen voor de verwarmingsregelingen van de verschillende afdelingen.

ad. 1

Hieruit kon worden geconcludeerd dat de op dat moment bestaande regelalgorithmen niet voldeden aan het toepassingsgebied dat het onderzoek voorstond. Het gebruik van twee warmtebronnen, aangesloten op regeltechnisch uiteenlopende verwarmingssystemen (verschillende aanvoer- en retourtemperaturen, vermogens, tijd-constanten etc.), met specifieke voorwaarden en eisen, vroeg om nieuwe regelalgorithmen.

ad. 2

Op basis van de randvoorwaarden en de regeltechnische eisen is als regelconfiguratie een meervoudige cascade-regeling toegepast. De specifieke eisen voor het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte zijn hierin opgenomen.

De regeltechnische haalbaarheid van restwarmte in combinatie met ketelwarmte is hoofdzakelijk verwarmingssysteem gebonden. Een algemeen kenmerkende eigenschap is echter dat bij het gebruik van restwarmte gestreefd moet worden naar zo min mogelijk sprongvormige verstoringen (verandering instellingen setpoints) in het regelproces. Het restwarmtenet heeft maar 30 % van de ontwerpbelasting van de verwarming ter beschikking voor het opheffen van deze verstoringen. Dit resulteert dan in vele gevallen in het onnodig bijkomen van ketelwarmte. Eveneens door het geringe vermogen dat het restwarmtenet bezit, moet voorzichtigheid betracht worden bij het bepalen van de systeemparameters. Zelfs 's nachts kan bij hoge luchttemperaturen de plantverdamper een aanzienlijke verstoring vormen. In het algemeen geldt dat indien het ontwerpvermogen van een verwarmingssysteem gering is, de systeemparameters gevoeliger zijn voor o.a. storingen door het buitenklimaat, stand van het gewas, hoeveelheid instraling etc. Het gebruik van restwarmte in combinatie met ketelwarmte leidt in alle gevallen tot een verlaging van de waarde van de regelparameters, die op grond van theoretische instellingen verwacht zouden mogen worden. Dit is een gevolg van de overschakelproblematiek van restwarmte, naar rest- en ketelwarmte.

Het luchtverwarmingssysteem in afdeling 5 is regeltechnisch ge-

zien een optimaal regelproces. Het heeft een snel regelgedrag, en is door de geringe warmtecapaciteit van het verwarmingssysteem minder gevoelig voor niet-lineariteiten (afkoelgedrag van de kas niet veel trager dan opwarming).

De verwarmde betonvloer in combinatie met het ALCOA-net in afdeling 6, heeft weliswaar een aanvaardbaar regelgedrag, maar dit is vooral te danken aan het snelle ALCOA-net. Doordat in de huidige situatie 90 % van het retourwater van de vloer weer wordt bijgemengd met water van 80 oC, ontstaat een te traag regelproces (tijdconstante > 12 uur). Hier kan op geen enkele wijze een regelalgoritme worden ontworpen, dat regeltechnisch haalbaar kan worden geacht. In vervolgonderzoek zal door een eenvoudige installatietechnische ingreep, met een gewijzigde opzet worden gewerkt. Hiermee wordt de tijdconstante van het proces aanzienlijk verkleind.

Het ALCOA-pijpen systeem in combinatie met een 51 mm stalen pijpen net, biedt voor een tuinder een goede mogelijkheid om met minimale investeringskosten het gebruik van restwarmte mogelijk te maken. Regeltechnisch is dit een haalbaar systeem, het vergt echter nog wel de nodige aandacht ten aanzien van variaties in de proces-parameters, overschakelgedrag en optimalisaties betreffende het energieverbruik. Evenals bij het ontwerp van een regelalgoritme voor de verwarmde betonvloer, zal ook hier het gebruik van dynamische modellen in het vervolgonderzoek een belangrijk item vormen (Verwaayen, 1987).

8. Literatuur

- 1 Verwaayen, P.W.T. 1984, Beschrijving regeltechnisch onderzoek bij het verwarmen van kassen in de glastuinbouw met behulp van rest- en afvalwarmte, intern IMAG-rapport: PR-788-7.
- 2 Udink ten Cate, A.J. 1983, Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates, Dissertatie, Landbouw Universiteit Wageningen.
- 3 Valentin J., en Van Zeeland J. 1980, Adaptive split-range control of a glasshouse heating system. Acta Hort. 106: 109-115.
- 4 Udink ten Cate, A.J., en Van Zeeland, J. 1981, A modified PI-algorithm for a glasshouse heating system. Acta Hort. 115 (2 Volumes) (1): 351-358.
- 5 Tantau, H.J., 1984. Adaptive control of greenhouse climate. Acta Hort. 148: 251-257.
- 6 Astrom, K.J. 1981. Theory and applications of adaptive control. In: Preprints 8th IFAC World Congress, Kyoto, Japan (Aug. 1981). P.S.: 28-39.
- 7 Sonneveld A., De (toekomstige) energievoorziening in de Nederlandse glastuinbouw, NEOM, april 1983.
- 8 Knies P., Van de Braak, N.J., Breuer J.J.G. 1984, Beschrijving onderzoek verwarmen tuinbouwkassen met behulp van rest- en afvalwarmte, intern IMAG-rapport: PR-788-5
- 9 Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model. Dissertatie, Landbouw Universiteit Wageningen.
- 10 Stanghellini, C. 1987, Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management, Dissertatie, Landbouw Universiteit Wageningen.
- 11 Verwaayen, P.W.T., Gieling, T.H., Van Meurs, W.T.M., 1985. Measurement and control of the climate in a greenhouse, where a heated concrete-floor is used as low temperature energy source. Acta Hort. 174: 469-475.
- 12 Verwaayen, P.W.T., 1986, Beschrijving regeltechnisch onderzoek bij het toepassen van twee warmtebronnen voor het verwarmen van kassen. IMAG-rapport.
- 13 Gieling, T.H., Van Meurs, W.T.M., 1979. Specifications for environmental control, The PDP-11 to MuP/KuP interface. Research report 79-5, Institute of Agricultural Engineering.

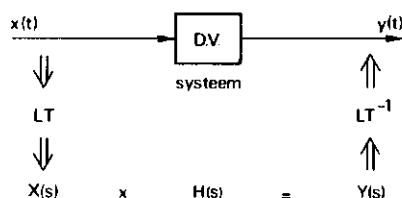
Appendix: Laplace-transformatie

Met behulp van de Laplace-transformatie kan men lineaire differentiaalvergelijkingen welke het verband beschrijven tussen een in- en uitgangssignaal, omvormen tot een algebraïsche vergelijking. Door nu deze algebraïsche vergelijking relatief eenvoudig op te lossen, kan men door de zgn. terugtransformatie toe te passen de oplossing van de differentiaalvergelijking verkrijgen. Door toepassing van Laplace-transformatie gaat een systeemvergelijking beschreven in het tijd-domein over naar een vergelijking in het s-domein (s is de Laplace-operator). Indien bepaalde grafische afbeeldingen in dit s-domein worden gehanteerd (polen/nulpunten beeld), kan hiermee een regeltechnische beoordeling van het systeemgedrag worden gemaakt.

De Laplace-transformatie berust op het omzetten van een onafhankelijke variabele (in de regeltechniek altijd de tijd) naar een andere onafhankelijke variabele s. De transformatie wordt als volgt gedefinieerd:

$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt$$

De getransformeerde verhouding van het uitgangs- en ingangssignaal van een regelsysteem noemt men de overdrachtsfunctie van het regelsysteem. Schematisch ziet dit eruit als volgt:



Waarbij:

LT: Laplace-transformatie

-1

LT : terugtransformatie

X(s) en Y(s): het getransformeerde in- /uitgangssignaal

H(s): overdrachtsfunctie van het regelsysteem

D.V.: differentiaalvergelijking van het systeem.

In FIG. A1 zijn enkele belangrijke standaard getransformeerde functies vermeld, alsmede een aantal veel voorkomende eigenschappen.

Aan de hand van een voorbeeld zal een en ander worden toege-
licht.

De responsie $y(t)$ op de eenheidssprongfunctie $1(t)$ zal worden
berekend van het systeem dat wordt beschreven door de differen-
tiaalvergelijking:

$$T_c \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (\text{eerste orde systeem})$$

$$x(t) = 1(t); \quad LT\{1(t)\} = \frac{1}{s}; \quad \dot{y}(0) = a$$

Uit de gegeven waarde $y(0) = a$ blijkt dat de beginvoorwaarde
niet gelijk aan nul is. Dit betekent dat regel 13 van FIG A1
niet toegepast mag worden. Indien beginvoorwaarden ongelijk aan
nul zijn, geldt de volgende algemene transformatieregel:

(n)

Stel $f^{(n)}(t)$ is de te transformeren functie, waarbij n de graad
van de differentiaalvergelijking aangeeft, dan geldt voor

$$F(s) = s^n \cdot F(s) - s^{n-1} \cdot f(0) - s^{n-2} \cdot f'(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$$

De getransformeerde differentiaalvergelijking wordt nu:

$$T_c \cdot s \cdot Y(s) - T_c \cdot y(0) + Y(s) = \frac{1}{s}$$

$$(T_c \cdot s + 1) Y(s) = \frac{1}{s} + T_c \cdot a$$

$$Y(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{T_c \cdot s + 1} + \frac{a \cdot T_c}{T_c \cdot s + 1}$$

Met behulp van partiële breuksplitsing wordt deze vergelijking
in een terugtransformatie-formaat geschreven volgens:

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T_c}} + \frac{a}{s + \frac{1}{T_c}}$$

Wanneer de eigenschappen en de transformatietabel in FIG. A1
worden gehanteerd, komt men tot de volledige oplossing van de
differentiaalvergelijking. Deze oplossing ziet er als volgt uit:

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_c}} + a \cdot e^{-\frac{t}{T_c}} = 1 - (1 - a) e^{-\frac{t}{T_c}}$$

Het uitgangssignaal van het regelsysteem met de genoemde overdrachtsfunctie zal op een stapvormige verstoring aan de ingang van het systeem reageren volgens de beschrijving voor $y(t)$.

Alle beginvoorwaarden worden nul verondersteld!

	$f(t)$	$F(s)$
1	Eenheidsimpuls (Dirac-pulse) $\delta(t)$	1
2	Eenheidsschakel $1(t)$	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
5	$t e^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
6	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
8	$t^n \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
9	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
10	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$

Eigenschappen:

- 11 $\mathcal{L}\{A f(t)\} = A F(s)$ (lineariteitsregel)
- 12 $\mathcal{L}\{f_1(t) \pm f_2(t)\} = F_1(s) \pm F_2(s)$ (superpositieregel)
- 13 $\mathcal{L}\left\{\frac{d^n}{dt^n} f(t)\right\} = s^n F(s)$, mits $f(0) = f'(0) = \dots = 0$
- 14 $\mathcal{L}\{e^{-at} f(t)\} = F(s+a)$ (dempingsregel)
- 15 $\mathcal{L}\{f(t-a)\} = e^{-as} F(s)$ (verschuivingsregel)
- 16 $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s F(s)$ (eindwaardetheorema)
- 17 $\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s F(s)$ (beginwaardetheorema)

Fig. A1