

## MASTER

### Dynamica en regeling van een klinkerkoeler

Debie, A.C.P.

*Award date:*  
1968

[Link to publication](#)

#### **Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

28

DYNAMICA EN REGELING

VAN

EEN KLINKERKOELER

afstudeerverslag

A.C.P. Debie

Technische Hogeschool Eindhoven  
maart 1968.

NC  
68.6

# I N H O U D

	<u>pagina</u>
INLEIDING	1
HOOFDSTUK 1 Beschrijving van de klinkerkoeler oven 7.	3
HOOFDSTUK 2 Experimenten	5
HOOFDSTUK 3 Model ter bepaling van de secundaire luchttemperatuur	20
HOOFDSTUK 4 Het dynamisch gedrag van de secundaire luchttemperatuur	34
HOOFDSTUK 5 Regeling van de secundaire luchttemperatuur	43
HOOFDSTUK 6 Appendix	45
SAMENVATTING	59
SUMMARY	59
LITERATUUR	60
SYMBOLENLIJST	61

## INLEIDING

Het belangrijkste procesonderdeel bij de cementfabrikage is een oven. Deze oven bestaat uit een lichthellende op rollen gelagerde buis die langzaam om zijn as draait. In het hoogstgelegen gedeelte van de buis wordt de grondstof (pap) toegevoerd. Tengevolge van de draaiing en de helling van de oven beweegt het materiaal zich langzaam naar het laagstgelegen gedeelte van de oven, om vervolgens in een koeler terecht te komen. In het laagstgelegen gedeelte van de oven wordt met behulp van een branderbuis brandstof (kolen plus leisteen) en lucht (primaire lucht) in de oven geblazen, die daar, samen met lucht uit de koeler (secundaire lucht) een vlam doet ontstaan. De verbrandingsgassen bewegen zich in tegenstroom met het materiaal naar het hoogstgelegen gedeelte van de oven, waar zich een trekventilator bevindt, om vervolgens via een schoorsteen het ovenstelsel te verlaten.

De ontstane temperatuurcondities in de oven zijn zodanig dat achtereenvolgens een aantal fysische en chemische processen optreden die uiteindelijk leiden tot het ontstaan van de z.g. klinker. Deze klinker, waarvan de temperatuur ongeveer  $1300^{\circ}\text{C}$  is, bestaat uit bolletjes waarvan de gemiddelde diameter 30mm is. Na koeling met lucht wordt de klinker onder bijvoeging van gips gemalen tot cement. Dit koelen van klinker heeft de volgende redenen:

### 1. Kwaliteitsverbetering van het cement.

Zou de klinker zo langzaam worden afgekoeld dat zich bij iedere temperatuur een chemisch evenwicht zou instellen, dan vinden een reeks chemische omzettingen plaats in de klinker, die ertoe leiden, dat de mineralogische samenstelling van de koude klinker wezenlijk anders wordt dan die bij hoge temperatuur. Wordt de klinker echter in een koude luchtstroom gebracht, dan zal als het ware de mineralogische toestand "ingevroren" worden, zodat geen noemenswaardige omzetting plaatsvindt. (air-quenching).

### 2. Regeneratie van warmte.

Doordat de klinker warmte afstaat aan de lucht, die als secundaire verbrandingslucht in de oven wordt gebruikt, wordt het thermisch en daardoor economisch rendement van de oven verbeterd.

### 3. Transport.

In gloeiende toestand is de klinker niet zonder grote moeilijkheden te transporteren.

Onze aandacht zal zich in het vervolg speciaal richten op de temperatuur van de secundaire lucht, die in het kader van de regeling van het ovenproces een belangrijke rol speelt. Wenst men een zo stabiel mogelijk ovenproces dan is één van de vereisten dat de secundaire luchttemperatuur konstant blijft ondanks een aantal voorkomende storingen. Door middel van een theoretisch en experimenteel onderzoek van het dynamisch gedrag van een klinkerkoeler is nagegaan wat onder de gegeven omstandigheden het beste regelsysteem is voor de secundaire luchttemperatuur.

In het verslag zullen in even zoveel hoofdstukken de volgende onderwerpen aan bod komen:

1. Beschrijving van de klinkerkoeler waaraan de experimentele gegevens zijn ontleend. Deze koeler is gekoppeld aan cementoven 7, die zich bevindt op de terreinen van de N.V. Eerste Nederlandse Cement Industrie (E.N.C.I.) te Maastricht.
2. Experimenten ter bepaling van het statisch en dynamisch gedrag van de koeler. De met behulp van metingen vergaarde gegevens hebben voornamelijk betrekking op de temperaturen van de lucht in de koeler.
3. Een analoog model (elektrisch analogon en simulatie op een analoge rekenmachine) van het thermisch gedrag van een klinkerpakketje, waaruit de secundaire luchttemperatuur bepaald kan worden. De uitkomsten van het model worden vergeleken met experimentele gegevens.
4. Berekening van het gedrag van de secundaire luchttemperatuur onder niet-stationaire condities aan de hand van het analoge model.
5. Op grond van het dynamisch gedrag van de secundaire luchttemperatuur is voor genoemde koeler nagegaan hoe deze temperatuur het gunstigste geregeld kan worden.

## H O O F D S T U K 1

### BESCHRIJVING VAN DE KLINKERKOELER OVEN 7

#### 1.1 Klinker

De klinker die de oven verlaat valt in de koeler op een talud, waardoor men enigszins verzekerd wordt van een homogene verdeling van de klinker over een groot gedeelte van de breedte van de koeler (fig. 1.1, 1.2). Vervolgens komt de klinker op een schudrooster dat gevormd wordt door rijen platen. Tengevolge van de op- en -neergaande beweging van de platen verplaatst de klinker zich in de lengterichting van de koeler. De fijne klinkerdeeltjes vallen door de zich in alle platen bevindende gaatjes en worden in silo's onder het rooster verzameld. Van tijd tot tijd worden deze silo's leeggemaakt, waarna de klinker met behulp van een sleepketting naar de z.g. klinkertransportband wordt getransporteerd. Aan het eind van de koeler valt de klinker vanaf het rooster door een stangenrooster in een ruimte waar zich de reeds eerder genoemde sleepketting bevindt. Grote stukken klinker die niet door het stangenrooster gaan, komen in een ~~hamer~~breker terecht.

#### 1.2 Lucht

De klinker wordt m.b.v. twee ventilatoren met buitenlucht gekoeld. De ruimte onder het rooster is verdeeld in vier compartimenten. Iedere ventilator voedt twee compartimenten door de lucht door het rooster en de klinker te blazen. De totale hoeveelheid lucht die iedere ventilator levert, wordt constant geregeld. De verdeling van de lucht over de compartimenten wordt vast ingesteld door jalouzieën, die zich in de aanvoerleidingen bevinden. De hoeveelheid secundaire lucht wordt hoofdzakelijk bepaald door de trekventilator aan het eind van de oven en wordt voornamelijk geleverd door de eerste twee compartimenten. Een klein gedeelte van deze lucht vormt een aandeel in de primaire lucht.

De resterende lucht boven het rooster wordt aangezogen door een ontstoftingsventilator. Deze lucht, voortaan tubixlucht genoemd, wordt ontstoft. Een gedeelte van de ontstofte lucht verlaat het systeem via de koelerschouwsteen. Het overblijvende gedeelte vormt samen met het eerder genoemde gedeelte van de secundaire lucht plus buitenlucht de primaire lucht. Het is in principe mogelijk luchtrecirculatie toe te passen. Dit bestaat hieruit dat ontstofte tubixlucht wordt gemengd met de buitenlucht, die voor de koeling in de eerste twee compartimenten dient.

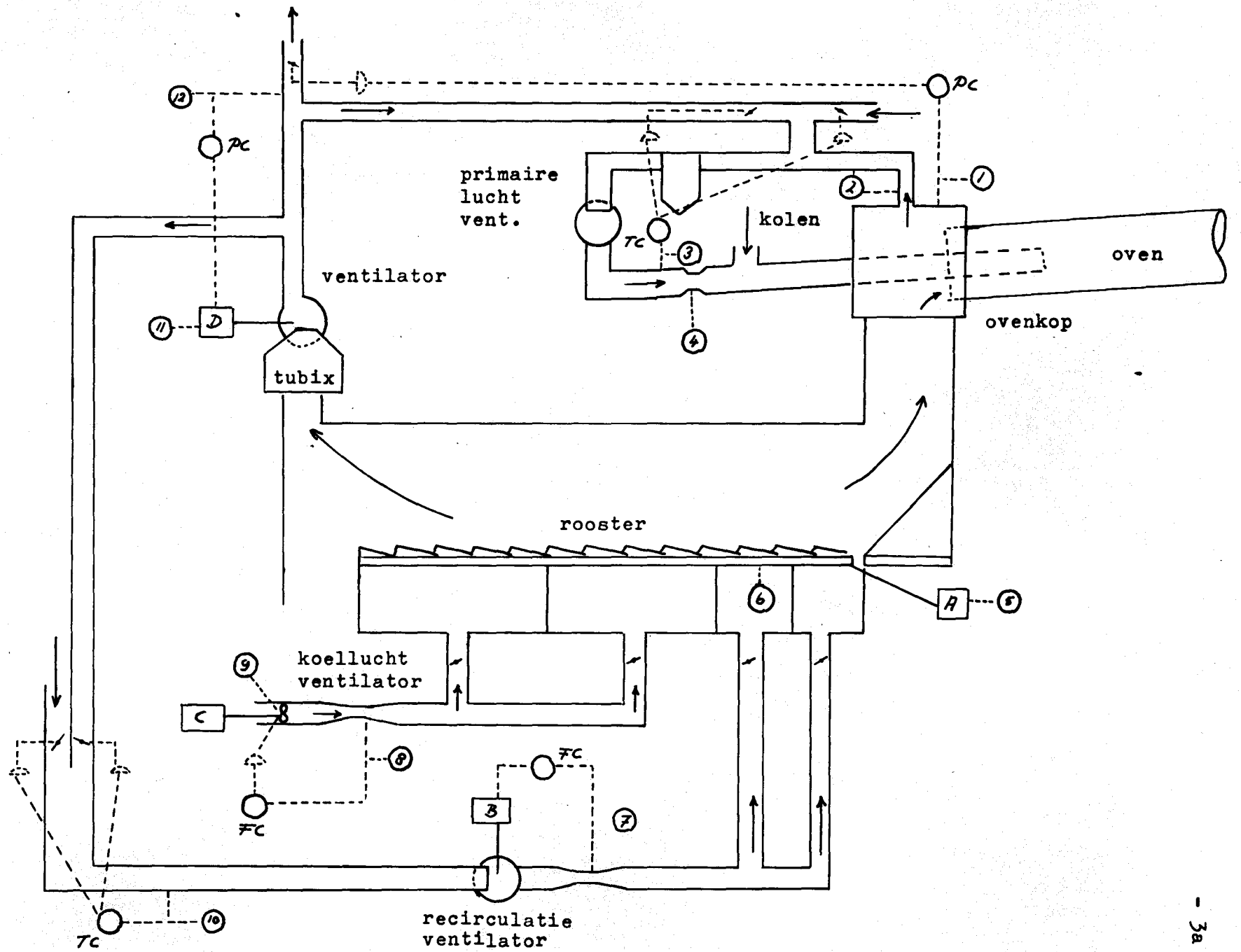
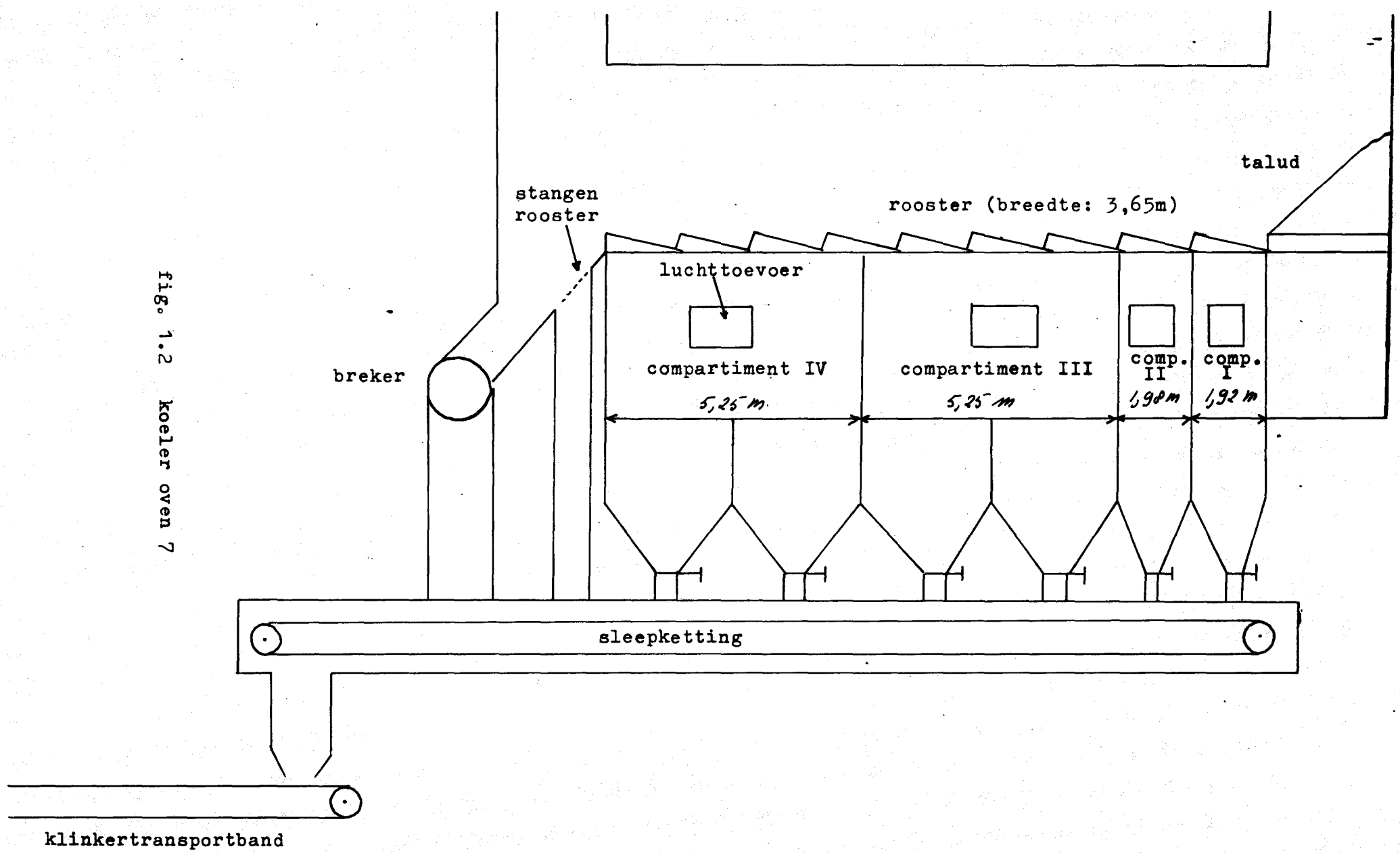


fig. 1.1 Koeler oven 7.

1. registratie ovenkopdruk
  2. registratie secundaire luchttemperatuur
  3. registratie primaire luchttemperatuur
  4. registratie hoeveelheid primaire lucht
  5. registratie toerental roosteraandrijving
  6. registratie temperatuur roosterplaten
  7. registratie hoeveelheid recirculatielucht
  8. registratie hoeveelheid koellucht
  9. registratie schoepstand koelventilator
  10. registratie temperatuur recirculatielucht
  11. registratie toerental tubixventilator
  12. registratie druk in koelerschoorsteen
    - A. elektromotor plus P.I.V. toerenregelaar met verstelmotor (aandrijving rooster)
    - B. elektromotor met verstelmotor
    - C. elektromotor
    - D. elektromotor met verstelmotor
- △ air-o-motor
- PC drukregelaar
- TC temperatuurregelaar
- FC hoeveelheidsregelaar



fig. 1.2 koeler oven 7



### 1.3 Regeling

De belangrijkste storingen die in de koeler optreden zijn:

1. onregelmatige toevoer van klinker;
2. variaties in de temperatuur waarmee de klinker de koeler binnenkomt.

Tengevolge van deze storingen kunnen variaties optreden in de werkcondities van de koeler, hetgeen van invloed is op het ovenproces. Om de invloed van de storingen te elimineren zijn een aantal regelingen aanwezig: Deze zijn (fig. 1.1):

1. Regeling van de totale luchthoeveelheid in de eerste twee en laatste twee compartimenten;
2. Regeling van de druk in de ovenkop op -2mm wk, waarbij als korrigerend orgaan de klep in de koelerschoorsteen wordt gebruikt;
3. Regeling van de druk in de koelerschoorsteen door middel van het toerental van de tubixventilator;
4. Regeling van de temperatuur van de primaire lucht door een juiste menging van buitenlucht en tubixlucht;
5. Indien recirculatie wordt toegepast, kan de temperatuur van de recirculatielucht geregeld worden door de verhouding van buitenlucht en gerecirculeerde tubixlucht op de juiste manier te veranderen.

Echter een regeling voor de secundaire luchttemperatuur ontbreekt. Aangezien het constant houden van deze temperatuur een belangrijke verbetering geeft van het ovenproces, is nagegaan welk regelstrategie het beste vol doet.

## HOOFDSTUK 2

### EXPERIMENTEN

#### 2.1 Inleiding

Het experimentele onderzoek aan de koeler van oven 7 is te splitsen in een statisch en een dynamisch gedeelte. Het statisch gedeelte bestaat voornamelijk uit het meten van luchttemperaturen plaatselijk in de koeler en het bepalen van de verblijftijd van de klinker in de koeler. Uit dit laatste experiment worden conclusies getrokken omtrent de hoogte van de klinkerlaag. Het dynamisch gedeelte omvat responsies van de secundaire luchttemperatuur indien o.a. de roostersnelheid en hoeveelheid koellucht stapvormig wordt gewijzigd.

In dit hoofdstuk worden bovendien nog enkele fysische constanten van de klinker vermeld.

#### 2.2 Luchttemperatuurmeting boven het klinkerbed

Indien een thermokoppel zonder meer in de lucht boven het klinkerbed wordt geplaatst, zullen er grote fouten optreden tengevolge van de stralingsuitwisseling tussen het thermokoppel en de omgeving (klinkerbed, koelerwand). We zullen thans enkele methoden beschrijven die deze stralingsinvloed reduceren.

2.2.1 In plaats van een temperatuurmeting in de koeler is het ook mogelijk de temperatuur van de lucht te meten die aan de koeler is onttrokken, met het voordeel dat de plaats van de meting zodanig gekozen kan worden dat de invloed van de straling verkleind wordt. In dit geval moet men er echter wel voor zorgen dat tijdens het transport van de lucht van de koeler naar de meetplaats zo weinig mogelijk warmte verloren gaat. Een compromis tussen warmteverlies en stralingsinvloed bereikt men door lucht af te zuigen via een opening boven het rooster in de zijwand van de koeler. Door middel van

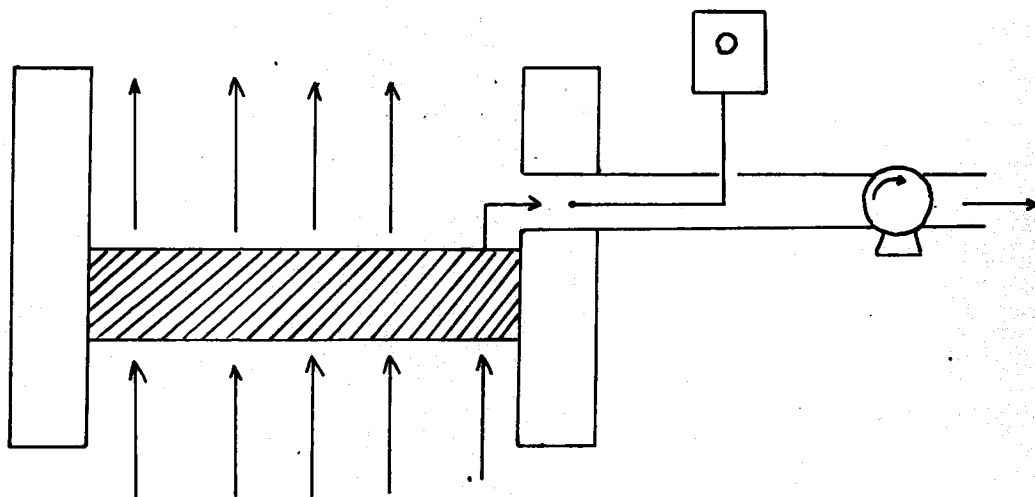


fig. 2.2.1.1 Afzuigpyrometer.

een thermokoppel (Chromel - Alumel) dat zich centraal in de opening bevindt werd de luchttemperatuur gemeten. In fig. 2.2.1.1. is de meetopstelling schematisch weergegeven.

De op deze manier gemeten waarden in compartiment I en II blijken lager te zijn dan de gemiddelde temperatuur van de secundaire lucht. Daaruit concluderen we dat de meetprocedure van zodanige aard is dat de daarmee verkregen temperaturen niet representatief zijn voor de koeler. De oorzaak kan van tweeërlei aard zijn:

1. Doordat er aan de randen van het rooster minder klinker ligt dan in het midden zal er verhoudingsgewijs meer lucht passeren door de klinkerlaag in de buurt van de koelerwand met het gevolg dat de luchttemperaturen aan de randen lager zijn dan in het midden;
2. De afgezogen lucht is grotendeels afkomstig uit de relatief koudere grenslaag langs de koelerwand.

2.2.2 Om de luchttemperaturen toch ter plaatse in de koeler te meten zonder al te veel last te hebben van de straling, is gebruik gemaakt van een afzuigpyrometer ontwikkeld door het Internationaal Vlam Onderzoek (I.V.O.) te Ymuiden.

De afzuigpyrometer bestaat uit een thermokoppel in een beschermhuls die geplaatst wordt in een systeem van twee concentrische stralingsschermen\*). Lucht, waarvan men de temperatuur wil meten, wordt met grote snelheid langs de huls en door de schermen gezogen door middel van een radiaalpompe. Na het passeren van het thermokoppel wordt de lucht gekoeld om beschadiging van de pompe te voorkomen. Als koelend medium is stromend water gebruikt. De lengte van de afzuigpyrometer is 3m waardoor het mogelijk is temperaturen tot in het midden van de koeler te meten.

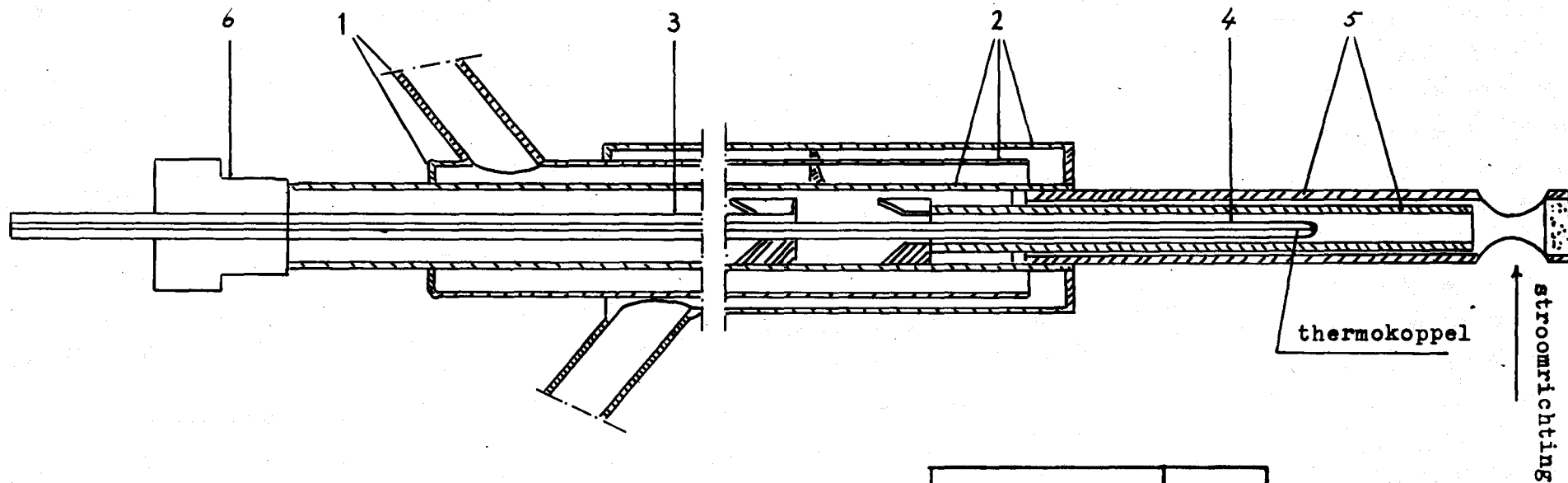
De diverse onderdelen van de pyrometer bestaan uit de volgende onderdelen:

1. Thermokoppel: Pt-Pt Rh 13%. De dikte van de draad is 0,5mm.
2. Beschermhuls: aluminiumoxyde.
3. Stralingsschermen: silimaniet. Vanwege de lage emissie- en warmtegeleidingscoëfficiënt van dit materiaal zal slechts een klein gedeelte van de op het buitenste scherm vallende stralingsenergie aan dit thermokoppel worden overgedragen.
4. Koelbuis: staal.

De beste resultaten worden bereikt wanneer het uiteinde van het buitenste stralingsscherm is gesloten en in de buitenwand twee gaten tegenover elkaar worden gemaakt, waarvan een gat op de klinkerlaag is gericht.

-----

\*) zie fig. 2.2.2.1.



MATERIAAL	No.
staal	1,2
nikkel chroom	3
alúmina	4
silimaniet	5
koper	6

fig. 2.2.2.1 IVO afzuigpyrometer.

Een gedeelte van de klinkerstof in de lucht verlaat via het andere gat direkt het stralingsscherm waardoor de kans dat de openingen tussen de schermen en de huls verstopten wordt gereduceerd. De positie van het thermokoppel in verhouding tot het gat in het buitenste scherm is 4 cm stroomafwaarts van de rand van het gat.

De doelmatigheid van de afzuigpyrometer is afhankelijk van de afzuigsnelheid, temperatuur van de lucht, de geometrie van de stralingsschermen en van de omgevingscondities zoals de intensiteit van de straling. Als maat voor de doelmatigheid (E) wordt gedefinieerd:

$$E = \frac{T_M - T_O}{T_G - T_O} \quad (2.2.2.1)$$

$T_M$  = gemeten temperatuur

$T_O$  = gemeten temperatuur zonder afzuiging

$T_G$  = werkelijke temperatuur

Voor vlamtemperatuurmetingen in een oven heeft men gevonden  $E = 0,98$ , bij een afzuigsnelheid van 250 m/s en een temperatuur van  $1600^{\circ}\text{C}$  [1].

Aannemende dat deze waarde van E ook geldig is voor de metingen in de koeler, kunnen we een schatting maken van de meetfout. Bij een afzuigsnelheid van 46 m/s wordt onder bepaalde omstandigheden met de afzuigpyrometer op een zekere plaats in de koeler een temperatuur van  $400^{\circ}\text{C}$  gemeten. Wanneer met een niet-afgeschermd thermokoppel op dezelfde plaats in de koeler de temperatuur wordt gemeten dan wordt gevonden  $530^{\circ}\text{C}$ . Stel nu  $T_O$  gelijk aan  $530^{\circ}\text{C}$ . In dit geval volgt uit formule (1) voor de werkelijke temperatuur:

$$T_G = \frac{T_M - T_O(1-E)}{E} = 388^{\circ}\text{C}$$

De relatieve afwijking is dan:

$$\frac{T_M - T_G}{T_M} \cdot 100\% = 3\%$$

Tot slot enkele gegevens over de traagheid van de afzuigpyrometer. De tijd nodig om bij de eerste meting een stationaire toestand te bereiken ligt in de orde van 3 minuten. Uitgaande van een stationaire toestand is de tijdconstante bij een variatie in de temperatuur van enkele tientallen graden celcius ongeveer anderhalve minuut.

2.2.3 Om de volgende redenen is een pyrometer geconstrueerd waarmee het mogelijk is luchttemperaturen in de koeler te meten:

1. De afzuigpyrometer van het IVO is slechts incidenteel beschikbaar, zodat men voor toekomstige metingen naar eigen middelen moet omzien;
2. Aangezien de IVO-pyrometer speciaal ontworpen is voor temperatuur-metingen in een vlam is het niet onmogelijk dat voor metingen onder omstandigheden zoals die in de koeler heersen, een eenvoudiger opzet even goede resultaten geeft. Speciaal denken we bij die omstandigheden aan de luchttemperaturen in de koeler (maximaal 1000°C) die lager zijn dan de temperaturen in een vlam.

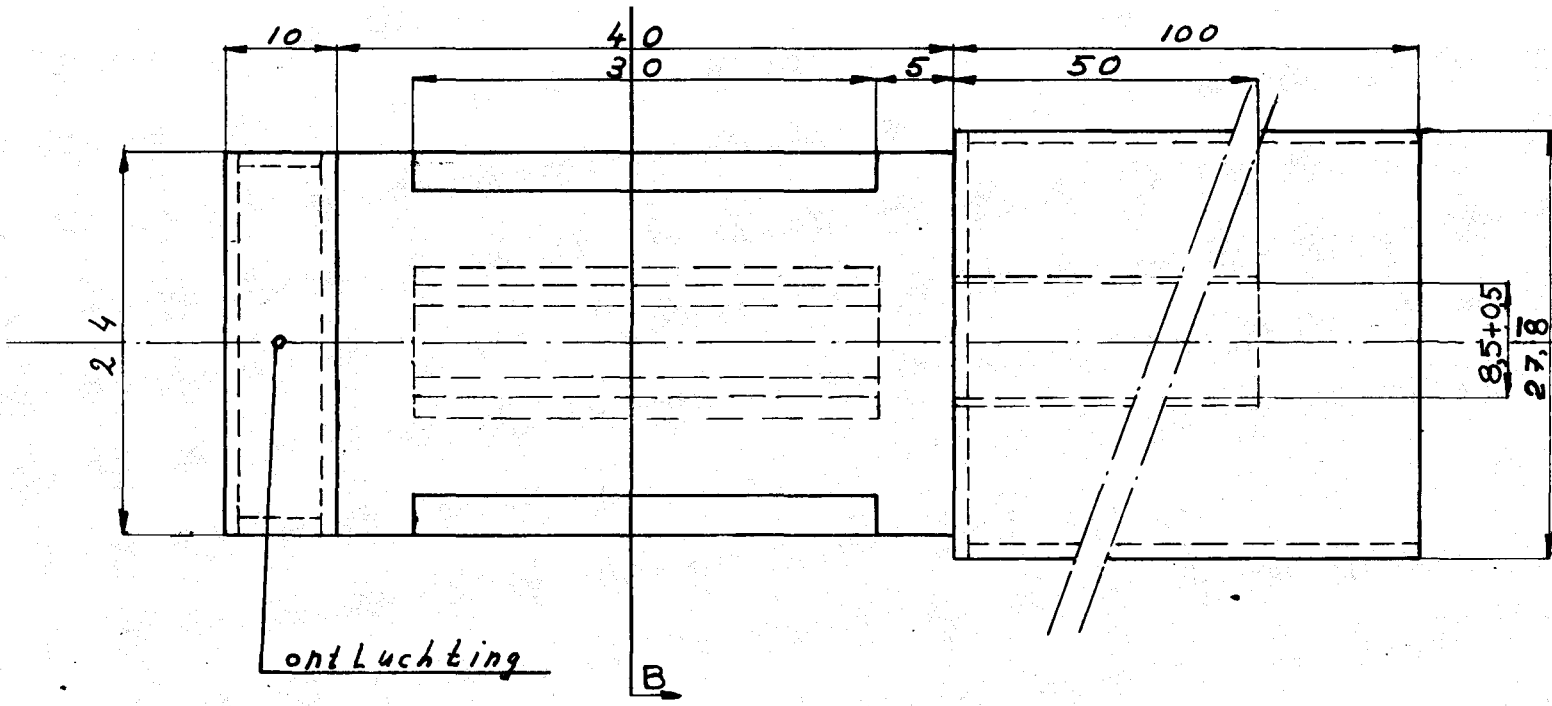
De geconstrueerde pyrometer, ter onderscheiding van de IVO-afzuigpyrometer kortweg TH-pyrometer genoemd, bestaat uit een keramische pijp (inwendige diameter 28mm, lengte 2,5m) met daarop bevestigd een sichromel stralingskop. Deze stralingskop (fig. 2.2.3.1) bestaat uit een aantal stralingsschermen die een zodanige positie hebben dat een thermokoppel (Chromel - Alumel) dat zich in de kop bevindt alleen in contact staat met de (eventueel aangezogen) lucht en nagenoeg geen straling uit de omgeving opvangt.

Om iets over de meetnauwkeurigheid van de TH-pyrometer te weten te komen, zijn enkele luchttemperaturen in de koeler bepaald zowel met de TH- als IVO-pyrometer. Door gegeven omstandigheden was het niet mogelijk tegelijk lucht af te zuigen bij beide pyrometers. Rekening houdend met de traagheid van de pyrometers en het relatief snelle verloop van de condities in de koeler is het voor de betrouwbaarheid van de meting noodzakelijk dat de pyrometers tegelijk in bedrijf zijn. Zodoende zullen voornamelijk vergeleken worden de resultaten van de IVO-pyrometer met afzuiging en de TH-pyrometer zonder afzuiging. De resultaten zijn weergegeven in fig. 2.2.3.2.

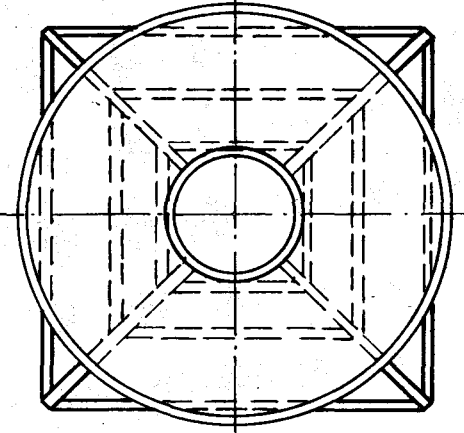
Ervan uitgaande dat de correlatie tussen de temperatuur gemeten met de IVO-pyrometer ( $T_1$ ) en de temperatuur gemeten met de TH-pyrometer ( $T_2$ ) voldoende groot is, kunnen we met de methode van de kleinste kwadraten een regressierechte opstellen voor het verband tussen beide temperaturen. Dit verband luidt:

$$T_2 = 1,04 T_1 + 32 \quad (2.2.3.1)$$

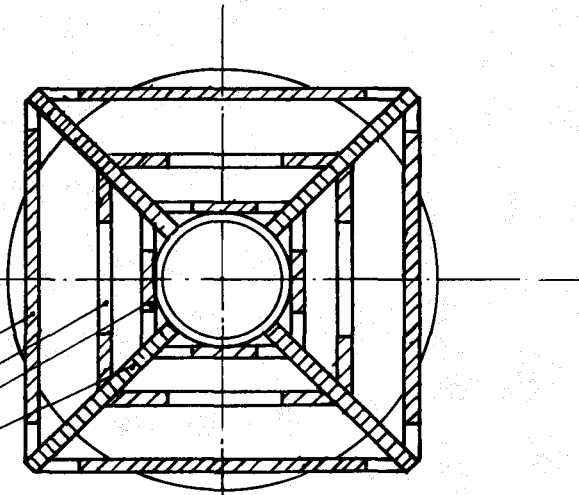
Hieruit blijkt dat de TH-pyrometer slechtere resultaten geeft dan de IVO-pyrometer. Het verschil tussen  $T_1$  en  $T_2$  wordt in het beschouwende temperatuurgebied groter naarmate de temperatuur stijgt. Dit is te verklaren uit het feit dat bij hogere temperatuur de stralingsinvloed bij de TH-pyrometer zonder afzuiging meer toeneemt dan bij de IVO-pyrometer met afzuiging.



ZU- EN BOVEN AANZICHT.



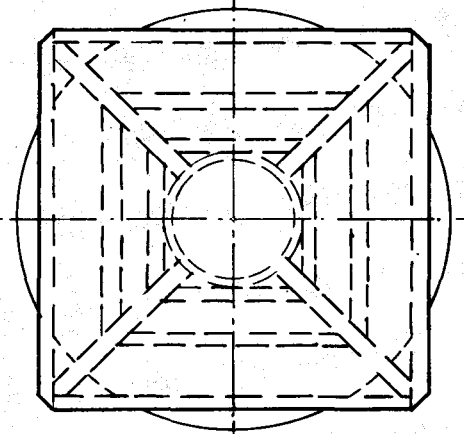
ACHTER AANZICHT



DOORSNED E A-B

MATEN IN MM

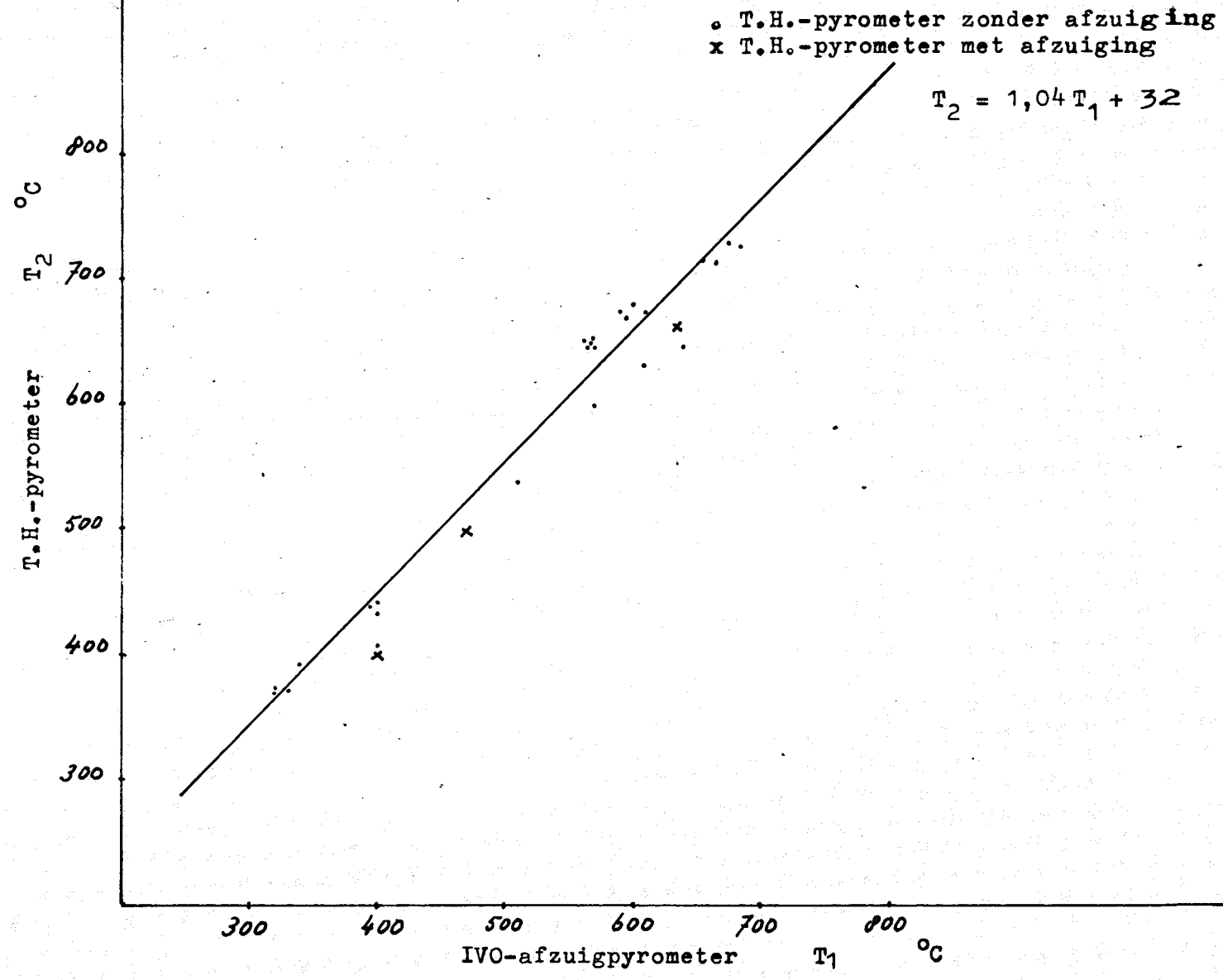
FIG. 2.2.3.1  
STRALINGSKOP



VOOR AANZICHT.



Fig. 2.2.3.1 Vergelijking T.H.-pyrometer en IVO-pyrometer.



In fig. 2.232 komen een drietal punten voor die verkregen zijn uit metingen met de TH-pyrometer met afzuiging. Daaruit blijkt dat met afzuiging betere resultaten worden bereikt. Het nadeel van afzuiging is, dat de keramische buis zo warm wordt dat er kans bestaat dat de buis breekt. Vooral onder niet-stationaire omstandigheden zoals bij grote temperatuurvariaties t.g.v. het in- en uitschakelen van de afzuiging is de kans op breken groot. Het remedie hiertegen is om de afgezogen lucht na het passeren van de stralingskop te koelen, hetgeen weer niet ten goede komt aan de eenvoud.

### 2.3 Secundaire luchttemperatuurmeting

Voor de meting van de secundaire luchttemperatuur is gebruik gemaakt van de opstelling zoals die bij de koeler aanwezig is. Door middel van een Chromel - Alumel thermokoppel in een metalen beschermhuls wordt op de in fig. 1.1 aangegeven plaats de temperatuur gemeten van dat gedeelte van de secundaire lucht dat dient als bestanddeel voor de primaire lucht.

### 2.4 Meting van de klinkertemperatuur

De temperatuur van de klinker die vanuit de oven in de koeler valt is door omstandigheden alleen door een kontaktloze meting te verkrijgen. Hiertoe is gebruik gemaakt van een gloeidraadpyrometer waarbij de helderheid van een gloeidraadje wordt vergeleken met de helderheid van de klinker. Deze pyrometer wordt gericht op de klinker die zich aan het einde van de oven bevindt (fig. 2.4.1).

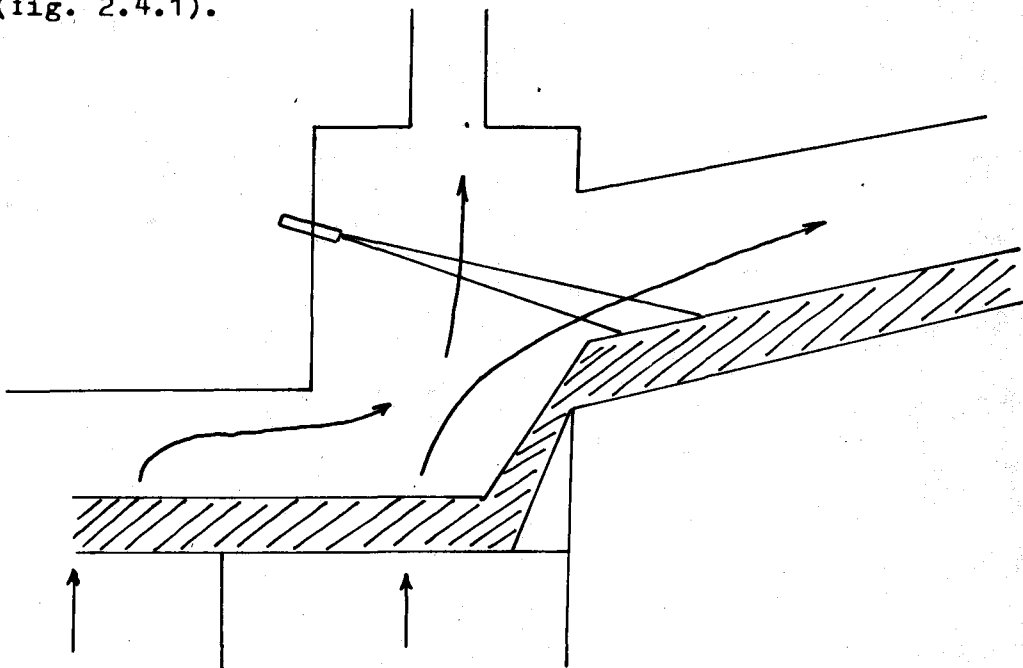


fig. 2.4.1. Klinkertemperatuurmeting.

Bij deze meetmethode dient men het volgende in overweging te nemen.

1. Tussen de pyrometer en de klinker bevindt zich de stofhoudende secundaire lucht. Hierdoor wordt een gedeelte van de door de klinker geëmitteerde straling geabsorbeerd zodat de gemeten temperatuur te hoog is.
2. De secundaire lucht koelt de bovenste laag klinker al in zekere mate af. Aangezien nu juist de temperatuur van deze laag wordt gemeten zal in werkelijkheid de klinkertemperatuur hoger zijn.

De temperatuur van de klinker die de koeler verlaat en op de klinkertransportband terecht komt, wordt door middel van een kontaktthermoëlement bepaald.

## 2.5 Drukmeting

Om het drukverschil over het klinkerbed te bepalen zijn in de koelerzijwanden onder het rooster vier drukaansluitingen gemaakt, één voor ieder compartiment. De meting van de druk onder het rooster t.o.v. de buitenlucht is voldoende om het drukverschil over het klinkerbed te kennen, omdat de druk boven het bed nagenoeg gelijk is aan de constant geregelde ovenkopdruk (-2mm wk). Overigens levert een drukaansluiting boven het rooster moeilijkheden op in verband met verstoppingen ten gevolge van klinkerstof.

Dynamische metingen zijn verricht met behulp van drukomzetters, waarbij de deformatie van een membraan door middel van rekstrookjes in een elektrisch signaal wordt omgezet (Dynisco PT14, meetbereik 0 - 0,5 psid).

Alvorens de signalen afkomstig van de Dynisco's worden geregistreerd, passeren ze eerst een elektrisch filter dat bestaat uit drie RC-sekties (afbreekfrequentie  $\omega = 0,1$ ). Tengevolge van de op-en-neergaande beweging van het rooster zal de druk over de klinkerlaag een sinusvormig karakter bezitten. Aangezien we niet geïnteresseerd zijn in deze snelle drukveranderingen, wordt deze sinus onderdrukt waardoor de gevoeligheid van de schrijvers opgevoerd kan worden zonder dat uitsturing optreedt.

## 2.6 Resultaten van de temperatuurmetingen

In één van de wanden van de koeler, die parallel loopt aan de bewegingsrichting van de klinker, zijn op 115cm boven het rooster vier gaten geboord, waarvan de positie in figuur 2.6.1 wordt gegeven.

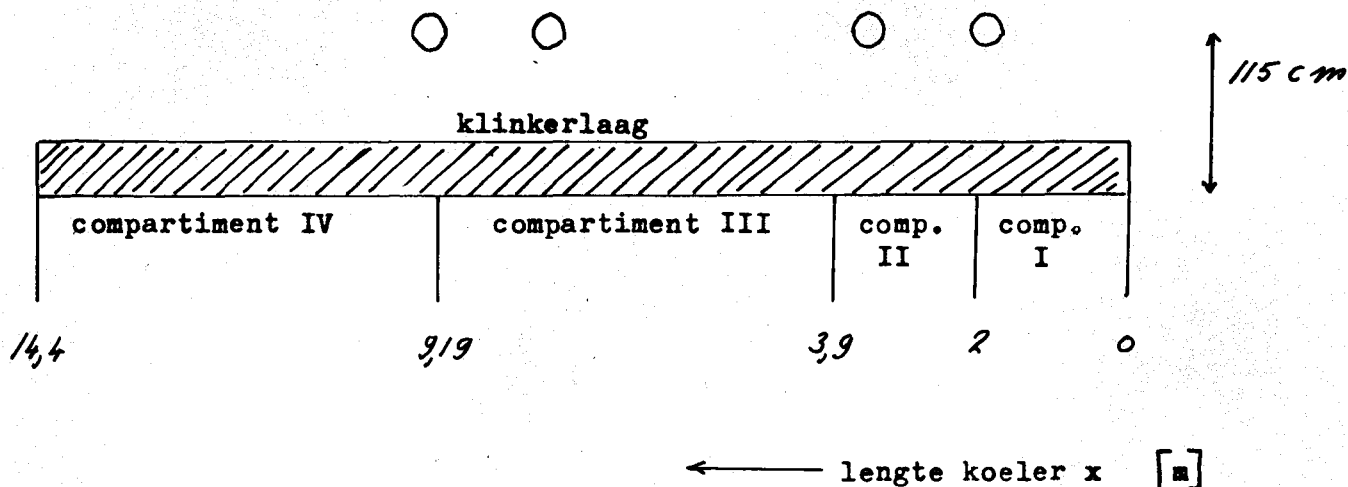


fig. 2.6.1 Meetgaten.

Hierdoor is het mogelijk op vier plaatsen het temperatuurprofiel van de lucht in de breedterichting te bepalen. Alle luchttemperatuurmetingen boven het klinkerbed die hier worden besproken zijn uitgevoerd met de IVO--afzuigpyrometer.

In figuur 2.6.2 zijn de breedteprofielen weergegeven onder de volgende condities:

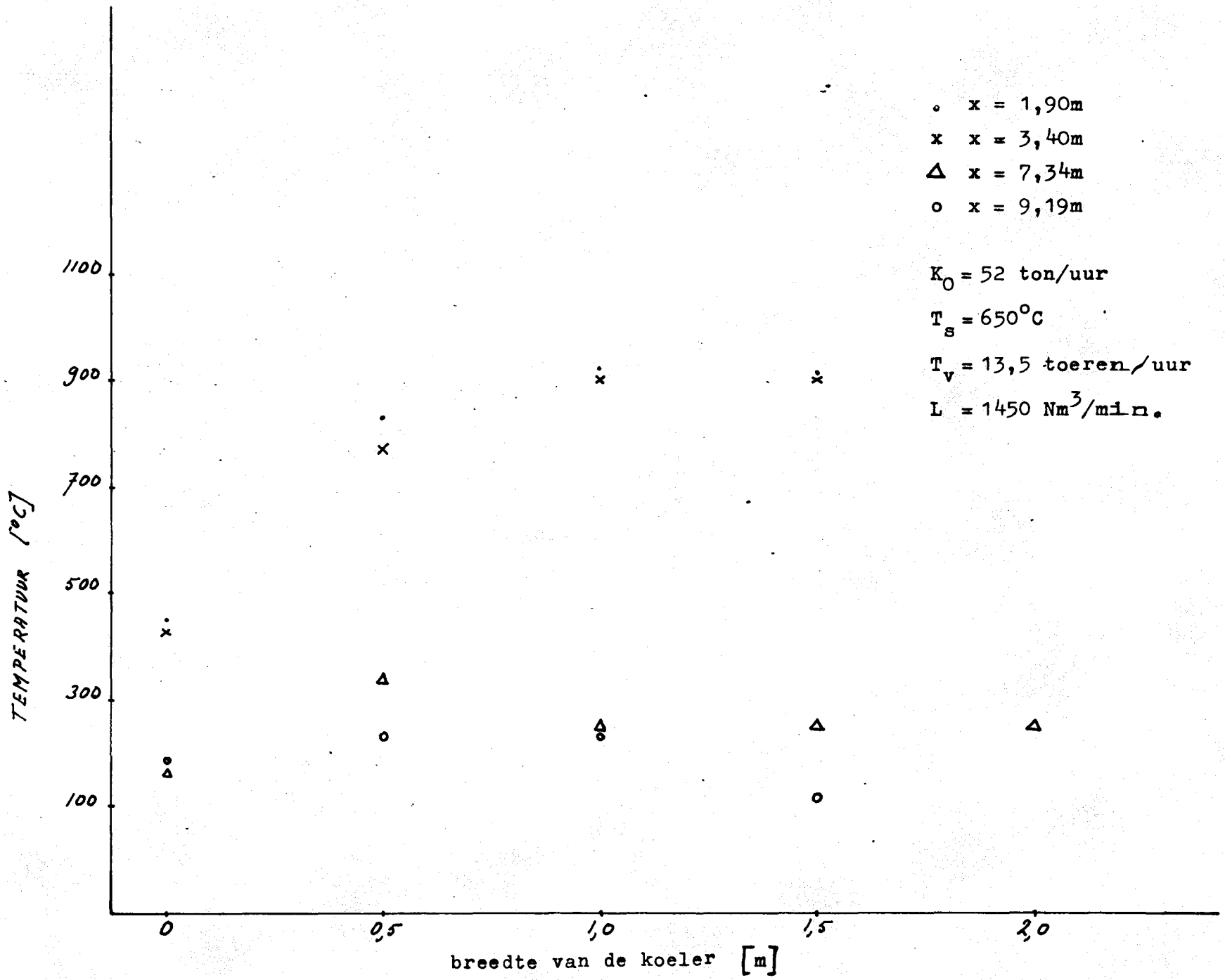
klinkerproductie	: 52 ton/uur
toerental roosteraandrijving	: 13,5 toeren/min.
hoeveelheid lucht door compartiment I + II	: 1450 Nm <sup>3</sup> /min.

Tijdens deze meting was de secundaire luchttemperatuur: 650°C.

Tengevolge van de lengte van de pyrometer was het niet mogelijk over de volle breedte van de koeler te meten, maar we nemen aan dat het temperatuurprofiel symmetrisch is t.o.v. het midden van het rooster. Uit deze grafiek blijkt dat aan de randen van het rooster een lagere temperatuur heerst dan in het midden hetgeen ons vermoeden bevestigd dat is uitgesproken in par. 2.2.1. Er treden nu langs de randen van het rooster een viertal effecten op:

1. Tengevolge van de distribuerende kracht uitgaande van de roosterbeweging zal een ongelijkmatige materiaalverdeling in de breedterichting op den duur teniet gedaan worden. Er treedt menging op waardoor warmere klinker uit het midden naar de randen wordt getransporteerd.

Fig. 2.6.2 Temperatuurprofielen in de breedte van de koeler.



2. Klinker die in het begin van de koeler reeds aan de rand ligt zal vlugger afkoelen doordat aan de randen meer lucht door de klinkerlaag passeert vanwege het feit dat daar de bedweerstand het kleinst is.
3. Door contact met de koelerwand zal de klinker aan de rand van het rooster langzamer bewegen t.o.v. de klinker in het midden van het rooster. Hierdoor krijgt de klinker aan de wand meer kans om af te koelen met als gevolg een lagere luchttemperatuur.
4. Langs de koelerwand bevindt zich de relatief koudere grenslaag door warmteverlies naar de omgeving.

Omdat uit de metingen volgt dat voor  $x$  groter dan 7 m het temperatuurprofiel vrij vlak loopt, blijkt dat de effecten 3 en 4 van ondergeschikt belang zijn. Het bepalen van een dergelijk breedteprofiel voor vier waarden van  $x$  is t.g.v. de traagheid van de IVO-pyrometer zo langdurig dat de kans groot is dat gedurende de meting de omstandigheden in de koeler veranderen. Aangezien we verwachten dat er onder andere omstandigheden weinig zal veranderen aan het kwalitatief verloop van de breedteprofielen, zijn alle andere metingen slechts op één plaats in de breedte verricht en wel op 1,50 m van de wand.

De figuren 2.6.3 t/m 2.6.6 geven het verband weer tussen de luchttemperaturen in afhankelijkheid van de lengte van de koeler bij een bepaald luchtdebiet door compartiment I en II; als parameters treden op het toerental van de roosteraandrijving en de klinkerproduktie. Tevens is in deze grafieken de secundaire luchttemperatuur aangegeven. Vermeld dient te worden dat de waarden van de klinkerproduktie gemiddelden zijn over 24 uur. Bij het vergelijken van de grafieken dient men er rekening mee te houden dat er nog onbekende variaties kunnen optreden in b.v. klinkerinlaattemperatuur en granulatie van de klinker.

Voor het bepalen van een volledig temperatuurprofiel geven vier punten te weinig informatie vooral om de volgende redenen:

1. De luchttemperatuur zal niet monotoon dalen omdat er in de compartimenten verschillende luchthoeveelheden onder het rooster worden geblazen. Het liefst zou men dan in ieder compartiment op zijn minst twee temperaturen moeten kennen om iets over het temperatuurprofiel te kunnen zeggen.
2. De klinker die uit de oven valt zal in de koeler over een gebied ter lengte van ca. één meter terecht komen. In het begin van de koeler verwachten we dan ook in de lengte een kleine temperatuurgradiënt.

$T_v = 14$  toeren/min.

$T_s = 638^\circ\text{C}$

$K_0 = 56,3$  ton/uur

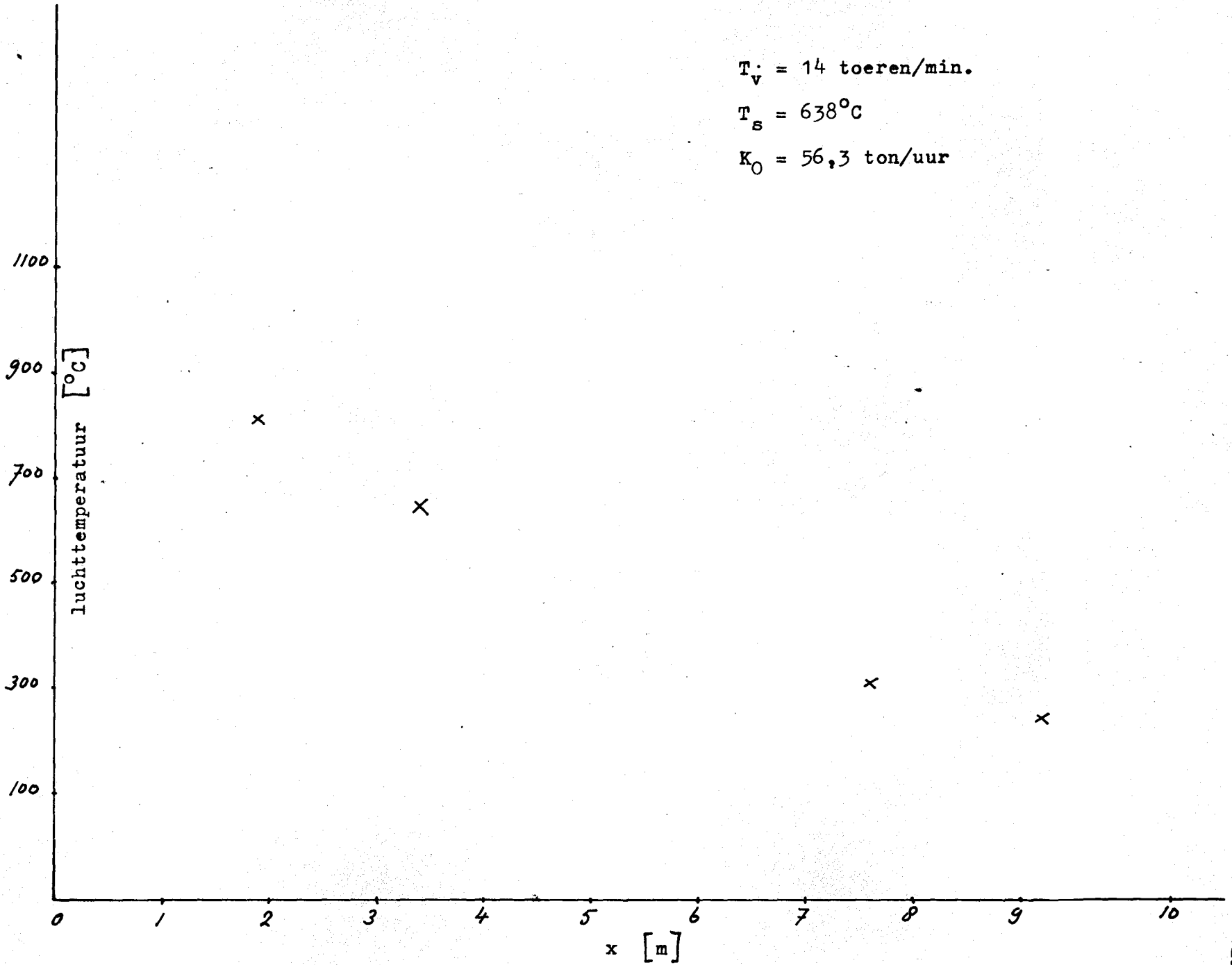


Fig. 2.6.3 Temperatuurprofiel in de lengte van de koeler;  
 $L_I + L_{II} = 1600 \text{ Nm}^3/\text{min.}$

- o 54,6 ton/uur,  $T_v = 14$  toeren/min.  
 $T_s = 588^\circ\text{C}$
- x 52,7 ton/uur,  $T_v = 13,5$  toeren/min.  
 $T_s = 613^\circ\text{C}$

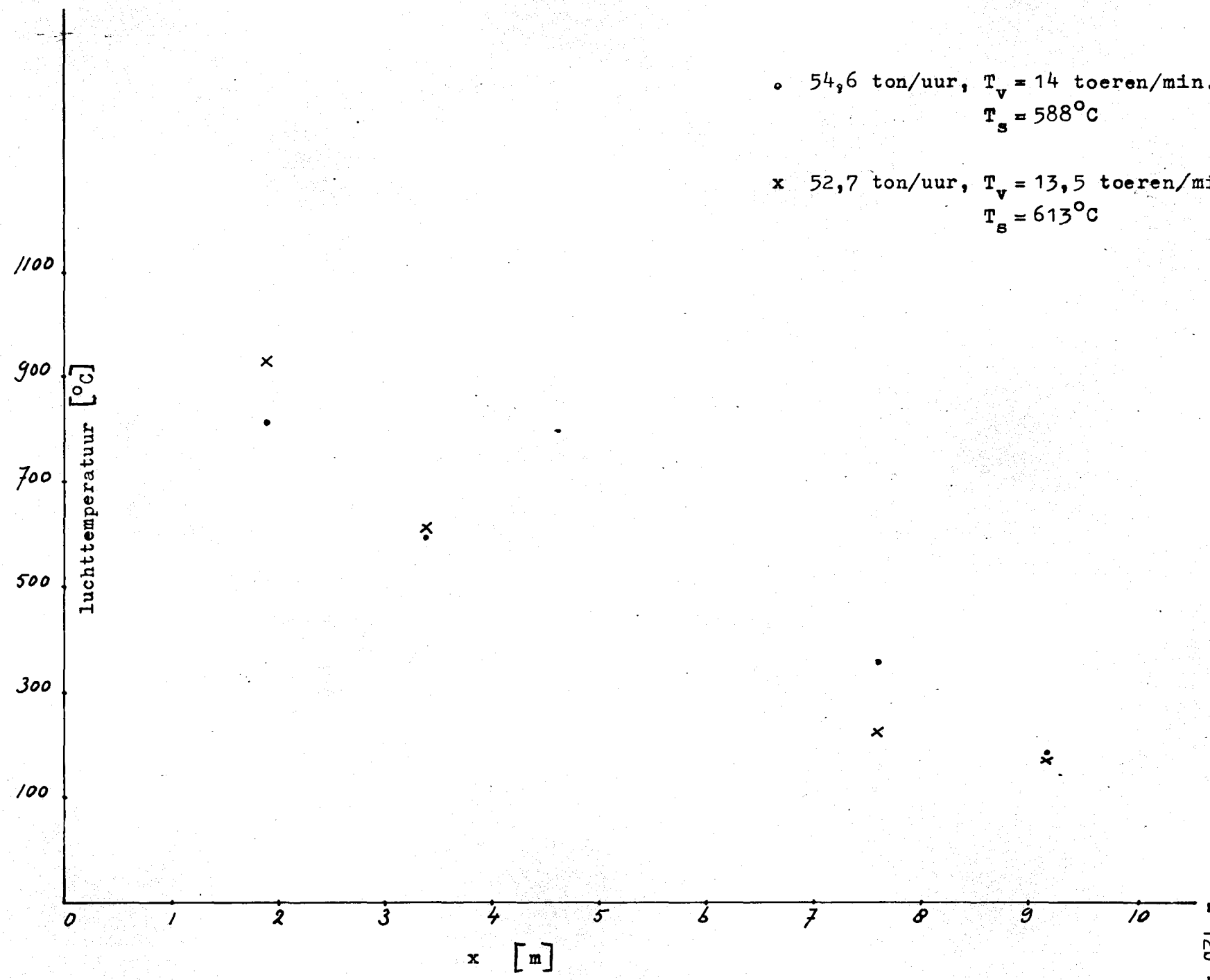
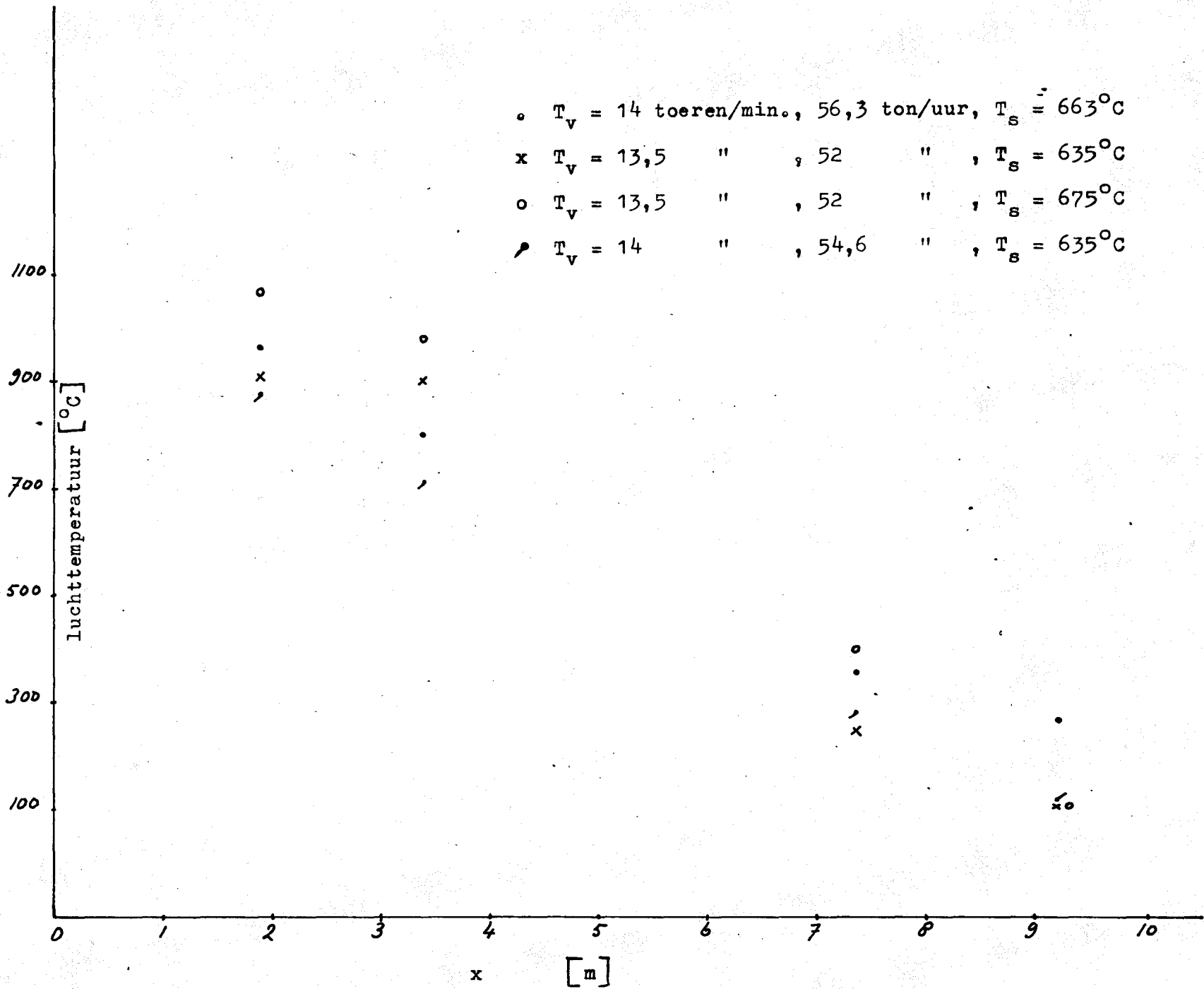


Fig. 2.6.4 Temperatuurprofiel in de lengte van de koeler;  
 $L_I + L_{II} = 1500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ .



Fig. 2.6.5 Temperatuurprofiel in de lengte van de koeler;  
 $L_I + L_{II} = 1450 \text{ Nm}^3/\text{min}.$



x	$T_v = 14$	toeren/	minuut,	59,4	ton/	uur,	$T_{\text{m}}$	= 610°C
o	$T_v = 14$	"	"	55,8	"	"	$T_{\text{m}}$	= 663°C
Δ	$T_v = 17$	"	"	55,8	"	"	$T_{\text{m}}$	= 625°C
□	$T_v = 10$	"	"	55,8	"	"	$T_{\text{m}}$	= 663°C
∩	$T_v = 14,3$	"	"	59,4	"	"	$T_{\text{m}}$	= 685°C
o	$T_v = 14,3$	"	"	54,6	"	"	$T_{\text{m}}$	= 650°C
∅	$T_v = 10$	"	"	54,6	"	"	$T_{\text{m}}$	= 640°C

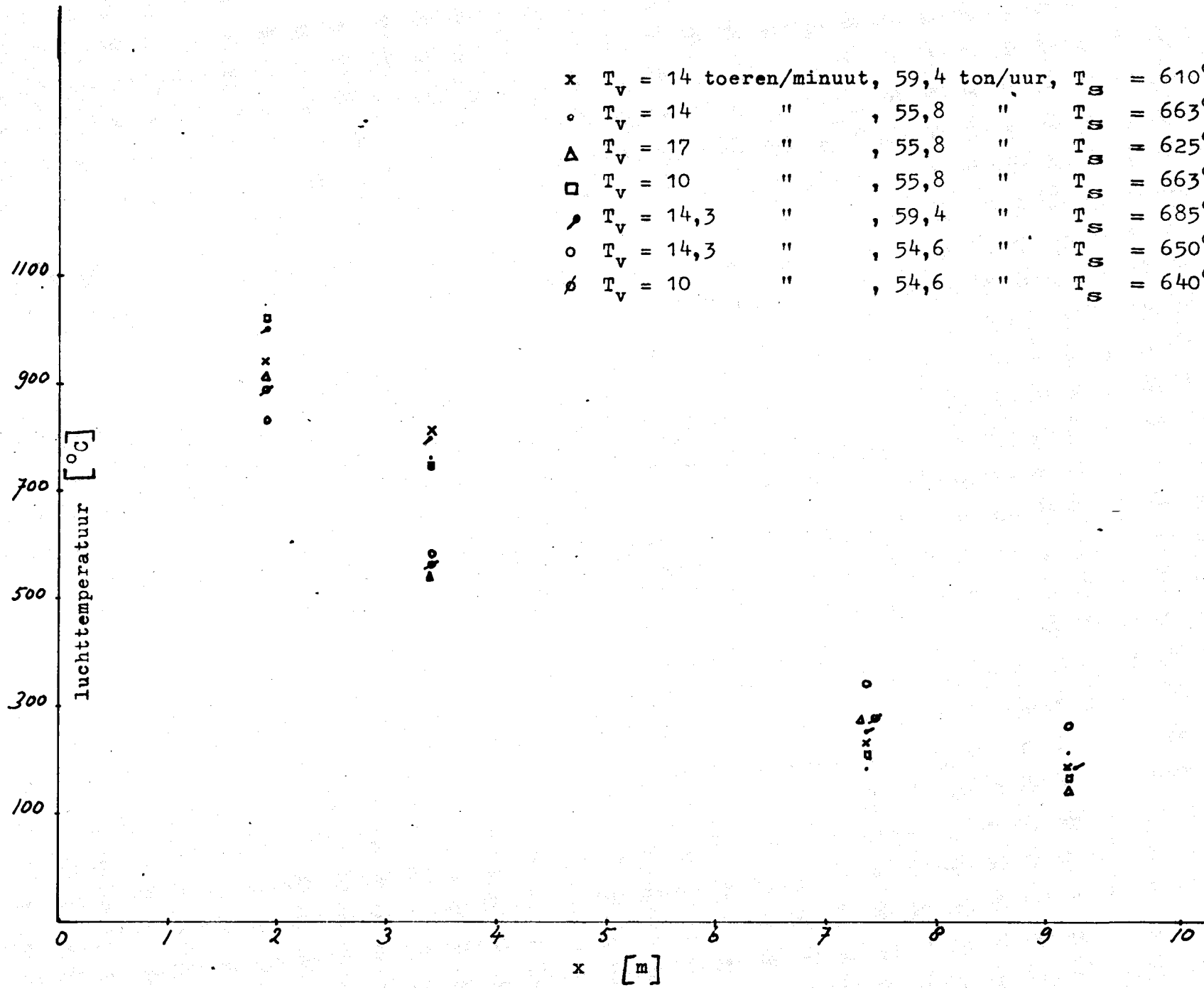
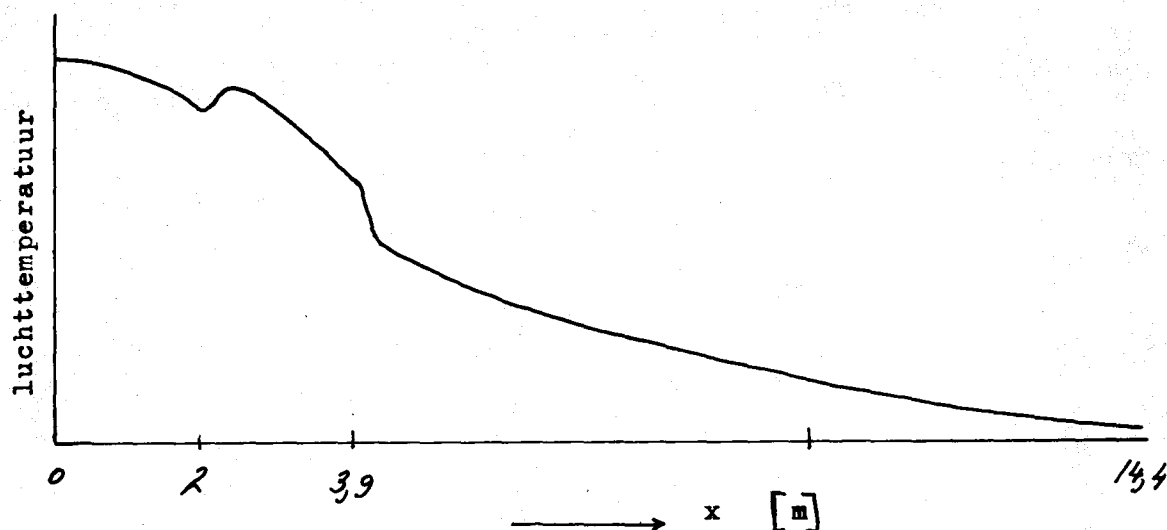


fig. 2.6.6 Temperatuurprofiel in de lengte van de koeler;  
 $L_I + L_{II} = 1550 \text{ Nm}^3/\text{min}$ .

Uitgaande van deze beschouwingen is in figuur 2.6.7 het kwalitatieve verloop van de luchttemperatuur gegevens zoals dat optreedt indien door compartiment I meer lucht gaat dan door compartiment II en door compartiment III en IV meer lucht gaat dan door compartiment II.



figuur 2.6.7 Luchttemperatuurprofiel.

Door de volgende omstandigheden was het niet mogelijk op meer plaatsen in de koeler temperaturen te meten:

1. Tengevolge van obstakels voor de koelerwand kon niet op elke gewenste plaats gaten worden geboord.
2. Om beschadiging van de IVO-pyrometer door vallende klinker te voorkomen kon in compartiment I alleen maar aan het einde ervan temperaturen gemeten worden.

Bekijken we nu b.v. in fig. 2.6.6 de metingen voor (59,4 ton/uur, 14 toeren/min.) en (54,6 ton/uur, 14,3 toeren/min.) dan vinden we achtereenvolgens op de vier meetplaatsen de volgende temperatuurverschillen:  $+110^{\circ}\text{C}$ ,  $+230^{\circ}\text{C}$ ,  $-110^{\circ}\text{C}$  en  $-80^{\circ}\text{C}$ . Bij de gegeven omstandigheden verwachten we een positief temperatuurverschil omdat in het eerste geval de klinkerlaag dikker is en de verblijftijd kleiner. Variaties in de momentane klinkeropbrengst van de oven kan de oorzaak zijn van het niet-eenduidig teken van het temperatuurverschil. Het verschil in de secundaire luchttemperatuur tussen beide gevallen is  $-40^{\circ}\text{C}$  hetgeen niet is af te leiden uit het verschil in de luchttemperaturen in de eerste twee compartimenten. De verklaring hiervoor ligt waarschijnlijk aan het feit dat de hoeveelheid secundaire lucht is veranderd t.g.v. wijziging van de condities in de oven.

Uit dit ene voorbeeld blijkt dat het interpreteren van de metingen bijzonder

moeilijk is zonder nadere gegevens. Over het nut van deze metingen in het kader van de dynamica van de koeler zullen we het later nog hebben.

Tot slot enkele gegevens over de klinkertemperatuur aan het begin en einde van de koeler. De klinkerinlaattemperatuur is slechts in incidentele gevallen gemeten vanwege de daarvoor benodigde manipulaties die een storende invloed op de oven hadden (onderdruk in de ovenkop). Gemiddeld is een temperatuur van  $1100^{\circ}\text{C}$  gevonden. Voor de gemiddelde temperatuur van de klinker op de transportband is  $170^{\circ}\text{C}$  gemeten.

## 2.7 Dynamische metingen

Deze metingen bestaan uit responsies van de secundaire luchttemperatuur  $T_s$  en het drukverschil over het klinkerbed in compartiment II  $\Delta P_{II}$  op stapvormige veranderingen in het toerental van de roosteraandrijving  $T_R$  en toerental van de ventilator die de lucht levert voor de eerste twee compartimenten  $T_v$ . De grootste moeilijkheid was het optreden van ongewenste veranderingen in klinkertoevoer en klinkertemperatuur.

a. Stap in  $T_R$  van 10 tot 18 toeren/min. (fig. 2.7.1)

Uit fig. 2.7.1 blijkt:

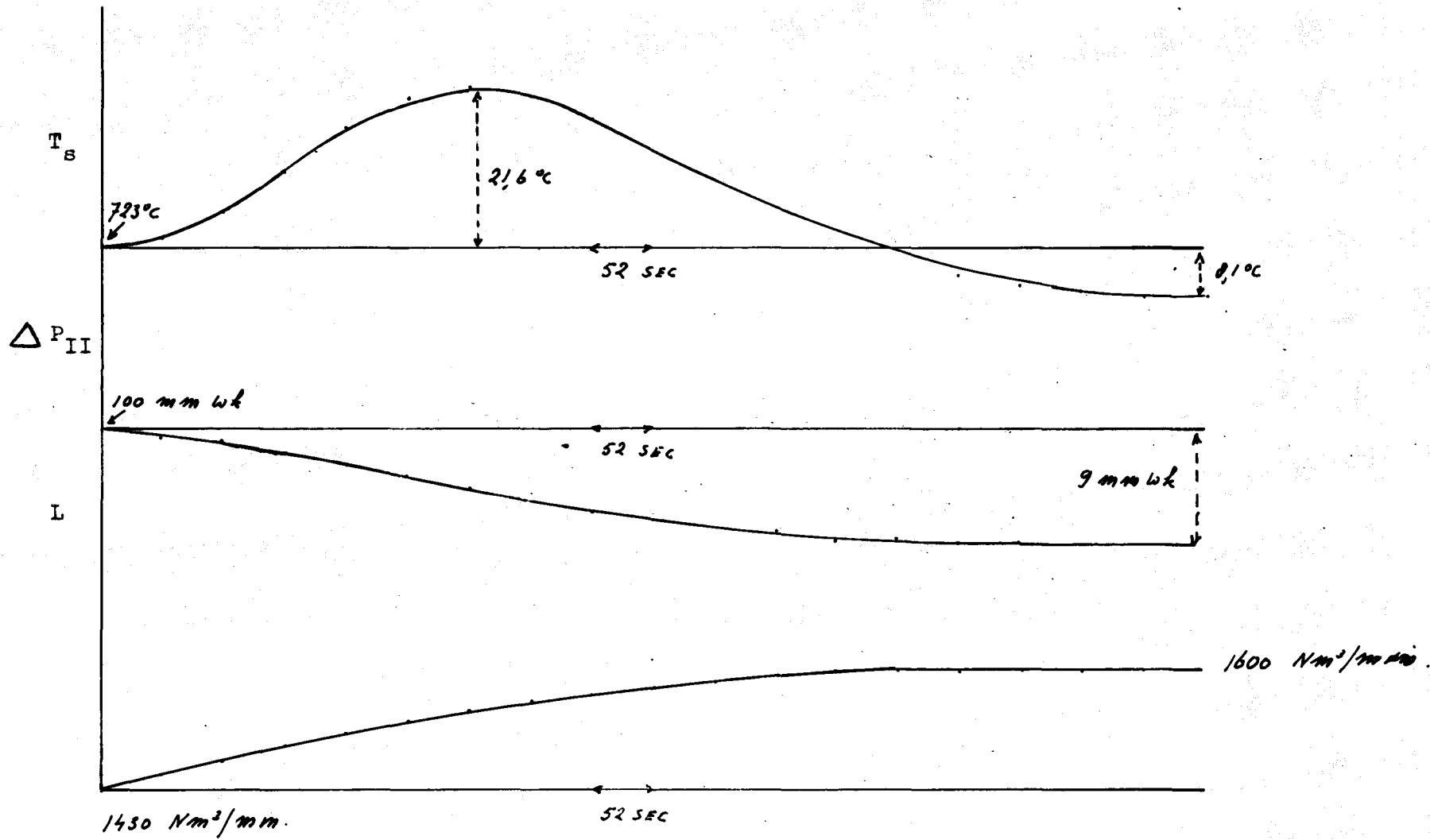
1.  $T_s$  verandert niet monotoon (inverse responsie). Dit is een systematisch optredend verschijnsel, zowel bij positieve als negatieve veranderingen in  $T_R$ .
2.  $\Delta P$  neemt na een dode tijd nagenoeg lineair af.

Om de inverse responsie van  $T_s$  te kunnen verklaren is in fig. 2.7.1 tevens het gedrag opgetekend van de hoeveelheid lucht in compartiment I plus II ( $L_I + L_{II}$ ). Ondanks het feit dat voor deze luchthoeveelheid een regeling aanwezig is, funktioneert deze kennelijk niet goed, omdat een toename van  $T_R$  (kleinere klinkerbedhoogte) gepaard gaat met een toename van  $L_I + L_{II}$ . Indien de hoeveelheid secundaire lucht constant is, heeft dit tot gevolg dat het denkbeeldig scheidingsvlak tussen de secundaire lucht en tubixlucht naar de kant van de koeleringang verschuift, hetgeen de toename van  $T_s$  verklaart.

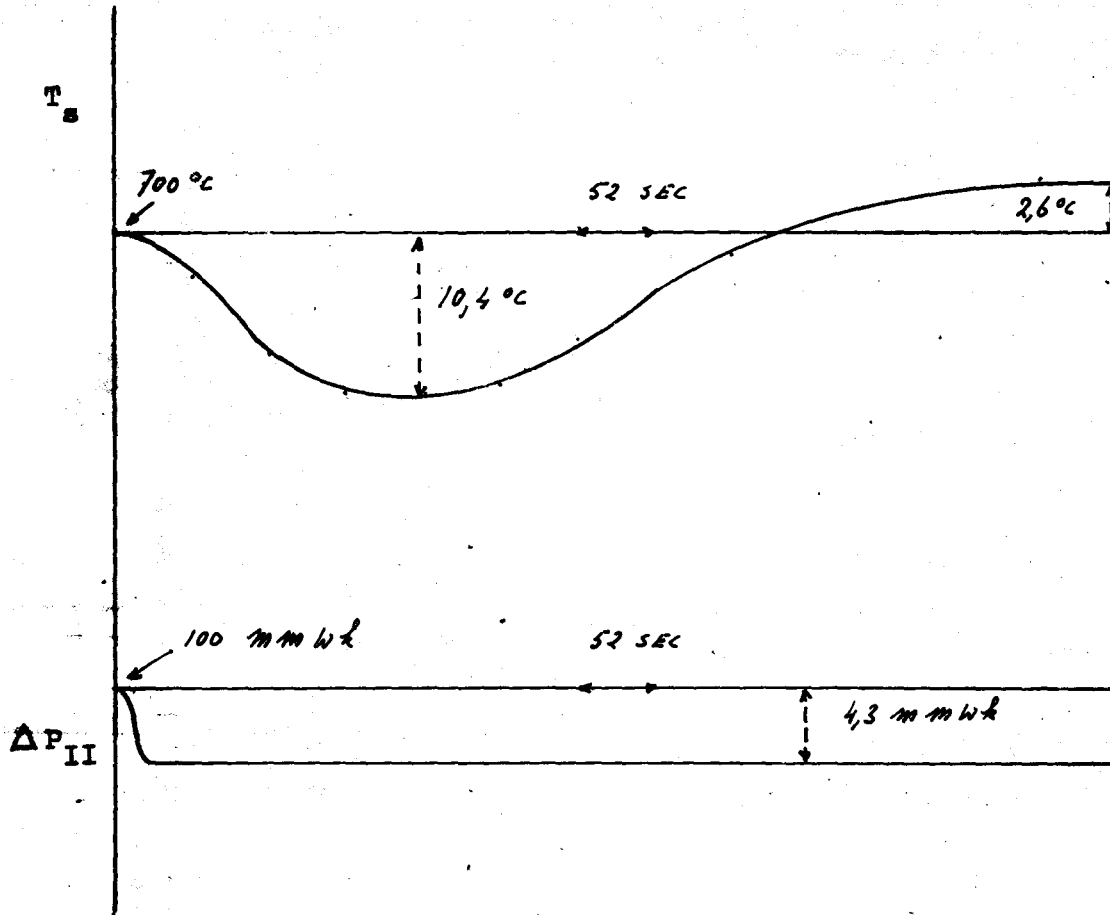
b. Stap in  $T_v$  van 950 tot 800 toeren/min. (fig. 2.7.2).

Uit fig. 2.7.2 blijkt dat  $T_s$  een inverse responsie vertoont, hetgeen weer verklaard kan worden uit een scheidingsvlakverplaatsing. De druk verandert nagenoeg instantaan.

Fig. 2.7.1 Step in toerental roosterandrjving  
(10 naar 18 toeren/min.)



$K_0 = 57,1 \text{ ton/uur.}$



$$K_0 = 57,1 \text{ ton/uur}$$

$$L_I + L_{II} = 1500 \text{ Nm}^3/\text{min.}$$

Fig. 2.7.2 Stap in toerental ventilator ( $L_I + L_{II}$ ) van 950 tot 800 toeren/min.

## 2.8 Klinkerverblijftijden

De klinkerbedhoogte wordt bij gegeven klinkerproductie bepaald door de verblijftijd van de klinker op het rooster en door de hoeveelheid klinker die door het rooster valt. De verblijftijd is langs experimentele weg bepaald, daarentegen is de hoeveelheid klinker die door het rooster valt aan de hand van een aanname berekend.

### 2.8.1 Klinkerverblijftijden in de koeler

Om de verblijftijd en verblijftijdspreiding van de klinker in de koeler te bepalen, is een impulsvormige storing in de materiaaltoevoer naar de koeler aangebracht. Het beste zou zijn klinker te gebruiken die zich door middel van een markering, b.v. radioactiviteit, van de andere klinker onderscheidt. Voor het gemak zijn echter tauwstenen en stalen kogels gebruikt.

Het voordeel van tauwstenen (hard materiaal dat aangetroffen wordt in een mergellaag) is dat ze nagenoeg dezelfde vorm en dichtheid hebben als klinker en door hun gele kleur gemakkelijk te detecteren zijn. Hier staat als nadeel tegenover dat door de hoge temperatuur in de koeler de tauwstenen stuk kunnen springen. Wanneer het merendeel van de gebroken stukken zo klein is dat ze door het rooster vallen, dan blijven er te weinig stukken over om een redelijke verblijftijd en spreiding te meten. Dit laatste effect zou men ten eerste kunnen vermijden door grotere stukken tauw te nemen, waarvan men kan aannemen dat de gebroken stukken zo groot zijn dat ze niet door het rooster vallen. Het bezwaar hiertegen is dat niet of zwak gebroken stukken in de breker terecht komen en vervolgens weer op het rooster geworpen worden, met het gevolg dat de verblijftijd en spreiding gestoord worden; bovendien zullen tauwstenen die een veel grotere afmeting hebben dan de gemiddelde klinkerdiameter een afwijkende verblijftijd hebben t.o.v. de klinker. Op de tweede plaats zou men veel kleine stenen kunnen nemen. Ondanks dat na het stukspringen een gedeelte door het rooster valt, zal er genoeg overblijven om een verblijftijd te meten. Het is echter praktisch niet uitvoerbaar al deze stenen tegelijk in de koeler te deponeren.

Voorgaande bezwaren worden grotendeels ondervangen bij het gebruik van stalen kogels met een diameter van vier cm. Omdat deze kogels een grotere soortelijke massa hebben dan klinker, is het mogelijk dat het bewegingsgedrag enigszins verschilt van dat van klinker. Desondanks lijkt dit, de meetmethode en eenvoud in aanmerking genomen, het beste compromis.

De impulsvormige storing is benaderd door op een bekend tijdstip een juttzak met meestal vijftig kogels in de koeler te werpen. De zak zal onmiddellijk verbranden t.g.v. de hoge temperatuur. Men meet nu van iedere kogel de tijd tussen het deponeren in de koeler en het verschijnen op de klinkertransportband. Dit experiment is herhaald bij verschillende toerentallen van de roosteraandrijving.

Een effect dat steeds optreedt is, dat niet alle kogels op de klinkertransportband worden gedetekteerd. Oorzaken zijn defecte roosterplaten, waardoor kogels in de silo's onder het rooster terecht komen, en het feit dat na het rooster de klinker door middel van een sleepketting wordt getransporteerd. In de sleepkettingruimte zijn plaatsen waar de klinker nagenoeg immobiel is. Omdat op vastgestelde tijden de silo's onder het rooster leeggemaakt moeten worden, is de detektietijd beperkt. Tijdens dit leegmaken is de klinkerlaag op de klinkertransportband namelijk zo dik, dat het niet meer mogelijk is kogels waar te nemen.

In de fig. 2.8.1.1 t/m 2.8.1.6 zijn de experimentele resultaten weergegeven in de vorm van een histogram, waarin het aantal kogels vermeld is dat in een bepaald tijdsinterval op de klinkertransportband verschijnt. Uit ieder histogram wordt de gemiddelde verblijftijd  $\tau$ , standaardafwijking  $\sigma$  en relatieve standaardafwijking  $\sigma/\tau$  bepaald.

In fig. 2.8.1.7 is het verband weergegeven tussen de gemiddelde verblijftijd en het toerental van de roosteraandrijving. Opvallend is daarbij de discrepantie bij toerental 13 tussen de verblijftijden gemeten met stalen kogels en tauwstenen. In fig. 2.8.1.8 en 2.8.1.9 is het verband weergegeven tussen het toerental van de roosteraandrijving en de standaardafwijking resp. relatieve standaardafwijking. Uit deze laatste grafieken kunnen we concluderen dat het transport van de klinker in de koeler bij benadering als propstroom opgevat mag worden.

Voor latere toepassingen zijn we niet geïnteresseerd in de verblijftijd in de koeler maar meer in de verblijftijd op het rooster. Om deze laatste te bepalen gaan we als volgt te werk.

$$\tau = \tau_R + \tau_s ; \quad \tau_s = L_s / v_s \quad (2.8.1.1)$$

$\tau_R$  = verblijftijd op het rooster

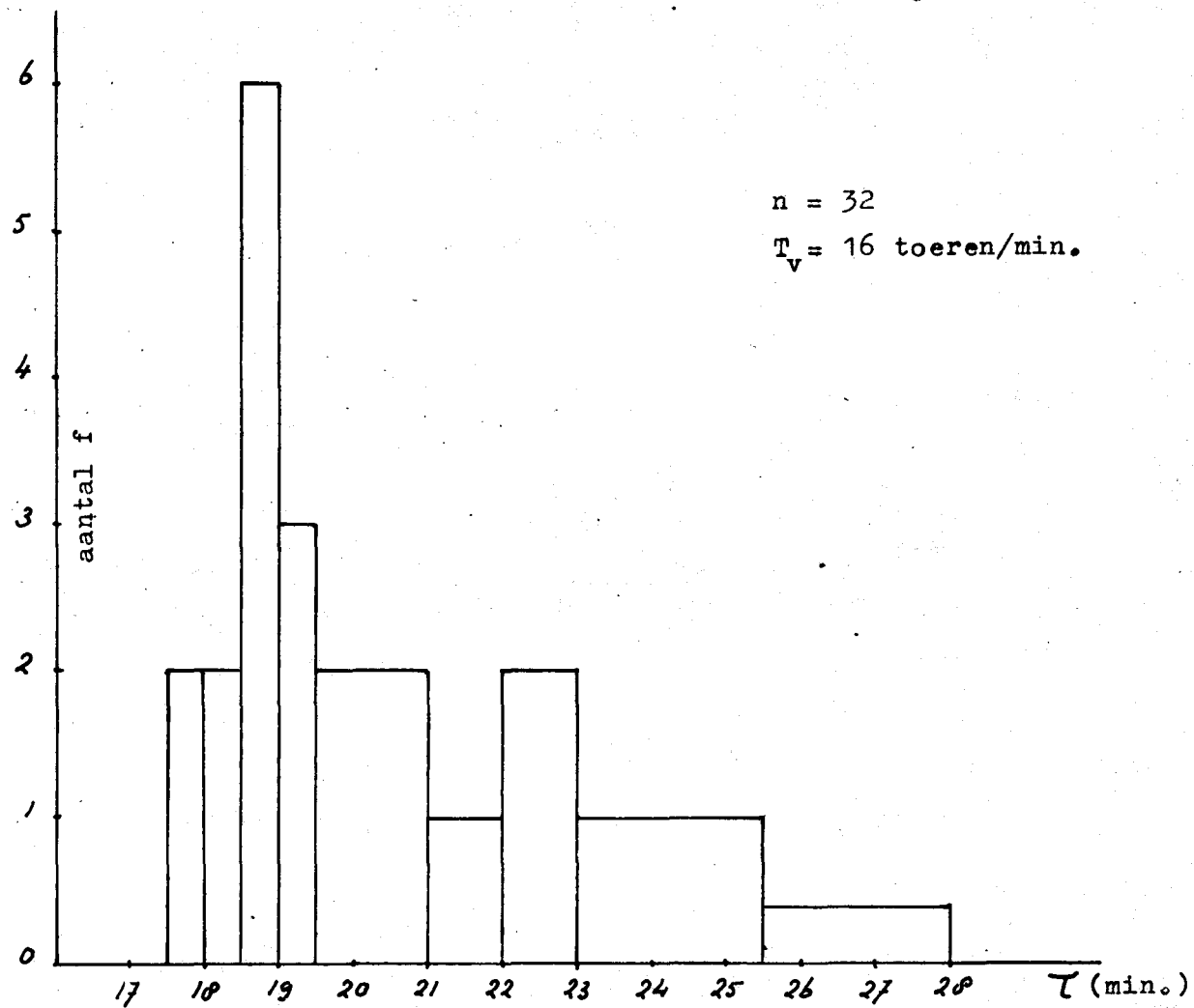
$\tau_s$  = verblijftijd in de sleepkettingruimte

$L_s$  = lengte sleepkettingruimte

$v_s$  = klinkersnelheid in sleepkettingruimte



fig. 2.8.1.1 Klinkerverblijftijd.



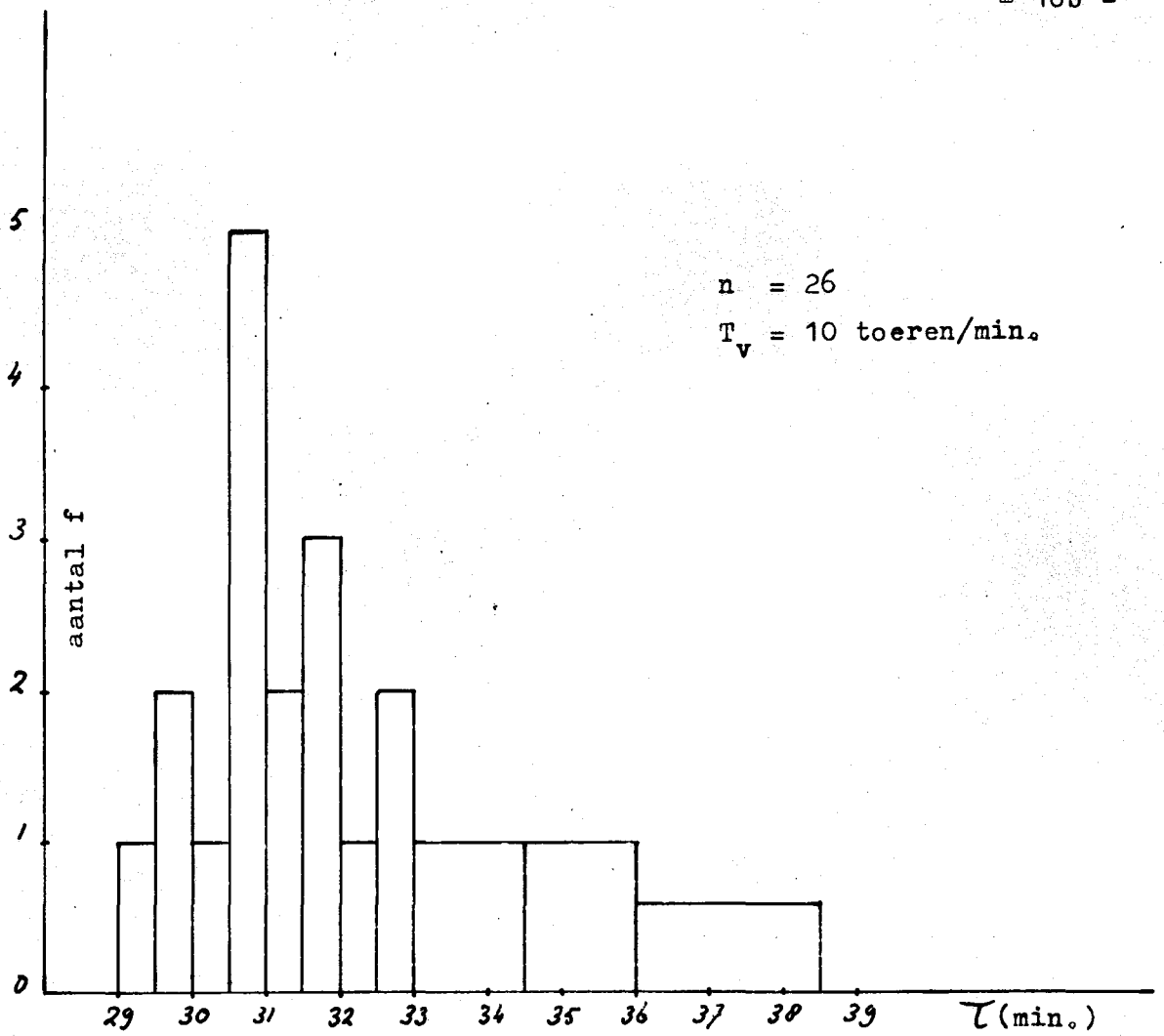


Fig. 2.8.1.3 Klinkerverblijftijd

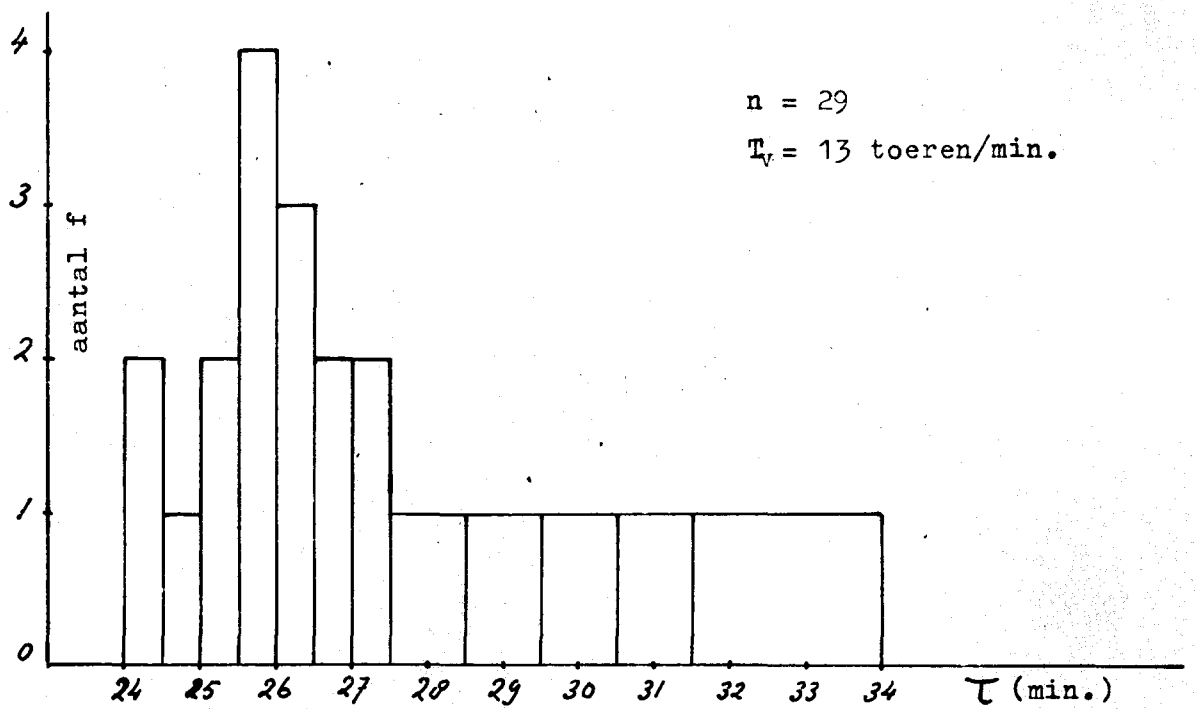


Fig. 2.8.1.3 Klinkerverblijftijd

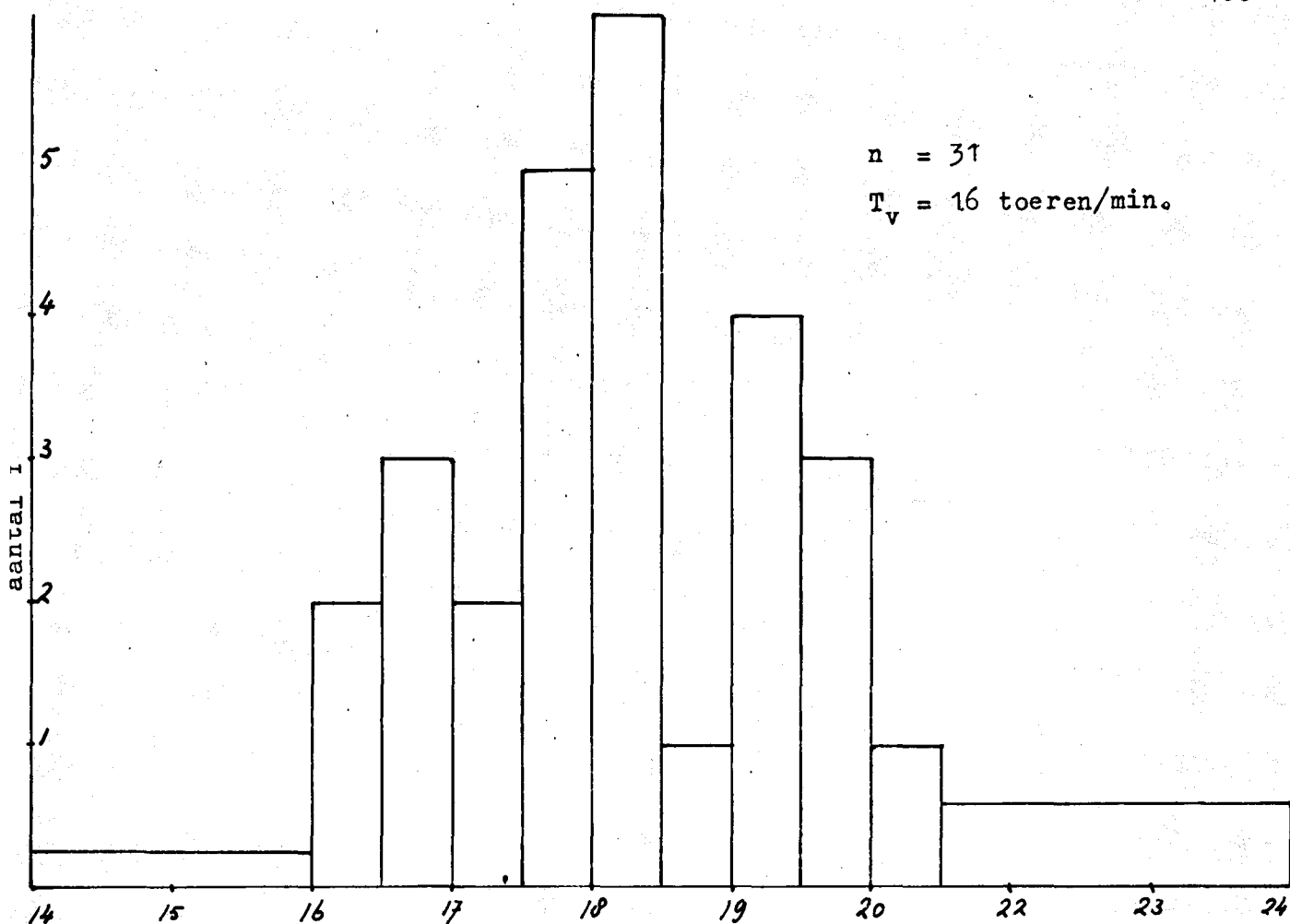


fig. 2.8.1.4 Klinkerverblijftijd

$\tau$  (min.)

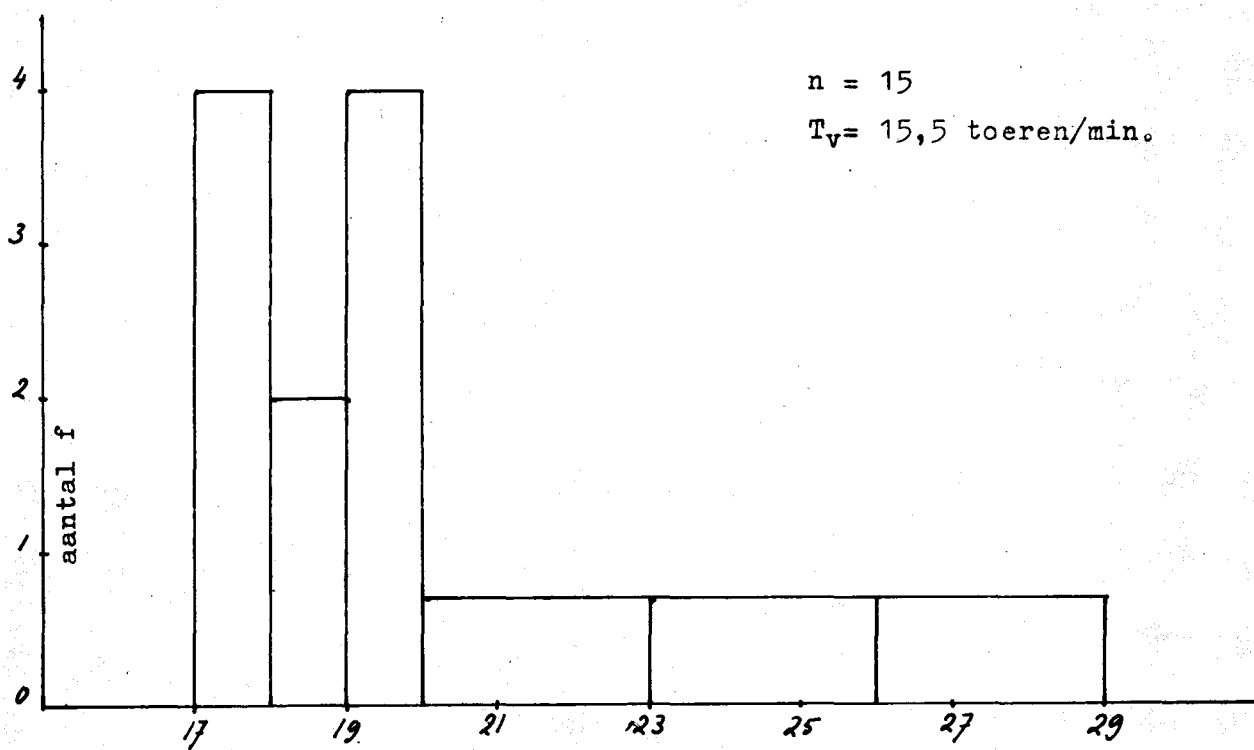


fig. 2.8.1.5 Klinkerverblijftijd

$\tau$  (min.)

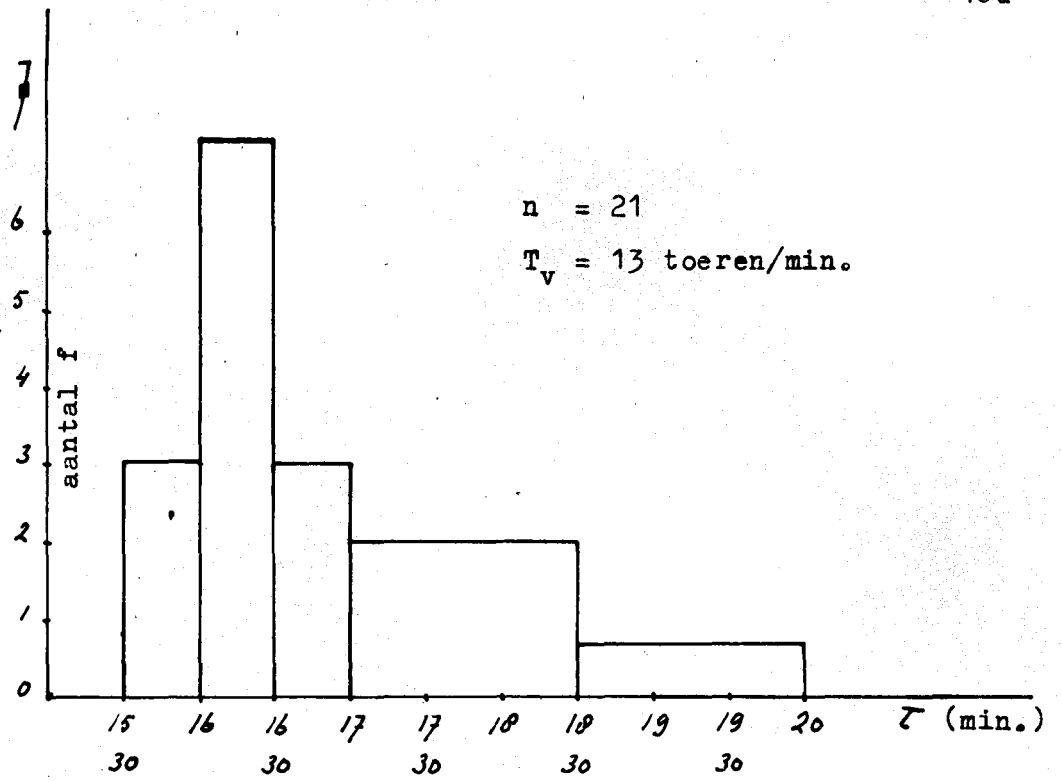


fig. 2.8.1.6 Klinkerverblijftijd

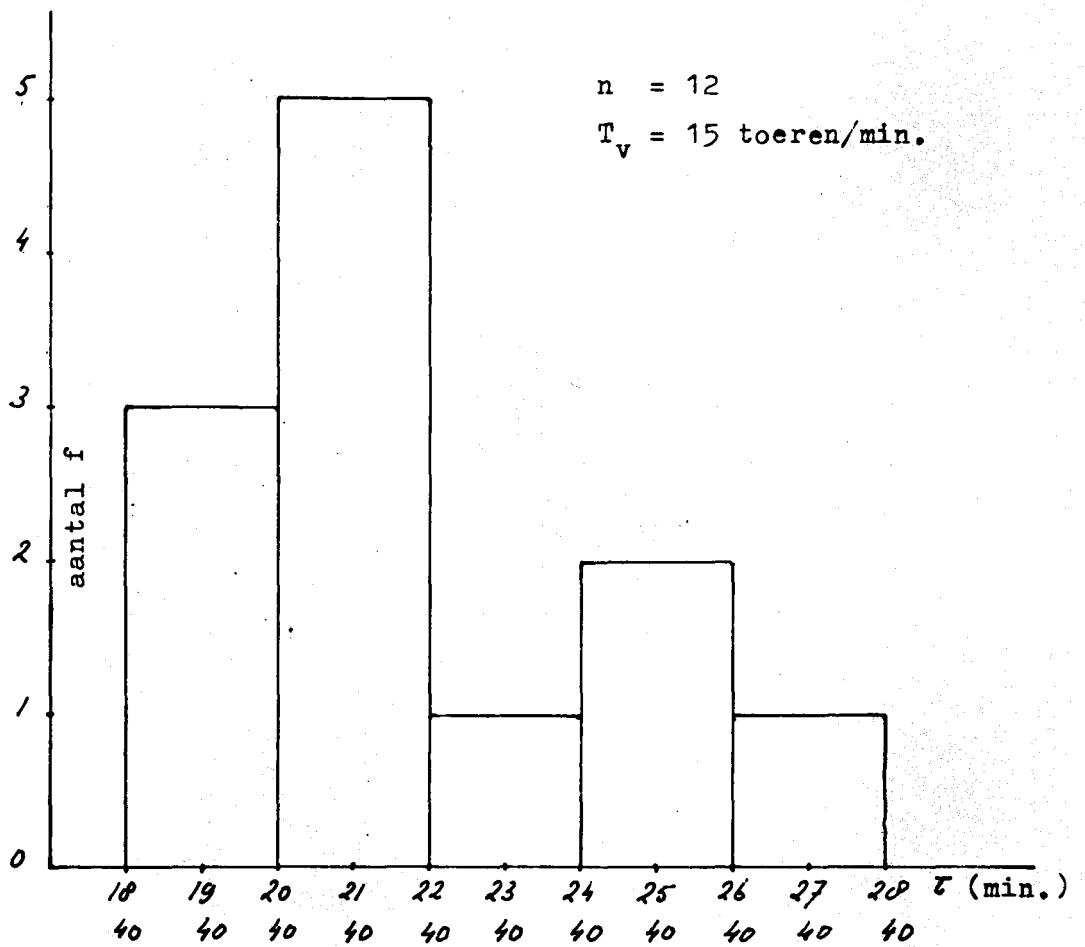
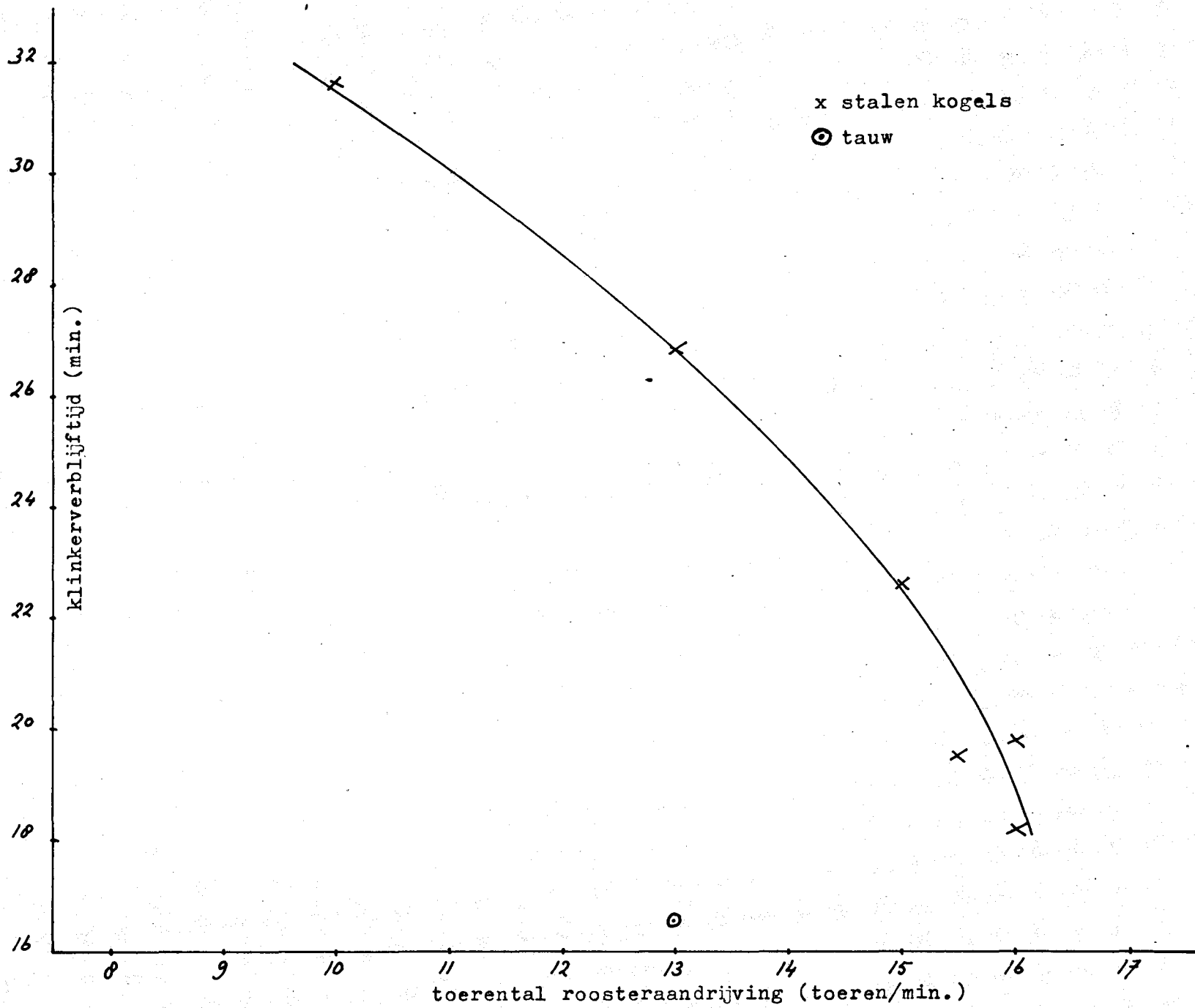


fig. 2.8.1.7 Klinkerverblijftijd

fig. 2.8.1.7 Klinkerverblijftijd als functie van het toerental van de roosteraandrijving.



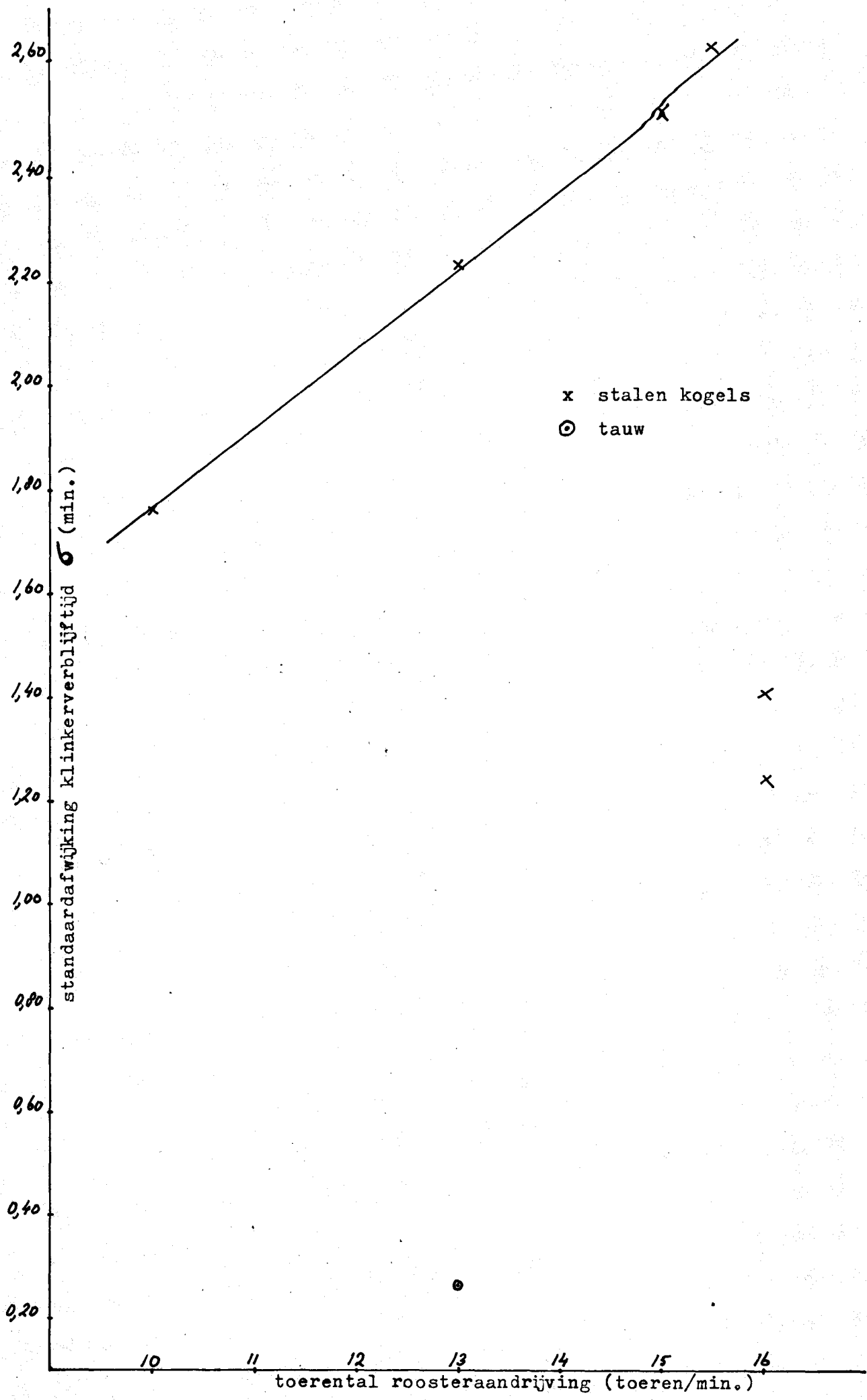


Fig. 2.8.1.8 Standaardafwijking als functie van het toerental van de roosteraandrijving.

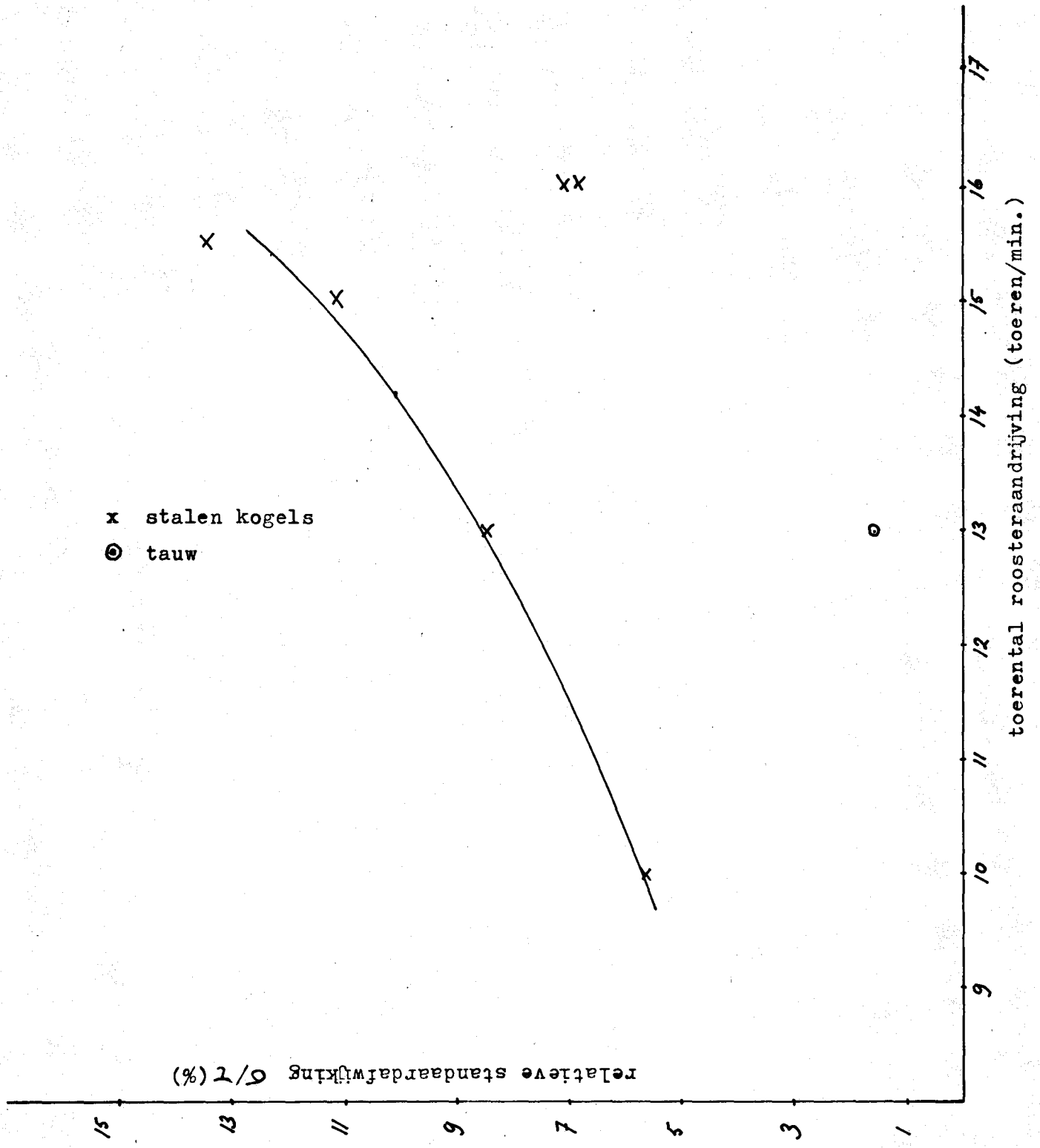


fig. 2.8.1.9 Relatieve standaardafwijking als functie van het toerental van de roosteraandrijving.

We stellen nu dat  $V_s$  hoogstens gelijk is aan de snelheid van de sleepketting (= 0,14 m/s). Zodoende is  $\tau_s$  op z'n minst gelijk aan 42 sec.  $\tau_s$  is bepaald door bij een bepaalde roostersnelheid met direkte waarneming van de klinker op het rooster de snelheid van de klinker te meten. Uit deze direkt gemeten snelheid volgt dan de verblijftijd op het rooster. Aangezien bij deze roostersnelheid ook de totale gemiddelde verblijftijd in de koeler gemeten is, levert het verschil de verblijftijd op in de sleepkettingsruimte. Met deze methode vinden we voor  $\tau_s$  5 min. 5 min. lijkt echter bij nadere beschouwing van het sleepkettingsmechanisme te hoog, zodat voor  $\tau_s$  het gemiddelde van 5 min. en 42 sec. genomen wordt; dus  $\tau_s = 2,85$  min. Zodoende is dus:

$$T_R = \tau - 2,85 \quad (2.8.1.2)$$

De klinkerverblijftijden op het rooster als functie van het toerental van de roosteraandrijving staan vermeld in figuur 2.8.1.10.

### 2.8.2 Klinkerverlies door het rooster

We nemen aan dat de hoeveelheid klinker die per meter per sec. door het rooster valt als functie van de plaats in de koeler te schrijven is als:

$$D = D_0 \left(1 - \frac{X}{L_R}\right) \quad (2.8.2.1)$$

$D$  = klinkerverlies door het rooster (kg/m sec.)

$X$  = lengtecoördinaat koeler (m)

$L_R$  = lengte rooster (m)

De hoeveelheid klinker die per seconde in de eerste silo terechtkomt is:

$$\int_{X=0}^{X=X_1} D dX = \int_{X=0}^{X=X_1} D_0 \left(1 - \frac{X}{L_R}\right) dX = \frac{\text{volume silo} \times \text{litergewicht klinker}}{\text{vultijd silo}} \quad (2.8.2.2)$$

Met de volgende gegevens:

$X_1$  = lengte compartiment I = 1,9m

$L_R$  = lengte rooster = 14,4m

Volume silo = 4m<sup>3</sup>

Litergewicht klinker = 1,7kg

Vultijd silo = 1 uur



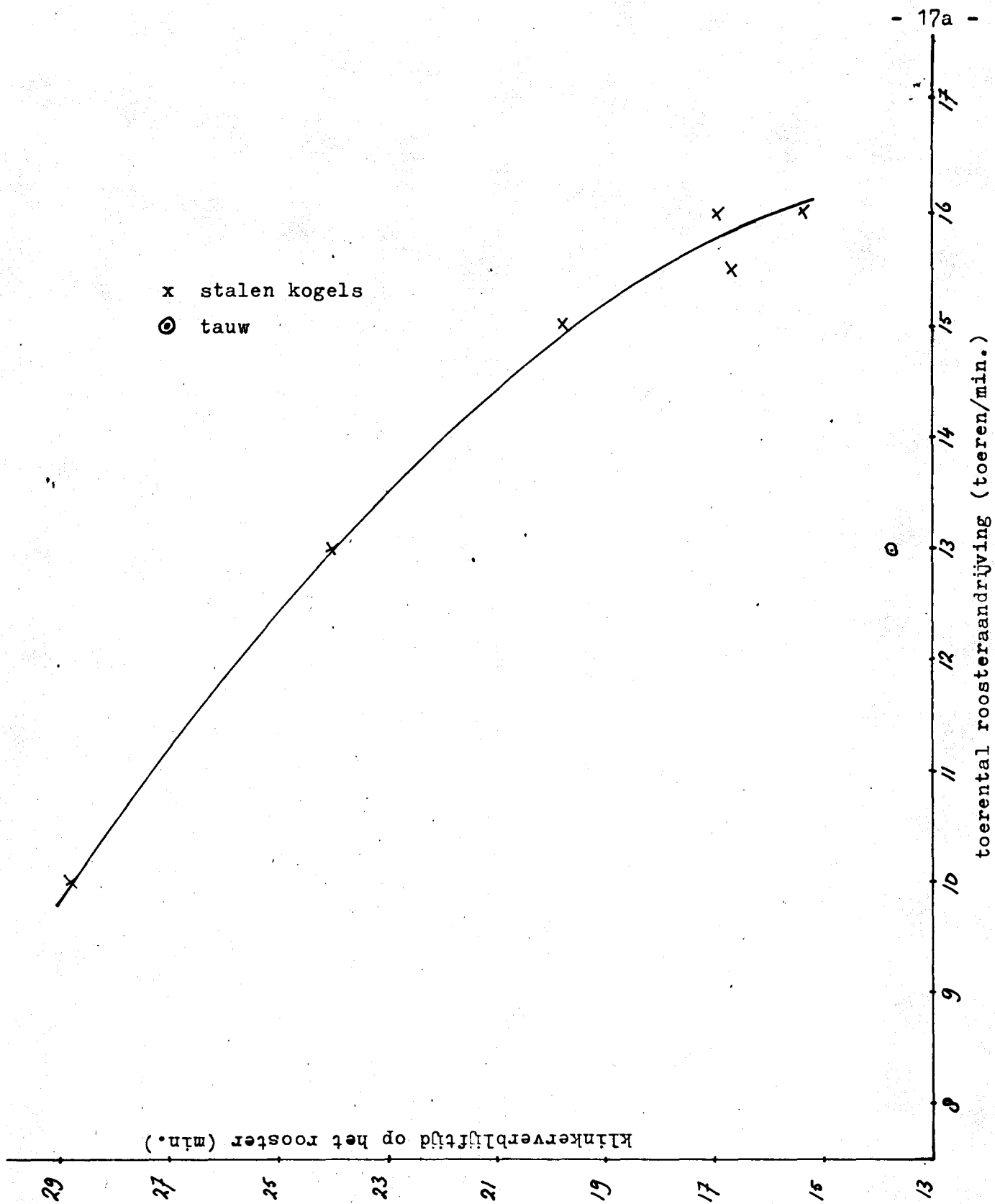


Fig. 2.8.1.10 Klinkerverblijftijd op het rooster als functie van de roosteraandrijving.

vinden we:  $D_0 = 1,05 \text{ kg/m sec.}$ , dus:

$$D = 1,05 \left( 1 - \frac{X}{14,4} \right) \text{ kg/ms}$$

### 2.8.3 Hoogte van de klinkerlaag op het rooster

De materiaalbalans voor een klinkerpakketje ter lengte  $\Delta X$  luidt:

$$\frac{\partial K}{\partial t} \Delta X = VK(X) - VK(X + \Delta X) - S_z \Delta X - D \Delta X \quad (2.8.3.1)$$

$K$  = hoeveelheid klinker op het rooster per meter (kg/m)

$V$  = gemiddelde snelheid van de klinker op het rooster (m/s)

$S_z$  = klinkerstof die per meter per seconde ontwijkt (kg/ms)

In stationaire toestand ( $\partial K / \partial t = 0$ ) en bij verwaarlozing van de klinkerstofontwijking ( $S_z = 0$ ) geldt dus:

$$0 = VK(X) - VK(X + \Delta X) - D \Delta X \quad (2.8.3.2)$$

Als  $\Delta X$  naar nul gaat krijgen we:

$$V \frac{dK(X)}{dX} = -D \quad (2.8.3.3)$$

De oplossing van deze vergelijking bij substitutie van  $D = D_0 \left( 1 - \frac{X}{L} \right)$  luidt:

$$VK(X) = -D_0 X + \frac{1}{2} D_0 \frac{X^2}{L} + K_0 \quad (2.8.3.4)$$

$K_0$  is gelijk aan de klinkerproductie in kg per sec. Substitutie van numerieke waarden voor  $L$ ,  $D_0$  en  $K_0$  (15,6 kg/s) geeft:

$$VK(X) = 15,6 - 1,05 X \left( 1 - \frac{X}{28,8} \right) \quad (2.8.3.5)$$

De hoogte van de klinkerlaag is gelijk aan:

$$h(X) = \frac{K(X)}{b \cdot \rho} \quad (2.8.3.6)$$

$h$  = hoogte klinkerlaag

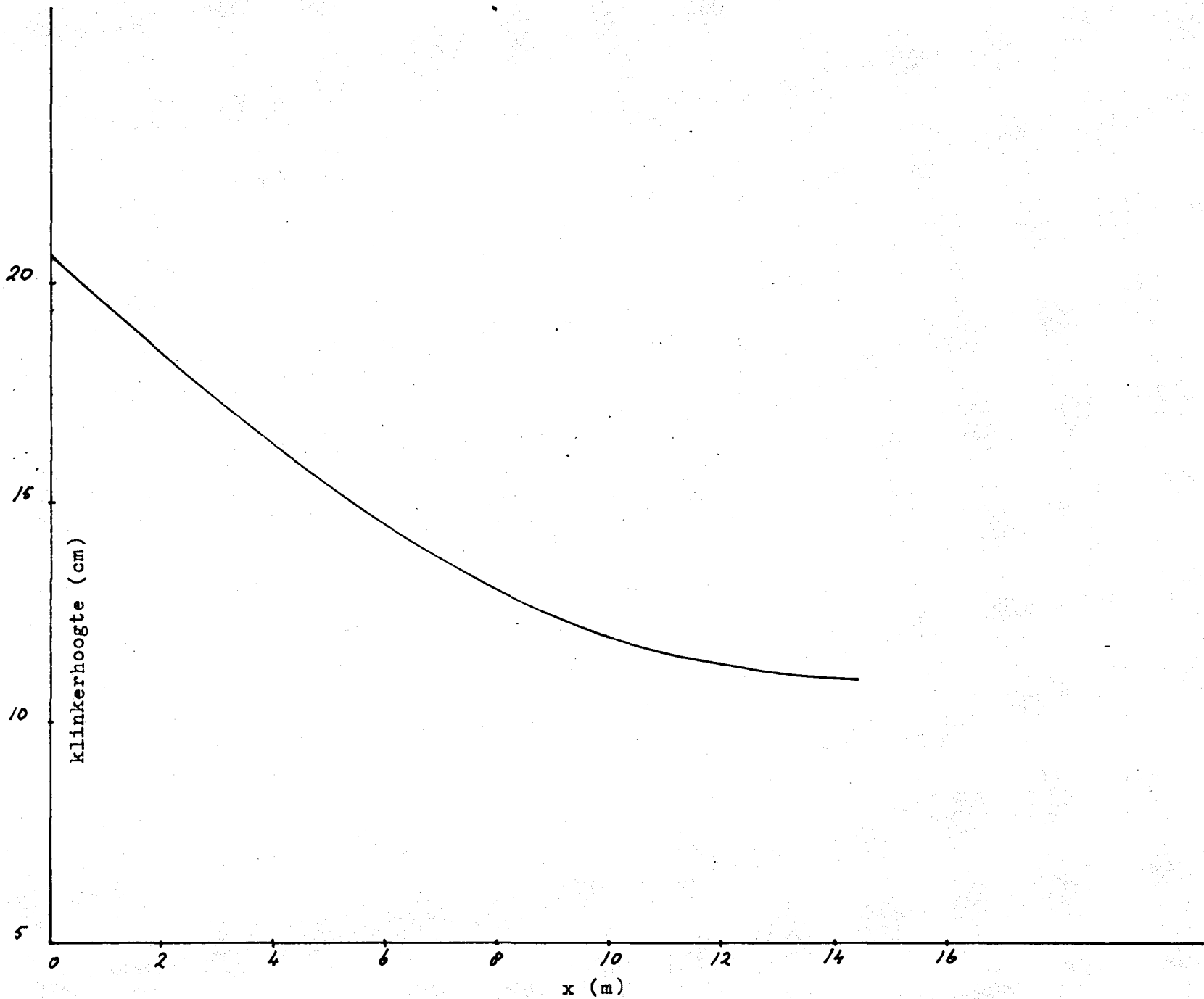
$b$  = breedte koeler = 3,65m

$\rho$  = dichtheid klinkerbed = 1700 kg/m<sup>3</sup>

Door substitutie van 2835 in 2836 vinden we:

$$h(X) = \frac{15,6 - 1,05X(1 - X/28,8)}{V \cdot 3,65 \cdot 1700} \text{ m} \quad (2.8.3.7)$$

Fig. 2.8.3.1 Hoogte van het klinkerbed als functie van de plaats.



Bij een verblijftijd van 20min. op het rooster behoort een snelheid van  $1,2 \cdot 10^{-2}$  m/sec., zodat in dit geval:

$$h(x) = \frac{15,6 - 1,05x(1 - \frac{x}{28,8})}{1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 3,65 \cdot 1700} = 0,21 - 0,014x(1 - \frac{x}{28,8}) \text{ m} \quad (2.8.3.8)$$

In figuur 2.8.3.1 is het verband tussen h en X grafisch weergegeven.

## 2.9 Gemiddelde diameter van de klinker

Uit de diameterverdeling, van de klinkerbollen in de koeler kan de gemiddelde diameter berekend worden. Daartoe zijn een tweetal klinkermonsters genomen, waarvan één op de klinkertransportband en één aan het uiteinde van de koeler op het rooster. Van beide monsters werd een zeefanalyse gemaakt waarvan het resultaat in de fig. 2.9.1. en 2.9.2 is weergegeven.

Het verschil tussen beide grafieken is te wijten aan de breker, waardoor de klinker op de klinkertransportband fijner is dan op het rooster.

Uit de zeefanalyse van het monster uit de koeler kan de gemiddelde diameter berekend worden aan de hand van de volgende formule [2]:

$$d_m = \frac{\sum_i x_i}{\sum_i \frac{x_i}{D_i}} \quad (2.9.1)$$

$d_m$  = gemiddelde klinkerdiameter

$d_i$  = klinkerdiameter

$x_i$  = gewichtsfractie behorende bij  $d_i$

De uitkomst is:  $d_m = 27\text{mm}$ .

## 2.10 Materiaalconstanten van de klinker

Volgens Gygi [3] is de warmtegeleidingscoëfficiënt van klinker  $\lambda_k$  1,5 kcal/mh°C. Deze waarde geldt voor klinkeraanzet in de brandzone van de oven, waar de hoedanigheid van de klinker anders kan zijn dan in de koeler. Onbekend is onder welke omstandigheden (temperatuur)  $\lambda$  is gemeten.

De soortelijke warmte van klinker is sterk afhankelijk van de temperatuur. Het volgende verband tussen de soortelijke warmte  $C_K$  en de klinkertemperatuur  $T_K$  is geldig [4]:

$$C_K = 0,175 + 1,39 \cdot 10^{-4} T_K - 1,25 \cdot 10^{-7} T_K^2 + 4,68 \cdot 10^{-11} T_K^3 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \quad (2.10.1)$$

Voor berekeningen is de gemiddelde  $C_K$  genomen tussen 20 en 1300°C:

$C_K = 0,2545 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ . Deze waarde wordt door meerdere auteurs bevestigd: [5], [6].

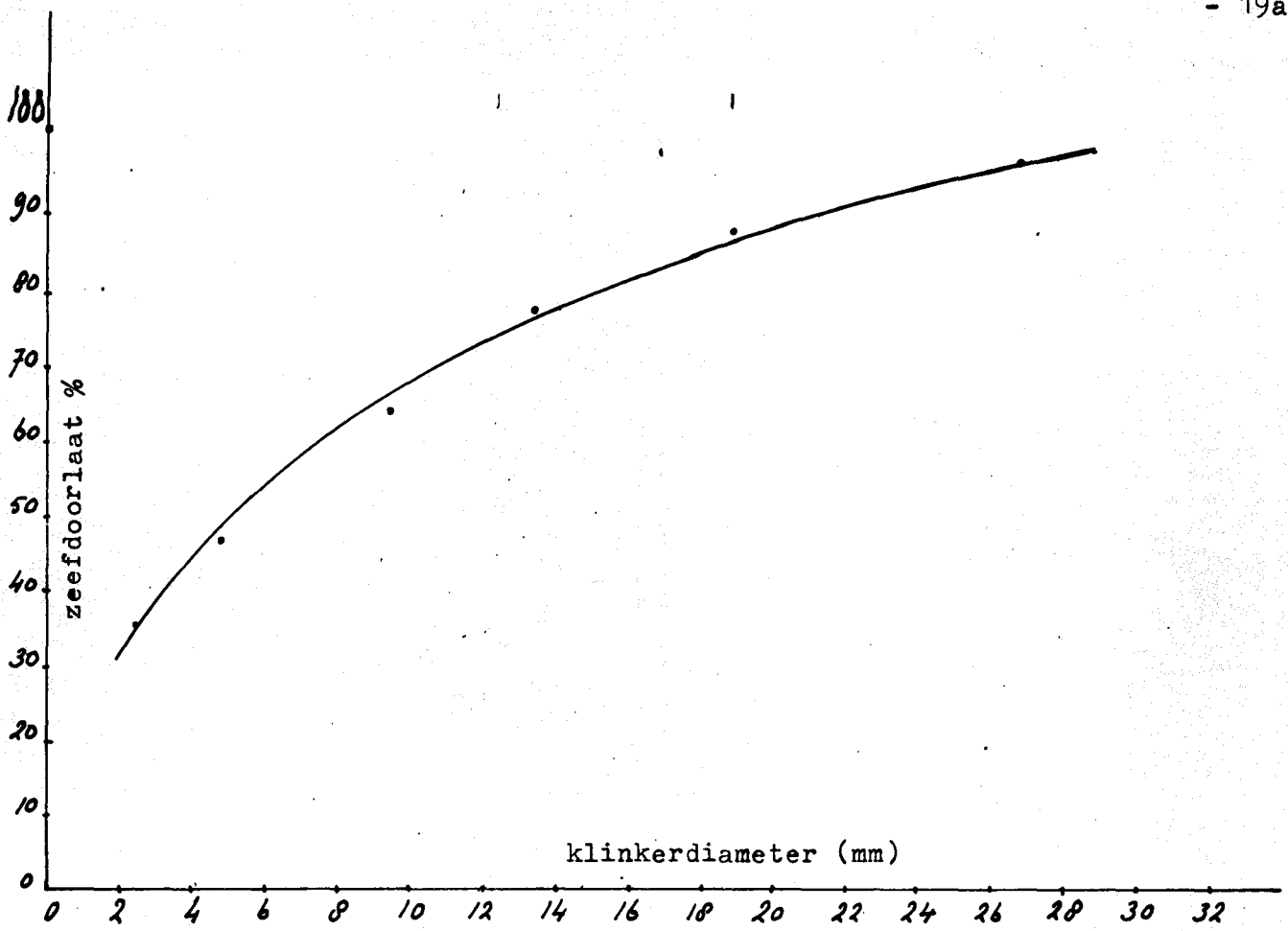


Fig. 2.9.1 Korrelverdeling (klinkertransportband)

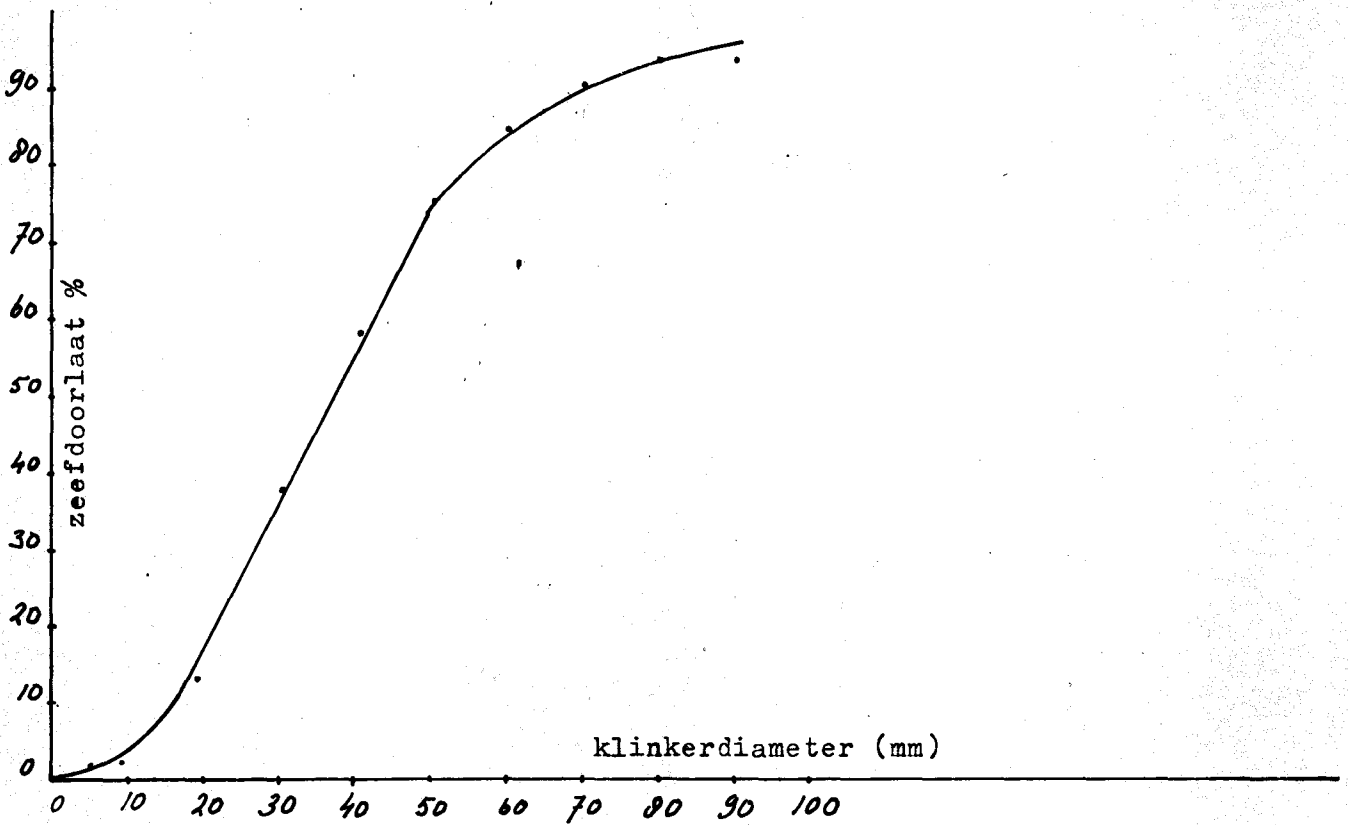


Fig. 2.9.2 Korrelverdeling (rooster)

## HOOFDSTUK 3

### MODEL TER BEPALING VAN DE SECUNDAIRE LUCHTTEMPERATUUR

#### 3.1 Inleiding

Uitgaande van een aantal veronderstellingen zullen voor het klinkerbed een aantal vergelijkingen worden afgeleid, waaruit in stationaire toestand de secundaire luchttemperatuur is te bepalen. Voor het oplossen van deze vergelijkingen is gebruik gemaakt van een aantal simulatietechnieken t.w.: elektrische simulatie met behulp van weerstanden en condensatoren, en simulatie op een analoge rekenmachine. De resultaten van het model worden vergeleken met experimenten.

#### 3.2 Analogon simulatie

##### 3.2.1 Inleiding

Alvorens de vergelijkingen worden opgesteld, die ons in staat stellen de secundaire luchttemperatuur te bepalen, zullen een aantal veronderstellingen gemaakt worden. In fig. 3.2.1.1 is het klinkerbed schematisch weergegeven. Het bed is verdeeld in vier stukken overeenkomstig de vier compartimenten onder het rooster. De X-richting is gelijk aan de bewegingsrichting van de klinker.

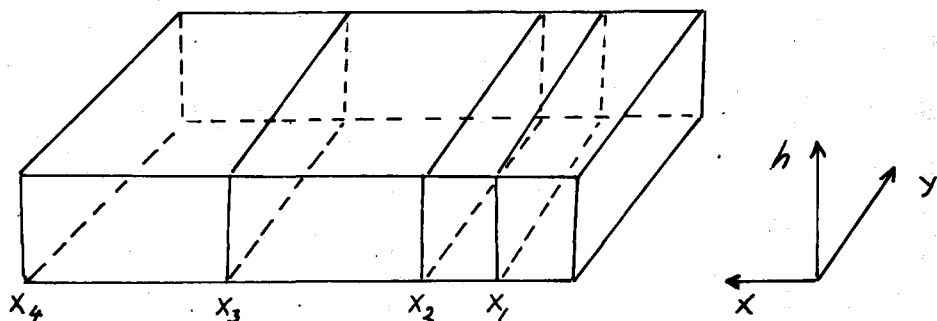


fig. 3.2.1.1 klinkerbed

Ten aanzien van dit klinkerbed nemen we het volgende aan:

1. De hoogte van het bed is onafhankelijk van de Y-richting. De hoogte is wel afhankelijk van de X-richting ten gevolge van het klinkerverlies door het rooster.
2. In de X-richting vindt geen warmteuitwisseling en menging plaats.
3. De toestand van de klinkerlaag, zoals temperatuur en porositeit, is onafhankelijk van de Y-richting.
4. Er vindt geen warmteuitwisseling plaats met de wand en het rooster.

De taak is nu voor dit bed een aantal relaties af te leiden tussen groot-heden die we in twee groepen verdelen: ingangsgrootheden (onafhankelijk variabelen) en uitgangsgrootheden (afhankelijk variabelen). Deze zijn:

ingangsgrootheden:

1. Massadebiet lucht per compartiment, aangeduid door resp.  $L_I$ ,  $L_{II}$ ,  $L_{III}$  en  $L_{IV}$
2. Temperatuur van de lucht onder ieder compartiment resp.  $T_{10,I}$ ,  $T_{10,II}$ ,  $T_{10,III}$  en  $T_{10,IV}$ .
3. Verbliftijd van de klinker op het rooster  $\tau_R$
4. Klinkerproduktie  $K_O$

uitgangsgrootheden:

1. Luchttemperatuur boven het bed  $T_{1b}$
2. Luchtdruk onder het rooster in ieder compartiment resp.  $P_I$ ,  $P_{II}$ ,  $P_{III}$  en  $P_{IV}$ .
3. Hoeveelheid klinker die het rooster verlaat  $K_u$
4. Temperatuur van de klinker die het rooster verlaat  $T_{K,u}$

Uit de aanname dat de verbliftijd van de lucht boven het bed nul is, volgt:

$L_I + L_{II} =$  hoeveelheid secundaire lucht

$L_{III} + L_{IV} =$  hoeveelheid tubixlucht

Hierbij is ervan uitgegaan dat alleen de eerste twee compartimenten bijdragen leveren aan de hoeveelheid secundaire lucht. Dit zal later aan de hand van cijfermateriaal worden gerechtvaardigd.

Voor de sec. luchttemperatuur  $T_s$  is slechts het deel van het bed tot  $X_2$  van belang. Op grond van veronderstelling 2 is het bed nu te verdelen in  $M$  onafhankelijke pakketjes, ter dikte  $\frac{X_2}{M}$ . De plaats van een pakketje wordt aangegeven met de index  $i$ .

$T_s$  is dan te bepalen uit:

$$(L_I + L_{II}) c_1 T_s = \sum_{i=0}^{i=M} L_i c_1 T_{1b,i} \quad (3.2.1.1)$$

$c_1 =$  soortelijke warmte van de lucht

$T_{1b,i} =$  luchttemperatuur boven het  $i$  pakketje.

Formule (3.2.1.1) is geldig indien  $c_1$  constant is en de lucht boven het bed ideaal gemengd is.

In stationaire toestand is het gedrag van alle pakketjes hetzelfde, zodat de plaats om te rekenen is tot verbliftijd.

De berekening van  $T_s$  is daarmee gereduceerd tot de bepaling van de uitgangstemperatuur als functie van de tijd van één pakketje.

We onderscheiden de volgende vier gevallen:

1. De klinker- en luchttemperatuur is onafhankelijk van de hoogte, wat impliceert dat het pakketje ideaal gemengd is. De diameters van de klinkerbollen in het pakketje zijn gelijk.
2. Er treedt een temperatuurgradiënt in de hoogte op. De klinkerbollen hebben gelijke diameters.
3. De klinker- en luchttemperatuur is onafhankelijk van de hoogte. De klinkerbollen vertonen een spreiding in hun diameters.
4. Er treedt zowel een temperatuurgradiënt in de hoogte op als een spreiding in de diameters.

### 3.2.2 Elektrisch analogon van een pakketje (geen temperatuurgradiënt, gelijke diameters)

Indien de verblijftijd van de lucht in het bed verwaarloosbaar is, geldt voor de warmtebalans van de luchtfase in een pakketje:

$$L_i c_l T_{10} + Q = L_i c_l T_{1b} \quad (3.2.2.1)$$

Waarin  $Q$  (hoeveelheid warmte die in het pakketje aan de lucht wordt overgedragen) gegeven wordt door:

$$Q = \alpha A_p (T_{KO} - T_{1b}) \quad (3.2.2.2)$$

$\alpha$  = warmteoverdrachtscoëfficiënt

$A_p$  = warmtewisselend oppervlak in pakketje

$T_{KO}$  = klinkeroppervlaktetemperatuur

Bij gegeven condities van de lucht en materiaal- en vormeigenschappen van de klinker, is  $Q$  een functie van  $T_{KO}$  en de tijd  $t$ :

$$Q = Q(T_{KO}, t) \quad (3.2.2.3)$$

Schrijven we de vergelijkingen 3.2.2.1, t/m 3.2.2.3 in de volgende gedaante:

$$(T_{1b} - T_{10}) = \frac{1}{L_i c_l} \cdot Q \quad (3.2.2.4)$$

$$(T_{KO} - T_{1b}) = \frac{1}{\alpha A_p} \cdot Q \quad (3.2.2.5)$$

$$Q = Q(T_{KO}, t) \quad (3.2.2.6)$$



en representeren we de in deze vergelijkingen optredende grootheden door de volgende analoge elektrische grootheden:

temperatuur = elektrische spanning  
 warmtestroom = elektrische stroom  
 warmteweerstand = elektrische weerstand  $R_E$   
 warmtecapaciteit = elektrische capaciteit  $C_E$

dan geeft fig. 3.2.2.1 het elektrisch analogon van het thermisch gedrag van een klinkerpakketje.

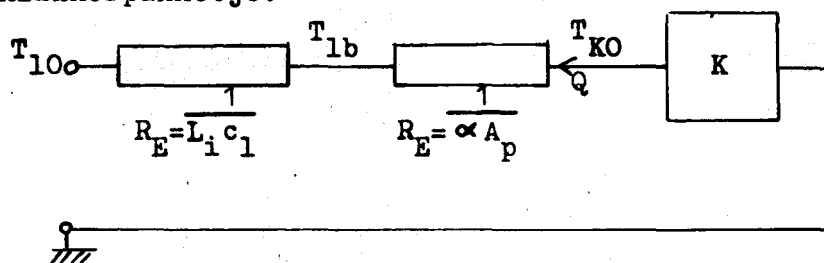


fig. 3.2.2.1 Elektrisch analogon pakketje

Het blokje K respresenteert het elektrisch netwerk dat de relatie  $Q = Q(T_{KO}, t)$  bepaalt. Wanneer een pakketje  $N$  identieke klinkerbollen bevat, die ieder een warmtestroom  $q$  afgeven, dan is  $Q = N \cdot q$ , zodat het voldoende is het elektrisch analogon (append 6.1) van een bol te kennen. In fig. 3.2.2.2 is het volledig elektrisch analogon van een pakketje gegeven.

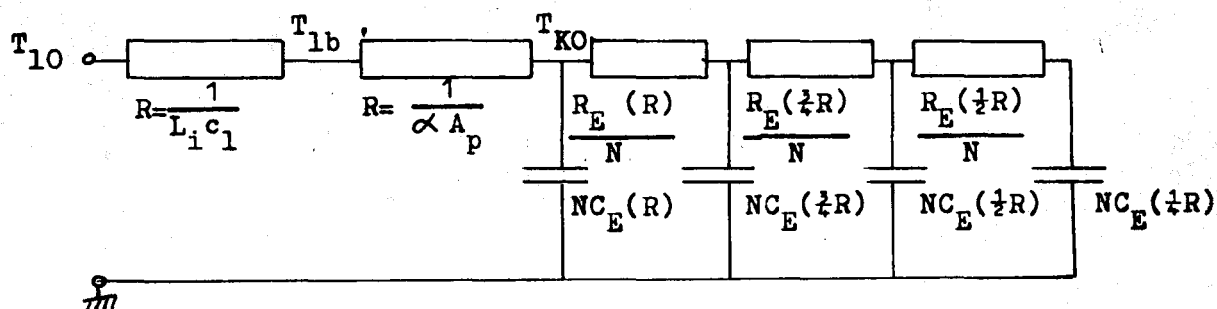


fig. 3.2.2.2 Elektrisch analogon van een pakketje

### 3.2.3 Elektrisch analogon van een pakketje (temperatuurgradiënt, gelijke diameters)

De behandeling van het geval dat er een temperatuurgradiënt in de hoogterichting van het pakketje optreedt/als volgt <sup>geschiedt</sup>. Verdeel het pakketje in een aantal lagen. Voor iedere laag gelden dan de vergelijkingen 3.2.2.1 t/m 3.2.2.3 zodat het model voor iedere laag gelijk is aan het in fig. 3.2.2.3 geschetste model, met dien verstande dat  $N$  verandert. Het model van het hele

pakketje verkrijgen we uit het feit dat de uitgangstemperatuur van de lucht van een bepaalde laag tevens ingangstemperatuur is van de daarop volgende laag. In fig. 3.2.3.1 is het elektrisch analogon weergegeven voor vier gelijke lagen. Bij het elektrisch koppelen van de schakelingen moeten we ervoor zorgen dat een bepaalde laag zijn voorgaande laag niet mag belasten, omdat de uitgangstemperatuur van een laag onafhankelijk is van het fysisch gebeuren in de volgende lagen; dit is de reden van het opnemen van emittervolgers in het model.

### 3.2.4 Conclusies

Het belangrijkste onderzoek dat aan de in het voorgaande beschreven modellen is verricht, heeft betrekking op de invloed van de warmtegeleiding in de klinker op de luchttemperatuur. Uit dit onderzoek blijkt dat indien in de modellen de warmtegeleiding ideaal wordt verondersteld, dit geen merkbare invloed heeft op  $T_{1b}$ , zodat de invloed van de warmtegeleiding verwaarloosd mag worden. In Appendix 6.2 zal nagegaan worden onder welke omstandigheden de benadering geldig is. Hiertoe wordt de warmtegeleidingsvergelijking analytisch opgelost. Daaruit blijkt dat de verwaarlozing geldig is indien  $\frac{\alpha_{dm}}{\lambda_K} < 1$ . In dat geval kan de klinker in een pakketje of laag als een compacte massa beschouwd worden, zodat een spreiding in de afmetingen van de klinkerbollen er niet meer toe doet. Hierdoor zijn de punten 3 en 4 voor het onderzoek aan de klinkerkoeler (spreiding in diameter) minder interessant.

## 3.3 Simulatie van een klinkerpakketje op een analoge rekenmachine

### 3.3.1 Simulatiemodel

#### a) Vergelijkingen

Voor een laag uit het pakketje geldt:

$$L_i c_l T_{10} + Q = L_i c_l T_{1b} \quad (3.3.1.1)$$

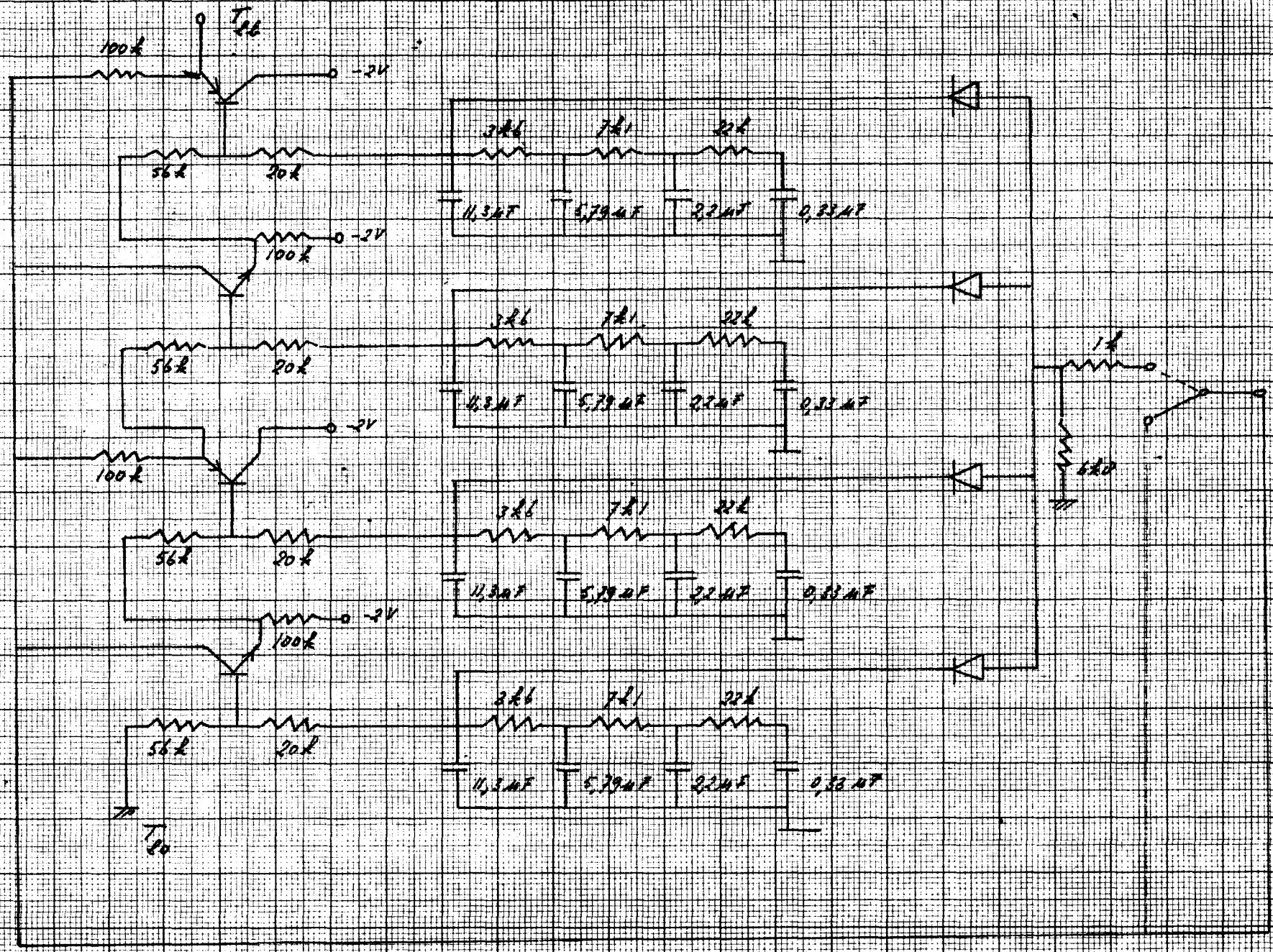
$$Q = N \alpha A (T_{KO} - T_{1b}) \quad (3.3.1.2)$$

$$Q = Q(T_{KO}, t) \quad (3.3.1.3)$$

Nu we tot de conclusie zijn gekomen dat de warmtegeleiding in de klinker verwaarloosbaar is, is de laatste betrekking van een eenvoudige gedaante; deze luidt:

$$Q = N c \frac{dT_K}{dt} \quad (3.3.1.4)$$

Fig. 3.2.3.1 Elektrisch analogon 4-lagen pakettje.



Hierdoor wordt simulatie van de vergelijkingen op een analoge rekenmachine (PACE 231 R; E.A.I.) **betrekkelijk simpel**. Dat is overgestapt van de elektrische modellen naar de analoge rekenmachine heeft de volgende redenen:

1. Wanneer men de afkoelingskurve van een pakketje wil bepalen onder condities zoals die in de klinkerkoeler optreden dan zullen een aantal parameters die in bovenstaande vergelijkingen optreden, zoals  $L_1$ ,  $N$  en  $\alpha$ , functies moeten zijn van de tijd. Met de faciliteiten van een analoge rekenmachine is dit gemakkelijk te realiseren.
2. Testen van het model bij verschillende parameters is handiger op een analoge rekenmachine uit te voeren, nl. door verandering van potentiometerinstellingen. Bij een elektrisch model moet men steeds weerstanden en condensatoren vervangen.

We gieten thans de basis-vergelijkingen in een vorm die geschikt is voor simulatie. Zie hiertoe fig. 3.3.1.1 waar het elektrisch model is gegeven voor één laag.

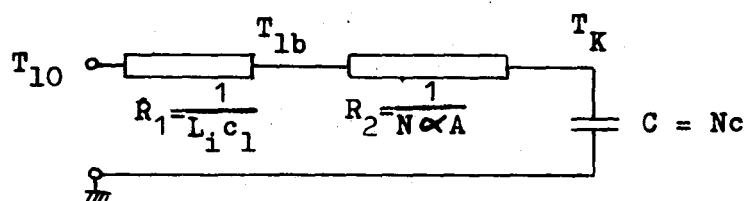


fig. 3.3.1.1

Uit dit model volgt:

$$Q = C \frac{dT_K}{dt} \quad (3.3.1.5)$$

$$Q = \frac{T_{10} - T_K}{R_1 + R_2} \quad (3.3.1.6)$$

Eliminatie van  $Q$  levert:

$$C \frac{dT_K}{dt} = \frac{T_{10} - T_K}{R_1 + R_2} \quad (3.3.1.7)$$

òf:

$$\beta \frac{dT_K}{dt} = T_{10} - T_K, \quad \beta = (R_1 + R_2)C \quad (3.3.1.8)$$

$$Q = \frac{T_{10} - T_K}{R_1 + R_2} \quad (3.3.1.9)$$

$$Q = \frac{T_{1b} - T_K}{R_2} \quad (3.3.1.10)$$

Eliminatie van Q geeft:

$$\frac{T_{10} - T_K}{R_1 + R_2} = \frac{T_{1b} - T_K}{R_2} \quad (3.3.1.11)$$

of:

$$T_{1b} = T_K + \gamma (T_{10} - T_K), \quad \gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.3.1.12)$$

In bovenstaande is:

$$\gamma = \frac{1/N\alpha A}{1/N\alpha A + 1/L_i c_1} = \frac{1}{1 + \frac{N\alpha A}{L_i c_1}} \quad (3.3.1.13)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{(1/L_i c_1 + 1/N\alpha A)Nc} = \frac{1}{(1 + \frac{N\alpha A}{L_i c_1})} \frac{\alpha A}{c} = \gamma \frac{\alpha A}{c} \quad (3.3.1.14)$$

In figuur 3.3.1.2 is het schema weergegeven van de gesimuleerde vergelijkingen 3.3.1.11 en 3.3.1.12. In Appendix 6.3 is afgeleid dat dezelfde vergelijkingen gelden indien het klinkerverlies door het rooster in rekening wordt gebracht.

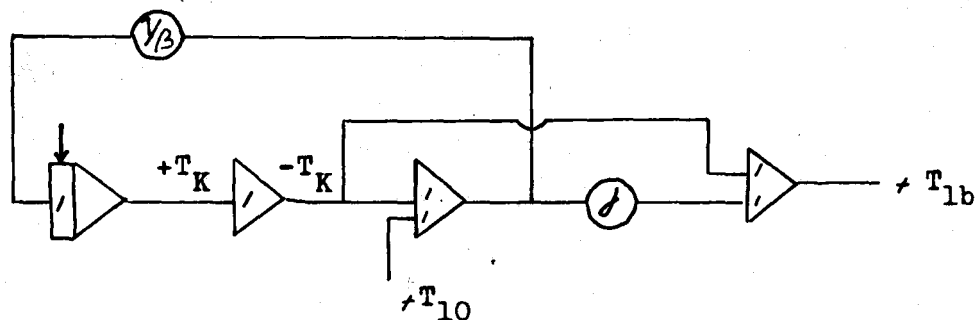


fig. 3.3.1.2 Simulatie één laag.

In fig. 3.3.1.3 is het schema weergegeven voor het geval dat het pakketje in vijf lagen is verdeeld.

b) Numerieke waarden

Voor een vijflagenmodel is:

$$N = \frac{\text{hoeveelheid klinker per meter x lengte pakketje}}{\text{massa één bol x 5}}$$

De lengte van een pakketje is gelijk genomen aan 20cm, terwijl de breedte gelijk is aan die van de koeler, dus 3,5m.

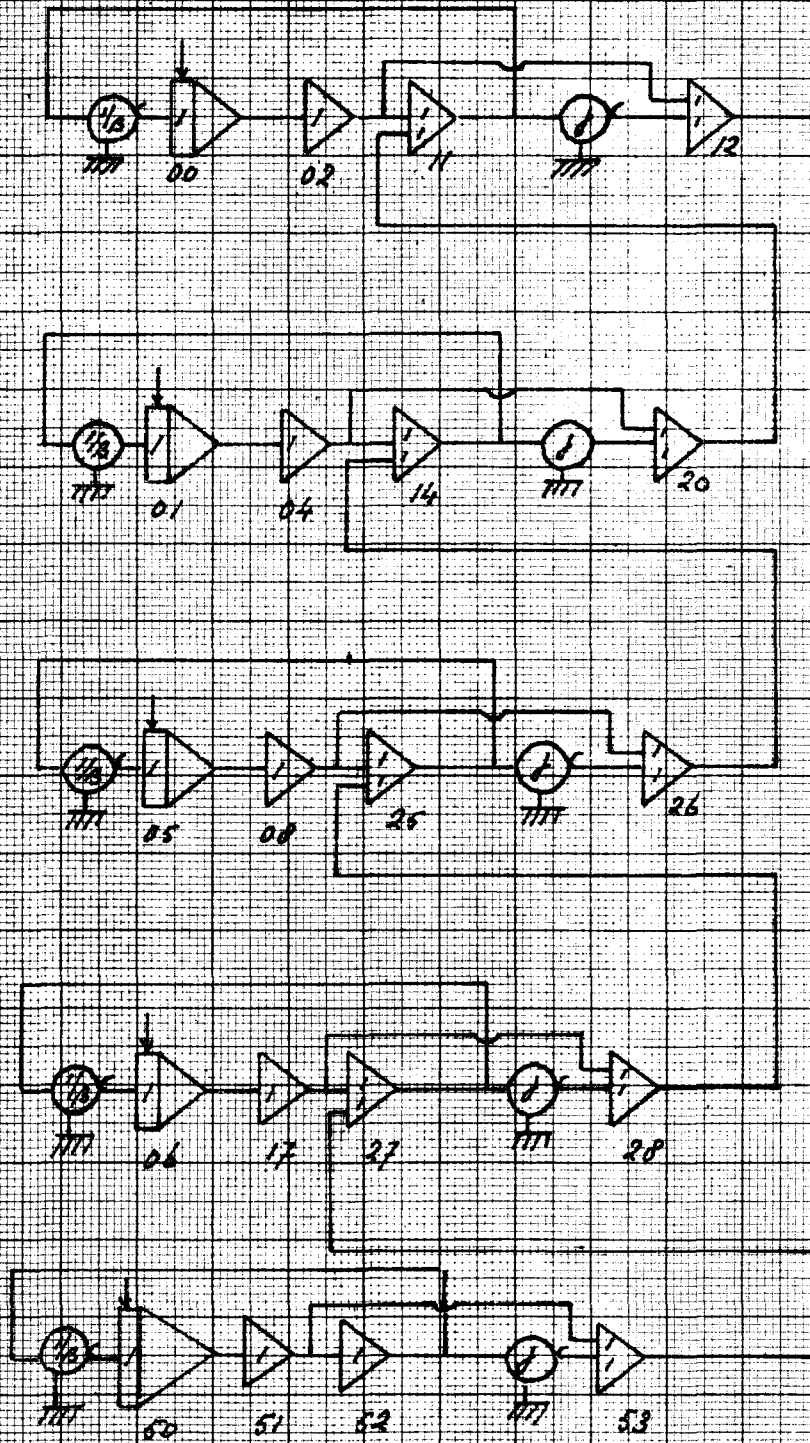


Fig. 3.3.1.3 Simulatie vijfslagenmodel

Bij een produktie van 56 ton klinker per uur en een verblijftijd van 20 min. van de klinker op het rooster is de hoeveelheid klinker per meter gelijk aan (zie par. 2.8.3):

$$K = \frac{K_0 - D_0 \times (1 - X/2L_R)}{V} = \frac{15,6 - 1,05 \times (1 - X/28,8)}{1,2 \cdot 10^{-2}} \quad (3.3.1.15)$$

Voor de gemiddelde diameter van de klinkerbolletjes is in par. 2.9 gevonden 27mm. Met een dichtheid van de klinker van  $3233 \text{ kg/m}^3$  is:

$$N = \frac{[15,6 - 1,05 \times (1 - X/28,8)]}{1,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{0,02}{4/3 \pi (13,5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 3233,5} \quad (3.3.1.16)$$

Voor  $\alpha$  vinden we met behulp van [7] :

$$N_u = 2,0 + 1,3 P_r^{0,15} + 0,66 R_e^{0,50} \cdot P_r^{0,31} \quad (3.3.1.17)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{d_m} N_u$$

de waarde  $0,02 \text{ kcal/m}^2 \text{ s}^\circ\text{C}$ , zodat:

$$N\alpha_A = \frac{[15,6 - 1,05 \times (1 - X/28,8)]}{1,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{0,02 \cdot 0,02 \cdot 4}{4/3 (13,5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 3233,5} (13,5 \cdot 10^{-3})^2 \quad (3.3.1.19)$$

Door substitutie van  $X = vt$  zetten we  $N\alpha_A$  in een tijdsafhankelijke betrekking om.

$$N\alpha_A = 71,14 \cdot 10^{-3} - 5,75 \cdot 10^{-5} t + 2,4 \cdot 10^{-8} t^2 \quad (3.3.1.20)$$

### c) Simulatie

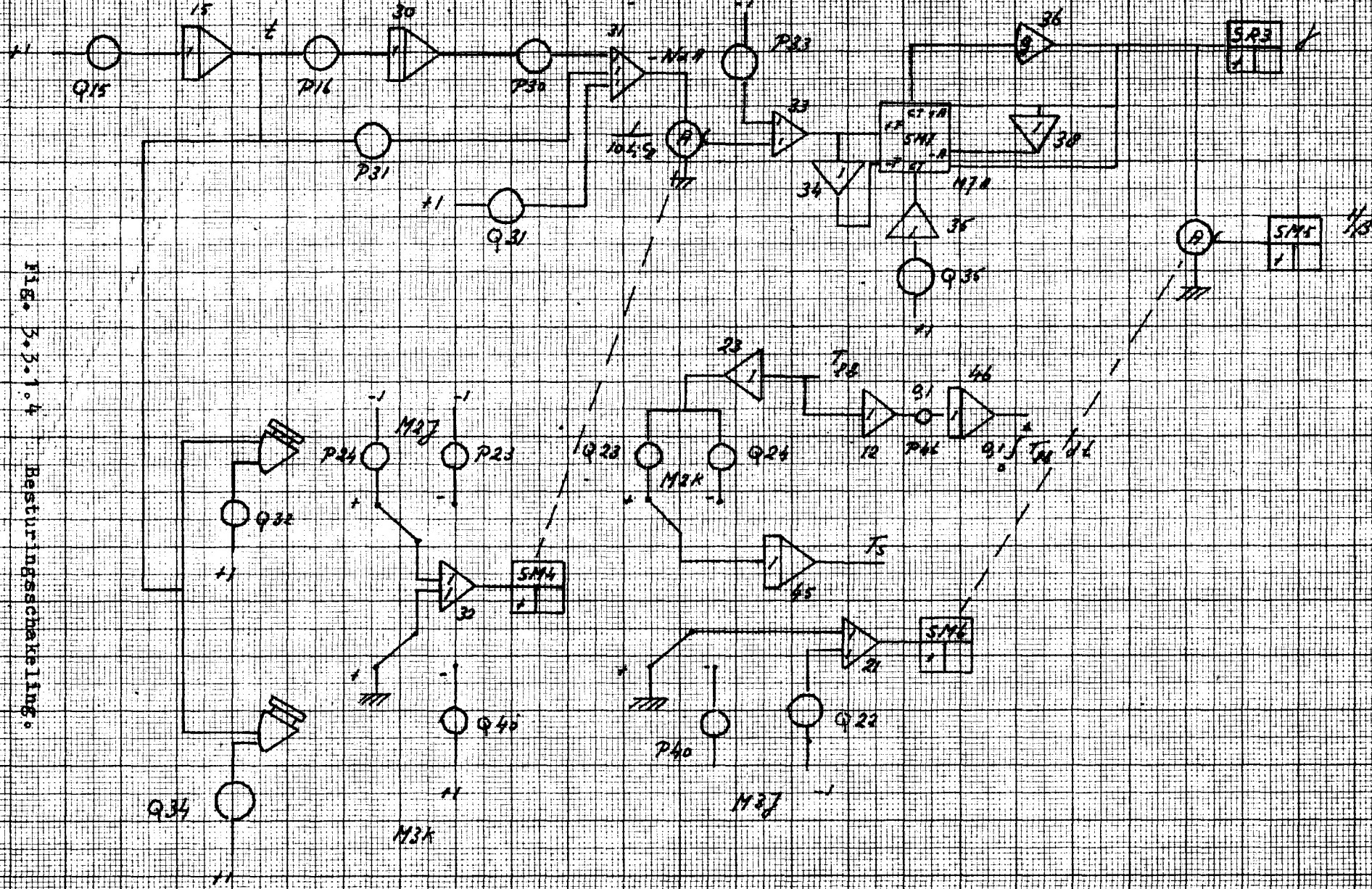
In fig. 3.3.1.4 is het besturingsschema weergegeven met daarin de simulatie van  $N\alpha_A$ .

Vermenigvuldiging van  $N\alpha_A$  met  $\frac{1}{L_1 c_1}$  gebeurt met Servovermenigvuldiger SM4. Het optellen van 1 en inverteren gebeurt met versterker A33 en SM7. Dit geeft  $\gamma$ . SM6 vermenigvuldigd  $\gamma$  met  $\frac{\alpha_A}{c}$  waardoor  $1/\beta$  verkregen wordt.  $\alpha$  is in de eerste 2 compartimenten constant en verschillend van  $\alpha$  in de laatste 2 compartimenten verondersteld.

Het verspringen van  $\alpha$  op de grens van 2e en 3e compartiment wordt in de term  $\frac{\alpha_A}{c}$  gerealiseerd met SM6. In de term  $N\alpha_A/L_1 c_1$  gebeurt dit door verandering van  $L_1$ .  $L_1$  is nl. gelijkmatig verdeeld verondersteld, maar heeft verschillende waarden in de achtereenvolgende compartimenten. De juiste verandering van  $L_1$  gebeurt met 2 comparatoren (M2 en M3) en SM4.



Fig. 3.3.1.4 Resturingschaltung.





De koppeling van de besturingsschakeling met het vijflagenmodel geschiedt met twee servovermenigvuldigers; een voor de waarde van  $\gamma$  en een voor de waarde van  $\beta$ . Op die manier is een model gecreëerd waaruit  $T_{1b}$  bepaald kan worden. We vragen ons nu af hoe uit  $T_{1b}$  de secundaire luchttemperatuur  $T_s$  gehaald kan worden. Reeds eerder is een formule voor  $T_s$  gegeven waarbij gesommeerd wordt over  $T_{1b}$  op discrete tijdstippen. Aangezien de gesimuleerde vergelijkingen ook geldig zijn voor een pakketje met infinitesimale lengte  $dX$  (zie Appendix 6.4) vervangen we de sommatie door integratie. De integratie zal zich hierbij uitstrekken over de eerste twee compartimenten omdat deze hoofdzakelijk de secundaire lucht opleveren [8]. Nu geldt:

$$(L_I + L_{II})c_1 T_s = L_I c_1 \frac{1}{X_1} \int_0^{X_1} T_{1b} dX + L_{II} c_1 \frac{1}{X_2 - X_1} \int_{X_1}^{X_2} T_{1b} dX \quad (3.3.1.21)$$

$$T_s = \frac{L_I}{L_I + L_{II}} \cdot \frac{1}{X_1} \int_0^{X_1} T_{1b} dX + \frac{L_{II}}{L_I + L_{II}} \cdot \frac{1}{X_2 - X_1} \int_{X_1}^{X_2} T_{1b} dX \quad (3.3.1.22)$$

Wanneer we substitueren  $X = vt$  dan vinden we:

$$T_s = \frac{L_I}{L_I + L_{II}} \cdot \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} T_{1b} dt + \frac{L_{II}}{L_I + L_{II}} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} T_{1b} dt \quad (3.3.1.23)$$

Met behulp van een integrator en twee potentiometers die bestuurd worden door een comparator kunnen we bovenstaande betrekking instrumenteren (zie fig. 3.3.1.4).

### 3.3.2 Invloed van de onderverdeling in verschillende lagen van een klinkerpakketje

In het in het voorgaande beschreven model zijn de potentiometers en beginspanningen van de integratoren zo ingesteld dat de uitkomsten van het model betrekking hebben op een situatie waarin geldt:

$$L_I + L_{II} = 1000 \text{ Nm}^3/\text{min.}$$

$$L_{III} + L_{IV} = 1800 \text{ Nm}^3/\text{min.}$$

$$L_I/L_{II} = 3/2$$

$$L_{III} = L_{IV}$$

klinkerproductie: 56 ton/uur

verblijftijd op het rooster: 20 min.

$$\alpha_1 = 0,02 \text{ kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_2 = 0,01 \text{ kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_K(t=0) = 1350^\circ\text{C}$$

Onderzocht is nu de invloed van de verdeling van een klinkerpakketje (lengte 20cm) in een aantal lagen op de afkoelingskurve van  $T_{1b}$ . Daartoe is het pakketje verdeeld in een aantal gelijke lagen. Uit de resultaten (zie fig. 3.3.2.1), trekken we de volgende conclusies.

a. Het verschil tussen 4 en 5 lagen is niet groot meer.

b.  $T_{1b}$  neemt toe bij groter aantal lagen.

We zullen thans bepalen naar welke waarde  $T_{1b}$  op  $t=0$  convergeert indien het aantal lagen oneindig groot wordt.

Bij  $s$  lagen geldt voor in- en uitgangstemperatuur van één laag:

$$T_{1b} = T_K + \gamma_s (T_{10} - T_K) \quad (3.3.2.1)$$

$$\gamma_s = \frac{1}{1 + \frac{N\alpha A}{sL_i c_1}} \quad (3.3.2.2)$$

Voor  $t=0$ :  $T_K = 1350^\circ\text{C}$  en  $T_{10} = 0^\circ\text{C}$ . Dan vinden we uit 3.3.2.1. voor  $T_{1b}$  op  $t=0$ :

$$1 \text{ laag: } T_{1b}(0) = 1350(1 - \gamma_1) \quad (3.3.2.3)$$

$$2 \text{ lagen: } T_{1b} \text{ laag } 1 = 1350(1 - \gamma_2)$$

$$\begin{aligned} T_{1b} \text{ laag } 2 &= 1350 + \gamma_2 (1350(1 - \gamma_2) - 1350) \\ &= 1350 (1 - \gamma_2^2) \end{aligned} \quad (3.3.2.4)$$

In het algemeen geldt voor  $s$  lagen:

$$T_{1b} \text{ laag } s = 1350(1 - \gamma_s^s)$$

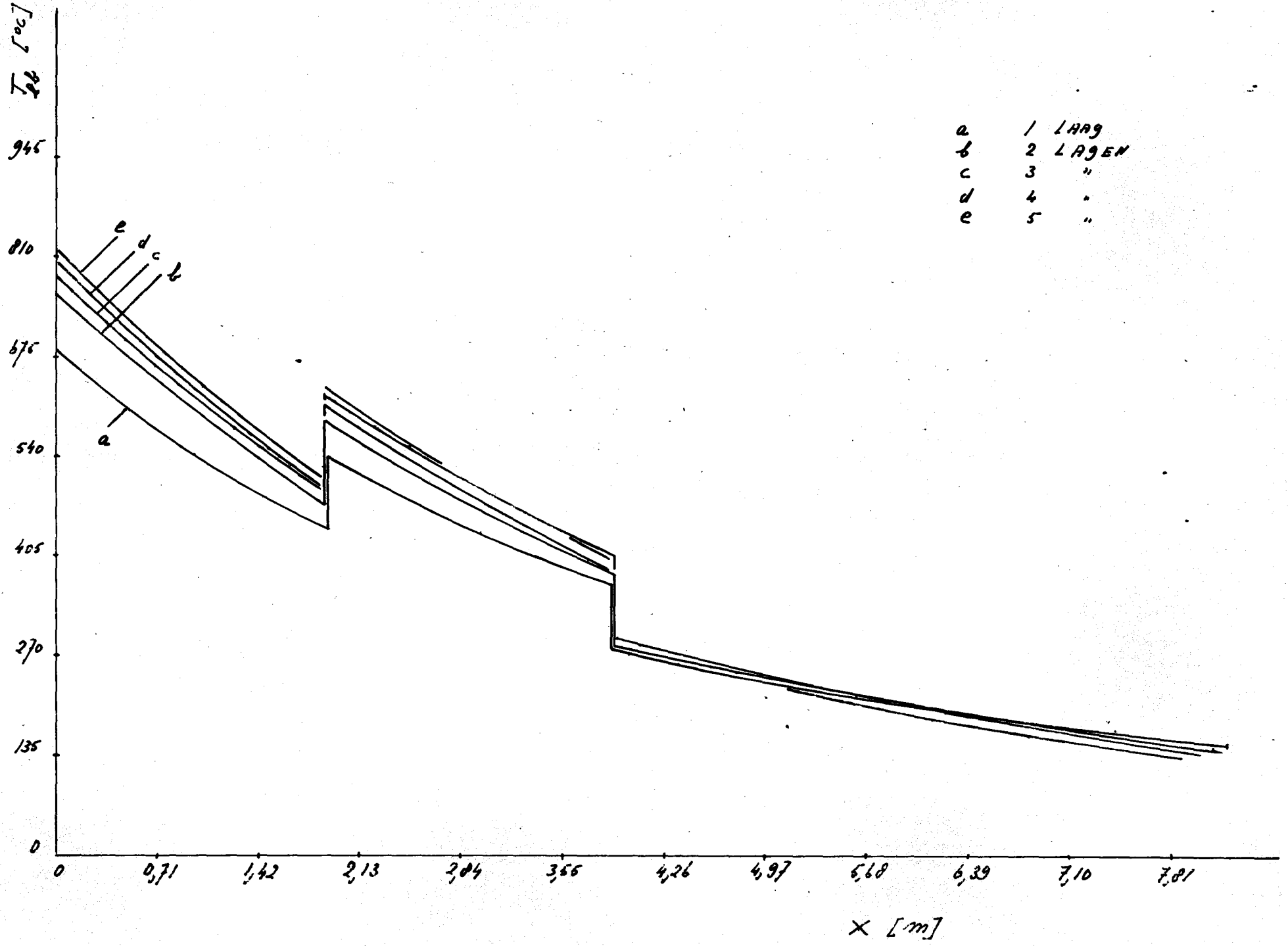
Wanneer het aantal lagen naar oneindig gaat dan vinden we:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} T_{1b} \text{ laag } s &= \lim_{s \rightarrow \infty} 1350 \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{N\alpha A}{sL_i c_1}\right)^s} \right] = \\ &= 1350 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{N\alpha A}{L_i c_1}\right) \right] \\ &= 1350 \left[ 1 - \exp(-1,02) \right] = 863^\circ\text{C} \quad (3.3.2.6) \end{aligned}$$

Uit figuur 3.3.2.1 blijkt:

1 laag	$T_{1b}(t=0)$	=	688 $^\circ\text{C}$
2 lagen	"	=	770 $^\circ\text{C}$
3 lagen	"	=	783 $^\circ\text{C}$
4 lagen	"	=	806 $^\circ\text{C}$
5 lagen	"	=	824 $^\circ\text{C}$

FIG. 33.2.1 LUCHTTEMPERATUUR ( $T_L$ ) VOOR RES. 1, 2, 3, 4 EN 5 LAGENDEKSTJE



Het voorgaande is een aanwijzing dat een vijf-lagenmodel een redelijke overeenstemming geeft met een model dat oneindig veel lagen representeert.

Tot nu toe zijn steeds gevallen aan de orde geweest waarbij het klinker-pakketje in gelijke stukken werd verdeeld. We zullen thans nagaan wat de invloed is van een niet-gelijkmatige verdeling. Hiertoe wordt de onderkant van het pakketje, dat is dit gedeelte waar de lucht binnentreedt, een fijnere onderverdeling toegekend dan de rest, omdat daar de temperatuurgradiënten het grootst zijn. We vergelijken nu de volgende situaties:

1. 5 lagen, gelijkmatig verdeeld;
2. 5 lagen, gerekend vanaf de onderkant van het pakketje is de volumeverdeling:  $1/9, 1/9, 1/9, 1/3, 1/3$ ;
3. 5 lagen, verdeling:  $1/20, 2/20, 3/20, 6/20, 8/20$ .

Vergelijken we de afkoelingskurven van deze drie gevallen dan blijkt er geen merkbaar verschil op te treden, zodat een niet-gelijkmatige verdeling slechts geringe invloed heeft op  $T_{1b}$ .

### 3.3.3. Verificatie van het model

Bij het vergelijken van de uitkomsten van het 5-lagen model met de statische experimentele gegevens treden de volgende complicaties op.

1. De luchthoeveelheidsmetingen en/of registraties zijn zeer onbetrouwbaar. Bij ijkmetingen van de hoeveelheid lucht in compartiment I + II bleken de geregistreerde luchthoeveelheden ongeveer 15% te hoog te zijn. Indien men de luchthoeveelheden corrigeert en onder die omstandigheden de resultaten van het model bekijkt, dan zijn de luchttemperaturen te laag. Dit kan erop wijzen dat in feite nog minder lucht onder het rooster wordt geblazen. Correctie door middel van een hogere warmteoverdrachtscoëfficiënt leidt wel tot hogere temperaturen maar heeft het nadeel dat de temperaturen als functie van de tijd te snel dalen.  
De registratie van de hoeveelheid lucht in compartiment III plus IV is volkomen foutief, in die zin, dat de geregistreerde waarden onmogelijk door de ventilator geleverd kunnen worden zoals de ventilator karakteristiek toont.
2. Wanneer bekend zou zijn wat de totale luchthoeveelheid is in compartiment I plus II dan treedt toch nog een onzekerheid op inzake de verdeling van de lucht over compartiment I en II. Het enige punt waar we ons op kunnen baseren is dat de jalouzieën in de aanvoerleidingen zodanig zijn

ingesteld dat in compartiment I meer lucht zit dan in compartiment II. Voor de compartimenten III en IV kunnen we een gelijkmatige luchtverdeling aannemen.

3. Gegevens omtrent de momentane klinkerinlaattemperatuur en momentane klinkerproduktie ontbreken volledig.
4. Bij het model is ervan uitgegaan dat de klinker homogeen verdeeld is over de breedte van de koeler terwijl uit de experimenten blijkt dat dit vooral in het begin van de koeler niet opgaat. Aangezien we het model gaan toetsen aan de gegevens uit fig. 2.6.6 moet men er dus rekening mee houden dat de in deze grafiek voorkomende temperaturen gelden op 1,50m van de koelerwand.

De modelparameters zijn als volgt gekozen:

klinkerproduktie: 56 ton/uur

verblijftijd op het rooster: 20 min. Uit fig. 2.8.1.10 volgt dan dat dit overeenkomt met een toerental van de roosteraandrijving van 14,8 toeren/min.

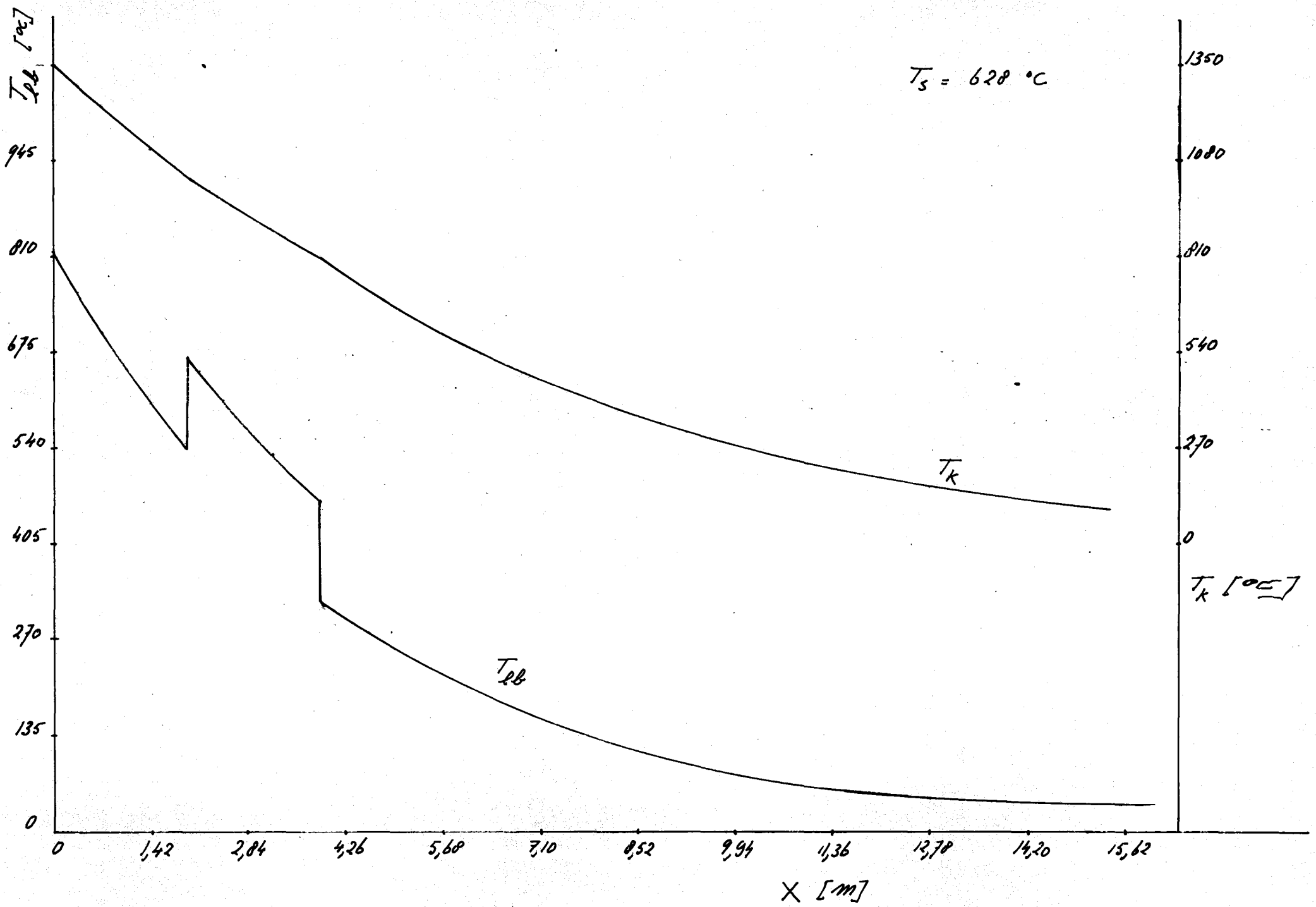
De andere parameters zijn zodanig gekozen dat er een zekere mate van overeenstemming is met de experimenten, waartoe uit fig. 2.6.6 het geval (55,8 ton/uur, 14 toeren/min.) gekozen is.

hoeveelheid lucht compartiment I plus II	1000Nm <sup>3</sup> /min.
hoeveelheid lucht compartiment III plus IV	1800Nm <sup>3</sup> /min.
verhouding luchthoeveelheden in comp. I en II:	3/2
warmteoverdrachtscoëfficiënt in comp. I en II:	0,02 kcal/m <sup>2</sup> s <sup>0</sup> C
warmteoverdrachtscoëfficiënt in comp. III en IV:	0,01 kcal/m <sup>2</sup> s <sup>0</sup> C

In figuur 3.3.3.1 is weergegeven de luchttemperatuur en klinkertemperatuur van de vijfde laag van een klinkerpakketje als functie van de tijd alsmede de secundaire luchttemperatuur. Aangezien het tijdgedrag van een pakketje identiek is aan het plaatsgedrag geeft deze grafiek ons meteen de temperaturen als functie van de plaats in de koeler.

In tabel 3.3.3.1 zijn enkele vergelijkende waarden vermeld uit fig. 2.6.6 en 3.3.3.1 : tevens is gebruik gemaakt van de gemeten klinkeruitlaattemperatuur.

FIG. 3.3.3.1 LUCHT ( $T_k$ )- EN KLINKERTEMPERATUUR ALS FUNCTIE VAN DE PLAKTS IN DE KOELER (MODEL).



	model	meting
luchttemperatuur		
X = 1,90m	543°C	1045°C
X = 3,40m	506°C	760°C
X = 7,30m	155°C	270°C
X = 9,20m	98°C	210°C
secundaire luchttemp.	628°C	663°C
klinkeruitlaattemp.	135°C	170°C

tabel 3.3.3.1 Vergelijkende waarden model-meting.

Uit deze tabel volgt dat er een redelijke mate van overeenstemming is tussen de secundaire luchttemperatuur ondanks het feit dat er een discrepantie bestaat tussen de luchttemperatuurprofielen. Dat dit mogelijk is kunnen we als volgt verklaren. De gegevens in fig.2.6.6 gelden voor het midden van het rooster waar de temperaturen hoger zijn dan aan de rand, zoals uit de gemeten breedteprofielen volgt. Bedenken we tevens dat aan de randen de klinkerlaag dunner is, waardoor daar meer lucht passeert, dan leggen dus de temperaturen aan de rand meer gewicht in de schaal bij het bepalen van de gemiddelde temperatuur. Wat natuurlijk ook nog een rol kan spelen is de plaats van het scheidingsvlak tussen de secundaire lucht en tubixlucht. Voor het model is aangenomen dat dit op het eind van het tweede compartiment ligt, dus de hoeveelheid secundaire lucht is  $1000\text{Nm}^3/\text{min}$ . maar bij de experimenten ontbreekt deze informatie.

Onze uiteindelijke bedoeling is niet om de secundaire luchttemperatuur onder allerlei statische condities zo goed mogelijk te kennen, maar om iets over de dynamica te weten te komen. In dit geval kan het best zijn dat het hier besproken model, "goed genoeg" is. Uitsluitel daarover krijgen we indien de aan het model ontleende gegevens over de dynamische eigenschappen van de secundaire luchttemperatuur worden vergeleken met de gemeten responsies.

#### 3.4 Statische karakteristieken

Met behulp van het vijflagenmodel zijn een aantal statische karakteristieken opgenomen die het verband weergeven tussen de secundaire luchttemperatuur  $T_s$  en verschillende ingangsgrootheden van de klinkerkoeler, zoals roostersnelheid, klinkertemperatuur en hoeveelheid lucht.

De statische karakteristieken zijn onder standaardcondities\* opgenomen, voorzover het die grootheden betreft die niet gevarieerd worden. We zullen thans enkele resultaten bespreken.

1. Het verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de klinkerproductie met als parameter de verblijftijd van de klinker op het rooster (fig. 3.4.1). De klinkerproductie loopt daarbij van 52 tot 60 ton per uur terwijl de verblijftijd ligt tussen 15 en 29 minuten. In het beschouwde produktiegebied is  $T_s$  evenredig met de hoeveelheid klinker bij een bepaalde verblijftijd; de karakteristieken bij verschillende verblijftijden lopen evenwijdig. Uit de karakteristieken kan men concluderen dat de statische gevoeligheid van  $T_s$  op een verandering van de roostersnelheid groot is.
2. Het verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de hoeveelheid lucht in compartiment I plus II bij constante hoeveelheid secundaire lucht (fig. 3.4.2). Het onderzochte gebied ligt tussen 500 en 1500 Nm<sup>3</sup>/mm. Tussen 600 en 900 Nm<sup>3</sup>/min. is  $T_s$  vrij ongevoelig voor veranderingen in de luchthoeveelheid, terwijl we voor grotere luchthoeveelheden een grotere, nagenoeg constante gevoeligheid krijgen. We merken nog op dat  $\alpha$  onafhankelijk is genomen van de hoeveelheid lucht.
3. Het verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de verhouding van de hoeveelheid lucht in compartiment I en II, wanneer de som van beide luchthoeveelheden constant blijft. De onderzochte verhoudingen lopen van 0,2 tot 4 (fig. 3.4.3). De grafiek is duidelijk in twee gebieden te onderscheiden nl. links en rechts van de verhouding 1. Wanneer er minder lucht door compartiment I gaat dan door compartiment II dan is  $T_s$  sterk afhankelijk van de verhouding en wel zodanig dat bij vermindering van de lucht in compartiment I en dus vermeerdering van de lucht in compartiment II  $T_s$  daalt. In het geval dat er evenveel lucht door compartiment I gaat als door II treedt er een maximum op in  $T_s$ . In het gebied rechts van 1, dus indien er meer lucht zit in compartiment I dan in II, neemt  $T_s$  af naarmate de hoeveelheid lucht in compartiment I toeneemt maar de gevoeligheid van  $T_s$  is lang niet zo groot als voor het gebied kleiner dan 1. Voor verhoudingen groter dan 1 doet het er kennelijk niet veel toe hoe de lucht over beide compartimenten is verdeeld.
4. Het verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de hoeveelheid secundaire lucht bij constante hoeveelheid lucht in compartiment I en II (fig. 3.4.4). Bij gegeven hoeveelheid aangestroomde lucht onder het

-----  
\* Zie numerieke gegevens par. 3.3.2



klinkerbed is de plaats van het scheidingsvlak tussen secundaire lucht en tubixlucht een maat voor de hoeveelheid secundaire lucht. Uit de grafiek blijkt dat naarmate het scheidingsvlak meer naar de kant van de koeleruitgang wordt verlegd,  $T_s$  daalt, waarbij de daling per meter ongeveer constant is.

5. Het verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de klinkeringstemperatuur  $T_K(X=0)$  (fig. 3.4.5). Uit deze grafiek volgt dat wanneer de klinkertemperatuur stijgt van 1000 naar 1400°C  $T_s$  evenredig toeneemt.

Fig. 5.4.1. Verband  $T_s - K_0$

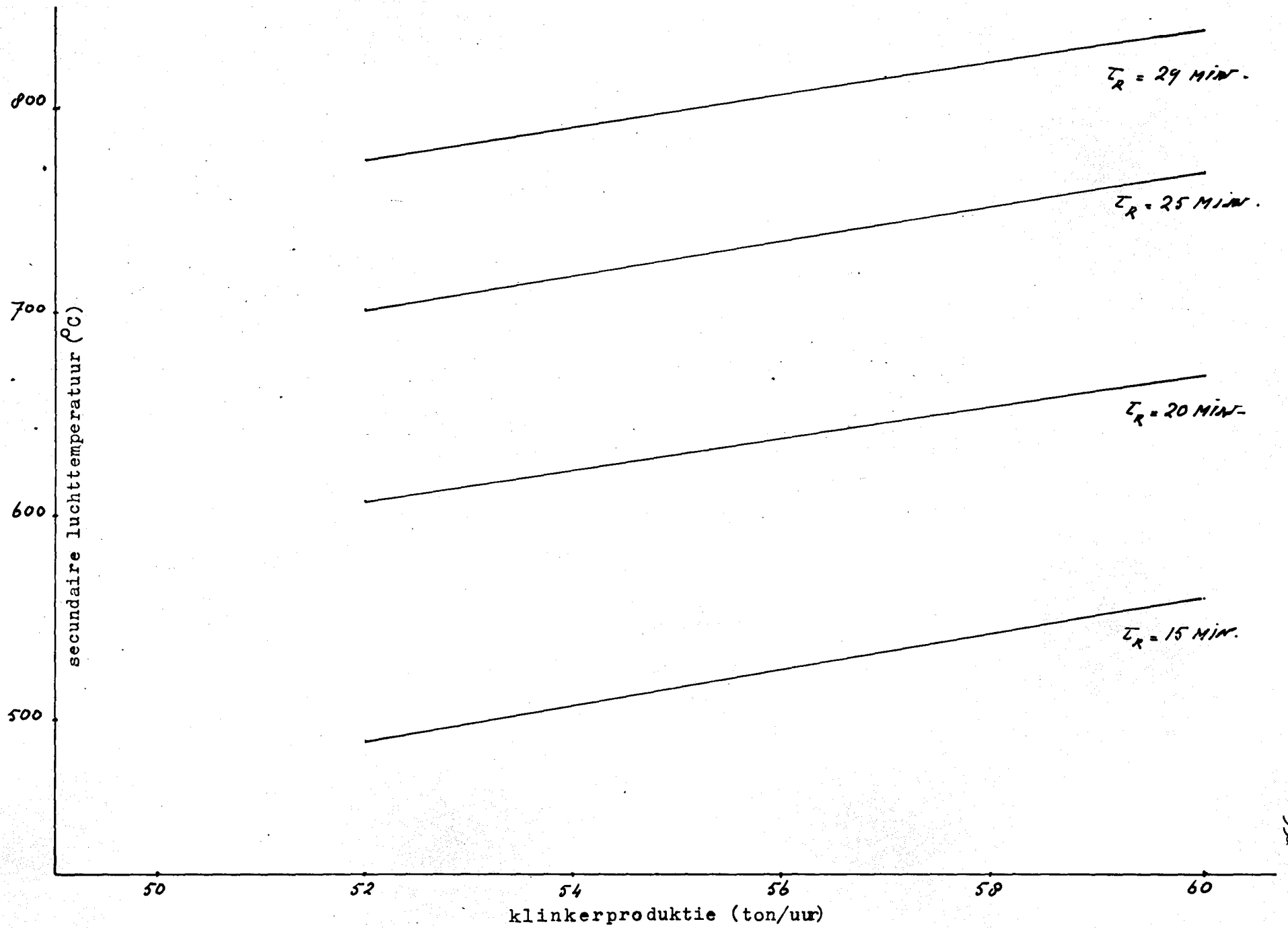


Fig. 3.4.2 Verband T<sub>s</sub> - L<sub>I</sub>+L<sub>II</sub>

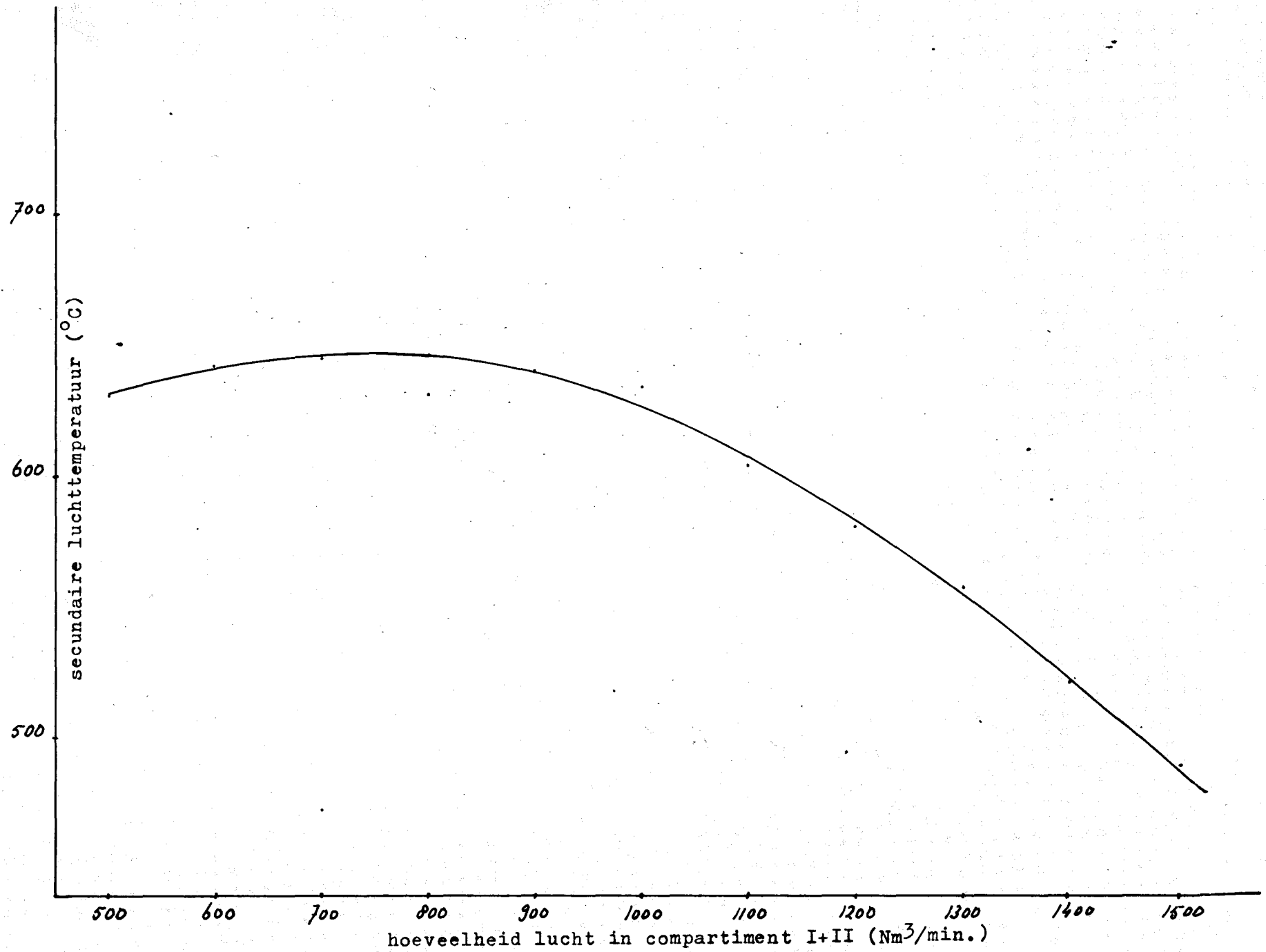


Fig. 3.4.3 Verband  $T_s - L_I/L_{II}$

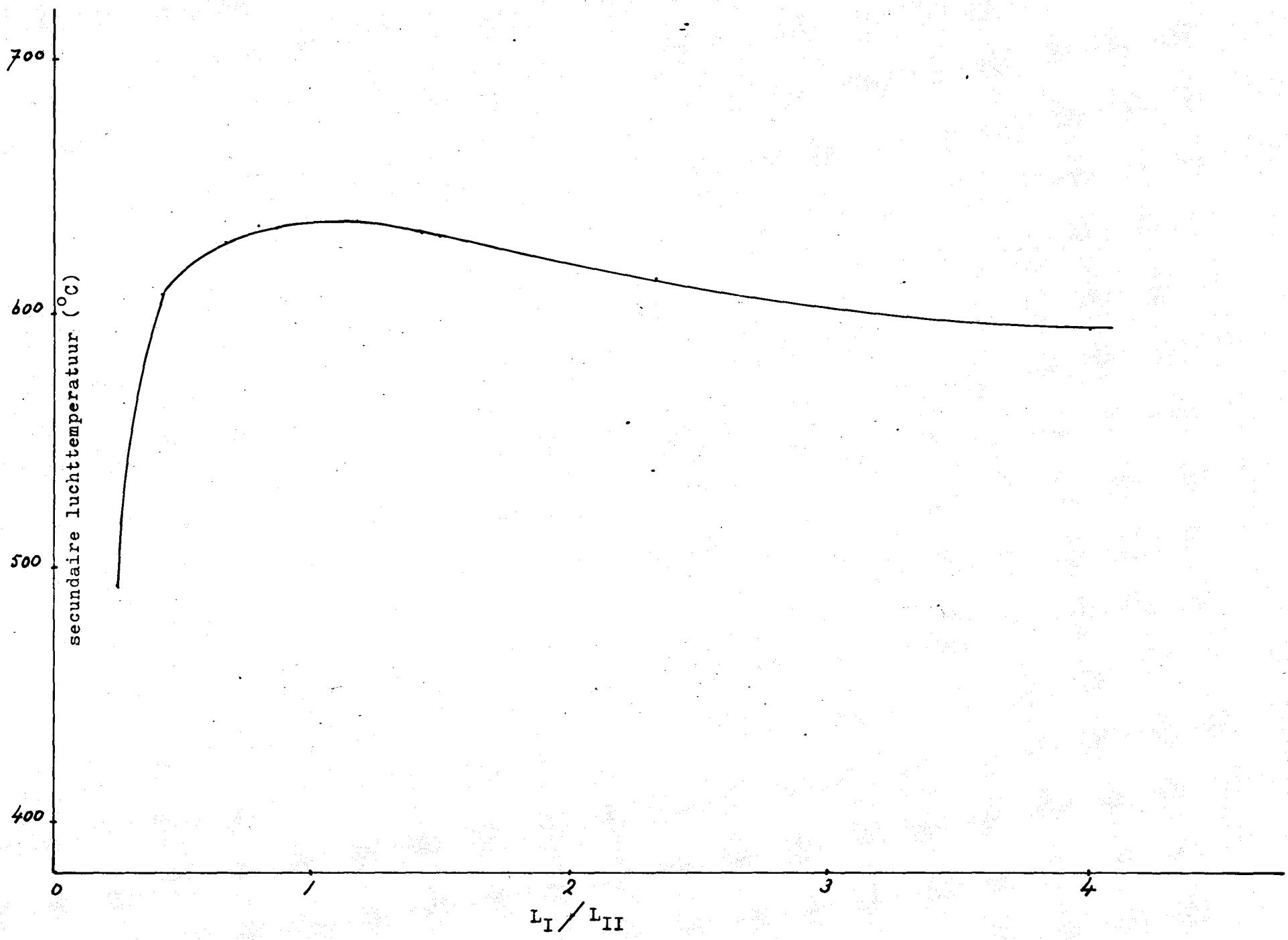


Fig. 3.4.4 Verband T<sub>S</sub> - S

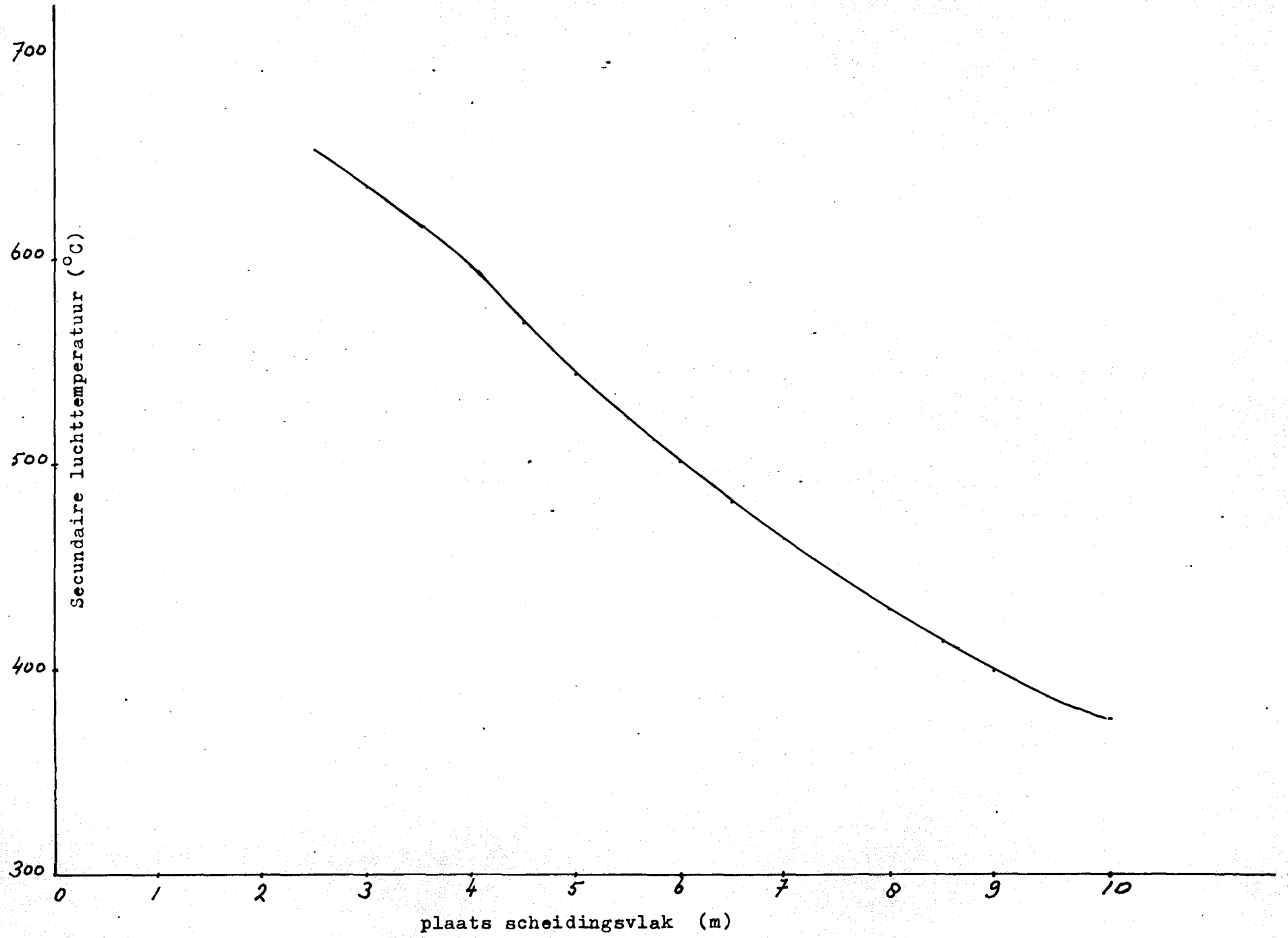
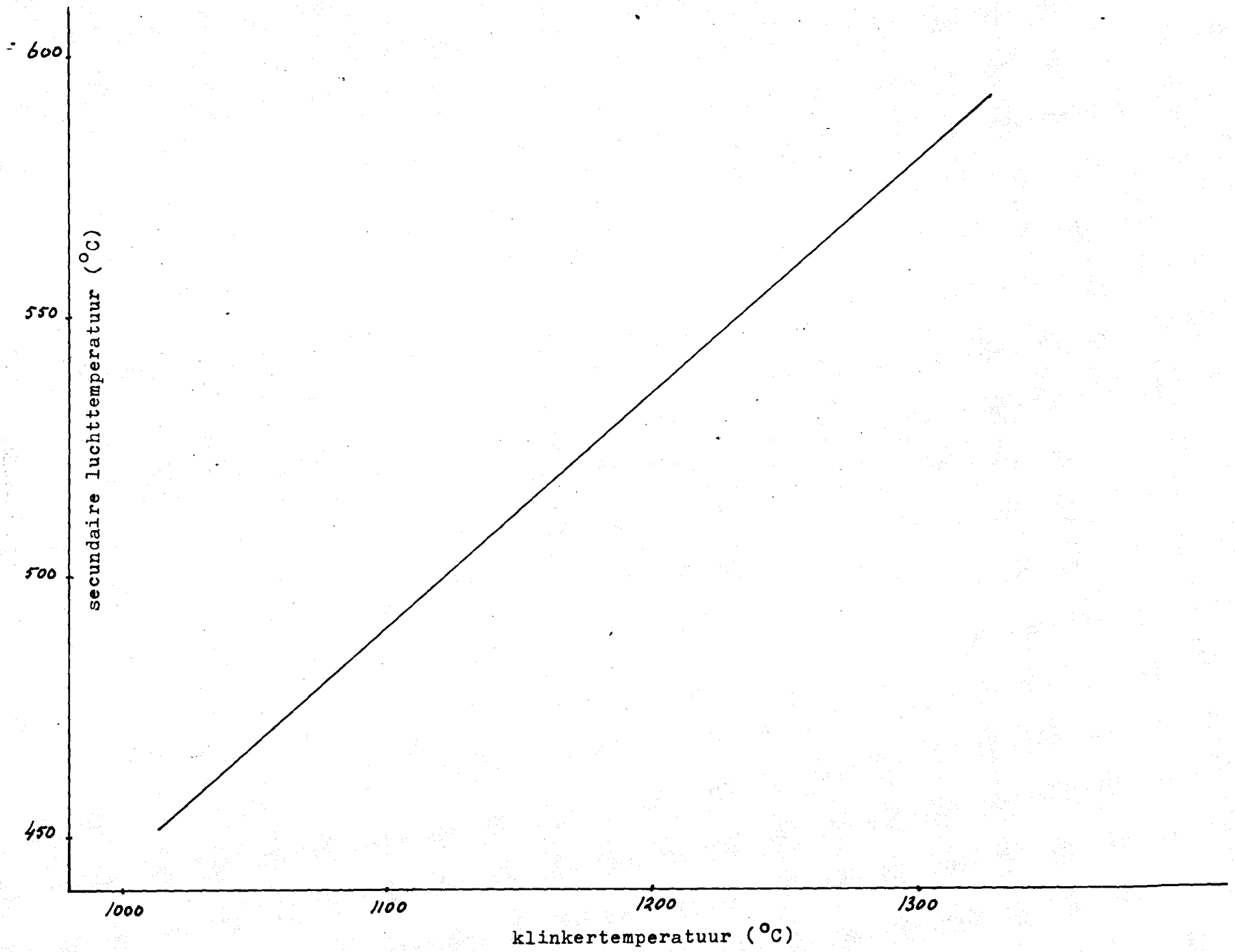


Fig. 3.4.5 Verband  $T_s - T_k$



## H O O F D S T U K 4

### HET DYNAMISCH GEDRAG VAN DE SECUNDAIRE LUCHTTEMPERATUUR

#### 4.1 Inleiding

Met behulp van de afkoelingscurve  $T_{1b}$  van een pakketje van het klinkerbed zal het tijdafhankelijke gedrag van de secundaire luchttemperatuur bepaald worden bij variaties in:

1. klinkerinlaattemperatuur,  $T_K(x=0)$ ;
2. klinkerhoeveelheid,  $K$ ;
3. verschildruk over het klinkerbed,  $\Delta P$ ;
4. plaats van het scheidingsvlak secundaire lucht/tubixlucht,  $S$ ;
5. roostersnelheid,  $V_R$

De variaties zullen bestaan uit puls- en stapvormige veranderingen die op het tijdstip  $t=0$  optreden. Vóór  $t=0$  verkeert de secundaire luchttemperatuur in een stationaire toestand, die bepaald wordt door de volgende condities:

- klinkerproduktie 56 ton/uur
- klinkerverblijftijd op het rooster 20 min.
- klinkerinlaattemperatuur  $1350^{\circ}\text{C}$
- hoeveelheid lucht door compartiment I plus II  $1000 \text{ Nm}^3/\text{min}$ .
- verhouding hoeveelheid lucht door compartiment I en II  $3/2$
- hoeveelheid lucht door compartiment III plus IV  $1800 \text{ Nm}^3/\text{min}$ .
- hoeveelheid secundaire lucht  $1000 \text{ Nm}^3/\text{min}$ .

De resultaten van het model zijn zowel geldig voor infinitesimaal dunne pakketjes als pakketjes met een eindige dikte. Voor de bepaling van de secundaire luchttemperatuur zijn we in het voorgaande ervan uitgegaan dat de pakketjes infinitesimaal dun zijn waardoor de formulering met behulp van integralen gemakkelijk is te instrumenteren. Echter voor de berekening van de dynamica is het overzichtelijker wanneer de conceptie van pakketjes met eindige dikte wordt aangenomen [10]. In dit geval geldt indien de secundaire luchttemperatuur wordt bepaald door de eerste twee compartimenten:

$$T_s = \sum_{i=1}^M \frac{L_i}{L} T_{1b,i} \quad (4.1.1)$$

waarin:

$$L = \sum_{i=1}^M L_i$$

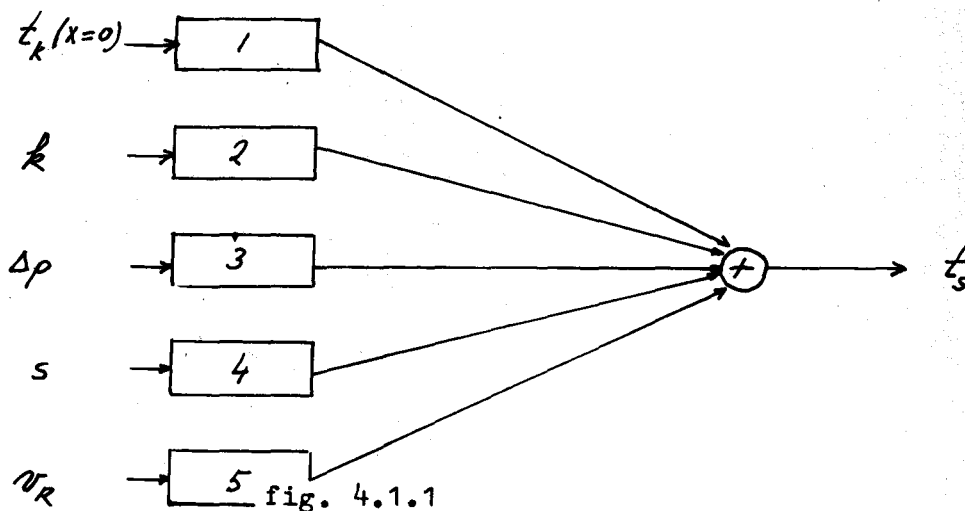
Voor de dikte van een pakketje is 20cm genomen zodat de compartimenten I en II elk 10 pakketjes bevatten. Met luchthoeveelheden  $L_{i1}$  en  $L_{i2}$  door de pakketjes voor resp. compartiment I en II, is formule 4.1.1 te schrijven als:

$$T_s = \sum_{i=1}^{10} \frac{L_{i1}}{L} T_{lb,i} + \sum_{i=11}^{20} \frac{L_{i2}}{L} T_{lb,i} \quad (4.1.2)$$

Bij het berekenen van de variaties  $t_s$  in de secundaire luchttemperatuur, gaan we ervan uit dat de storingen zo klein zijn dat de volgende benaderingen geldig zijn:

1. Het gedrag van  $t_s$  t.g.v. variaties in de klinkerinlaattemperatuur ( $t_{KO}$ ), klinkerhoeveelheid bij constante druk over het klinkerbed ( $k$ ), verschil-druk over het klinkerbed ( $\Delta p$ ), plaats scheidingsvlak ( $s$ ), en rooster-snelheid ( $v_R$ ) mogen onafhankelijk van elkaar behandeld worden.
2. Het verband tussen  $t_s$  en bovengenoemde variabelen is lineair zodat het superpositiebeginsel toepasbaar is.

In dit geval kan het systeem dat  $t_s$  beschrijft in een vijftal lineaire sub-systemen worden verdeeld volgens fig. 4.1.1.



#### 4.2 Invloed van de klinkerinlaattemperatuur

Veronderstel dat t.g.v. een pulsvormige variatie in klinkerinlaattemperatuur op  $t=0$  precies één pakketje hiervan invloed ondervindt.

Formule 4.1.2 geeft dan:

$$T_s(t) = \sum_{i=1}^{10} \frac{L_{i1}}{L} (T_{lb,i} + t_{lb,i}) + \sum_{i=11}^{20} \frac{L_{i2}}{L} (T_{lb,i} + t_{lb,i}) \quad (4.2.1)$$

$$= \sum_{i=1}^{10} \frac{L_{i1}}{L} T_{lb,i} + \sum_{i=11}^{20} \frac{L_{i2}}{L} T_{lb,i} + \frac{L_m}{L} t_{lb,m} \quad (4.2.2)$$



waarbij  $m$  de plaats van het gestoorde pakketje aanduidt.  $t_{lb,i}$  is variatie in afkoelingskromme. Daar slechts één pakketje een andere inlaattemperatuur heeft gehad geldt:

$$T_s(t) = T_s(t=0) + \frac{L_{m1}}{L} t_{lb,m} \quad (4.2.3)$$

De verandering van de secundaire luchttemperatuur is dan:

$$t_s(t) = \frac{L_{m1}}{L} t_{lb,m} \quad (4.2.4)$$

Indien het nieuwe pakketje zich in compartiment II bevindt dan kan op dezelfde manier worden afgeleid:

$$t_s(t) = \frac{L_{m2}}{L} t_{lb,m} \quad (4.2.5)$$

met:

$$\frac{L_{m1}}{L} = \frac{1}{M_1} ; \quad \frac{L_{m2}}{L} = \frac{1}{M_2} \quad (4.2.6)$$

is dus de pulsresponsie:

$$t_s(t) = t_s \left( \frac{m}{M} \right) = \begin{cases} \left( \frac{1}{M_1} t_{lb,m} \right) & 1 \leq m \leq 10 \\ \left( \frac{1}{M_2} t_{lb,m} \right) & 11 \leq m \leq 20 \end{cases} \quad (4.2.7)$$

Voor de berekening van  $t_{lb,m}$  zijn de afkoelingskurven met behulp van het model bepaald zowel voor een pakketje dat zich in de oorspronkelijke toestand bevindt (standaardproces,  $T_K(\theta) = 1350^\circ\text{C}$ ) als voor het afwijkende pakketje dat een klinkerinlaattemperatuur van  $1080^\circ\text{C}$  heeft. Uit het verschil tussen beide kurven ( $t_{lb,m}$ ) kan via formule 4.2.7  $t_s$  berekend worden (zie fig. 4.2.1).

De responsie op een stapvormige verandering in de klinkerinlaattemperatuur verkrijgt men uit de pulsresponsie door integratie. Voor het resultaat zie fig. 4.2.2.

#### 4.3 Invloed van de klinkerhoeveelheid

Een pulsvormige verandering in de vorm van één pakketje met een grotere hoogte, toegevoerd op  $t=0$ , heeft geen invloed op de andere pakketjes mits de drukval over het klinkerbed constant blijft. De luchtstroom door het afwijkende pakketje verandert wel, en daarom ook de totale luchtstroom. Er geldt nu voor het geval dat het pakketje met grotere hoogte zich op de plaats  $m$  bevindt,  $m$  in compartiment I:

Fig. 4.21 IMPULS RESPONSE  $t_s$ ; PULS  $T_k(x=0)$ ; 270°C

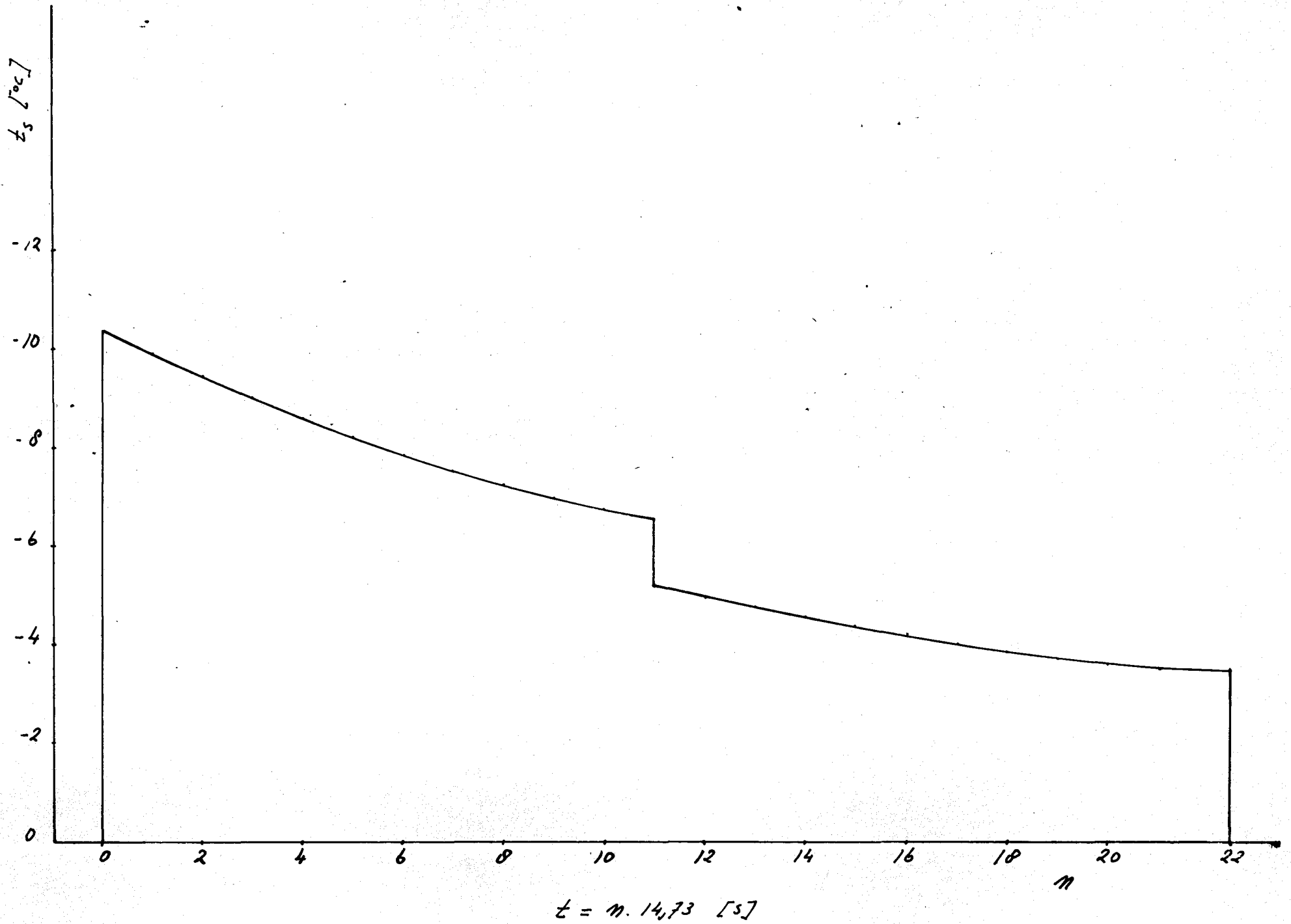
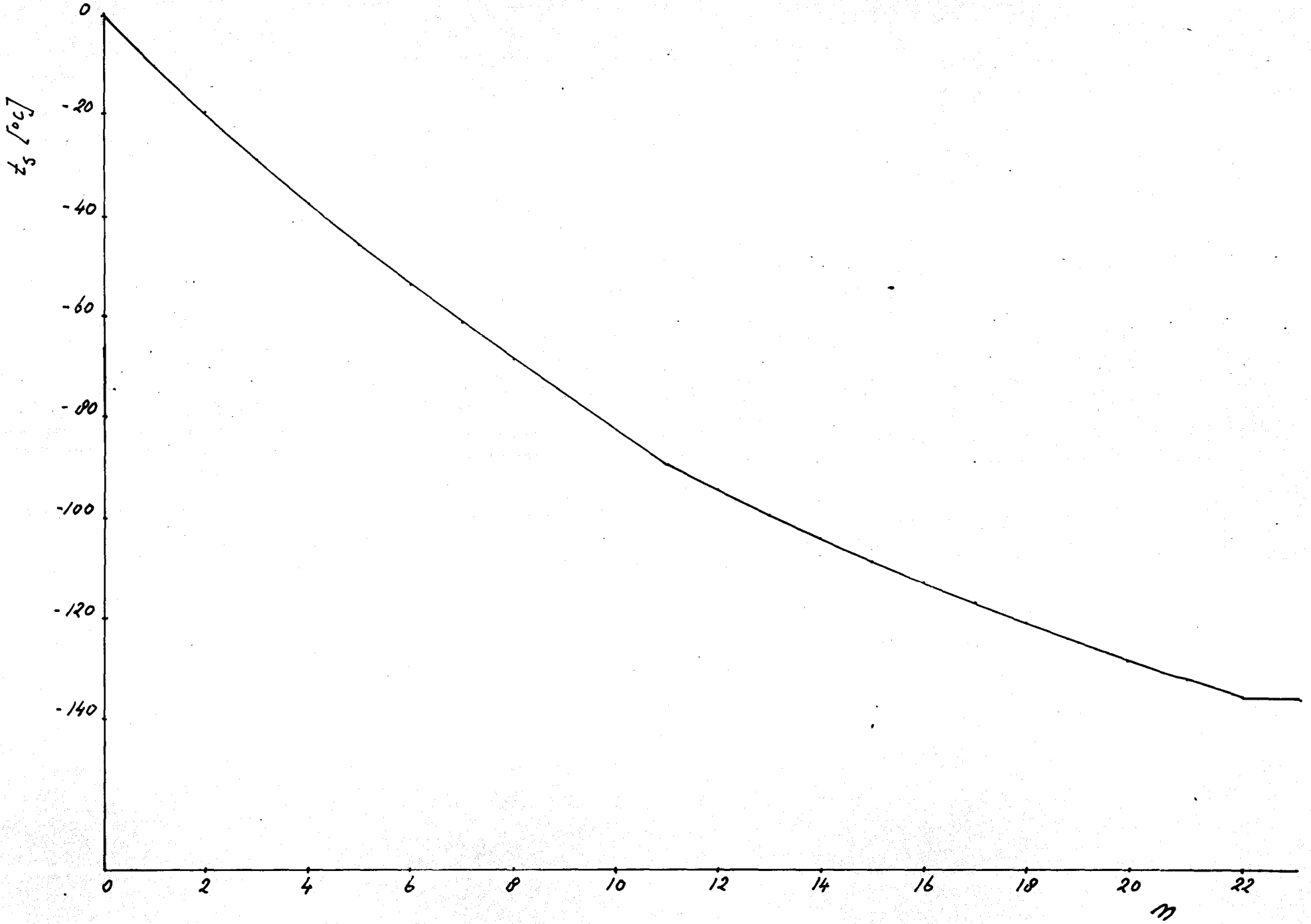


FIG. 4.22 STAIR RESPONSE  $t_s$ , STAIR  $T_r(x=0)$ :  $270^\circ\text{C}$



$t = m. 14,73 [s]$

$$T_s(t) = \sum_{i=1}^{10} \frac{L_{i1}}{L+1_1} T_{1b,i} - \frac{L_{i1}}{L+1_1} T_{1b,m} + \frac{L_{i1+1_1}}{L+1_1} (T_{1b,m} + t_{1b,m})$$

$$+ \sum_{i=11}^{20} \frac{L_{i2}}{L+1_1} T_{1b,i} \quad (4.3.1)$$

$$= \frac{L}{L+1_1} T_s(t=0) + \frac{1_1}{L+1_1} T_{1b,m} + \frac{L_{i1+1_1}}{L+1_1} t_{1b,m} \quad (4.3.2)$$

$$\approx (1 - \frac{1_1}{L}) T_s(t=0) + \frac{1_1}{L} T_{1b,m} + \frac{1}{M_1} t_{1b,m} \quad (4.3.3)$$

$l_1, l_2$  = variatie in hoeveelheid doorgestroomde lucht resp. in compartiment I en II.

Voor de variatie in de secundaire luchttemperatuur geldt:

$$t_s(t) = - \frac{l_1}{L} \left[ T_s(t=0) - T_{1b,m} \right] + \frac{1}{M_1} t_{1b,m} \quad *) \quad (4.3.4)$$

Uit formule 4.3.4 en 4.3.5 zien we dat  $t_s$  gesplitst is in twee termen waarvan de eerste de invloed van de verandering van de luchthoeveelheid beschrijft en de tweede de invloed van de hoeveelheid materiaal. We zullen bewijzen dat hetzelfde resultaat wordt verkregen indien formule 4.1.1 wordt gelineariseerd (zie Appendix 6.5).

a) Invloed van alleen de hoeveelheid klinker.  $t_{1b,m}$  is als verschil van de 2 afkoelingskrommen bij 56 en 59 ton/uur genomen. De invloed op  $t_s$  is berekend volgens 4.3.4 en 4.3.5. Het resultaat is weergegeven in fig. 4.3.1. Het blijkt dat het verschil tussen de afkoelingskrommen constant is voor het gebied van 52 tot 60 ton/uur klinkerproductie.

b) Invloed van alleen de hoeveelheid lucht.

Stel [11]:

$$\Delta P = c_1 l_i^2 H_i \quad (4.3.6)$$

waarin  $\Delta P$  = het drukverschil over een pakketje  $i$

$H_i$  = hoogte van pakketje  $i$

$c_1$  = een constante

-----  
\*) Voor compartiment II geldt:

$$t_s(t) = - \frac{l_2}{L} \left[ T_s(t=0) - T_{1b,m} \right] + \frac{1}{M_2} t_{1b,m} \quad (4.3.5)$$

Voor kleine variaties  $\Delta p$ ,  $l_i'$  en  $h_i'$  volgt uit formule 4.3.2.1:

$$\frac{\Delta p}{\Delta P} = \frac{h_i'}{H_i} + 2 \frac{l_i'}{L_i} \quad (4.3.7)$$

Indien  $\Delta P$  konstant is geldt volgens formule 4.3.7

$$l_i' = -\frac{1}{2} \frac{h_i'}{H_i} \cdot L_i \quad (4.3.8)$$

Variatie van 56 naar 59 ton/uur geeft  $h_i' = 1,11 \text{ cm}$  en voor  $l$  volgt uit 4.3.8:

$$l_1 = -0,04 \text{ kg/s} = -1,75 \text{ Nm}^3/\text{min.}$$

$$l_2 = -0,03 \text{ kg/s} = -1,29 \text{ Nm}^3/\text{min.}$$

De eerste term in de form. 4.3.4 en 4.3.5 is nu te berekenen. Samen met de andere term in formule 4.3.4 en 4.3.5 levert dit de responsie op van  $t_s$  op een pulsformige verandering in de hoeveelheid klinker bij constant drukverschil over de klinkerlaag (zie fig. 4.3.2.). Door integratie van de pulsresponsie krijgen we de stapresponsie (zie fig. 4.3.3).

#### 4.4 Invloed van de verschildruk

De verandering van de verschildruk of wat op hetzelfde neerkomt, de hoeveelheid lucht in compartiment I + II, beïnvloedt de luchtstroom door en daarmee de afkoelingskurve van ieder pakketje. Ter concretisering van de gedachten is in fig. 4.4.1 geschetst wat er gebeurt als het drukverschil stapvormig groter wordt gemaakt.

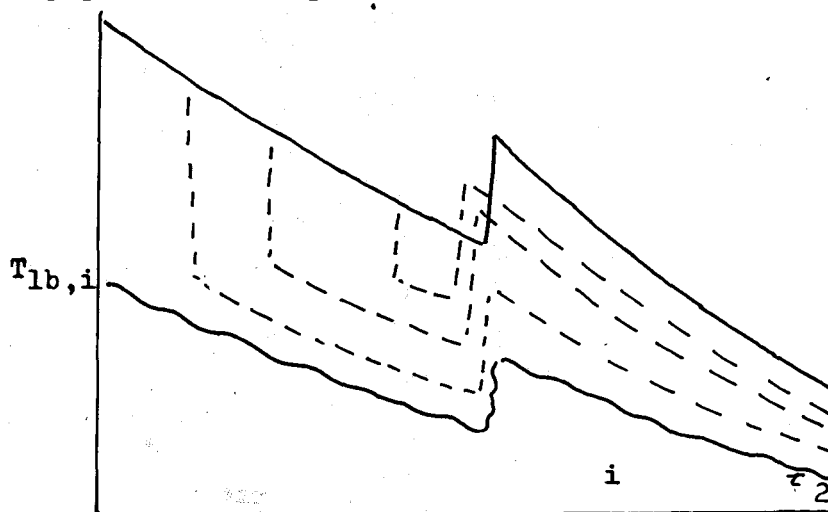


fig. 4.4.1 Afkoelingskrommen bij stap in  $\Delta P$

De bovenste getrokken kurve geldt voor  $t \leq 0$ . De abscis kan als een plaatsaanduiding en als tijd as beschouwd worden. Evenzo geeft de onderste geribde lijn weer wat er gebeurt in de pakketjes die na  $t=0$  binnenkomen.

Fig. 4.3.2 PULS RESPONSE  $t_s$ ; PULS  $k_0$ : 3 TON/UR

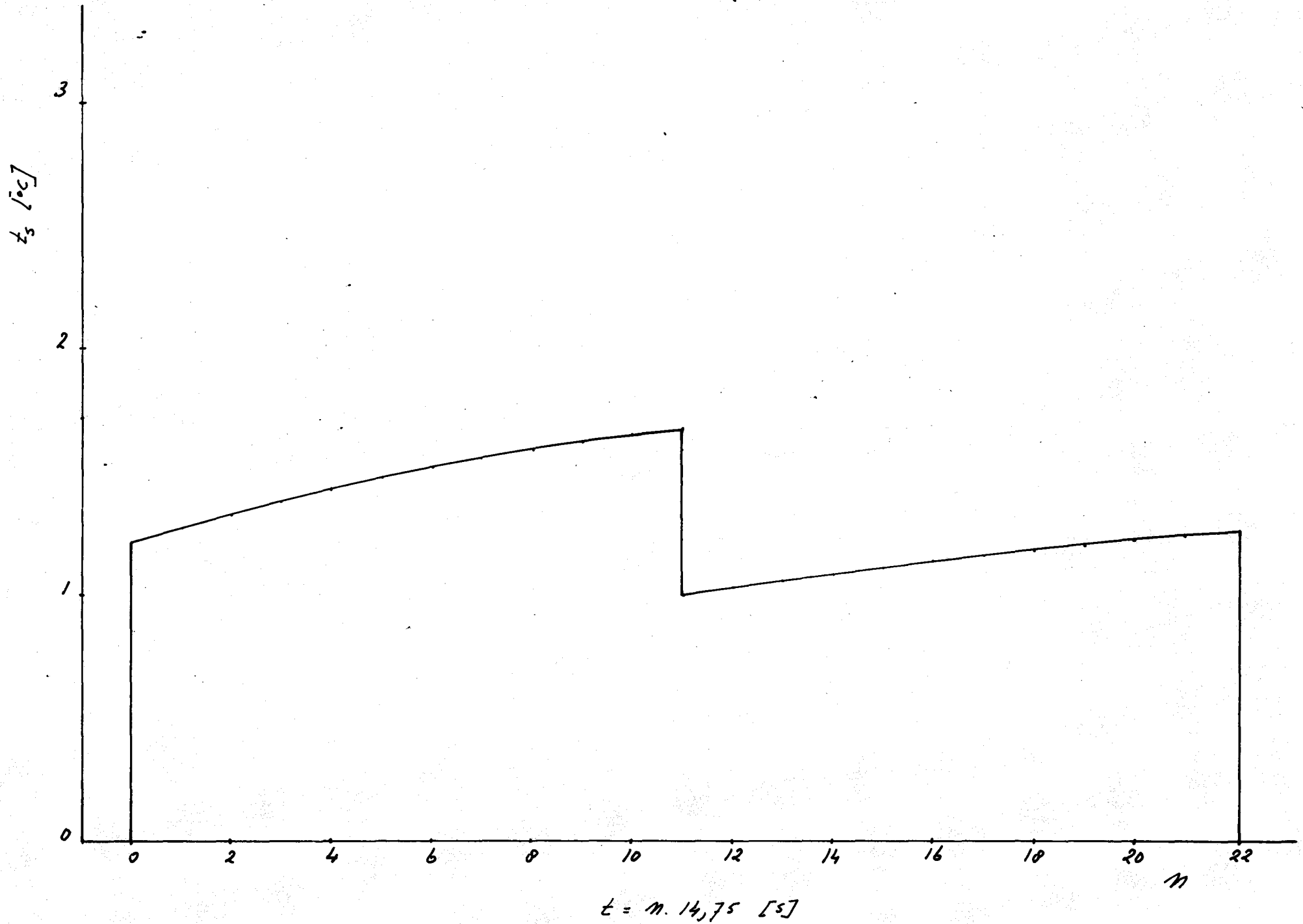


FIG. 4.3.1 PULSRESPONSIE  $t_s$  (ALLEEN INVLOED  $k_0$ ); PULS  $k_0$ : 3 TON/CM<sup>2</sup>

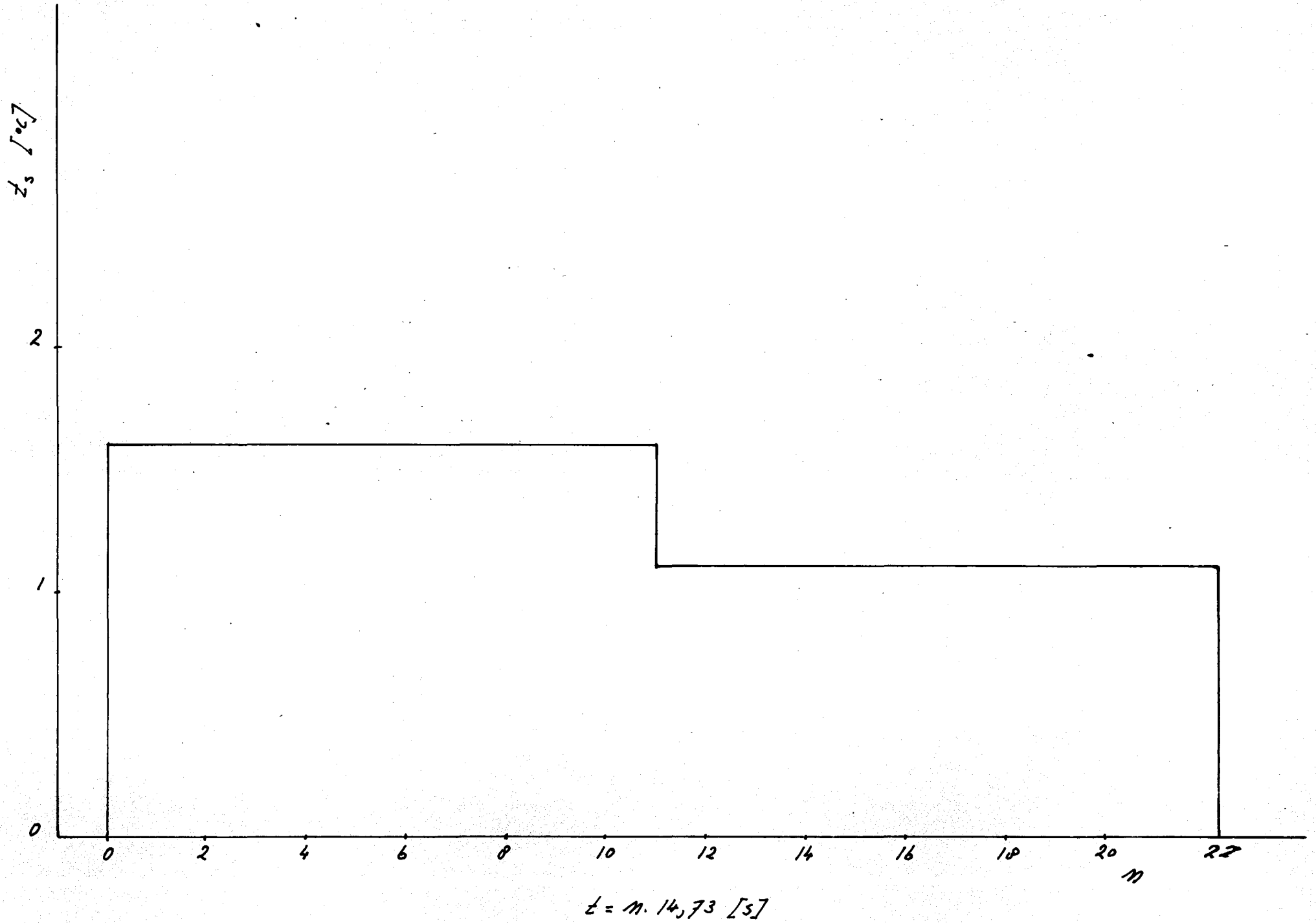
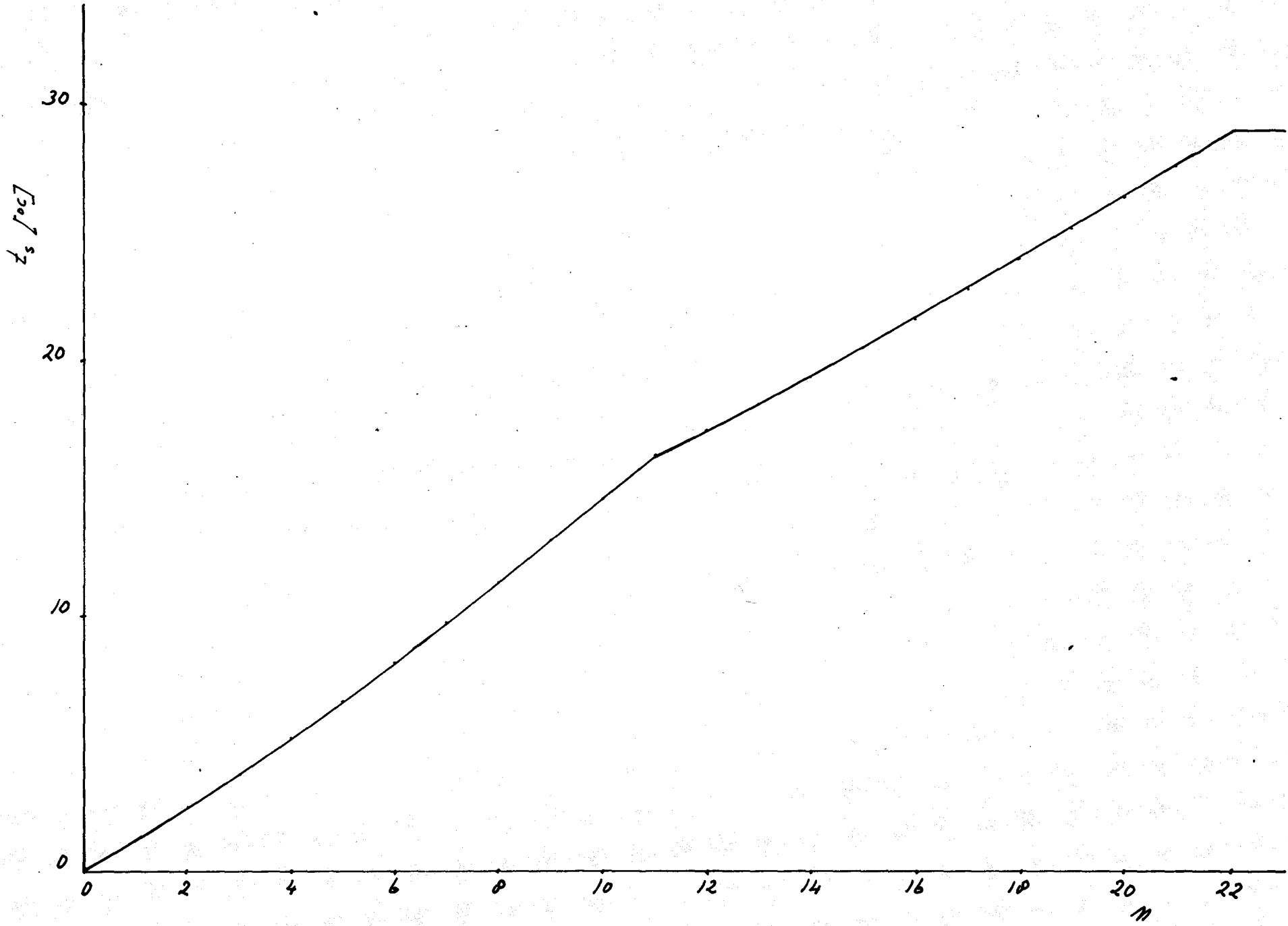


Fig. 4.3.3 STAPRESPONSIE  $t_s$ , STAP  $k_0$ : 3 TON/VR.



$t = 11,75$  [s]



Voor de pakketjes die zich op  $t=0$  reeds in de eerste twee compartimenten bevinden, begint op  $t=0$  de afkoelingskurve af te wijken van de oorspronkelijke, getrokken kurve; dit is weergegeven door de gestreepte lijnen. Het beginpunt van zo'n lijn geeft aan waar het pakketje zich op  $t=0$  in de koeler bevindt. De rest geeft aan hoe de uitlaattemperaturen zullen zijn op de plaatsen die het daarna nog zal innemen. Langs iedere kurve kan nog een tijdschaal getekend worden; deze heeft dezelfde schaalwaarde als voor de storing, maar het punt  $t=0$  ligt voor elke kurve anders nl. daar waar de afwijking optreedt van de afkoelingskurve voor  $t < 0$ . De responsie van  $T_s$  kan nu eenvoudig bepaald worden door sommatie van  $T_{lb,i}$  voor alle pakketjes op eenzelfde tijdstip volgens formule 4.1.2. Hiertoe is met het model voor ieder pakketje en dit zijn er 20, de afkoelingskurven bepaald. Voor de duidelijkheid is zo'n kurve nog eens in fig. 4.4.2 getekend. Het resultaat van de berekening voor een stap in de luchthoeveelheid van  $+200 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . is in fig. 4.4.3 weergegeven.

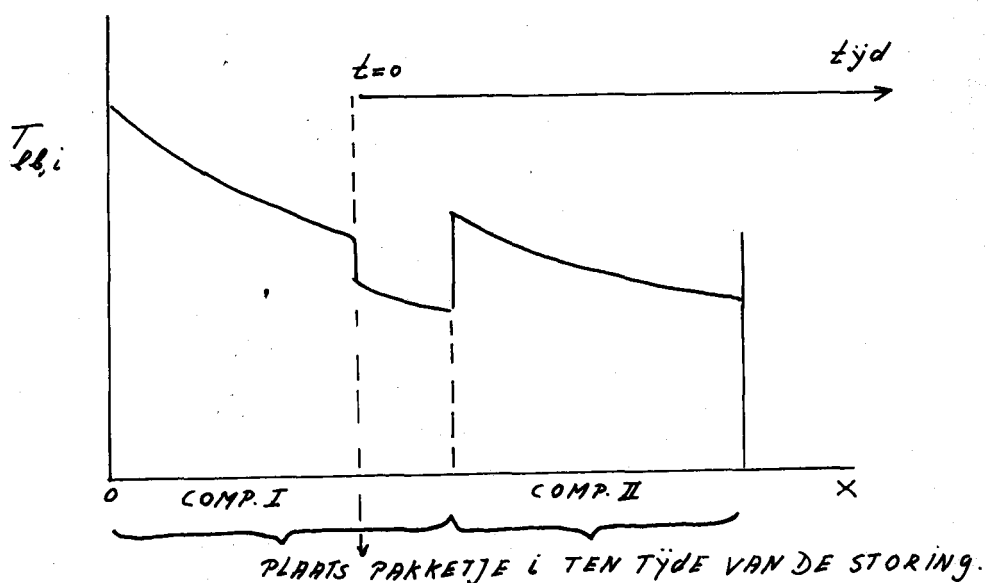
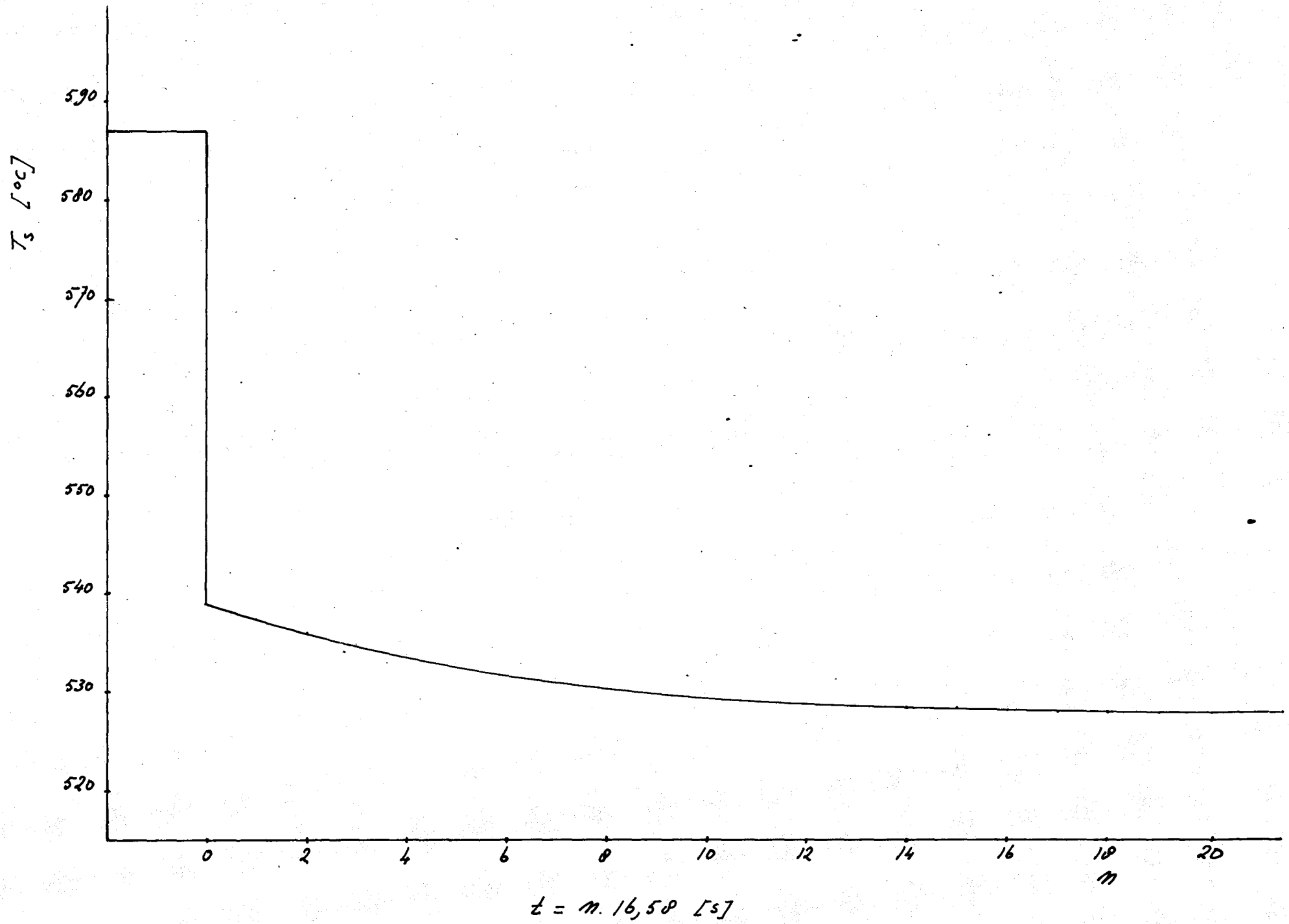


fig. 4.4.2

#### 4.5 Invloed van de plaats van het scheidingsvlak

Allereerst een nadere toelichting over het begrip scheidingsvlak. Bij het standaardproces is er van uit gegaan dat de hoeveelheid secundaire lucht gelijk is aan de hoeveelheid lucht in compartiment I+II. Op die manier kunnen we denkbeeldig een scheidingsvlak aanbrengeen aan het eind van compartiment II, zodat alle lucht aan de kant van de koeleringang secundaire lucht is en alle lucht aan de kant van de koeleruitgang tubixlucht.

Fig. 4.4.3 STAPRESPONSIE  $T_s$ ; STAP L: 200  $Nm^3/MIN$ .



Indien de hoeveelheid lucht in de beide eerste compartimenten wordt gewijzigd, terwijl de condities in de oven een constante hoeveelheid secundaire lucht vereisen, zal het scheidingsvlak zich op een andere plaats moeten instellen.

Een verandering in de plaats van het scheidingsvlak zal praktisch een instantane verandering van de secundaire luchttemperatuur tot gevolg hebben. Verondersteld hierbij is dat de verblijftijd van de lucht boven het bed 0 is en dat er ideale menging optreedt. In dit geval geeft het statisch verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de plaats van het scheidingsvlak voldoende informatie over het dynamisch gedrag van de secundaire luchttemperatuur.

#### 4.6 Correcties in de luchthoeveelheid

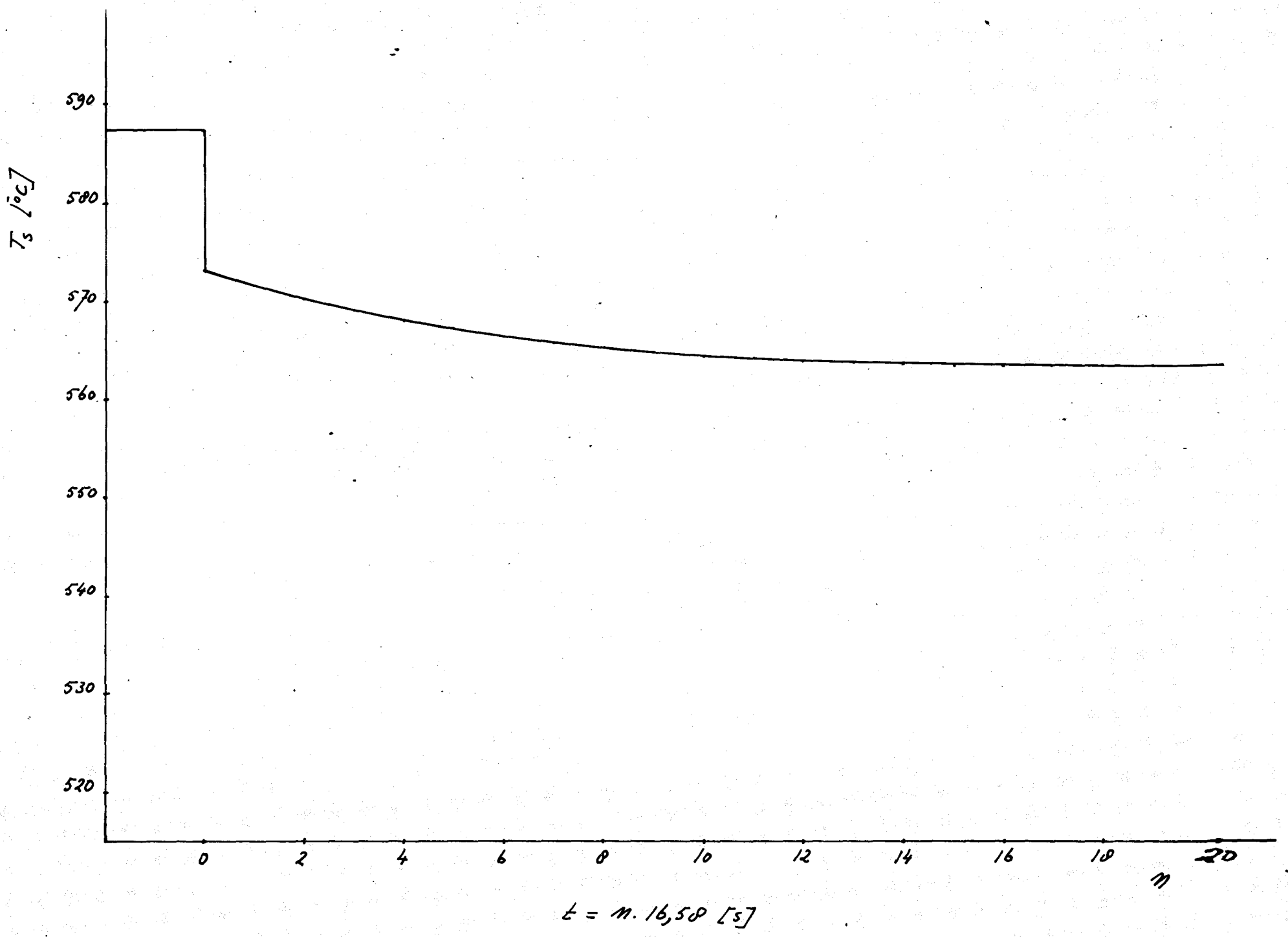
Enkele in het voorgaande berekende responsies zijn nog niet volledig omdat daar nog geen rekening is gehouden met een constante hoeveelheid secundaire lucht en het feit dat de hoeveelheid lucht in compartiment I+II constant wordt geregeld. Daartoe moet een correctie aangebracht worden die op grond van de veronderstellingen geaddereerd kan worden bij de eerder beschreven responsies.

##### 4.6.1 Correctie bij verschillendrukresponsies

Indien de hoeveelheid secundaire lucht constant blijft, dan zal bij een positieve stap (1000 naar 1200 Nm<sup>3</sup>/min.) in de hoeveelheid lucht door compartiment I en II het scheidingsvlak naar de koeleringang moeten verschuiven. In plaats van aan het eind van het tweede compartiment ( $x = 3,9\text{m}$ ) komt het scheidingsvlak dan te liggen op  $x = 3,08\text{m}$ , waardoor de secundaire luchttemperatuur momentaan 45°C hoger wordt (zie fig. 4.3.4). Wordt deze opgeteld zoals temperatuursprong/bij de responsie/deze onder 4.4 is uitgerekend, dan krijgen we een kromme die qua vorm niet is veranderd (zie fig. 4.6.1.1). De grootte van de temperatuursprong is voor een groot gedeelte opgeheven door de verschuiving van het scheidingsvlak.

Aan de klinkerkoeler is gemeten dat een zg. inverse responsie kan optreden, dat wil zeggen dat de verandering in de secundaire luchttemperatuur eerst positief wordt en daarna negatief. Voor de regeling is dit verschijnsel van bijzonder belang. Bij de berekening van de gecorrigeerde responsie is ervan uitgegaan dat het superpositiebeginsel geldig is. Het zou kunnen zijn dat een betere benadering wel een inverse responsie oplevert. Een exacte berekening is mogelijk door dezelfde procedure toe te passen als onder 4.4,

FIG. 4.6.1.1 STAP RESPONSIE  $T_s$  (KONSTANTE HOEVEELHEID SECUN.  
DAIRE LUCHT); STAP L: 200  $Nm^2/min$ .



waarbij dan het scheidingsvlak meteen op de juiste plaats wordt gelegd. Dit heeft tot gevolg dat de secundaire luchttemperatuur nu niet door alle pakketje in de eerste twee compartimenten (20) wordt bepaald, maar slechts door 16. Het resultaat is weergegeven in fig. 4.6.1.2. Het blijkt dat:

1. er geen inverse responsie optreedt;
2. het achteraf corrigeren door het verplaatsen van het scheidingsvlak een goede benadering van de exacte oplossing geeft.

#### 4.6.2 Correctie bij klinkerhoeveelheid-responsies

##### a. Drukverschil over het klinker-bed constant

In het voorgaande is de secundaire luchttemperatuur bepaald bij een variatie in de hoeveelheid klinker bij constant drukverschil over het klinkerbed. Gaan we ervan uit dat de hoeveelheid secundaire lucht constant is dan zou nog een correctie uitgevoerd moeten worden door middel van het verplaatsen van het scheidingsvlak. Bij een pulsformige verhoging van de bedhoogte neemt de lucht door het pakketje met meer materiaal af met een hoeveelheid 1. Daarom moet het scheidingsvlak zodanig naar de koeleruitgang worden verschoven dat de extra bijdrage aan de secundaire lucht gelijk is aan 1. Deze correctie heeft een negatieve sprong in  $t_g$  tot gevolg. In fig. 4.6.2.1 is de gecorrigeerde stapresponsie weergegeven.

##### b. Hoeveelheid lucht door compartiment I en II constant

Bekend is de responsie op een verandering van de hoeveelheid materiaal bij constant drukverschil over het klinkerbed wat dus wil zeggen dat de totale hoeveelheid lucht in de eerste twee compartimenten verandert. Indien we rekening houden met het feit dat de hoeveelheid lucht door deze compartimenten constant wordt gehouden dan moeten nog correcties in de luchthoeveelheid worden aangebracht. Voor het in par. 4.3 beschreven geval zal bij een pulsformige verhoging van de bedhoogte op  $t=0$  een sprong optreden in de hoeveelheid lucht door het nieuwe pakketje van  $-1,75 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . Zodoende bestaat de luchtcorrectie uit een stap in de totale luchthoeveelheid in de eerste twee compartimenten van  $+1,75 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . (Appendix 6.8). Wanneer het nieuwe pakketje in compartiment II is aangekomen, is de verandering in de doorgestroomde hoeveelheid lucht  $-1,29 \text{ Nm}^3/\text{min}$ , zodat dan een nieuwe sprong in de totale luchthoeveelheid optreedt van  $-0,46 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . In fig. 4.6.2.2 is de luchtcorrectie weergegeven voor een stap in de klinkerproductie van 3 ton/uur, terwijl in fig. 4.6.2.3 de gecorrigeerde responsie is opgetekend.

FIG. 4.6.12 STAPRESPONSIE  $T_s$  (KONSTANTE HOEVEELHEID SECUN.  
DRIE LUCHT); STAP L: 200 NM<sup>3</sup>/MIN.  
EXAKTE BEREKENING

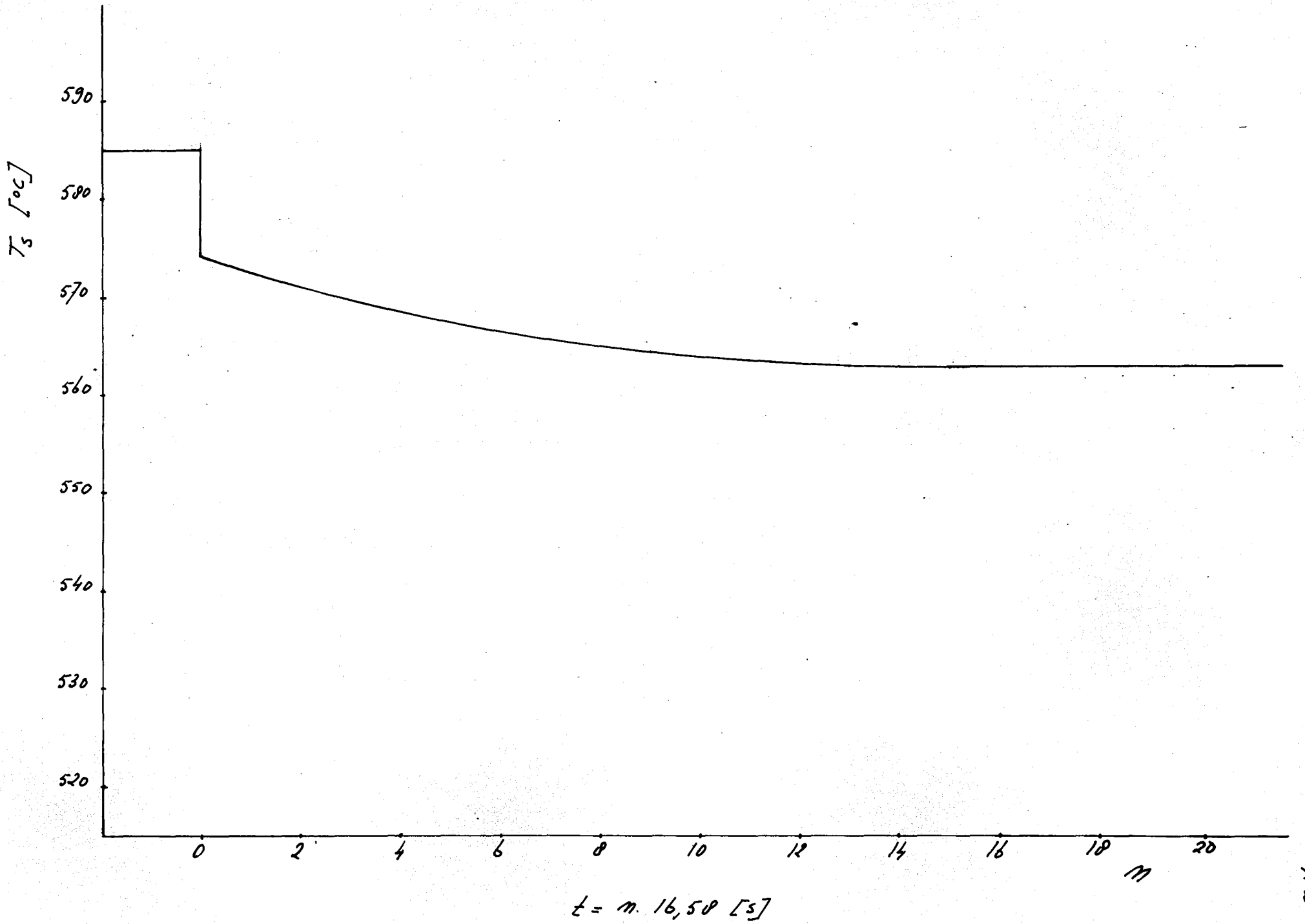
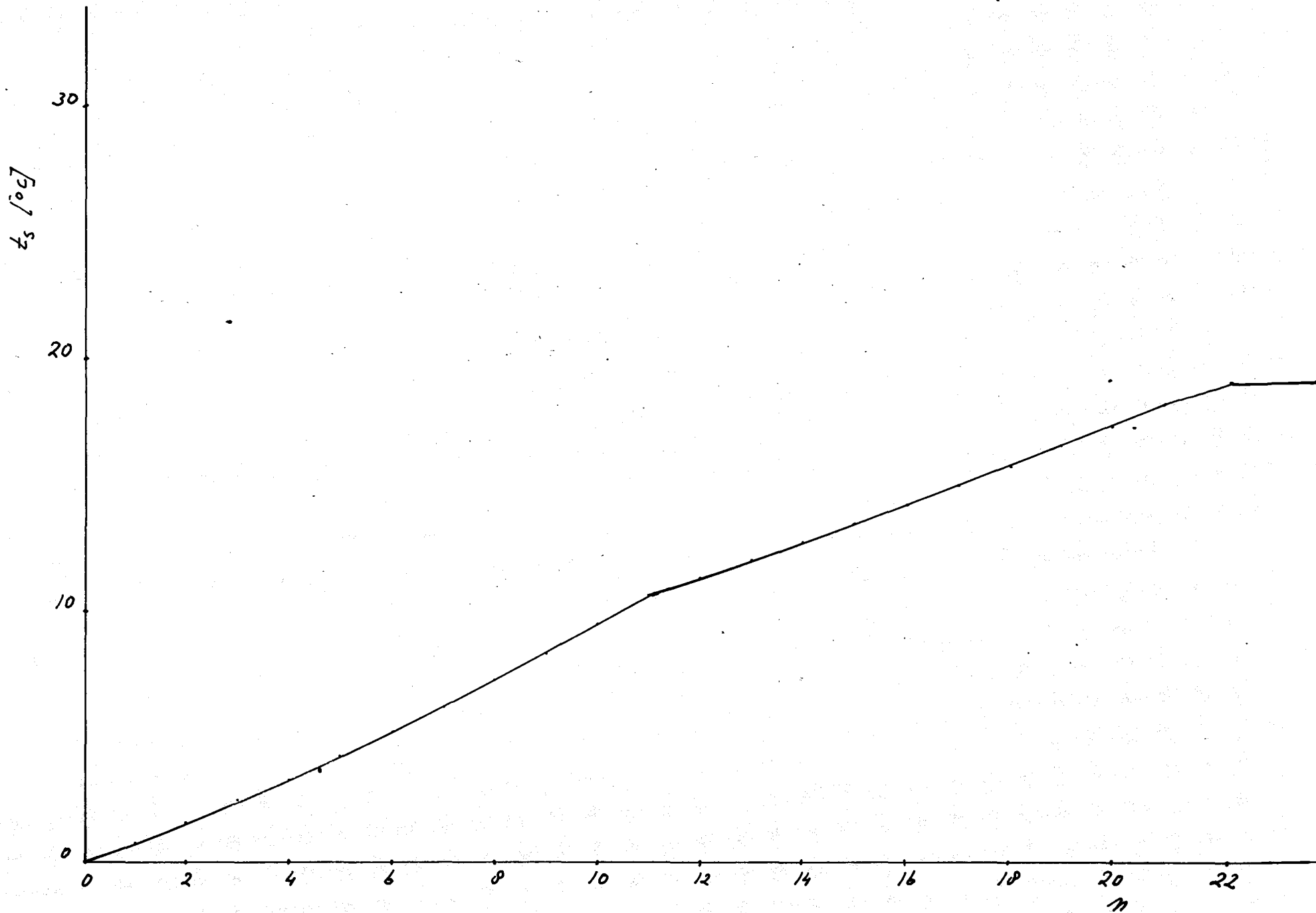


Fig. 4.6.21 STAPRESPONSIE  $t_s$  (KONSTANTE HOEVEELHEID SECUNDBAIRE  
LUCHT); STAP  $k_0$ : 3 TON/OUR.



$t = m. 14,75 [s]$

FIG. 4.6.2.2 STAPRESPONSIE  $t_s$ ; CORRECTIE VOOR STAP IN  $K_0$   
(3 TON/UR) bij KONSTANTE L.

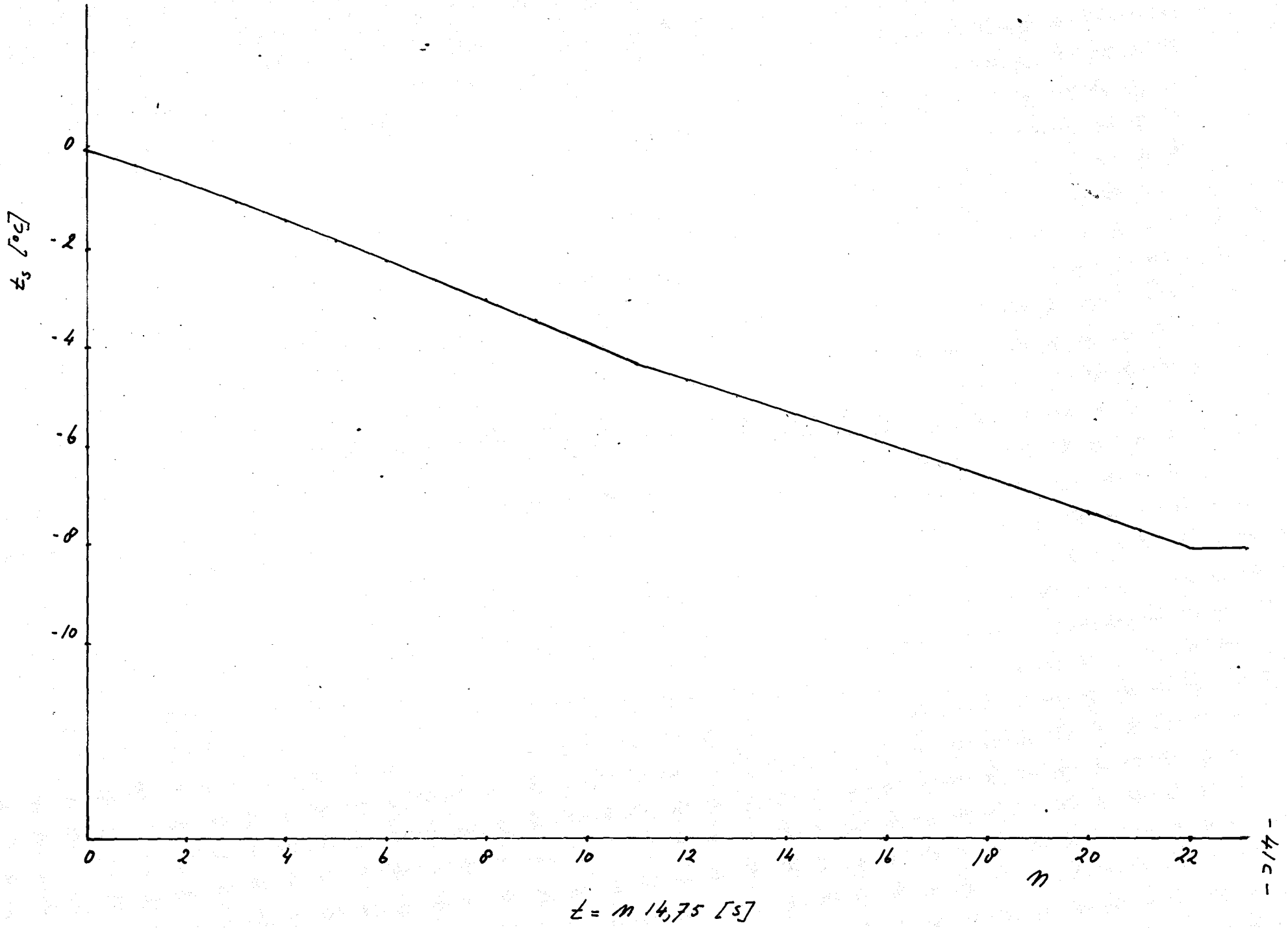
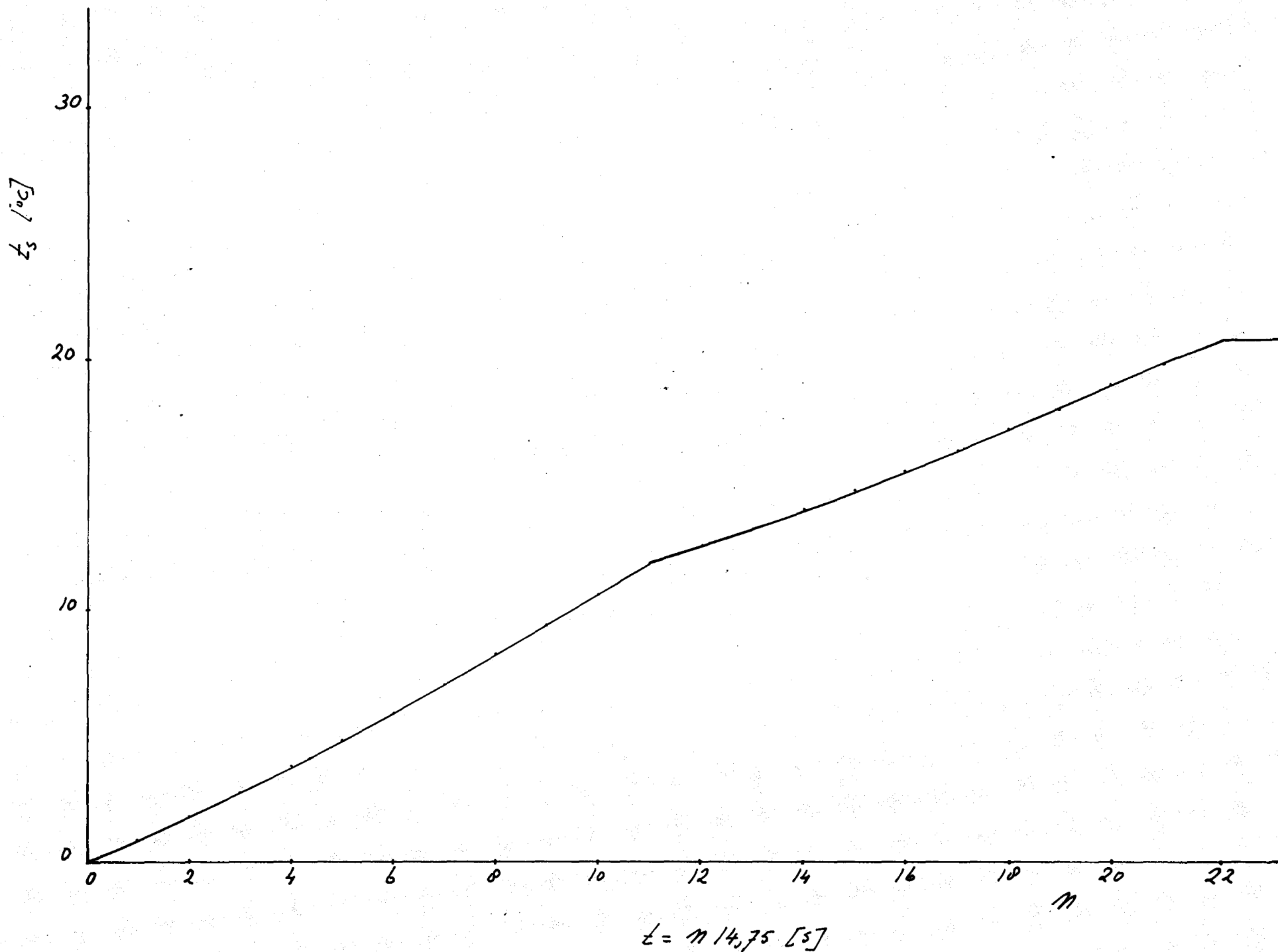




FIG. 4.6.2.3 STAPPRESPONSIE  $t_s$  (KONSTANTE  $L$ );  
STAPP  $K_0$ : 3 TON/UR



#### 4.7 Invloed van de roostersnelheid

Deze invloed is tweeledig: zowel de bedhoogte als de verblijftijd veranderen. Neem aan dat op  $t=0$  het rooster plotseling alle pakketjes één plaats naar de koeleruitgang verschuift. Dat betekent dat de roostersnelheid een impulsvormige verandering doormaakt. Onmiddellijk na de storing is het eerste pakketje op het rooster "leeg"; zie voor een nadere uiteenzetting van het "lege" pakketje Appendix 6.6. In dit geval wordt  $t_s$  gegeven door (App. 6.7):

lege element in compartiment I:

$$t_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) = \frac{T_{1,leeg} - T_{1b,z}}{M_1} + \frac{T_{1b,E} - T_{1b,M}}{M_2} - \frac{1}{L} \left[ T_s(0) - T_{1,leeg} + \frac{T_{1,leeg} - T_{1b,z}}{M_1} + \frac{T_{1b,E} - T_{1b,M}}{M_2} \right] \quad (4.7.1)$$

lege element in compartiment II:

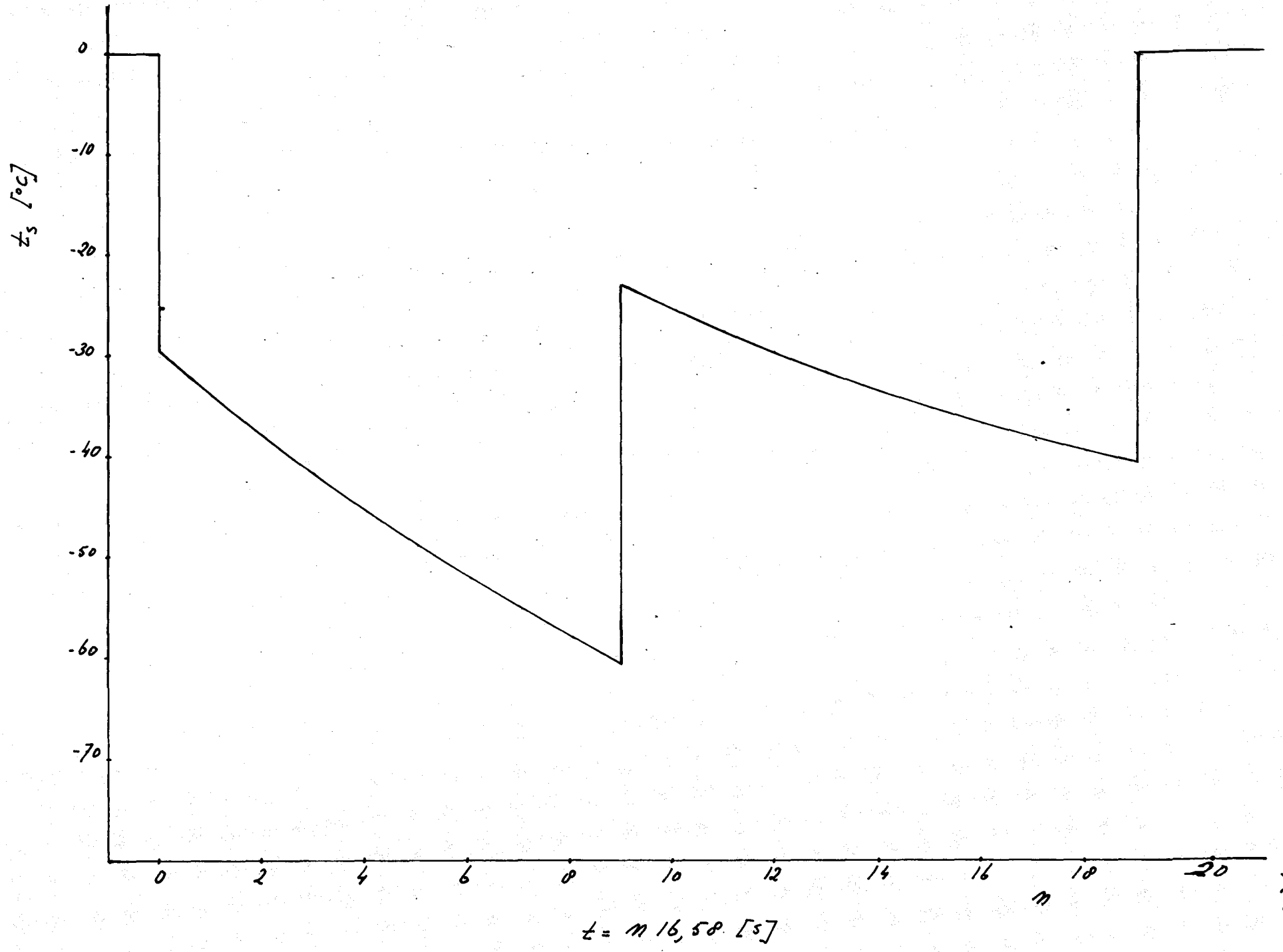
$$t_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) = \frac{T_{1,leeg} - T_{1b,M}}{M_2} - \frac{1}{L} \left[ T_s(0) - T_{1,leeg} + \frac{T_{1,leeg} - T_{1b,M}}{M_2} \right] \quad (4.7.2)$$

De impulsresponsie is weergegeven in fig. 4.7.1.

Luchtcorrecties voor het geval de hoeveelheid secundaire lucht constant is (scheidingsvlakverplaatsing) en de lucht door compartiment I en II constant wordt geregeld ( $\Delta p$  - correctie) hebben een verwaarloosbare invloed op de responsie.

In tegenstelling tot het experiment levert het model geen inverse responsie op.

Fig. 4.71. IMPULS RESPONSE  $t_s$ ; PULS IN ROOSTER SNEL HEID.



H O O F D S T U K 5

REGELING VAN DE SECUNDAIRE LUCHTTEMPERATUUR

Voor de regeling van  $T_s$  komen de volgende corrigerende grootheden in aanmerking:

1. Totale hoeveelheid lucht door compartiment I en II ( $\Delta P$ ).
2. Roostersnelheid ( $V_R$ )
3. Scheidingsvlak ( $S$ )
4. Verhouding van de hoeveelheid lucht door compartiment I en II ( $L_I/L_{II}$ )

Op grond van de kleine statische overdracht bij een verandering van  $L_I/L_{II}$  (fig. 3.4.3) rond het werkpunt  $L_I/L_{II}=3/2$ , komt  $L_I/L_{II}$  niet in aanmerking om  $T_s$  te regelen. In fig. 5.1 zijn de overblijvende mogelijkheden met overdrachtsfuncties in blokdiagram weergegeven.

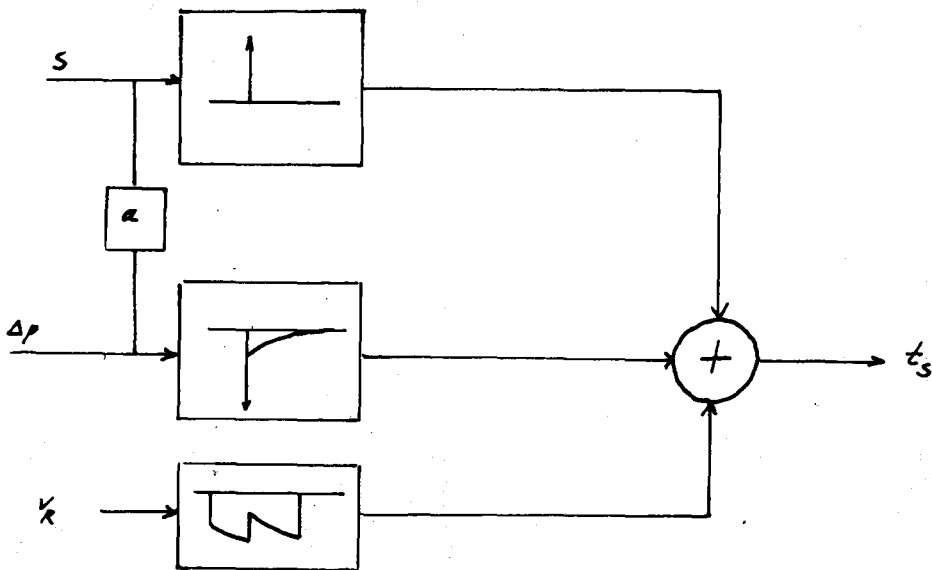


fig. 5.1 Overdrachtsfuncties.

Het blijkt dus dat  $\Delta p$  alleen wel grote invloed heeft op  $t_s$ , maar vanwege de correctie  $a$  (zie par. 4.6.1) wordt dit effect grotendeels opgeheven. Gemeten is zelfs een inverse responsie.  $v_R$  heeft met gebruikmaking van formule 4.7.1 en 4.7.2 een grote invloed op  $t_s$ . Een punt van discussie is nog of een gelineariseerde uitdrukking geen betere benadering is. In dat geval geeft de formule een inverse responsie, terwijl ook een inverse responsie is gemeten.

Het blijkt dus dat  $T_s$  het best met de plaats ( $S$ ) van het scheidingsvlak geregeld kan worden. Dit betekent dat men over een variabele luchthoeveelheid middelt om  $T_s$  te verkrijgen. Dus moet de totale hoeveelheid lucht naar de ovenkop instelbaar gemaakt worden. Dit zou kunnen door een klep naar buiten met ventilator en ontstoffingscyclus in de leiding boven de ovenkop aan te brengen. (zie fig. 5.2).

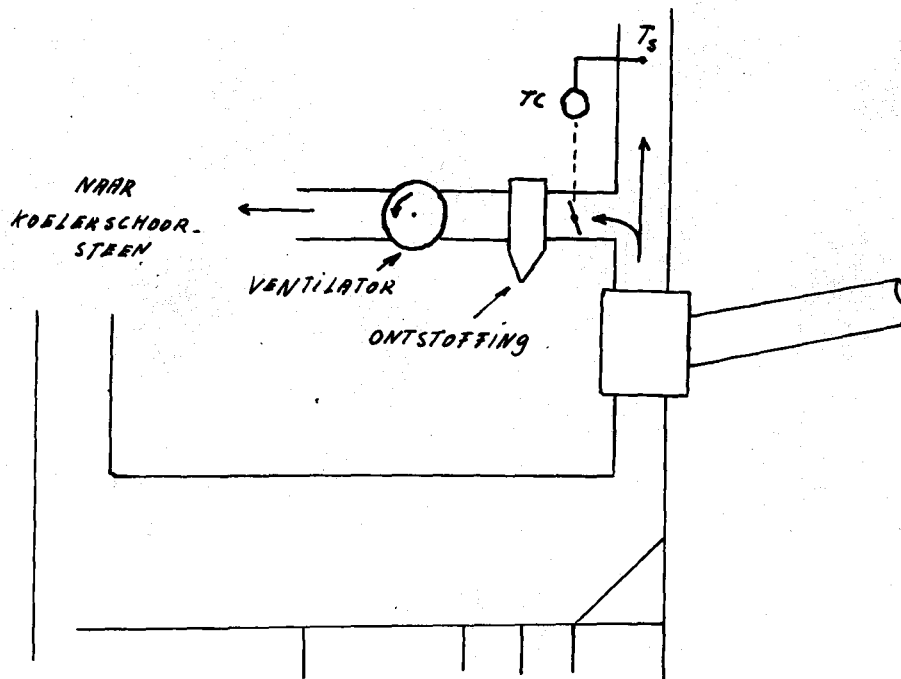


fig. 5.2 Regeling secundaire luchttemperatuur.

Variatie in de secundaire luchthoeveelheid zal de overige regelingen beïnvloeden en het is de vraag of deze nog zullen voldoen. Het antwoord is zeer waarschijnlijk ja. Veranderingen in de hoeveelheid recirculatielucht worden ook opgevangen. Verondersteld is hierbij dat de oven constante hoeveelheid lucht vraagt. Eventueel is het mogelijk de druk in de ovenkop te regelen m.b.v. de koelluchtventilator.

Wil men in de voorgestelde regeling de mogelijkheid hebben  $T_s$  zowel naar positieve als negatieve kant te regelen, dan moet het scheidingsvlak naar de koeluitgang worden verlegd, met het nadeel dat de ingestelde waarde van  $T_s$  lager wordt. Dit kan opgeheven worden door de recirculatie in te schakelen, met grotere bedhoogte te werken en met meer lucht te koelen ter voorkoming van verbranding van de roosterplaten. Verondersteld hierbij is dat de recirculatieventilator voldoende capaciteit en opvoerhoogte heeft.

In dit onderzoek is niet duidelijk geworden waarom de druk in de schoorsteen m.b.v. de tubixventilator en de druk in de ovenkop m.b.v. de klep in de schoorsteen wordt geregeld. Het zou fundamenteel mogelijk moeten zijn dit om te draaien, waardoor de voorgestelde regeling ook beter zou werken.

HOOFDSTUK 6

APPENDIX

6.1 Het elektrisch analogon van een bol

De temperatuurverdeling in een bol met homogene materiaaleigenschappen wordt door de volgende diff. vergelijking beschreven:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$r$  = radiële afstand

$$a = \frac{\lambda}{K \rho c_K}$$

We zullen nu bewijzen dat de spanningen over de condensatoren in het in fig. 6.1.1 weergegeven netwerk aan bovenstaande vergelijking voldoen wanneer bij geschikte keuze van de weerstanden en condensatoren  $\Delta$  naar 0 gaat.

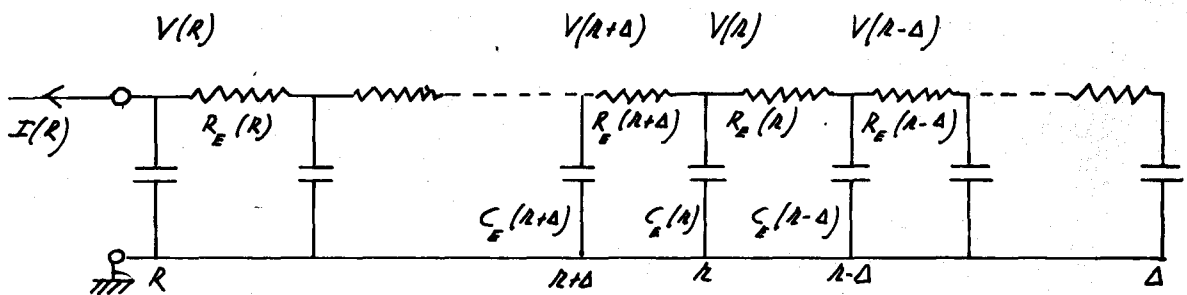


fig. 6.1.1 Elektrisch model van een bol.

Op het knooppunt A geldt:

$$I(r-\Delta) - I(r) = C_E(r) \frac{\partial V(r)}{\partial t} \quad (6.1.1)$$

δf:

$$\left[ V(r-\Delta) - V(r) \right] \cdot \frac{1}{R_E(r)} - \left[ V(r) - V(r+\Delta) \right] \cdot \frac{1}{R_E(r+\Delta)} = C_E(r) \frac{\partial V(r)}{\partial t} \quad (6.1.2)$$

De grootte van de elektrische weerstand wordt gelijk genomen aan de warmtegeleidingsweerstand van een bolschil. De grootte van de elektrische capaciteit komt overeen met de warmtecapaciteit van een bolschil. Dus:

$$R_E(r) = \frac{1}{4\pi\lambda_K} \left( \frac{1}{r-\Delta} - \frac{1}{r} \right) = \frac{1}{4\pi\lambda_K} \cdot \frac{\Delta}{r(r-\Delta)} \quad (6.1.3)$$

$$R_E(r+\Delta) = \frac{1}{4\pi\lambda_K} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+\Delta} \right) = \frac{1}{4\pi\lambda_K} \cdot \frac{\Delta}{r(r+\Delta)} \quad (6.1.4)$$

$$C_E(r) = \frac{4\pi\rho_K c_K}{3} \left[ r^3 - (r-\Delta)^3 \right] \quad (6.1.5)$$

Substitutie in vergelijking 6.1.2 geeft:

$$\begin{aligned} & \left[ V(r-\Delta) - V(r) \right] \cdot 4\pi\lambda_K \cdot \frac{r(r-\Delta)}{\Delta} - \left[ V(r) - V(r+\Delta) \right] \cdot 4\pi\lambda_K \cdot \frac{r(r+\Delta)}{\Delta} = \\ & \frac{4\pi\rho_K c_K}{3} \left[ r^3 - (r-\Delta)^3 \right] \frac{\partial V(r)}{\partial t} \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

$$\frac{\left[ V(r+\Delta) - V(r) \right]}{\Delta} - \frac{\left[ V(r) - V(r-\Delta) \right]}{\Delta} \cdot \frac{r-\Delta}{r+\Delta} = \frac{1}{a^2} \frac{1}{3} \frac{\left[ r^3 - (r-\Delta)^3 \right]}{r(r+\Delta)} \cdot \frac{\partial V(r)}{\partial t} \quad (6.1.7)$$

Wanneer  $\Delta \ll r$  geldt bij benadering:

$$\frac{r-\Delta}{r+\Delta} = 1 - \frac{2\Delta}{r} \quad (6.1.8)$$

$$r^3 - (r-\Delta)^3 = 3\Delta(r^2 - r\Delta) \quad (6.1.9)$$

Dit substitueren we in vergelijking 6.1.7:

$$\frac{\left[ V(r+\Delta) - V(r) \right]}{\Delta^2} + \frac{\left[ V(r) - V(r-\Delta) \right]}{\Delta^2} \cdot \left( 1 - \frac{2\Delta}{r} \right) = \frac{1}{a} \frac{(r^2 - r\Delta)}{r(r+\Delta)} \cdot \frac{\partial V(r)}{\partial t} \quad (6.1.10)$$

$$\frac{V(r+\Delta) - 2V(r) + V(r-\Delta)}{\Delta^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{V(r) - V(r-\Delta)}{\Delta} = \frac{1}{a} \frac{r-\Delta}{r+\Delta} \frac{\partial V(r)}{\partial t} \quad (6.1.11)$$

Nemen we van deze laatste betrekking de limiet voor  $\Delta$  gaat naar nul, dan is het resultaat:

$$\frac{\partial^2 V(r)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V(r)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial V(r)}{\partial t} \quad (6.1.12)$$

Deze vergelijking is analoog aan de warmtegeleidingsvergelijking. Wanneer nu een bol in een aantal schillen wordt verdeeld en we bouwen een elektrisch netwerk met evenveel RC-sekties als schillen, dan zullen de uitkomsten bij benadering overeenkomen met de oplossing van de warmtegeleidingsvergelijking, mits de weerstanden en condensatoren zijn gekozen op de

eerder aangegeven manier. We zullen nu nagaan in hoeverre het model van een bol, dat bestaat uit vier RC-sekties betrouwbare resultaten geeft. Daartoe wordt een bepaald warmtegeleidingsprobleem zowel met het model als langs analytische weg opgelost. Het probleem luidt als volgt:

- een klinkerbolletje, diameter 8mm, heeft een homogene temperatuur van  $1200^{\circ}\text{C}$ . Op het tijdstip  $t=0$  wordt dit bolletje in een luchtstroom geplaatst met een constante temperatuur van  $20^{\circ}\text{C}$ . Gevraagd wordt de oppervlaktetemperatuur als functie van de tijd. In wiskundige taal krijgen we de volgende formulering: Gegeven de warmtegeleidingsvergelijking met rand- en beginwaarde:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (6.1.13)$$

$$\lambda_K \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_R = -\alpha [T(R) - 20] \quad (6.1.14)$$

$$T(t=0) = 1200^{\circ}\text{C} \quad 0 < r < R \quad (6.1.15)$$

gevraagd:  $T(R, t)$

In fig. 6.1.2 is het gebruikte model weergegeven.

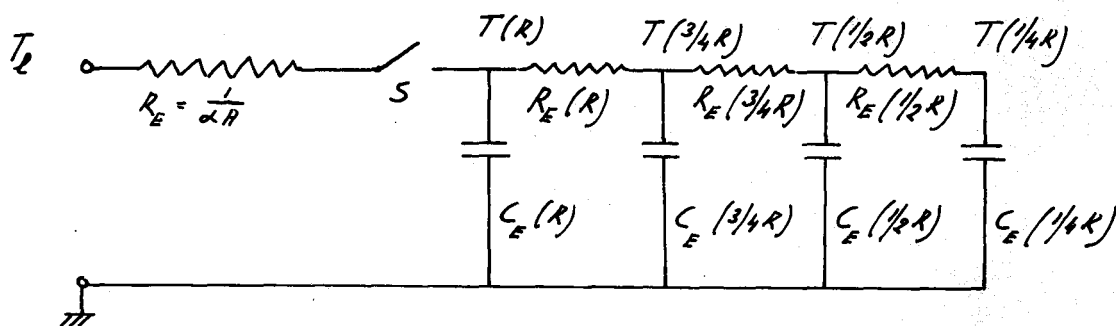


fig. 6.1.2 4-schillenmodel van een bol.

De condensatoren worden bij open schakelaar S tot een bepaalde spanning opgeladen. Op het tijdstip  $t=0$  wordt S gesloten en zal er een stroom gaan lopen. De spanning  $T(R)$  wordt op een X-Y plotter geregistreerd. Wanneer dit spanningsverloop wordt vergeleken met de langs analytische weg verkregen oplossing [9] dan blijkt er geen merkbaar verschil op te treden, zodat we dus kunnen concluderen dat het model betrouwbaar is.

Daar  $Q = Nq$  (zie par. 3.2.2) en alle bolletjes in het pakketje identiek zijn, wordt het elektrisch analogon van de relatie  $Q = Q(T_{K0}, t)$  (zie fig. 3.2.2.6), gegeven door dat van één bol met  $N$  maal zo grote capaci-



teiten en N maal zo kleine weerstanden.(fig. 3.2.2.3).

### 6.2 Invloed van de warmtegeleiding op de afkoeling van een bol.

We beschouwen het volgende probleem. Een klinkerbolletje met homogene temperatuur wordt op het tijdstip  $t=0$  in een luchtstroom met constante temperatuur geplaatst. Gevraagd wordt de oppervlakte-temperatuur als functie van de tijd. Hiertoe moet men de volgende diff. vergelijking oplossen met gegeven rand- en beginvoorwaarden [9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad a = \frac{\lambda_K}{\rho_K c_K} \quad (6.2.1)$$

$$\lambda_K \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_R = -\alpha T_K(R) \quad (6.2.2)$$

$$T(t=0) = T_0 \quad 0 < r < R \quad (6.2.3)$$

$$\text{Stel } T(r,t) = f(t) \cdot g(r) \quad (6.2.4)$$

Substitutie in (1) en (2) geeft:

$$\frac{f'(t)}{f(t)} = a \left( \frac{g''(r)}{g(r)} + \frac{2}{r} \frac{g'(r)}{g(r)} \right) \quad (6.2.5)$$

$$g'(R) = -h g(R), \quad h = \alpha / \lambda_K \quad (6.2.6)$$

Wanneer K een konstante is dan volgt uit 6.2.5:

$$f'(t) = -K f(t) \quad (6.2.7)$$

$$g''(r) + \frac{2}{r} g'(r) + \frac{K}{a} g(r) = 0 \quad (6.2.8)$$

Substitueer in 6.2.7:  $g(r) = r^{-\frac{1}{2}} U(r)$

$$U''(r) + \frac{1}{r} U'(r) + \left( \frac{K}{a} - \frac{1}{4r^2} \right) U(r) = 0 \quad (6.2.9)$$

De oplossing van 6.2.9 is in Besselfuncties van fraktionele orde te schrijven.

$$U(r) = A J_{\frac{1}{2}} \left( \sqrt{\frac{K}{a}} r \right) + B J_{-\frac{1}{2}} \left( \sqrt{\frac{K}{a}} r \right) \quad (6.2.10)$$

waarin:

$$J_{\frac{1}{2}} \left( \sqrt{\frac{K}{a}} r \right) = \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{a}} r} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \sqrt{\frac{K}{a}} r \quad (6.2.11)$$

$$J_{-\frac{1}{2}} \left( \sqrt{\frac{K}{a}} r \right) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{a}} r} \right\}^{\frac{1}{2}} \cos \sqrt{\frac{K}{a}} r \quad (6.2.12)$$

Substitutie van 6.2.11 en 6.2.12 in 6.2.10 geeft:

$$U(r) = F \left( \frac{1}{pr} \right)^{\frac{1}{2}} \sin pr + G \left( \frac{1}{pr} \right)^{\frac{1}{2}} \cos pr, \quad p = \frac{K'}{a} \quad (6.2.13)$$

dus:

$$g(r) = r^{-\frac{1}{2}} U(r) = F \frac{\sin pr}{pr} + G \frac{\cos pr}{pr} \quad (6.2.14)$$

Aangezien  $g(r)$  even is in  $r$  moeten gelden  $G = 0$ .

Substitutie van de randvoorwaarde  $g'(R) = -hg(R)$  in 6.2.14 geeft de volgende vergelijking:

$$pR \cos(pR) = (1-hR) \sin pR \quad (6.2.15)$$

Deze vergelijking heeft oneindig veel wortels  $V_i = p_i R$ .

Aangezien de oplossing van 6.2.7 luidt:

$$f(t) = \exp(-Kt), \quad (6.2.16)$$

geldt voor een bepaalde waarde van  $V_i$ :

$$T(r,t) = F_i \frac{\sin V_i \frac{r}{R}}{V_i \frac{r}{R}} \exp \left( -V_i^2 \frac{at}{R^2} \right) \quad (6.2.17)$$

De algemene oplossing is dus:

$$T(r,t) = \sum_{i=1}^{\infty} F_i \frac{\sin V_i \frac{r}{R}}{V_i \frac{r}{R}} \exp \left( V_i^2 \frac{at}{R^2} \right) \quad (6.2.18)$$

De waarde van  $F_i$  vinden we uit de beginvoorwaarde 6.2.3

$$(t=0, r) = T_0 = \sum_{i=1}^{\infty} F_i \frac{\sin V_i \frac{r}{R}}{V_i \frac{r}{R}} \quad (6.2.19)$$

$A_i$  zijn de coëfficiënten van de Fourierreeks 6.2.19 en te vinden uit:

$$F_i = T_0 \cdot 2 \frac{\sin V_i - V_i \cos V_i}{V_i - \sin V_i \cos V_i} \quad (6.2.20)$$

zodat we krijgen:

$$\frac{T(r,t)}{T_0} = \sum_{i=1}^{\infty} 2 \cdot \frac{\sin V_i - V_i \cos V_i}{V_i - \sin V_i \cos V_i} \cdot \frac{\sin V_i \frac{r}{R}}{V_i \frac{r}{R}} \cdot \exp \left( -V_i^2 \frac{at}{R^2} \right) \quad (6.2.21)$$

Uit 6.2.21 volgt dat voor  $r=R$  geldt:

$$\frac{T(R,t)}{T_0} = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \exp \left( -V_i^2 \frac{at}{R^2} \right) \quad (6.2.22)$$

$$\text{met } B_i = 2 \frac{\sin V_i - V_i \cos V_i}{V_i - \sin V_i \cos V_i} \cdot \frac{\sin V_i}{V_i} \quad (6.2.23)$$

De vraag is nu onder welke voorwaarden is 6.2.22 te benaderen door:

$$\frac{T(R,t)}{T_0} = B_1 \exp(-t/\beta_1), \quad \beta_1 = \frac{R^2}{\alpha V_1^2} \quad (6.2.24)$$

Voor een klinkerbol met een diameter van 8mm en bij een  $\alpha$  van 187,5 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>c geldt hR = 0,5. De eerste vier wortels van vergelijking 6.2.15 zijn in dit geval:  $V_1 = 1,166$ ,  $V_2 = 4,604$ ,  $V_3 = 7,790$  en  $V_4 = 10,950$  (zie tabel 6.2.1). Berekening van de eerste vier termen van (19) geeft dan:

$$\frac{T(R,t)}{T_0} = 0,91 \exp(-t/23,6) + 0,05 \exp(-t/1,51) + 0,02 \exp(-t/0,523) + 0,01 \exp(-t/0,267) + \dots \quad (6.2.25)$$

Aangezien geldt:  $B_{i+1} < B_i$  en  $\beta_{i+1} < \beta_i$  mogen we uit (6.2.25) concluderen dat de eerste term ( $B_1, \beta_1$ ) een dominerende positie inneemt, zodat bij benadering geldt:

$$\frac{T(R,t)}{T_0} = 0,91 \exp(-t/23,6) \quad (6.2.26)$$

hR	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
0	0,000	4,493	7,725	10,904
0,001	0,055	4,494	7,725	10,904
0,002	0,077	4,494	7,725	10,904
0,005	0,122	4,495	7,726	10,905
0,01	0,173	4,496	7,727	10,905
0,02	0,242	4,498	7,728	10,906
0,05	0,385	4,504	7,732	10,908
0,1	0,542	4,516	7,739	10,913
0,2	0,759	4,538	7,761	10,923
0,5	1,166	4,604	7,790	10,950
1,0	$\pi/2$	$3\pi/2$	$5\pi/2$	$7\pi/2$
2,0	2,030	4,913	7,979	11,085
5,0	2,569	5,354	8,303	11,335
10	2,836	5,717	8,659	11,658
20	2,986	5,978	8,983	12,003
50	3,079	6,158	9,239	12,320

Tabel 6.2.1 Wortels van de vgl.  $V \cos V = (1-hR) \sin V$

Wanneer de diameter 48mm en  $\alpha = 0,06$  kcal/m<sup>2</sup>s<sup>0</sup>C dan is hR = 1,0.

In dit geval zijn de eerste vier termen van 6.2.22:

$$\frac{T(R,t)}{T_0} = 0,81 \exp(-t/12,98) + 0,09 \exp(-t/1,44) + 0,0324 \exp(-t/0,52) + 0,0165 \exp(-t/0,265) + \dots \quad (6.2.27)$$

We zien dus dat in dit geval de benadering van  $T(R,t)$  door de eerste term slechter is dan bij het vorige geval. Het blijkt nu in het algemeen dat naarmate  $hR$  groter wordt, de eerste term van 6.2.22 een steeds minder dominerende rol gaat spelen. De gegevens waarmee gewerkt wordt zijn:  $\alpha = 0,02$  kcal/m<sup>2</sup> s<sup>0</sup>C, gemiddelde diameter van de klinkerlaag 27mm, zodat  $hR = 0,65$ . De constanten in de eerste vier termen van  $T(R,t)$  zullen nu inliggen tussen die bij  $hR$  is 0,1 en 1,0. Bekijken we nu het elektrisch analogon voor een klinkerpakketje (zie fig. 6.2.2) dan zien we dat in serie met de warmteovergangsweerstand  $1/N\alpha A$  de weerstand  $1/L_i c_1$  staat. Onder omstandigheden zoals die bij de koeler gelden, blijkt dat  $1/L_i c_1$  ongeveer drie maal zo groot is als  $1/N\alpha A$ , hetgeen een gunstige invloed heeft op de benadering.

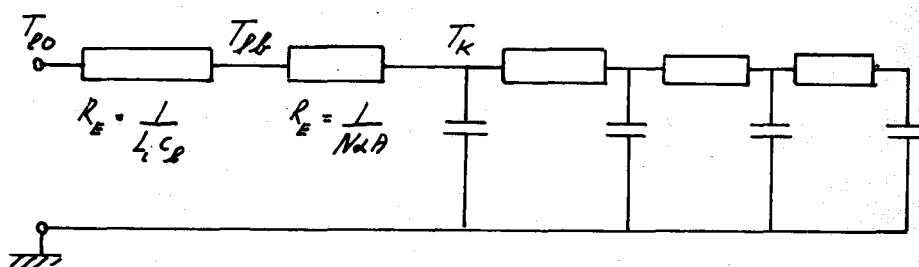


fig. 6.2.2 Elektrisch analogon klinkerpakketje.

Uit voorgaande beschouwing concluderen we dat onder de omstandigheden, zoals die bij de koeler optreden en voor niet te grote klinkerbollen de oppervlaktetemperatuur bij benadering door een exponentiële functie is voor te stellen. We zullen thans nog bewijzen dat deze exponentiële functie gelijk is aan degene die men krijgt wanneer de warmtegeleiding in de bol wordt verwaarloosd. Uit vergelijking 6.2.15 en tabel 6.2.1 volgt voor kleine waarden van  $hR$ :

$$V \cos V = (1-hR) \sin V \tag{6.2.28}$$

$$V(1-\frac{1}{2}V^2 + \frac{1}{6}V^4 \dots) = (1-hR)(V-\frac{1}{6}V^3 + \dots)$$

$$(1-\frac{1}{2}V^2) \cong (1-hR)(1-\frac{1}{6}V^2)$$

$$(1-hR) = \frac{1-\frac{1}{2}V^2}{1-\frac{1}{6}V^2} \cong 1-\frac{1}{3}V^2$$

$$\text{dus: } V^2 = 3hR \tag{6.2.29}$$

$$\text{Uit 6.2.24 volgt: } \beta = \frac{R^2}{aV^2} \tag{6.2.30}$$

$$\text{Substitutie van (24) geeft: } \beta = \frac{R^2}{a3hR} = \frac{\lambda_{KK} c_K R}{3\alpha} \tag{6.2.31}$$

Eveneens kan men bewijzen dat voor kleine  $hR$  de volgens vergelijking 6.2.23 gedefinieerde  $B$  naar  $\infty$  nadert. Voor kleine  $hR$  geldt dus:

$$T(R,t) = T_0 \exp(-t \frac{3\alpha}{\rho_K c_K R}) \quad (6.2.32)$$

Dit is tevens de oplossing van de differentiaalvergelijking die de temperatuur van een bol beschrijft zonder warmtegeleiding:

$$V \rho_K c_K \frac{dT}{dt} = -\alpha AT \quad (6.2.33)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$A = 4 \pi R^2$$

### 6.3 Simulatievergelijkingen met inachtnaam van het klinkerverlies door het rooster

In dit geval komt in vergelijking (3.3.1.5) een extra term voor het warmteverlies t.g.v. het verlies aan klinker.

$$Q = \frac{d N c T_K}{dt} + D c_K T_K \Delta x = N c \frac{dT_K}{dt} + c T_K \frac{dN}{dt} + D c_K T_K \Delta x \quad (6.3.1)$$

Aangezien  $c \frac{dN}{dt} = -D \Delta x$  volgt uit 6.3.2:

$$Q = N c \frac{dT_K}{dt} \quad (6.3.2)$$

6.3.3 is identiek aan 3.3.15

### 6.4 Vergelijkingen voor een pakketje met infinitesimale dikte.

Wanneer  $L_i$  de hoeveelheid lucht per meter in de bewegingsrichting is en  $N$  het aantal klinkerbolletjes per meter, dan volgt uit 3.3.17 en 3.3.1.12 voor een pakketje met dikte  $dx$ :

$$N dx c \left( \frac{1}{L_i dx c_1} + \frac{1}{N dx \alpha A} \right) \frac{dT_K}{dt} = T_{10} - T_K \quad (6.4.1)$$

$$T_{1b} = T_K + \frac{1}{\frac{L_i dx c_1}{N dx \alpha A} + 1} \cdot (T_{10} - T_K) \quad (6.4.2)$$

We kunnen deze vergelijkingen op de volgende manier schrijven:

$$\left( \frac{Nc}{L_i c_1} + \frac{c}{\alpha A} \right) \frac{dT_K}{dt} = T_{10} - T_K \quad (6.4.3)$$

$$T_{1b} = T_K + \frac{1}{\frac{L_i c_1}{N \alpha A} + 1} (T_{10} - T_K) \quad (6.4.4)$$

Deze vergelijkingen zijn identiek aan degenen die gebruikt zijn voor een

laag met een eindige dikte.

### 6.5 Responsie van $t_s$ op een verandering van de hoeveelheid klinker

Gegeven is:

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^M L_i T_{lb,i}}{\sum_{i=1}^M L_i} \quad (6.5.1)$$

$T_s$  is dus een funktie van  $T_{lb,i}$ ,  $L_i$  en  $M$ , waarvan de variaties worden aangeduid met  $t_{lb,i}$ ,  $l_i$  en  $\Delta M$ .

$$T_s = f(T_{lb,i}, L_i, M) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6.5.2)$$

Om de invloed van deze variaties op  $T_s$  te vinden wordt  $f$  in een Taylorreeks ontwikkeld waarvan alleen de eerste orde termen worden beschouwd.

$$t_s = \sum_{i=1}^M \frac{\partial f}{\partial T_{lb,i}} t_{lb,i} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial f}{\partial L_i} l_i + \frac{\partial f}{\partial M} \Delta M \quad (6.5.3)$$

De responsie op een pulsvormige verandering in een pakketje bij constante  $\Delta p$  en  $M$  kan rechtstreeks uit 6.5.3 afgeleid worden, waarbij de sommatie zich slechts over één pakketje zal uitstrekken. Wel zal omdat het pakketje voortloopt de index  $m$  steeds verspringen en evenredig met de tijd toenemen, dus:

$$\begin{aligned} t_s \left( \frac{m}{M} \tau \right) &= \frac{\partial f}{\partial T_{lb,m}} t_{lb,m} + \frac{\partial f}{\partial L_m} l_m \\ &= \frac{L_m}{\sum_{i=1}^M L_i} t_{lb,m} + \left( \frac{T_{lb,m} \sum_{i=1}^M L_i - \sum_{i=1}^M (L_i T_{lb,i})}{\left( \sum_{i=1}^M L_i \right)^2} \right) l_m \\ &= \frac{t_{lb,m}}{M} + (T_{lb,m} - T_s(t=0)) \frac{l_m}{L} \end{aligned} \quad (6.5.4)$$

Deze laatste uitdrukking is identiek aan 4.3.4 en 4.3.5.

### 6.6 Het lege pakketje

Aan de hand van het model is het verband bepaald tussen  $T_{lb}$  en  $K_0$ , waarbij  $K_0$  ligt tussen 52 en 60 ton/uur. Het blijkt dat er een lineaire relatie bestaat tussen  $T_{lb}$  en  $K_0$  (fig. 6.6.1).

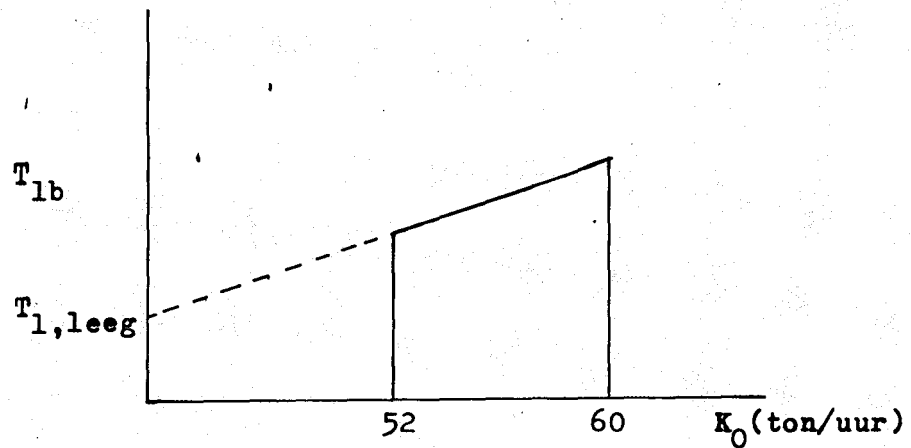


fig. 6.6.1.

We definiëren nu  $T_{1,leeg}$  door de waarde te nemen van  $T_{1b}$  voor  $K_0$  is nul, indien we de kromme tussen 52 en 60 ton/Uur extrapoleren. In fig. 6.6.2 is de op die manier verkregen afkoelingskurve van het lege pakketje weer gegeven.

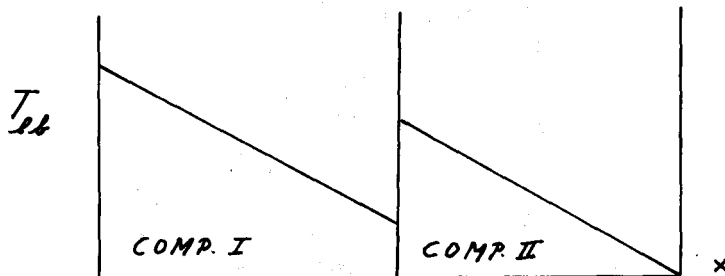
6.7 Responsies van de uitlaattemperatuur van twee compartimenten van de klinkerkoeler

Invloed van de roostersnelheid.

We nemen aan dat op  $t=0$  het rooster plotseling alle pakketjes één plaats naar rechts verschuift; de roostersnelheid verandert dus impulsvormig. Onmiddellijk na de storing is het eerste pakketje op de band "leeg". Alvorens wordt afgeleid een formule die aangeeft de verandering van de secundaire luchttemperatuur, zal eerst nagegaan worden wat er precies plaatsvindt. We maken onderscheid tussen het geval dat het lege pakketje in compartiment I zit en het geval dat het compartiment II het lege pakketje bevat.

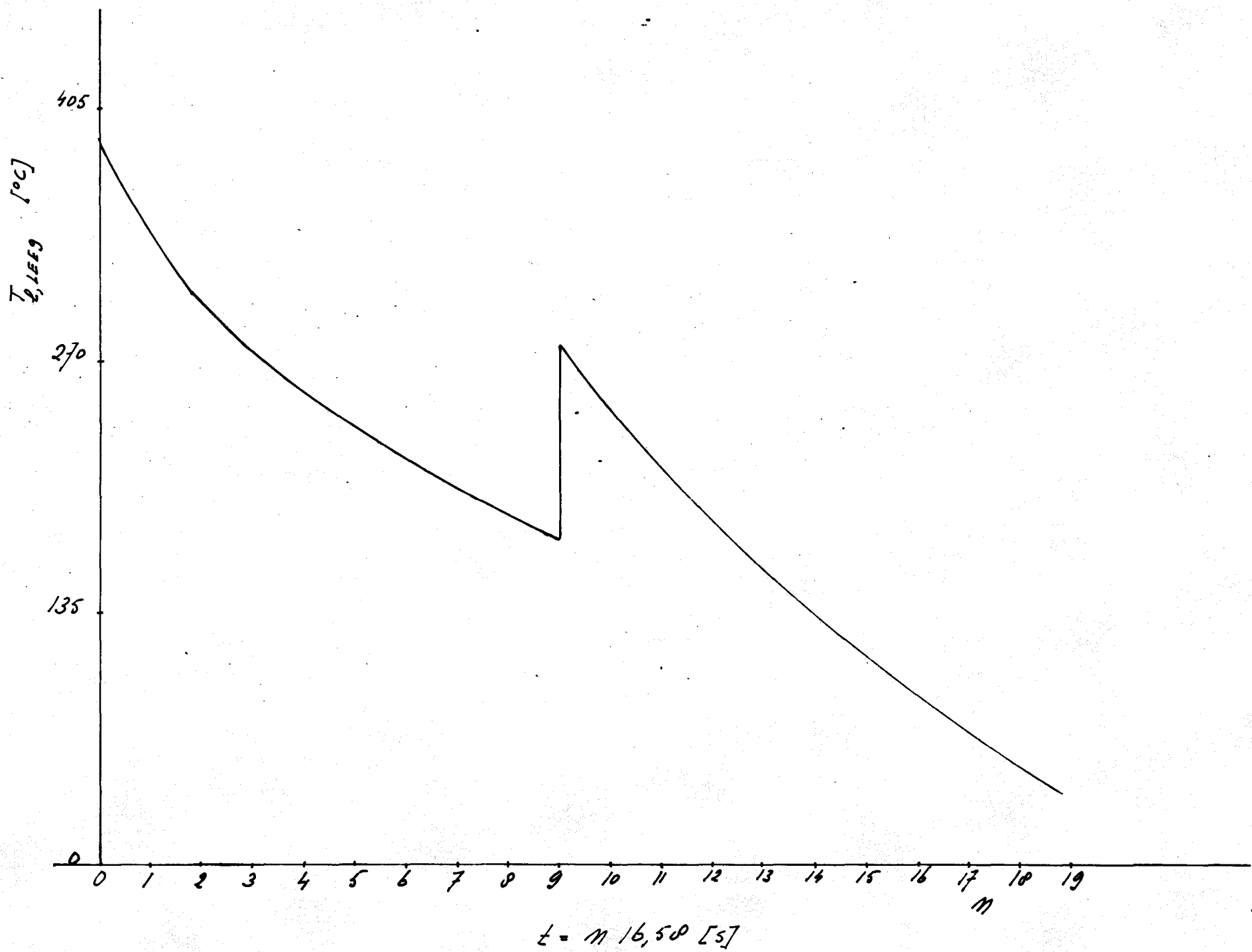
a) Lege pakketje in compartiment I.

Voor  $t < 0$  ziet het luchttemperatuurprofiel in compartiment I en II er als volgt uit:

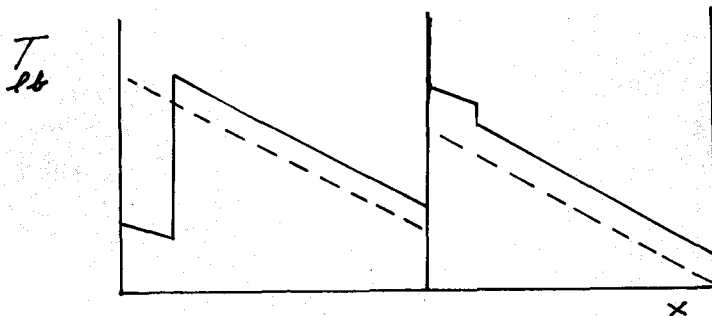


Voor  $t > 0$  ziet de situatie er als volgt uit:

Fig. 6.6.2 AFKÖLLINGSKURVE "LEGE" PAKKETJE

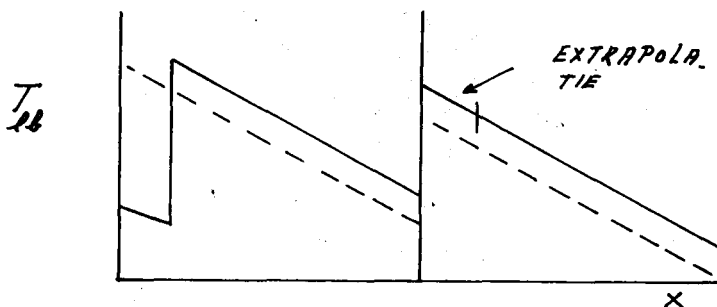




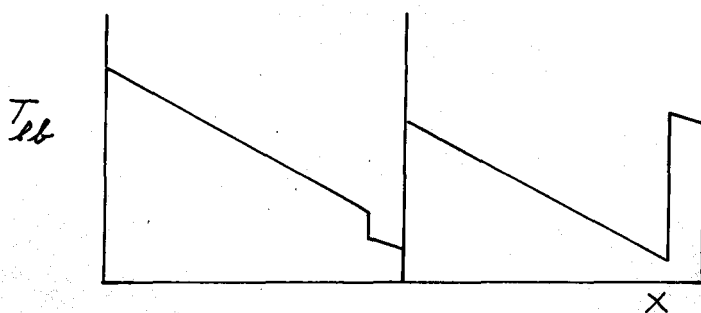


Alle pakketjes in compartiment I zijn één plaats naar rechts verschoven; het meest linkse pakketje is het lege pakketje. Het laatste pakketje van compartiment I komt in compartiment II terecht, gepaardgaande met een verandering van de doorgestroomde hoeveelheid lucht. Alle pakketjes van compartiment II zijn ook één plaats naar rechts verschoven, waarbij het laatste pakketje van compartiment II verdwijnt.

We nemen nu aan dat de pakketjes die compartiment II doorlopen en komen uit compartiment I, in compartiment II een afkoelingskurve hebben die gelijk is aan de één plaats naar rechts verschoven oude afkoelingskurve plus een afkoelingskurve voor het beginstuk van compartiment II, die men verkrijgt door extrapolatie van de oude afkoelingskurve. Voor  $t > 0$  krijgen we dan:



Beschouw nu een willekeurig tijdstip na  $t=0$  waarop het lege pakketje zich ter plaatse  $m$  in compartiment I bevindt. Als we ons nu alle pakketjes waarvoor  $x > m$  in compartiment I één plaats teruggeschoven denken en het lege pakketje aan het eind van compartiment I plaatsen, treffen we in compartiment I de oude afkoelingskurve aan, met uitzondering van de laatste plaats. In compartiment II schuiven we eveneens alle pakketjes één plaats terug en plaatsen het eerste pakketje op de vrijgekomen laatste plaats. We krijgen dan in compartiment II weer de oude afkoelingskurve terug, behalve op de laatste plaats. Het temperatuurprofiel ziet er nu als volgt uit:



In dit geval is de secundaire luchttemperatuur:

$$T_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) = \sum_{i=1}^{Z-1} \frac{L_{i1}}{L+1} T_{1b,i} + \frac{L_{i1+1}}{L+1} T_{1,leeg} + \sum_{i=Z+1}^{M-1} \frac{L_{i2}}{L+1} T_{1b,i} + \frac{L_{i2}}{L+1} T_{1,E} \quad (6.7.1)$$

$T_{1,E}$  = uitlaattertemperatuur van pakketje (Z+1)

Z = aantal pakketjes in compartiment I

$$T_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) = \frac{L}{L+1} \left[ \sum_{i=1}^{Z-1} \frac{L_{i1}}{L} T_{1b,i} + \frac{L_{i1+1}}{L} T_{1,leeg} + \sum_{i=Z+1}^{M-1} \frac{L_{i2}}{L} T_{1b,i} + \frac{L_{i2}}{L} T_{1,E} \right] \\ \approx \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \left[ T_s(0) - \frac{1}{M_1} T_{1,Z} - \frac{1}{M_2} T_{1,M} + \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{L} \right) T_{1,leeg} + \frac{1}{M_2} T_{1,E} \right] \quad (6.7.2)$$

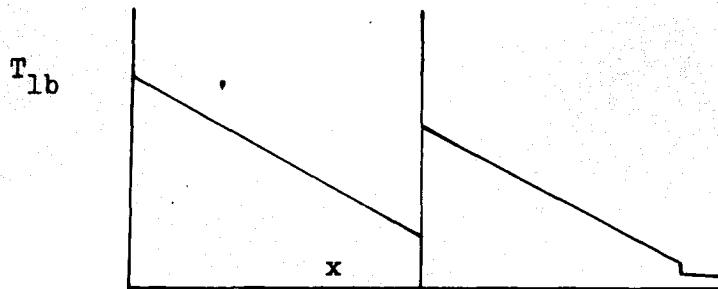
$$t_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) = - \frac{1}{L} T_s(0) + \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \left[ \frac{T_{1,leeg} - T_{1,Z}}{M_1} + \frac{T_{1,E} - T_{1,M}}{M_2} + \frac{1}{L} T_{1,leeg} \right] \\ = - \frac{1}{L} T_s(0) + \frac{T_{1,leeg} - T_{1,Z}}{M_1} + \frac{T_{1,E} - T_{1,M}}{M_2} + \frac{1}{L} \frac{T_{1,leeg} - T_{1,Z}}{M_1} \\ - \frac{1}{L} \frac{T_{1,E} - T_{1,M}}{M_2} \quad (6.7.3)$$

$$t_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) = \frac{T_{1,leeg} - T_{1,Z}}{M_1} + \frac{T_{1,E} - T_{1,M}}{M_2} - \frac{1}{L} \left[ T_s(0) - T_{1,leeg} \right] \\ + \frac{T_{1,leeg} - T_{1,Z}}{M_1} + \frac{T_{1,E} - T_{1,M}}{M_2} \quad (6.7.4)$$

b) Lege pakketje in compartiment II

Bekijken we de situatie in het geval dat het lege pakketje zich in compartiment II bevindt, dan constateren we dat achter het lege pakketje weer de oude afkoelingskurve geldt. Alle pakketjes vóór het lege pakketje koelen af volgens een kurve die gelijk is aan de oude afkoelingskurve in compartiment II, maar één plaats naar rechts verschoven. Schuiven we alle pakketjes die zich vóór het lege pakketje bevinden één plaats naar links en plaatsen we het lege pakketje aan het eind van compartiment II, dan treffen we in compartiment II de oude afkoelingskurve aan, met uitzondering van de laatste plaats, waar het lege pakketje zich bevindt.

De situatie ziet er als volgt uit:



$$\begin{aligned}
 T_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) &= \sum_{i=1}^Z \frac{L_{i1}}{L+1} T_{lb,i} + \sum_{i=Z+1}^{M-1} T_{lb,i} + \frac{L_{i2+1}}{L+1} T_{1,leeg} \\
 &= \frac{L}{L+1} \left[ \sum_{i=1}^Z \frac{L_{i1}}{L} T_{lb,i} + \sum_{i=Z+1}^{M-1} \frac{L_{i2}}{L} + \frac{L_{i2+1}}{L} T_{1,leeg} \right] \\
 &\approx \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \left[ T_s(0) - \frac{L_{i2}}{L} T_{1,M} + \frac{L_{i2} + 1}{L} T_{1,leeg} \right] \\
 &= \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \left[ T_s(0) - \frac{1}{M_2} T_{1,M} + \left( \frac{1}{M_2} + \frac{1}{L} \right) T_{1,leeg} \right] \quad (6.7.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_s \left( \frac{m}{M} \tau_2 \right) &= \frac{1}{L} T_s(0) + \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \left[ - \frac{1}{M_2} T_{1,M} + \frac{1}{M_2} T_{1,leeg} + \frac{1}{L} T_{1,leeg} \right] \\
 &= \frac{T_{1,leeg} - T_{1,M}}{M_2} - \frac{1}{L} \left[ T_s(0) - T_{1,leeg} + \frac{T_{1,leeg} - T_{1,M}}{M_2} \right] \quad (6.7.6)
 \end{aligned}$$

### 6.8 Luchtcorrectie bij responsie op de hoeveelheid materiaal (constante hoeveelheid lucht)

Voor kleine variaties in de bedhoogte van één pakketje geldt voor één compartiment met een constante totale luchthoeveelheid:

$$\text{pakketje met meer materiaal: } \frac{\Delta p}{\Delta P} = 2 \frac{l_1}{L_1} + \frac{h'}{H} \quad (6.8.1)$$

$$\text{willekeurig ander pakketje: } \frac{\Delta p}{\Delta P} = 2 \frac{l_2}{L_i} \quad (6.8.2)$$

$$l_1 + (M-1) l_2 = 0 \quad (6.8.3)$$

Uit deze formules volgt:

$$l_i = -\frac{1}{2} L_i \frac{h'}{H} \cdot \frac{M-1}{M} \quad (6.8.4)$$

We zullen bewijzen dat hetzelfde resultaat wordt verkregen door superpositie van de volgende gevallen:

1.  $\Delta P$  is constant; daarbij behoort een verandering van de doorgestroomde hoeveelheid lucht door het pakketje met meer materiaal van  $-1$ .
2. Verandering van de totale luchthoeveelheid ter grootte  $+1$

Indien  $\Delta P$  constant is, is de verandering van de lucht door het pakketje met meer materiaal:

$$l = -\frac{1}{2} L_i \frac{h'}{H} \quad (6.8.5)$$

Wanneer een correctie aangebracht wordt in de totale luchthoeveelheid in het compartiment van  $+\frac{1}{2} L_i \frac{h'}{H}$ , dan blijft de aangestroomde luchthoeveelheid constant. Per pakketje is de correctie  $+\frac{1}{2} \frac{L_i}{M} \cdot \frac{h'}{H}$ , zodat de resterende luchtverandering voor het nieuwe pakketje gelijk is aan:

$$l = -\frac{1}{2} L_i \frac{h'}{H} + \frac{1}{2} \frac{L_i}{M} \cdot \frac{h'}{H} = -\frac{1}{2} L_i \frac{h'}{H} \cdot \frac{M-1}{M} \quad (6.8.6)$$

Deze uitkomst is indentiek aan 6.8.4 zodat de hier gevolgde correctiemethode, althans wat de lucht betreft, tot de juiste oplossing leidt. Dezelfde correctieprocedure zal nu toegepast worden voor twee compartimenten echter zodanig dat de verhouding van de hoeveelheid lucht in compartiment I en II ongewijzigd blijft nl.  $3/2$ . Dit is als volgt te argumenteren:

1. De responsie in de secundaire luchttemperatuur op een stap in de totale luchthoeveelheid is opgenomen bij een luchtverhouding van  $3/2$ .
2. Uit het verband tussen de secundaire luchttemperatuur en de verhouding van de lucht in compartiment I en II blijkt dat kleine variaties in deze verhouding rond het punt  $3/2$  weinig invloed hebben op de secundaire luchttemperatuur.
3. Een stap in de totale luchthoeveelheid resulteert in een nagenoeg stapvormige verandering van de secundaire luchttemperatuur evenals dat het geval is bij een stap in het scheidingsvlak. Correctie d.m.v. een  $\Delta P$ -variatie zal in vergelijking met een correctie d.m.v. een scheidingsvlakverplaatsing geen nieuwe aspecten opleveren.

## S A M E N V A T T I N G

Het doel van het onderzoek is een regelstrategie te vinden voor de koeler van een cementoven, waarbij vooral aandacht aan de secundaire luchttemperatuur is besteed. Eerst worden een aantal metingen aan de koeler beschreven. Terwille van het onderzoek van het statisch en dynamisch verband tussen onafhankelijke en afhankelijke variabelen in de koeler, is een eenvoudige modelbeschouwing opgezet. Het model is m.b.v. de meetresultaten aangepast. Een aantal impulsresponsies, geldig voor kleine variaties, worden in Hst. 4 gegeven. In Hst. 5 wordt op de regelstrategie ingegaan.

## S U M M A R Y

The aim of this research is to find a possible control-strategy for the clinker cooler of a cement kiln, especially with regards to the temperature of the secondary air stream. Some measurements have been made on a full-scale plant, while the necessary information on the dynamic and static behaviour of the different variables were gathered from a model study. The models are adapted to fit the measurements. A possible control-strategy is given, based on the information furnished by the linear model for the dynamic behaviour.

L I T E R A T U U R

1. Beer, J.M.  
Chigier, N.A.  
Koopmans, G.  
Lee, K.B.      Measuring Instruments for the Study of  
Flames at IJmuiden. International Flame  
Research Foundation. IJmuiden, May 1965,  
Doc.nr. F72/a/9.
2. Coulson, J.M.  
Richardson, J.F.      Chemical Engineering, Volume II, Unit  
Operations
3. Gygi      Wärmetechnische Untersuchungen des Dreh-  
ofens zur Herstellung von Portlandzement-  
klinker.
4.      Cement Chemists and Works Managers Hand-  
book.
5. Kühl, H.      Zement-Chemie, Band II.
6. Safar, J.      De bepaling van de bedrijfsparameters voor  
klinkerkoelers. Stavivo 10(1964, blz. 364-  
366, 407-410.
7. Vries, D.A. de      Warmtetransport en -overdracht I, college-  
diktaat 1960, T.H.E.
8. Mommers, J.      Warmtebalans oven 7, ENCI 1961.
9. Gröber  
Erk  
Grigull      Wärmeübertragung.
10. Rademaker, O.      Responsies van de uitlaattemperatuur van  
een compartiment van de klinkerkoeler,  
1967, T.H.E., Interne Publikatie.
11. Kramers, H.      Fysische Transportverschijnselen, college-  
diktaat T.H.D.

SYMBOL EN LIJST

A	oppervlakte bol met diameter $d_m$ ( $m^2$ )
$A_p$	warmtewisselend oppervlak in pakketje ( $m^2$ )
B	constante
C	warmtecapaciteit pakketje ( $kcal/^\circ C$ )
$C_E$	elektrische capaciteit
D	klinkerverlies door het rooster ( $kg/sm$ )
$D_0$	klinkerverlies door het rooster voor $X=0$ ( $kg/sm$ )
E	maat voor de doelmatigheid van een afzuigpyrometer
F	constante
G	constante
$H_i$	hoogte klinkerbed op plaats i (m)
I	elektrische stroom (A)
K	hoeveelheid klinker op het rooster ( $kg/m$ )
$K_u$	K voor $X=14,4m$ ( $kg/m$ )
L	hoeveelheid lucht in compartiment I en II ( $Nm^3/min.$ )
$L_i$	hoeveelheid lucht door pakketje i ( $kg/s$ )
$L_I$	hoeveelheid lucht door compartiment I ( $Nm^3/min.$ )
$L_{II}$	hoeveelheid lucht door compartiment II ( $Nm^3/min.$ )
$L_{III}$	hoeveelheid lucht door compartiment III ( $Nm^3/min.$ )
$L_{IV}$	hoeveelheid lucht door compartiment IV ( $Nm^3/min.$ )
$L_R$	lengte rooster (m)
$L_s$	lengte sleepkettingruimte (m)
M	aantal pakketjes in compartiment I en II
$M_1$	$L/L_{i1}$
$M_2$	$L/L_{i2}$
N	aantal bollen in pakketje
$P_I$	luchtdruk onder het rooster in compartiment I (mm wk)
$P_{II}$	luchtdruk onder het rooster in compartiment II (mm wk)

$P_{III}$	luchtdruk onder het rooster in compartiment III (mm wk)
$P_{IV}$	luchtdruk onder het rooster in compartiment IV (mm wk)
$\Delta P$	drukverschil over het klinkerbed (mm wk)
$\Delta P_{II}$	drukverschil over het klinkerbed in compartiment II (mm wk)
$Q$	hoeveelheid overgedragen warmte van klinker naar lucht in een pakketje (kcal/s)
$R_E$	elektrische weerstand ( $\Omega$ )
$S$	plaats scheidingsvlak (m)
$S_t$	hoeveelheid ontwijkende klinkerstof (kg/ms)
$R$	straal bol (m)
$T$	temperatuur ( $^{\circ}C$ )
$T_G$	werkelijke temperatuur bij temperatuurmeting ( $^{\circ}C$ )
$T_l$	luchttemperatuur ( $^{\circ}C$ )
$T_{lb}$	luchttemperatuur boven het bed ( $^{\circ}C$ )
$T_{l,E}$	$T_{lb}$ voor pakketje (Z+1)
$T_{lO}$	luchttemperatuur onder het bed ( $^{\circ}C$ )
$T_{l,Z}$	$T_{lb}$ voor pakketje Z
$T_M$	gemeten temperatuur met afzuigpyrometer ( $^{\circ}C$ )
$T_O$	gemeten temperatuur met afzuigpyrometer zonder afzuiging ( $^{\circ}C$ )
$T_K$	klinkertemperatuur ( $^{\circ}C$ )
$T_{K(X=0)}$	klinkertemperatuur voor $X=0$ ( $^{\circ}C$ )
$T_{KO}$	klinkeroppervlaktetemperatuur ( $^{\circ}C$ )
$T_{K,u}$	klinkertemperatuur voor $X=14,4m$ ( $^{\circ}C$ )
$T_R$	toerental ventilator voor eerste twee compartimenten (toeren/min.)
$T_S$	secundaire luchttemperatuur ( $^{\circ}C$ )
$T_V$	toerental roosteraandrijving (toeren/min.)
$T_1$	temperatuur gemeten met IVO-pyrometer ( $^{\circ}C$ )
$T_2$	temperatuur gemeten met T.H.-pyrometer ( $^{\circ}C$ )
$V$	elektrische spanning (V)
$V_s$	klindersnelheid in sleepkettingruimte (m/s)



$V_R$	klinkersnelheid (m/s)
Z	aantal pakketjes in compartiment I
a	$\lambda_K / \rho_K c_K$ ( $m^2/s$ )
b	breedte rooster (m)
c	warmtecapaciteit bol ( $kcal/^\circ C$ )
$c_K$	soortelijke warmte klinker ( $kcal/kg^\circ C$ )
$c_l$	soortelijke warmte lucht ( $kcal/kg^\circ C$ )
$c_1$	constante
$d_i$	klinkerdiameter (mm)
$d_m$	gemiddelde klinkerdiameter (mm)
f	aantal kogels (verblijftijdsmeting) in bepaald tijdinterval
h	hoogte klinkerbed (cm)
$h'$	variatie in H
i	plaats pakketje, variabele (index)
k	variatie in K (kg/m)
$l, l_i$	variatie in $L_i$ (kg/s)
$l_1$	variatie in $L_{i1}$ (kg/s)
$l_2$	variatie in $L_{i2}$ (kg/s)
m	plaats pakketje
n	aantal kogels bij verblijftijdsmeting
$\Delta p$	variatie in $\Delta P$ (mm wk)
q	warmteoverdracht aan bol (kcal/s)
r	radiële afstand bol (m)
s	variatie in S (m)
t	tijd (s)
$t_K(x=0)$	variatie in $T_K(\theta)$ ( $^\circ C$ )

$t_s$	variatie in $T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$v_R$	variatie in $V_R$
$x$	lengterichting koeler (m)
$x_i$	gewichtsfractie klinker met diameter $d_i$ (kg)
$\Delta x$	breedte pakketje (cm)
$\alpha$	warmteoverdrachtscoëfficiënt ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{sec}$ )
$\beta$	tijdconstante (s)
$\rho$	dichtheid klinkerbed ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_K$	dichtheid klinker ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\lambda_K$	warmtegeleidingscoëfficiënt klinker ( $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
$\lambda_1$	warmtegeleidingscoëfficiënt lucht ( $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
$\tau$	gem. verblijftijd klinker in de koeler (min.)
$\tau_R$	gem. verblijftijd klinker op het rooster (min.)
$\tau_s$	gem. verblijftijd klinker in de sleepkettingruimte (min.)
$\tau_1$	gem. verblijftijd klinker in compartiment I (min.)
$\tau_2$	gem. verblijftijd klinker in compartiment II (min.)
$\Delta$	afstand bolschillen (m)
$\Delta$	verschil, variatie
$\sigma$	standaard-afwijking gem. verblijftijd (min.)