

CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 71/05057

Dossier: 3572G-2412

RAPPORT

Het warmte- en stromingstechnische
gedrag van een tunneloven voor grof-
keramische produkten

door

G. Wentink

en

Ir. J. Claus

Datum : december 1971

Bestemd voor: De Nederlandse Grofkeramische Industrie

Typ. ES

Inhoudsopgave.

	<u>blz.</u>
1. Samenvatting.	4
2. Inleiding.	5
3. De oven.	5
4. De metingen.	7
4.1 De warmte naar de drogerij.	7
4.1.1 De meting.	7
4.1.2 Nadere beschouwing van de meting.	8
4.1.3 Berekening van de uit de oven naar de drogerij gevoerde warmte.	8
4.2 De door het tussendek stromende lucht.	9
4.2.1 De metingen.	9
4.2.2 Nadere beschouwing van de metingen.	9
4.3 De door de roosters in de ovenwanden en het ovendak naar binnen stromende lucht.	9
4.4 De door het vloerrooster naar binnen stromende lucht.	10
4.5 De aan de oven toegevoerde koellucht.	10
4.6 De aan de oven toegevoerde verbrandingslucht.	11
4.7 De hoeveelheid aardgas.	11
4.8 De door de "weekend"-pijp naar binnen lekkende lucht.	12
4.9 De door de oven stromende hoeveelheid lucht en verbrandingsgas.	13
4.10 De luchtstroom van het tussendek naar de opwarmzône.	14
4.11 De bij de inrijopening naar binnen lekkende lucht.	14
4.12 Het schoorsteenverlies.	14
4.12.1 De meting.	14
4.12.2 Nadere beschouwing van de metingen.	15
4.13 De warmteverliezen van de ovenromp.	15
4.14 De temperaturen in de steenstapeling.	15
4.14.1 De meting.	15
4.14.2 Nadere beschouwing van de meting.	16
4.15 De temperaturen van de wagens.	22
4.15.1 De meting.	22
4.15.2 Nadere beschouwing van de meting.	23

	<u>blz.</u>
4.16 De gastemperatuur in de oven.	23
4.16.1 De meting.	23
4.16.2 Nadere beschouwing van de meting.	24
4.17 CO ₂ -metingen.	25
5. De warmtebalansen.	27
5.1 De berekening.	27
5.2 Nadere beschouwing van de warmtebalansen.	32
6. De stofbalansen.	35
7. Conclusies.	37
8. Literatuur.	38
Appendix.	39
Schema tunneloven.	fig.1
" "	" 2
De steenstapeling.	" 3
Thermokoppels in de steenstapeling.	" 4
Grafiek CO ₂ -perc. in de oven (A)	" 5
" " " " " " (B)	" 6
" CO ₂ -perc. in de schoorsteen (B)	" 7
Temperaturen in de steenstapeling	" 8
" in de meetsteen	" 9
Gastemperaturen in de oven	" 10
Wagentemperaturen	" 11
Warmtebalansen	fig.12 t/m 15
Stofbalans	fig.16
De door de oven stromende gashoeveelheid	" 17
CO ₂ -concentraties in de oven	" 18

1. Samenvatting.

Dit rapport bevat de resultaten van een uitgebreide meting aan een met gas gestookte tunneloven.

Van de tunneloven werd een warmte- en stofbalans opgesteld van een drietal bedrijfsvoeringen waardoor achtereenvolgens het effect kon worden vastgesteld van veranderingen in het brandersysteem en van de overgang op een machinale zetwijze. De warmtebalans vertoonde een voor deze metingen zeer acceptabele sluitpost (0,5% - 7,5%). De sluitpost van de stofbalansen (8,5% - 17,5%) was wat groter ten gevolge van het grote aantal instroom- en omloopkanalen in de oven.

Uit de metingen bleek, dat door de overgang op het nieuwe brandersysteem bij deze oven een besparing van 15% op het aardgasverbruik kon worden verkregen. Tevens bleek dat door de overgang van de handzetting naar de machinale zetwijze de produktie met 15% kon worden opgevoerd. Het nieuwe brandersysteem resulteerde niet in een grote temperatuuregelijkmatigheid. De temperatuursverschillen tussen de meetpunten waren vooral groot tijdens het opwarmen van de inzet.

2. Inleiding.

In samenwerking met de Nederlandse Grofkeramische industrie wordt door het C.T.I.-TNO een onderzoek verricht met het doel te komen tot de constructie van een steenoven waarin met Nederlandse klei een geautomatiseerd en gemechaniseerd bakproces kan worden verwezenlijkt.

Het onderzoek werd gestart met metingen waarmee het warmte- en stromingstechnisch gedrag van een moderne vlamoven werd vastgesteld [1]. In aansluiting hierop werd de warmtehuishouding van een enkele vlamovenkamer aan een nadere beschouwing onderworpen [2]. Dit gedeelte van het onderzoek wordt momenteel voortgezet met een berekening van de warmteoverdrachtscoëfficiënten in de vlamoven waardoor het uiteindelijk mogelijk zal worden om een rekenmodel van de vlamoven op te stellen.

Op de vergadering van de programmacommissie van 2 februari 1971 werd besloten om ook voor een tunneloven een dergelijk onderzoek uit te voeren. Overeengekomen werd de metingen te verrichten aan de tunneloven van de fa.G.Lust te Oosterhout.

Daar op deze oven een nieuw brandersysteem (Leisenberg) zou worden gemonteerd zou het mogelijk zijn de veranderingen in het proces tengevolge van de overgang op dit systeem vast te stellen.

Aangezien na de ombouw ook tot een andere zetwijze zou worden overgegaan, zou met metingen aan deze oven ook de invloed van de zetwijze kunnen worden vastgesteld.

In dit verslag zijn de resultaten van warmte- en stromingstechnische metingen samengevat. De kwaliteitsanalyses zijn gerapporteerd in het rapport: Beoordeling van de kwaliteit van het sinterproces in een tunneloven vanuit keramisch-technisch standpunt door J.H.v.d.Velden en A.H.de Vries [3].

3. De oven.

De oven waaraan de metingen zijn verricht is de tunneloven voor grofkeramische produkten van de fa.G.Lust te Oosterhout. De oven (schematisch weergegeven in fig. 1 en 2) wordt met aardgas gestookt. Gemeten werd tijdens verschillende bedrijfsvoeringen.

- A. Oven uitgerust met de branderinstallatie bestaande uit gaslansen waar- uit continu (behalve tijdens het verschuiven van de lading) aardgas en verbrandingslucht stroomt en de oorspronkelijke zetwijze.
- B. Oven uitgerust met de branderinstallatie volgens het z.g.n. Leisenberg brandersysteem (het aardgas wordt intermitterend aan de branders toe- gevoerd) en de oorspronkelijke zetwijze.
- C. Oven uitgerust met Leisenberg brandersysteem en de nieuwe zetwijze.

Deze metingen kunnen nog worden onderverdeeld in

- C₁ met handstapeling
- C₂ met zetmachine

Bij het Leisenberg systeem wordt de verbrandingslucht continu toege- voerd. Bij het onder A. genoemde systeem ook, behalve tijdens het ver- schuiven van de wagens. De hoeveelheid verbrandingslucht wordt dan terug- gebracht op 1/3 (voor het koelen van de gaslansen).

De zetwijze is weergegeven op de foto's fig. 3 en fig.4.

De warmeluchtaftrek naar de drogerij vindt plaats door een leiding, die aangesloten is op de ruimte tussen het eigenlijke ovendak en een twee- de dak (verder in dit verslag het tussendek genoemd).

Omdat tijdens de weekeinden minder lucht voor de drogerij nodig is wordt dan een deel van de warme lucht door de "weekend-pijp" naar buiten geblazen.

De warme lucht voor de drogerij wordt hoofdzakelijk door de uitrij- opening, uit de ruimte onder de wagens en door de dubbele ovenwand aange- zogen.

Tijdens de 4e meting (C2) werd geen lucht voor de drogerij door de steenstapeling gezogen. Er werd gebruik gemaakt van de schuif aan het eind van de oven (r fig.1) die tijdens de vorige metingen gesloten was. Bij de oven wordt de warme lucht uit het tussendek gezogen en als voor- warmlucht aan het begin van de oven toegevoerd. Een deel van de lucht die onder de wagens stroomt, wordt benut om de ovenmuren aan het begin van de oven warm te houden. Deze lucht gaat daarna door het tussendek naar de drogerij. De rookgassen worden vlak boven de wagens door kanalen in de zijwanden afgezogen (fig.2) en daarna via een rookgaskast aan de boven- zijde van de oven afgevoerd via een schoorsteen met ventilator.

Bij de bedrijfsvoering A. waren 2 schoorsteenpijpen met ventilatoren in werking, bij het Leisenberg-systeem (bedrijfsvoering B en C) slechts één. Voor het afkoelen van het gebakken produkt wordt nog koellucht in de oven geblazen met behulp van een ventilator.

Het verschuiven van de wagens (halve wagenlengte per verschuiving) vond als volgt plaats: C1 en C2 om de 60 minuten, A en B om de 65 minuten.

Het vervaardigde produkt is een gele geperforeerde metselsteen. Op elke wagen werden doorgaans 4630 vormlingen geplaatst. Tijdens de bedrijfsvoering C2 4960 vormlingen per wagen. Dit komt bij het verschuiven van een halve wagenlengte per uur neer op een produktie van 3640 resp. 3900 kg gebakken stenen per uur.

4. De metingen.

Aan de oven werden metingen verricht met als doel het opstellen van een warmte- en stofbalans van de gehele oven en een berekening van de warmteoverdracht in de oven. Ter oriëntatie of de toepassing van de Hetracertechneik [4] bij deze oven noodzakelijk was werd een beperkt aantal metingen verricht. Hieruit bleek dat de luchtsnelheden in de oven zodanig groot waren, dat de bepaling van de luchthoeveelheden kon worden uitgevoerd met pitotbuizen en anemometers.

In dit hoofdstuk zullen verder alle verrichte metingen in afzonderlijke paragrafen worden behandeld. Aandacht zal worden geschonken aan de praktische uitvoering van de metingen, aan de betekenis van de metingen zowel afzonderlijk als in hun onderlinge samenhang en aan de nauwkeurigheid van de metingen.

4.1 De warmte naar de drogerij (o)

4.1.1 De meting.

De naar de drogerij afgevoerde warme lucht wordt voornamelijk door de uitrijopening, uit de ruimte onder de wagens en door de kanalen in de muren en het dak van het ovenlichaam aangezogen. Tijdens de bedrijfsvoering C2) werd ook lucht bij de verticale schuif r (fig.1) aangezogen terwijl bij die situatie geen lucht voor de drogerij langs de warme lading gezogen werd (klep q was gesloten).

De totale hoeveelheid lucht naar de drogerij werd bepaald met de zelfaanwijzende Lambrecht-pitot (situatie A) en tijdens de overige metingen met een pitotbuis en Betz-micromanometer. De temperatuur van de lucht werd gemeten met een thermokoppel en zuigpyrometer, terwijl bovendien het CO₂-percentage met Dräger-buisjes werd vastgesteld.

4.1.2 Nadere beschouwing van de meting.

Tijdens de metingen bleek, dat bij deze oven de hoeveelheid lucht die naar de drogerij wordt afgezogen nagenoeg constant is (behalve tijdens de weekeinden). Het was danook voldoende om met een momentopname te volstaan. Tijdens de metingen met de pitotbuis werd de leidingdoorsnede op 9 punten afgetast. De leiding is aan de buitenzijde goed geïsoleerd. Uit metingen met de zuigpyrometer bleek dat de daarmee gemeten temperaturen overeenkwamen met die, die werden gemeten met het thermokoppel.

De gemiddelde luchttemperatuur in de leiding bedroeg: voor situatie A) 159°C, B) 155°C, C1) 162°C, C2) 198°C. De gemiddelde ^{ivich}gashoeveelheid 26.000 nm³/h tijdens de 1e, 2e, en 3e meting (A, B, C1) en tijdens de 4e meting (C2) 23.830 nm³/h

Het CO₂-percentage in de warme lucht bedroeg ± 0,2% tijdens de verschillende metingen.

4.1.3 Berekening van de uit de oven naar de drogerij gevoerde warmte.

Met de bekende eindtemperatuur in het warmeluchtkanaal kan de naar de drogerij gevoerde warmte worden berekend. Hieruit volgt dat voor een omgevingstemperatuur van 12° (A, B en C1) en 15° (C2)

voor situatie A) $Q = 1.212.000 \text{ kcal/h (1409 kW)}$

situatie B) $Q = 1.179.000 \text{ " (1370 kW)}$

C1) $Q = 1.236.000 \text{ " (1437 kW)}$

C2) $Q = 1.365.000 \text{ " (1587 kW)}$

In deze berekening is de soortelijke warmte van lucht aangehouden. De koolzuur en de waterdamp in deze lucht worden dus verwaarloosd. Dit heeft slechts een fout van < 0,1% tot gevolg. Wel betekent de gemeten 0,2% CO₂ in de lucht naar de drogerij dat er op een of andere plaats (ovendaklek, lek langs de wagens of terugstroming) een klein gedeelte van de door de oven stromende rookgashoeveelheid naar de drogerij verdwijnt.

4.2 De door het tussendek stromende lucht. (a, m, g)

4.2.1 De metingen.

In het tussendek werden op een plek 9 m "stroomopwaarts" vanaf de warme luchtleiding naar de drogerij, snelheden gemeten. Dit was de enige plaats in het tussendek waar meetbare snelheden waargenomen konden worden. Met de Lambrecht-pitot werd t.p.v. de 3 aanwezige deksels in het tussendek een gemiddelde snelheid gemeten van 5,3 m/sec (A, B, C1) resp. 4,3 m/sec (C2). De temperatuur van de lucht bedroeg daar 247°C resp. 212°C (gemeten met een thermokoppel).

4.2.2 Nadere beschouwing van de metingen.

Uit het schema van de oven (fig.1) volgt dat ook op andere plaatsen dan die waar de snelheid meetbaar was, lucht in het tussendek zal stromen. Dat er slechts op één plaats meetbare snelheden aangetoond konden worden duidt er echter op, dat de overige snelheden zo laag zijn dat de hoeveelheid lucht die door deze doorsneden stroomt ten opzichte van de plaats 9 m stroomopwaarts van de afzuigleiding, kan worden verwaarloosd. De met de gemeten gemiddelde snelheid en temperatuur berekende hoeveelheid lucht is opgenomen in de stofbalansen.

4.3 De door de roosters in de ovenwanden en in het ovendak naar binnen stromende lucht. (f, g)

12,2 m vanaf de uitrijopening van de oven bevinden zich in elke zijwand van de oven 3 roosters die aangesloten zijn op kanalen voor de koeling van de ovenwanden. De hierdoor stromende lucht gaat later naar de drogerij. Tijdens de verschillende bedrijfsvoeringen werd als volgt gemeten:

A), B) en C2) met vleugelradanemometer, C1) met hittedraadanemometer.

Ook in het ovendak zijn nog roosters met beweegbare kleppen aanwezig waardoor naar believen omgevingslucht in het tussendek toegelaten kan worden. De meeste roosters waren tijdens de metingen afgesloten; alleen midden op de oven waren er 2 voor een deel geopend. Hier werd tijdens de verschillende bedrijfsvoeringen met een vleugelradanemometer gemeten. Tijdens de bedrijfsvoering C2) waren alle roosters in het ovendak gesloten.

De roosters in de zijwanden en het dak zijn van het "Weema"-type.

De afmetingen van de zijwandroosters zijn 0,246 m x 0,246 m, die in het dak 0,47 m x 0,41 m. Daar bij dergelijke roosters de instroming over het gehele oppervlak niet evenwijdig aan de roosterribben is werd voor de zijwandroosters een rechthoekige koker geplaatst waarin de snelheden werden gemeten. Dit leverde geen noemenswaardige verschillen op met de snelheden die werden gemeten zonder de koker wanneer de vleugelrad- of hittedraadanemometer tegen de ribben werd gehouden.

De uit de metingen berekende hoeveelheden zijn weer opgenomen in de stofbalansen.

4.4 De naar binnenstromende lucht door het vloerrooster. (k)

18 m vanaf de inrijopening van de oven bevindt zich aan de fabriekszijde een vloerrooster waardoor lucht naar de ruimte onder de wagens stroomt. Boven dit rooster werden tijdens de bedrijfsvoeringen A) en B) met de vleugelradanemometer en tijdens de situatie C1) met de Wallac-Oy hittedraadanemometer op 9 punten snelheden gemeten. Omdat het tijdens situatie C2) mogelijk was onder de wagens te meten, werden toen de snelheden daar gemeten. Met de gemeten snelheden werden de in de stofbalansen weergegeven hoeveelheden berekend.

4.5 De aan de oven toegevoerde koellucht (h)

Vier meter na de laatste branderrij wordt met een ventilator via een verdeelpijp koellucht in de oven geblazen. Om deze hoeveelheid te meten werd in een meetpijp die aan de zuiguit van de ventilator verbonden was de snelheid en temperatuur gemeten met een pitot, Betz-micromanometer en thermometer.

De meetpijp was een gladde plastic pijp met een inv.diameter van 153 mm ϕ .

De stroming in de pijp was turbulent ($Re \approx 100.000$) zodat met een meting op het hart van de pijp kon worden volstaan en de gemiddelde snelheid gevonden kon worden door de op het hart gemeten waarde

met 0,84 te vermenigvuldigen. De aldus berekende hoeveelheden zijn weergegeven in de stofbalansen.

4.6 De aan de oven toegevoerde verbrandingslucht. (j)

De verbrandingslucht wordt met ventilatoren toegevoerd. Bij de bedrijfsvoering A) vond dit plaats door 7 ventilatoren, bij het Leisenberg-systeem (B, C1 en C2) door 2. Aan de zuigzijde van de ventilatoren werd een meetpijp bevestigd waarin snelheden en temperaturen werden gemeten.

Ook hier werd de hoeveelheid lucht voor de stofbalans berekend met een gemiddelde snelheid die werd gevonden door de maximale snelheid met 0,84 te vermenigvuldigen. Bij bedrijfsvoering A) werd rekening gehouden met het feit, dat tijdens het verschuiven van de wagens de verbrandingsluchthoeveelheid naar 1/3 van de "normale" hoeveelheid wordt teruggebracht.

Bij het Leisenberg brandersysteem werd de meetpijp slechts bij één van de twee ventilatoren gebruikt.

De tweede ventilator stond met de zuigzijde zo dicht bij de muur, dat de meetpijp niet kon worden gebruikt. Van deze ventilator werd de opbrengst bepaald met een snelheidsmeting in de toevoerleiding naar de branders. De op deze wijze gemeten hoeveelheden stemden redelijk overeen. Het totaal is in de stofbalansen weergegeven. Bij de bedrijfsvoeringen B, C1 en C2 leveren de verbrandingsluchtventilatoren tijdens het verschuiven van de wagens dezelfde hoeveelheid lucht, zodat geen correctie behoefde te worden aangebracht.

4.7 De hoeveelheid aardgas. (j)

Het gasverbruik werd afgelezen van de aanwezige gasmeter in het aardgasontvangststation. Dit was mogelijk omdat de oven als enige "afnemer" van de hoofdgasmeter fungeerde.

Gemeten werden de volgende hoeveelheden:

- Situatie A) $89 \text{ m}^3/\text{h}$ bij $t = 16^\circ\text{C}$ en een overdruk van 3 bar. overeenkomend met $333 \text{ nm}^3/\text{h}$
- B) $76 \text{ m}^3/\text{h}$ bij $t = 16^\circ\text{C}$ en een overdruk van 3 bar. overeenkomend met $284 \text{ nm}^3/\text{h}$
- C1) $81 \text{ m}^3/\text{h}$ bij $t = 17^\circ\text{C}$ en een overdruk van 3 bar. overeenkomend met $301 \text{ nm}^3/\text{h}$
- C2) $84 \text{ m}^3/\text{h}$ bij $t = 15^\circ\text{C}$ en een overdruk van 3 bar. overeenkomend met $320 \text{ nm}^3/\text{h}$

4.8 De door de "weekend"-pijp naar binnen lekkende lucht. (m)

Zoals in hoofdstuk 3 is vermeld, wordt tijdens de weekeinden (behalve bij de situatie C2) het overschot aan warme lucht voor de drogerij door de "weekend"-pijp naar buiten geblazen. Tijdens normaal bedrijf is deze pijp met een schuif afgesloten. Om de dan inlekkende luchthoeveelheid te kunnen schatten werden met de Lambrecht-pitotbuis in de genoemde pijp snelheden gemeten. De hoeveelheid binnenlekkende lucht die daarmee werd berekend is weergegeven in de stofbalansen.

4.9 De door de oven stromende hoeveelheid lucht en verbrandingsgas.

Met de vleugelradanemometer en de hittedraadanemometer werden bij de uitrijopening van de oven snelheden boven en onder de wagen gemeten. De hieruit berekende hoeveelheden zijn voor de verschillende bedrijfsvoeringen weergegeven in de stofbalansen.

Uit de verschillende luchthoeveelheden die met afzonderlijke metingen zijn vastgesteld, kan de totaal door de oven stromende gashoeveelheid worden berekend. Bovendien kan deze hoeveelheid worden berekend uit de gemeten CO_2 -concentraties in de schoorsteen en de hoeveelheid CO_2 die ontstaat bij het verbranden van het aardgas en het bakken van de stenen. In figuur 12 is de grootte van de gashoeveelheid door de oven in beeld gebracht. De in deze figuur weergegeven situatie is gebaseerd op de tijdens meting CO_2 vastgestelde waarden.

Uit de figuur blijkt, dat de totaal boven de wagens aan de oven toegevoerde lucht- en gashoeveelheid overeenkomt met de hoeveelheid rookgas in de schoorsteen. Hieruit zou de conclusie kunnen worden getrokken dat de doorstromende luchthoeveelheid niet beïnvloed wordt door lekkage door de hefdeuren en lekkage tussen de wagenbodems door. Zeker is dit echter allerminst. Wel zal de netto toevoer ten gevolge van lekkage door de hefdeuren en lekkage tussen de ovenwagens te verwaarlozen zijn, maar het blijft mogelijk dat uit de oven een hoeveelheid rookgas door de spleten tussen de wagens wegstroomt die van dezelfde orde van grootte is als de door de hefdeuren boven de wagens inlekkende hoeveelheid lucht. De aanwezigheid van CO_2 in de naar de drogerij afgezogen lucht bevestigt de mogelijkheid dat ovengassen tussen de wagens door het ovenkanaal verlaten.

4.10 De luchtstroom van het tussendek naar de opwarmzône. (p)

Uit het tussendek wordt met een leiding met axiaalventilator een hoeveelheid warme lucht naar de opwarmzône getransporteerd. Voor de ventilator werden met een pitot en Betz micromanometer op verschillende punten in de leiding (inw. ϕ 0,42 m) snelheden gemeten. Omdat de leiding goed is geïsoleerd kon voor de temperatuurmeting met een meting met een thermokoppel worden volstaan. De gemeten gemiddelde temperatuur bedroeg 146°C (A, B, C1) en 159°C (C2). De snelheidsverdeling over de doorsnede was gelijkmatig (max. gemeten verschil 5% van de max. snelheid). De berekende luchthoeveelheid is opgenomen in de stofbalansen.

4.11 De bij de inrijopening naar binnen lekkende lucht. (l)

De inrijopening van de oven is, wanneer er geen wagens naar binnen rijden, door 2 hefdeuren afgesloten (zie fig.1). Bij hefdeur I zijn nogal wat gaten en kieren waardoor lucht in de oven kan stromen. Bovendien kan hefdeur II niet verder naar beneden dan tot op de bovenzijde van de wagenbodem en heeft deze deur aan de bovenkant nog een lek door onnauwkeurige afwerking. De snelheid van de bij deze deuren naar binnen stromende lucht werd gemeten met de hittedraadanemometer waarmee in vrij nauwe kieren nog snelheden zijn te meten. De totale hoeveelheid lucht die bij gesloten deuren naar binnen lekt is in de stofbalansen weergegeven.

4.12 Het schoorsteenverlies. (n)

4.12.1 De meting.

Voor de bepaling van het schoorsteenverlies werden gemeten:

- de hoeveelheid rookgas
- de temperatuur van het rookgas
- de gassamenstelling

De hoeveelheid rookgas kan voor de vier verschillende bedrijfsvoeringen worden berekend uit het gemeten CO_2 -percentage in de schoorsteen en uit de gemeten snelheden in het schoorsteenkanaal. De in het rookgaskanaal gemeten temperaturen bedroegen 137°C (A), 152°C (B), 155°C (C1) en 107°C (C2).

De temperatuur werd bepaald met een thermokoppel. Het CO₂-percentage werd tijdens de situaties A), C1) en C2) met een Orsat-apparaat gemeten terwijl in het geval B) met infraroodanalyse (Uras) werd gewerkt (fig.5).

4.12.2 Nadere beschouwing van de metingen.

De meest nauwkeurige meting van het schoorsteenverlies heeft plaatsgevonden tijdens de situaties B), C1) en C2) toen alleen het rechthoekige schoorsteenkanaal in gebruik was (inw.afm. 1m x 0,79 m). Bij situatie B) werd het rechthoekige schoorsteenkanaal op 9 punten verdeeld over de doorsnede met een pitot (aangesloten op een Betz micromanometer) afgetast, terwijl tevens op de 9 punten de temperatuur in de rookgassen werd bepaald met een thermokoppel.

Tijdens situatie C1) werd op 5 punten in het schoorsteenkanaal het CO₂-percentage bepaald met een Orsatapparaat. De concentratie was over de doorsnede vrij gelijkmatig. Hetzelfde geldt voor de temperatuur. (max.verschil \pm 3% t.o.v. het gemiddelde)

Uit de gemiddelde snelheden en temperaturen werden de in de stof- en warmtebalansen weergegeven hoeveelheden berekend.

4.13 Warmteverliezen van de ovenromp.

De oppervlaktetemperaturen van de ovenwanden en het ovendak waren vrij laag (max. 59°C in de onmiddellijke omgeving van de branders). Met de uit de metingen aan de vlamoven $\sqrt{1}$ bepaalde warmteoverdrachtscoëfficiënten werd berekend, dat het warmteverlies van de ovenromp 7% van de totaal ingebrachte warmte (aardgas + humus) bedraagt. Hierin is niet begrepen het warmteverlies door de ovenbodem onder de wagens. Een berekening hiervan was niet mogelijk omdat daar geen temperatuurmetingen werden verricht. Het verlies door de ovenbodem is opgenomen in de sluitpost van de warmtebalansen.

4.14 De temperaturen in de steenstapeling.

4.14.1 De meting.

Daar de eerste metingen een oriënterend karakter hadden, werd tijdens de situaties A), B) en C1) niet met thermokoppels in de

steenpakketten gemeten. Wel werden Bullersringen tussen de stenen gelegd zodat een indruk omtrent de temperatuurgelijkmatigheid en de max. temperaturen verkregen kon worden. De resultaten van deze proeven zijn vermeld in het rapport: "Beoordeling van de kwaliteit van het sinter-proces in een tunneloven vanuit keramisch technisch standpunt" [3].

Tijdens de bedrijfsvoering C2 werden thermokoppels in het steenpakket aangebracht.

8 Chromel-alumel thermokoppels (draaddiameter 1,8 mm) werden in het steenpakket aangebracht vlg. fig.4 en 2 koppels (draaddiameter 0,8 mm) aan een "meetsteen". Bij de "meetsteen" was één koppel aan de buitenkant bevestigd en één middenin de steen. De thermokoppels werden onder de ovenwagen aangesloten op een streng compensatiekabels die de meetsignalen via een 0°C thermostaat door-gaven aan een 12-puntsrecorder. De streng compensatiekabels was om-wikkeld met een beschermende tape en werd door de ovenwagen meege-trokken. De resultaten van de metingen zijn weergegeven in de figu-ren 8 en 9.

4.14.2 Nadere beschouwing van de meting.

In fig.8 zijn de 8 temperaturen in de steenstapeling uitgezet. De meetpunten 1 t/m 6 bevinden zich midden in een van de steenpakketten op een afstand van een kwart wagenlengte van de achterzijde van de wagen. Door deze opstelling van de thermokoppels wordt zo weinig mogelijk invloed ondervonden van warmtegeleiding langs de koppels en daarmee gepaard gaande meetfouten. Meetpunt nr.11 ligt in hetzelfde verticale vlak als de punten 1 t/m 6. Meetpunt 8 is aan de buitenzijde van het pakket op de helft van de wagenlengte aangebracht (zie fig.8). In fig.8 is de plaats van de stookzône aan-gegeven en zijn tevens vermeld de tijdstippen waarop lucht in of ver-brandingsgassen uit de oven worden gezogen.

(N.B.: De schoorsteenafzuiging ligt in de oven dichterbij de inrij-opening dan aan de buitenkant van de oven is te zien. De kanalen lopen scheef door de muur naar de rookgaskast boven op de oven (zie fig.1)).

Het tijdstip 0 uur komt overeen met het moment waarop het meetpakket de oven binnengaat. De koppels 8, 6, 5 en 4 geven op het tijdstip dat de voorwarmlucht het meetpakket treft waarden van ca 70°C en dalen daarna in temperatuur. De temperaturen ter plaatse van de punten 1, 2, 3 en 11 worden niet door deze luchttoevoer beïnvloed. Dit effect wordt veroorzaakt door het feit dat de door de warme luchtpijp ingeblazen lucht naar de bodem van de wagen wordt gevoerd en via de op dat niveau gelegen afzuigopening naar de schoorsteen wordt afgezogen. De stenen bovenin het pakket worden daardoor niet opgewarmd.

Zoals te verwachten is wordt de temperatuur ter plaatse van het aan het oppervlak gelegen koppel 8 sterk door de warme luchttoevoer beïnvloed. Doordat dit koppel $1/4$ wagenlengte eerder aan de warme luchtstroom wordt blootgesteld is op het tijdstip 5 uur na het begin van het bakproces de temperatuur op punt 8 al aanzienlijk hoger dan in de rest van het pakket.

Na 7,5 uur is de temperatuur in het steenpakket weer uniform geworden. Globaal kan worden gesteld dat met de warme luchttoevoer van $2575 \text{ m}^3/\text{h}$ met een temperatuur van 159°C een hoeveelheid warmte van 127.000 kcal/h in de oven wordt gevoerd. Tengevolge hiervan warmen de stenen 30°C op. De hiervoor benodigde warmte en de warmte voor verdamping bedraagt 51.000 kcal/h . Hieruit blijkt dat de opwarming van de stenen niet erg effectief gebeurt. Meer dan de helft van de door de warme luchtpijp ingeblazen warmte gaat door de schoorsteen de oven uit.

Op het moment dat het meetpakket bij de schoorsteenafzuigopeningen in de oven komt stijgt de temperatuur onmiddellijk doordat de stenen in aanraking komen met de warme rookgassen. De boven in de inzet liggende stenen warmen het snelste op. De opwarming van de stenen onderin de stapeling geschiedt veel minder plotseling. Hier wordt pas na ongeveer 15 uur dezelfde opwarmsnelheid bereikt als in het bovenste stuk van de stapeling. Hoewel door de afzuiging van de warme rookgassen door de laag gelegen afzuigopeningen verwacht kon worden dat ook de koppels aan de onderzijde van het pakket snel zouden opwarmen blijkt dit niet het geval te zijn.

Het ovendak heeft blijkbaar een aanzienlijk hogere temperatuur dan de wagen. Dit is ondermeer een gevolg van het feit dat het ovendak ter plaatse van de rookgasafzuiging door de warmtegeleiding uit de rookgaskast wordt opgewarmd. De wagentemperatuur (fig.10) bedraagt aan de bovenzijde na 20 uur nog maar 150°C . Een andere reden voor de veel snellere opwarming aan de bovenzijde van de inzet is de doorstroming met de hetere rookgassen. Door de thermiek is de temperatuur van de rookgassen boven in de oven hoger dan onderin. Bovendien is de doorstroming in het onderste gedeelte van het pakket slecht omdat de rookgassen aan de zijkant worden afgezogen.

Na het passeren van de rookgasafzuiging wordt de steenstapel uitwendig opgewarmd door de rookgasstroom en de straling van de ovenwanden en het ovendak. Steeds blijft de invloed van de relatief koude wagen en de thermiek op de ongelijkmatigheid in de temperatuur van de inzet, duidelijk merkbaar.

Bij ongeveer 500°C is extra warmte nodig voor het verdampen van het chemische water terwijl daarna (ca $650-850^{\circ}\text{C}$) warmte wordt gebruikt voor de ontleding van de kalk. Hierdoor stijgt boven de 500°C de temperatuur van het bovenste deel van de steenstapel minder sterk per tijdseenheid. Bij de stenen onderin het steenpakket is deze vermindering in opwarmingsnelheid niet merkbaar. Dit komt omdat juist op het tijdstip waarop de inzet aan de onderzijde de 500°C bereikt met stoken wordt begonnen. Het begin van het stoken is direct merkbaar aan de temperatuurstijging van de in de spleet tussen de twee stapels aan het oppervlak gelegen stenen (koppel 8). De verbrandingsgassen worden door de branders in deze spleet gespoten en warmen daar de inzet zeer snel op. Ter plaatse van koppel 8 wordt een opwarmingsnelheid van $150^{\circ}\text{C}/\text{h}$ bereikt. (In de figuur lijkt het zo dat koppel 8 in temperatuur stijgt voordat met stoken wordt begonnen, maar dat komt door de andere positie van koppel 8 in het pakket).

Ongeveer 35 uur na het begin van het bakproces treedt in de inzet een temperatuuregalisatie op. De koppels die in het bovenste gedeelte van de inzet zijn aangebracht nemen niet meer zo sterk in

temperatuur toe doordat de temperatuurverschillen tussen het langs de inzet stromende gas en de stenen kleiner wordt. Onderin de inzet is het temperatuursverschil naar verhouding groter doordat de steentemperaturen daar ten gevolge van de invloed van de wagen achter gebleven zijn. Op deze plaats blijven de temperaturen dus nog door stijgen.

Na 40 uur is een betrekkelijk stationaire toestand bereikt. Het grootste temperatuursverschil in een verticale doorsnede door de inzet ter plaatse van de koppels 1, 2, 3, 4, 5 en 6 bedraagt 30°C .

Na het verlaten van de stookzône dalen de temperaturen in het steenpakket zeer snel. Dit is een gevolg van de geforceerde koeling die 54 uur na het begin van het proces de stenen met een gemiddelde koelsnelheid van 60°C/h afkoelt. (Dat punt 8 eerder afkoelt is te verklaren uit de andere positie van dit meetpunt. De vroegtijdige daling van de temperatuur t.p.v. punt 5 is niet anders te verklaren dan met een kortsluiting ergens in het koppel). Zeer opvallend bij deze koeling is het feit dat de in het midden van het pakket gelegen meetpunten vrijwel direct sterk reageren. Dit duidt erop dat de luchtstraal tussen de stenen door het pakket indringt. Direct na het verplaatsen van de wagens naar een plaats achter de luchtinblaasopeningen, is de koelsnelheid veel minder. Door de neiging van de koude lucht onderin de oven te blijven, zijn na de geforceerde koeling de temperatuurverschillen in de inzet aanzienlijk toegenomen. Het verschil tussen de punten 2 en 4 bedraagt nu 120°C .

Gedurende de volgende 15 uur is de koeling wat langzamer. In deze periode daalt de temperatuur van gemiddeld 850°C tot 650°C . Baktechnisch gezien zou een dergelijke vertraging in de koeling misschien beter in het temperatuurgebied rond de 550 à 600°C hebben kunnen plaats vinden.

Ongeveer 67 uur na intree in de oven bij een gemiddelde inzettemperatuur van 625°C neemt de koelsnelheid wederom sterk toe tot 80°C/h voor de in het steenpakket gelegen stenen. Voor stenen aan de buitenzijde is deze snelheid nog groter. Voor punt 8 bedraagt de afkoelsnelheid 120°C/h . Deze sterke afkoeling wordt veroorzaakt

doordat in dit gedeelte van de oven de wanden niet meer van een spouw zijn voorzien, zodat de wandtemperatuur aanzienlijk lager is.

De ongelijkmatigheid in de temperatuurverdeling in het steerpakket neemt nog toe doordat de "koude" intredende lucht vooral de onderzijde van het steenpakket afkoelt. Bij het verlaten van de oven is de gemiddelde temperatuur in de meetdoorsnede 120 à 130°C. Het warmteverlies door het uitrijden van de stenen bedraagt bij deze temperatuur 3% van de totaal ingebrachte warmte (aardgas + humus).

De wagens worden uitgereden met een gemiddelde temperatuur van ca 120°C. Dit geeft een warmteverlies van 1,5% van de totaal ingebrachte warmte.

De tweede grafiek die informatie verschaft over de temperaturen in het steenpakket is fig.9. Hierin zijn de temperaturen van de bovenzijde en in het midden van de meetsteen weergegeven. De meetsteen bestond uit ruim een dubbele vormling zonder perforatie, echter wel uit dezelfde klei gevormd als de overige vormlingen. Door de iets grotere afmetingen en het ontbreken van de perforatie is de hoeveelheid klei in de halve meetsteen 17% groter dan bij de gemiddelde vormling.

Door de "meetsteen" aan een andere zijde van de wagen te plaatsen is tevens een indruk verkregen over de temperatuurgelijkmatigheid over de totale breedte van de steenstapeling. De plaats van de meetsteen in het pakket is in figuur 9 aangegeven. Het blijkt dat de temperatuur aan het oppervlak van de meetsteen tot 750°C 2 tot 2 $\frac{1}{2}$ uur najlt bij de meetpunten 4, 5 en 6 onder in het meetpakket. Wordt de oppervlaktemperatuur van de meetsteen vergeleken met de oppervlaktemperatuur van het meetpakket ter plaatse van meetpunt 8, dan blijkt er tot 32 uur na het begin praktisch steeds een temperatuursverschil van 400°C te bestaan. Het oppervlak van de meetsteen ondervindt geen directe invloed van de gasvlammen. Dit komt door de plaats van de branders die hun warme rookgassen juist in de spleet tussen de steenstapels blazen en daardoor meetpunt 8 veel sterker beïnvloeden dan meetpunt 12.

De maximumtemperatuur die meetpunt 12 bereikt is 1120°C . Dit is 45°C hoger dan alle overige maximumtemperaturen in het meetpakket. Uit de praktijk van de oven is bekend, dat de oventemperaturen aan die zijde steeds hoger zijn en dat de neiging tot smelt daar het eerste optreedt. (Dit is enigszins te zien op de rechterzijde van de foto in fig.4). Hoewel, doordat de isolerende spleet tussen de oven en de buitenmuur aan de bovenzijde is afgesloten, een enigszins asymmetrisch temperatuurbeeld te verwachten is, moet de hogere temperatuur vooral worden toegeschreven aan het feit dat aan die kant van de oven aan het einde van de stookzône nog een niet geïsoleerde verbindingspijp tussen de ovenruimte en het tussendeck is aangebracht waardoor hete verbrandingsgassen naar de drogerij worden gezogen. Daardoor zal er op die plaats een asymmetrische stroming door en om de steenstapeling ontstaan waarvan een plaatselijke temperatuurverhoging het gevolg is. Overigens ver- toont fig.9 een beeld analoog aan dat van figuur 8.

De koppels op en in de meetsteen geven een goed beeld om- trent de warmteindringing in de meetsteen. Tijdens het opwarmen is het temperatuurverschil bij ca 420°C het kleinst. Dit is het gevolg van de humusverbranding waardoor de temperatuur in de vormling stijgt (zie ook [2]). Hierop zal in een volgend ver- slag nader worden ingegaan.

In figuur 9 zijn ook nog de resultaten van temperatuur- metingen met een gloeidraadpyrometer weergegeven en zijn met de zuigpyrometer gemeten gastemperaturen opgenomen. Voor de bespre- king van de gastemperaturen zij verwezen naar hoofdstuk 4.16.

De met de gloeidraadpyrometer gemeten temperaturen zijn waargenomen door de kijkgaten aan de zijkant (fabriekszijde) van de oven. Deze gaten liggen juist iets boven de wagenvloer ter hoogte van de thermokoppels 7, 8 en 12 in het steenpakket. Daar alleen gaten in de fabriekszijdige ovenwand aanwezig waren, zijn de genoemde temperaturen die van het oppervlak van het steenpak- ket (fabriekszijde) en die van de binnenzijde van de niet fabrieks- zijdige ovenwand.

De steenpakkeoppervlaktemperaturen en de wandtemperaturen werden gemeten tijdens het verschuiven van de wagens. De branders zijn dan uitgeschakeld. De temperaturen kunnen door een zeer geringe afkoeling tijdens het verschuiven iets beïnvloed zijn. Het is echter het enig mogelijke moment om deze temperaturen te meten omdat dan juist de lading langs het kijkgat schuift en bovendien geen hinder wordt ondervonden van de voor deze metingen storende invloed van de gasvlammen.

Daar het i.v.m. de stapelmachine niet lukte de meetsteen zo in het pakket te plaatsen dat het koppel aan de buitenkant van de meetsteen ook aan de buitenzijde van het steenpakket kwam is het helaas niet mogelijk de oppervlaktemperaturen gemeten met het thermokoppel en de gloeidraadpyrometer onderling te vergelijken. Wel kan de oppervlaktemperatuur gemeten met het thermokoppel bijdragen tot een goed inzicht in de warmteovergang omdat de plaats van het koppel wel toegankelijk was voor de gasen die door de oven stromen. Hierop zal in een volgend verslag nader worden ingegaan.

Uit een vergelijking van de met de gloeidraadpyrometer gemeten oppervlaktemperatuur van steenstapel en ovenwand, blijkt ook dat de temperatuur in de oven aan de fabriekszijde lager is.

4.15 De temperaturen van de wagens.

4.15.1 De meting.

Tijdens de bedrijfsvoering C2 werden ook de temperaturen van de ovenwagens gemeten. Daartoe werden 3 thermokoppels aan de meetwagen bevestigd en wel:

- a) Aan de bovenkant op de wagenbodem (in het midden van het wagenbodemoppervlak).
- b) Tegen de onderkant van de wagenbodem (idem).
- c) Op de wagenas vlak bij het wielager (fabriekszijde).

Het thermokoppel a) werd voor een deel in een sparring in de bovenkant van de wagenbodem gemetseld zodat meetfouten door warmtegeleiding langs het koppel zoveel mogelijk beperkt bleven.

Koppel b) werd met hittebestendige draad tegen de onderkant van de wagenbodem gehangen, het meetpunt werd met vuurvaste cement aan de bodem gekit. Koppel c) werd met warmtebestendige tape op een goed gereinigd deel van de wagenas bevestigd. De drie koppels werden evenals die in het meetpakket via de compensatie-kabels en nulpuntsthermostaat aangesloten op de 12-puntsrecorder.

4.15.2 Nadere beschouwing van de meting.

De meetresultaten van de thermokoppels aan de meetwagen zijn weergegeven in fig.10. De bevestiging van het koppel aan de onderkant van de wagenbodem liet helaas bij het inrijden van de wagen in de oven los. Het koppel bleef, door de ophanging aan de wagenbodem, vlak bij de onderkant van de wagenbodem hangen.

Wordt fig.11 vergeleken met fig.8 dan blijkt de temperatuur van de bovenkant van de wagenbodem in de opwarmzône iets bij de temperaturen onder in de steenstapeling achter te lopen. Bij het begin van de stookzône is dit verschil verdwenen en bereikt de bovenkant van de bodem een hogere temperatuur dan die onder in het meetpakket. De invloed van de gasbranders die tussen de steenstapels zijn opgesteld, is hier duidelijk merkbaar. De maximum temperatuur waaraan de bovenkant van de wagen wordt blootgesteld is 1025°C . Deze temperatuur ligt dus 15°C beneden meetpunt 4 onder in het steenpakket. In dat gebied is de temperatuur onder de wagenbodem ca 210°C . De isolatie van de wagenbodem is dus redelijk goed.

Van de plotselinge stijging van het op de wagenas bevestigde koppel ongeveer 60 uur na het begin van het bakproces is moeilijk te zeggen of deze kenmerkend is. Hiertoe zou een herhaling van de meting nodig zijn.

4.16 De gastemperatuur in de oven.

4.16.1 De meting.

Tijdens de situatie A) werd getracht met de zuigpyrometer gastemperaturen in de oven te meten. Daar de weerstand van het aanwezige persluchtleidingnet te groot was kon niet voldoende zuigsnelheid in de zuigpyrometer worden bereikt.

Daarom werd tijdens de bedrijfsvoering C2) een compressor van het C.T.I. ter plaatse opgesteld zodat een goede werking van de zuigpyrometer verzekerd was.

Aan de zijkant van de oven (fabriekszijde) bevinden zich 20 cm boven de ovenwagenvloer kijkgaten in de ovenwand waardoor een zuigpyrometer in de oven kon worden gestoken. Voor het berekenen van de warmteoverdrachtscoëfficiënten is het vooral van belang de gastemperaturen te weten op een plaats waar ook de oppervlakt temperatuur van het steenpakket gemeten werd. Daarom werd in elk aanwezig kijkgat op 3 verschillende plaatsen over de halve ovenbreedte de gastemperatuur gemeten. De meetresultaten zijn weergegeven in fig.11.

4.16.2 Nadere beschouwing van de meting.

Uit fig.11 blijkt dat in het gemeten gebied de gastemperaturen vlak bij de ovenwand nogal verschillen van die meer in het midden van de oven. Dit is duidelijk een gevolg van het feit dat langs de stenen de grootste gasstroom plaatsvindt en dus de opwarming van de gassen het kleinste is.

In het midden van de oven tussen de steenstapels in, is de doorstroming veel minder. Juist daar wordt met de branders gas toegevoerd waardoor de gastemperatuur hoger zal zijn.

Van een grote temperatuurgelijkmatigheid ten gevolge van het intermitterend stoken is geen sprake. Deze gelijkmatigheid zou juist in de gastemperatuur het duidelijkste moeten blijken.

4.17 CO₂-metingen.

Tijdens de bedrijfsvoering A) en B) werd met een Uras (registrerende CO₂-meter) op één punt boven de steenstapelings continu het CO₂-percentage gemeten (10,3 m stroomopwaarts vanaf de schoorsteen). Het verloop van de CO₂-concentratie met de tijd is voor bedrijfsvoering A weergegeven in figuur 5. (In deze figuur is het verschuiven van de wagens (hierbij worden de branders uitgeschakeld) goed zichtbaar).

Het feit dat tijdens de onderbreking van de verbranding het CO₂-gehalte niet tot 0% daalt is een gevolg van het feit dat de CO₂-produktie van de stenen doorgaat en dat in de oven een recirculatie stroming optreedt. De fluctuaties in het CO₂-percentage moeten geweten worden aan het niet regelmatig vrijkomen van de CO₂ uit de vormlingen. De CO₂-produktie van de vormlingen bedraagt 220 nm³/h, de door de verbranding van het aardgas ontstane hoeveelheid 300 nm³/h. Voor de situatie B) is het CO₂-verloop weergegeven in fig.6. De fluctuaties zijn nu veel minder. Dit komt door het hogere CO₂-percentage waardoor de invloed van de CO₂-produktie uit de vormlingen op het verloop veel geringer is. De oorzaak van het niet volledig zijn van deze grafiek was het verstopt raken van de monsternamebuis met klei en gecondenseerde waterdamp.

Tijdens situatie C1) werd op dezelfde plaats als bij de A) en B) meting op 6 punten verdeeld over de ovendoorsnede het CO₂-percentage met een Orsat-apparaat gemeten.

Evenzo tijdens situatie C2).

Uit de gemeten CO₂-percentages zijn de rookgashoeveelheden berekend die in de stofbalans zijn weergegeven. De samenstelling van de klei is opgenomen in de appendix aan het eind van dit verslag.

In figuur 18 is nog een verticale traverse van de CO₂-concentratie in de oven weergegeven. Duidelijk blijkt, dat de CO₂-concentratie in de oven aan de onderzijde sterk daalt tengevolge van de door de hefdeuren inlekkende lucht en de voorwarmlucht die vanuit het ovendak in de oven wordt geblazen.

Bovendien kan door de gasstroming naar de laag gelegen schoorsteenopeningen de CO₂-verdunning onder in de oven groter zijn.

Uit de vergelijking tussen de CO_2 -percentages in het midden van de oven en aan de muurzijde volgt dat de verdunning van de uit de stenen komende CO_2 tussen de stenen veel minder groot is als aan de zijkant van de oven.

5. De warmtebalansen.

5.1 De berekening.

Met de in de vorige hoofdstukken vastgestelde grootheden kunnen de warmtebalansen van de oven voor de verschillende bedrijfsvoeringen worden opgesteld. Hiervoor werden de totaal toegevoerde warmtehoeveelheid en de benodigde warmtehoeveelheid voor het bakproces als volgt berekend.

Totaal toegevoerde warmte: $Q_1 + Q_2 = \text{nm}^3 \text{ aardgas/h} \times \text{stookwaarde} + \text{kg vormlingen/h} \times \text{humusgehalte} \times \text{stookwaarde}.$

Voor de stookwaarde van aardgas werd 7600 kcal/nm^3 aangehouden, voor die van de humus $4400 \text{ kcal/kg}.$

De voor het bakproces benodigde warmte kan worden gesplitst in: de warmte die nodig is voor het vrijmaken en verdampen van het water, de warmte die nodig is voor het ontleden van de kalk.

Hierbij werden de volgende waarden aangehouden:

vrijmaken + verdampen fysisch gebonden water	680 kcal/kg.
idem restwater	575 "
idem chemisch gebonden water	964 "
ontleding CaCO_3	759 "

Totaal benodigde warmte voor het bakproces ($Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$):

$Q_3 = \text{kg vormlingen/h} \times \text{fysisch watergehalte} \times 680$
$Q_4 = \text{" " } \times \text{restwatergehalte} \times 575$
$Q_5 = \text{" " } \times \text{chemisch watergehalte} \times 964$
$Q_6 = \text{" " } \times \text{kalkgehalte} \times 759$

Voor de analyse van de Bavelse klei zij verwezen naar de appendix aan het eind van dit rapport. (blz.39)

De warmtebalansen worden dan:

Tabel I
Bedrijfsvoering A

	kcal/h	kW	% van toegevoerde warmte
Nuttig verbruikte warmte (voor het bakproces)	529.000	615	19
Warmte naar de drogerij	1.212.000	1409	44
Schoorsteenverlies hoeveelheid uit CO ₂ %	791.000	920	28
Verlies door ovenromp	195.000	227	7
Verlies in uitgereden stenen	84.000	97	3
Verlies in uitgereden wagens	42.000	49	1,5
Totaal verbruikte warmte	2.853.000	3317	102,5
Totaal toegevoerde warmte	2.791.000	3246	100
Sluitpost	- 62.000	- 71	- 2,5

Tabel II
- Bedrijfsvoering B

	kcal/h	kW	% van toegevoerde warmte
Nuttig verbruikte warmte (voor het bakproces)	529.000	615	22
Warmte naar de drogerij	1.179.000	1370	49
Schoorsteenverlies hoeveelheid uit CO ₂ (2,3%)	813.000	945	33,5
Verlies door ovenrömp	169.000	197	7
Verlies in uitgereden stenen	73.000	85	3
Verlies in uitgereden wagens	36.000	42	1,5
Totaal verbruikte warmte	2.799.000	3254	116
Totaal toegevoerde warmte	2.419.000	2813	100
Sluitpost	- 380.000	- 441	- 16

Tabel III
Bedrijfsvoering Cl

	kcal/h	kW	% van toegevoerde warmte
Nuttig verbruikte warmte (voor het bakproces)	573.000	666	22
Warmte naar de drogerij	1.236.000	1437	48
Schoorsteenverlies hoeveelheid uit CO ₂	666.000	774	26
Verlies door ovenromp	180.000	209	7
Verlies in uitgereden stenen	77.000	90	3
Verlies in uitgereden wagens	39.000	45	1,5
Totaal verbruikte warmte	2.771.000	3221	107,5
Totaal toegevoerde warmte	2.572.000	2991	100
Sluitpost	- 199.000	- 230	- 7,5

Tabel IV
Bedrijfsvoering C2

	kcal/h	kW	% van toegevoerde warmte
Nuttig verbruikte warmte (voor het bakproces)	609.000	709	22
Warmte naar de drogerij	1.365.000	1587	50
Schoorsteenverlies hoeveelheid uit CO ₂	433.000	504	16
Verlies door ovenromp	191.000	222	7
Verlies in uitgereden stenen	82.000	95	3
Verlies in uitgereden wagens	41.000	48	1,5
Totaal verbruikte warmte	2.721.000	3165	99,5
Totaal toegevoerde warmte	2.732.000	3177	100
Sluitpost	+ 11.000	+ 12	+ 0,5

De warmtebalansen zijn in de fig. 12 t/m 15 in beeld gebracht.

5.2 Nadere beschouwing van de warmtebalansen.

De warmtebalansen die voor de bedrijfsvoeringen A, C1 en C2 zijn opgesteld, bezitten een goede nauwkeurigheid. De meting die tijdens bedrijfsvoering B werd verricht bezit in vergelijking tot de overige balansen een veel grotere sluitpost (16%).

Ook de stofbalans sluit voor deze bedrijfsvoering met een veel grotere sluitpost.

De oorzaak van het afwijkend gedrag van de bedrijfsvoering B is niet duidelijk vast te stellen. Ten opzichte van de andere warmtebalansen is het schoorsteenverlies bij bedrijfsvoering B wel aan de hoge kant, maar een duidelijke reden voor het afwijkend gedrag is dit niet.

Gezien de in verhouding grote sluitpost van de meting B, is het verstandiger om ons bij een beoordeling van de invloed van de veranderingen van het brandersysteem en de zetwijze op de economie te beperken tot de bedrijfsvoeringen A, C1 en C2.

In tabel V zijn het gas- en het warmteverbruik per 1000 stenen weergegeven. (blz. 34)

Uit deze tabel kunnen een aantal interessante conclusies worden getrokken. Deze zijn:

- Door het overgaan naar het Leisenberg stookstelsel is het aardgasverbruik per 1000 stenen met ruim 15% gedaald.
- Het overgaan van de handzetting naar de machinale zetwijze heeft geen besparing in het gasverbruik tot gevolg gehad.
- De naar de drogerij gevoerde warmte is bij beide toegepaste stooksystemen even groot. Ook de verandering van de zetwijze heeft de hoeveelheid warmte die per 1000 stenen naar de drogerij wordt gevoerd niet beïnvloed.
- Door het toepassen van de machinale zetwijze is het schoorsteenverlies per 1000 stenen aanzienlijk gedaald. De reden hiervoor is de veel betere afkoeling van de rookgassen in de met meer "ruimte" gestapelde inzet. De lage schoorsteentemperatuur die bij deze zetwijze wordt bereikt, houdt het gevaar in dat het zuurdauwpunt van de rookgassen wordt onderschreden.

Ten opzichte van de oorspronkelijke bedrijfsvoering is door het toepassen van de nieuwe zetwijze en het nieuwe stookstelsel de produktie van de oven met ruim 15% gestegen.

Tabel V.

Gas- en warmteverbruik per 1000 stenen en produktie van de oven.

	A	B	C1	C2
Aardgasverbr. nm ³	156	133	130	129
Warmte naar de drogerij kcal	566.200	550.800	533.900	550.300
Schoorsteenverlies kcal	369.900	404.500	287.500	174.800
Steenproduktie aant.st./h	2140	2140	2315	2480
Temp.in de schoorsteen °C	137	152	155	107

6. De Stofbalansen.

Uit de op de verschillende plaatsen gemeten snelheden en temperaturen werden de hoeveelheden berekend die voor de verschillende bedrijfsvoeringen zijn weergegeven in tabel VI. (blz. 36)

Voor de bedrijfsvoering C2) is de stofbalans ook in beeld gebracht in fig. 16.

Zoals reeds bij het bespreken van de warmtebalansen is geconstateerd, is de sluitpost van de meting tijdens bedrijfsvoering B) veel groter dan bij de overige metingen. Het is daarom beter om ook in beschouwingen over de stofbalans meting B2 niet te betrekken. Tussen de verschillende bedrijfsvoeringen bestaan wat betreft de stofbalans-aspecten geen grote verschillen. Het meest opvallende is wel dat de door de uitrijopening onder de wagens toegevoerde lucht tijdens meting C2 aanzienlijk groter was dan tijdens de overige metingen. Dat dit een gevolg is van de veel hogere trek in de oven is niet waarschijnlijk; de veel geringere luchthoeveelheid door de uitrijopening boven de wagens wijst namelijk niet in die richting. Vermoedelijk is tijdens meting C2 de afzuiging naar de drogerij vanuit de ruimte onder de wagens groter geweest.

Tabel VI
De Stofbalansen

	A gaslansen hand	B Leisenberg br. hand	Cl Leisenberg br. hand	C2 Leisenberg br. machinaal
Bedrijfsvoering				
Brandcrysteeen				
Wijze van steenstapelen	65	65	60	60
Wagens verschoven per min	2	1	1	1
Aantal schoorstenen	4,7	1,65	2,4	5,4
Trek in de oven (9,5 m voor de schoorsteen in mm.v.k.)	18.000	18.500	15.000	15.000
Door de schoorsteen (n) nm ³ nat/h (uit CO ₂ -%)	26.000	26.000	26.000	24.000
Naar de drogerij nm ³ /h	44.000	44.500	41.000	39.000
Totaal uit	44.000	44.500	41.000	39.000
Totaal in:				
Door verticale schnif bij de uitrijopening (r) nm ³ /h	-	-	-	4.350
Door uitrijopening boven de wagens (d)	11.000	7.800	11.000	8.350
Door uitrijopening onder de wagens (e)	3.900	3.950	4.750	7.850
Door verticale roosters (f)	4.150	4.250	4.800	3.000
Door roosters in ovendak (s)	2.900	1.550	1.350	-
Koellucht in de oven (met ventilator) (h)	650	550	550	250
Verbrandingslucht in de oven (met ventilator) (j)	2.600	4.000	4.000	2.900
Aardgas in de oven (j)	335	285	300	320
Door het vloerrooster (k)	4.500	3.200	3.600	3.350
Door lekken bij hefdeuren (inrijopening) (l)	6.700*	4.000*	4.800	5.150
Waterdamp uit de stenen	180	180	190	200
CO ₂ uit de stenen	220	220	240	250
Door de "weekend"-pijp (m)	300	300	300	-
Totaal in	37.450	30.300	35.900	35.950
Sluitpost	-6.550	-14.200	-5.100	-3.050
Meer uit dan in %	17,5	47	14,5	8,5
Uit tussendek naar opwarmzone	2.575	2.575	2.575	2.575

* Berekend op basis van gemeten trek uit Cl

7. Conclusies.

De verschillende metingen zijn in afzonderlijke hoofdstukken reeds uitvoerig besproken. Daarom zal hier worden volstaan met de opsomming van de voornaamste conclusies die uit de metingen kunnen worden getrokken. Deze zijn:

- Het is mogelijk gebleken met de in dit rapport beschreven metingen met een goede nauwkeurigheid (sluitpost 0,5% - 7,5%) een warmtebalans van een tunneloven op te stellen.
- In de uiteindelijke bedrijfsvoering van de oven wordt ongeveer de helft van de toegevoerde warmte afgevoerd naar de drogerij.
- Na het aanbrengen van de nieuwe branderinstallatie is het gasverbruik per 1000 stenen met 15% gedaald.
- Door het overgaan van een handzetting op een machinale zetwijze is de produktie van de oven met 15% toegenomen. Het gasverbruik per 1000 stenen is daardoor niet veranderd.
- De rookgastemperatuur (en daarmee het schoorsteenverlies) is door de overgang op de machinale zetwijze zover gedaald, dat gevreesd moet worden dat in de schoorsteen condensatie van zwavelzuur optreedt.
- Het nieuwe brandersysteem heeft niet geresulteerd in een grote temperatuur-gelijkmatigheid in de inzet. Ook op grond van de gemeten gastemperaturen is op dit punt geen positieve uitspraak mogelijk.
- In het steenpakket komen grote verschillen in temperatuur voor. De grootste temperatuursverschillen treden op in de opwarmzône. Deze verschillen worden vooral veroorzaakt door de invloed van de relatief veel koudere ovenwagenvloer.
- De opwarm- en afkoelsnelheid verschilt voor verschillende punten in de steenstapel aanzienlijk. De aan de dwarsspleten grenzende stenen worden in het begin van de stookzône onderworpen aan opwarmheden van 150°C/h. In de koelzône worden voor deze stenen koelsnelheden van 120°C/h bereikt.
- Tijdens het sinteren bedragen de temperatuursverschillen in de inzet minstens 30°C.

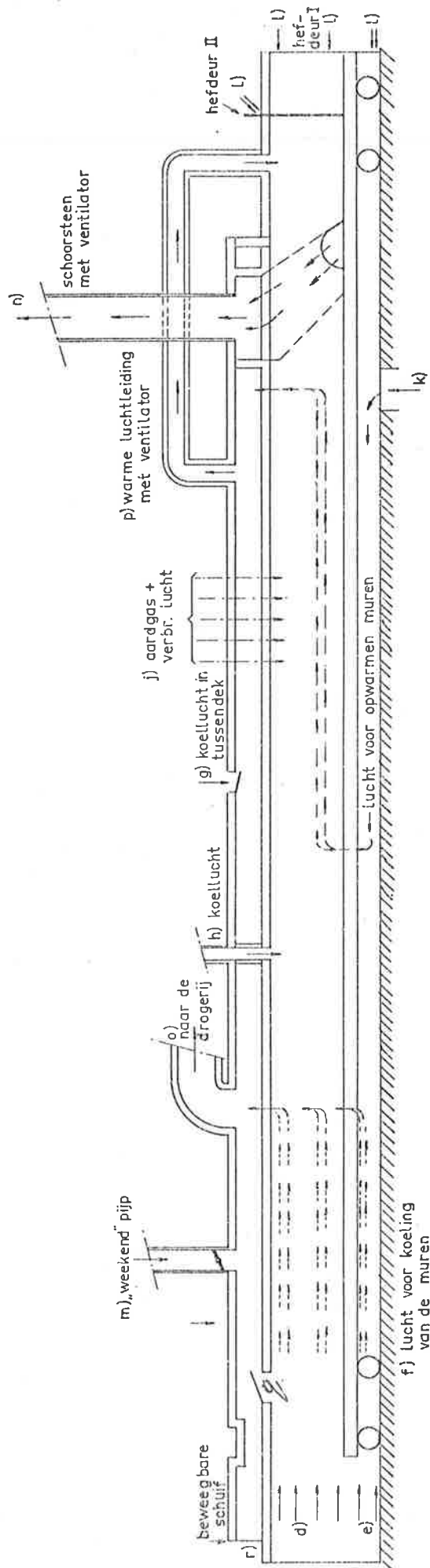
8. Literatuur.

1. Claus, ir.J. en Wentink, G.
Het warmte- en stromingstechnische gedrag van een vlamoven.
C.T.I.-TNO, Ref.nr.70-0615, Doss.nr.3572D-6412.
2. Claus, ir.J. en Wentink, G.
De warmtehuishouding van een vlamovenkamer.
C.T.I.-TNO, Ref.nr.71/0176, Doss.nr.3572F-2412.
3. v.d.Velden, J.H. en de Vries, A.H.
Beoordeling van de kwaliteit van het sinterproces in een tunneloven
vanuit keramisch-technisch gezichtspunt.
C.T.I.-TNO, Ref.nr.71-02628. Doss.nr.3572G-2412.
4. Claus, ir.J. en Wentink, G.
Het bepalen van de lucht- en rookgasstroming in steenovens met behulp
van een He-tracertechniek.
C.T.I.-TNO, Ref.nr.69-01275, Doss.nr.3038-6011.
5. v.d.Velden, J.H.
Onderzoek naar de invloed van baktemperatuur en aanhoudtijd op de
deformatie onder belasting tijdens het sinterproces.
C.T.I.-TNO, Ref.nr.70-03183, Doss.nr.3572K-6412.

Appendix.

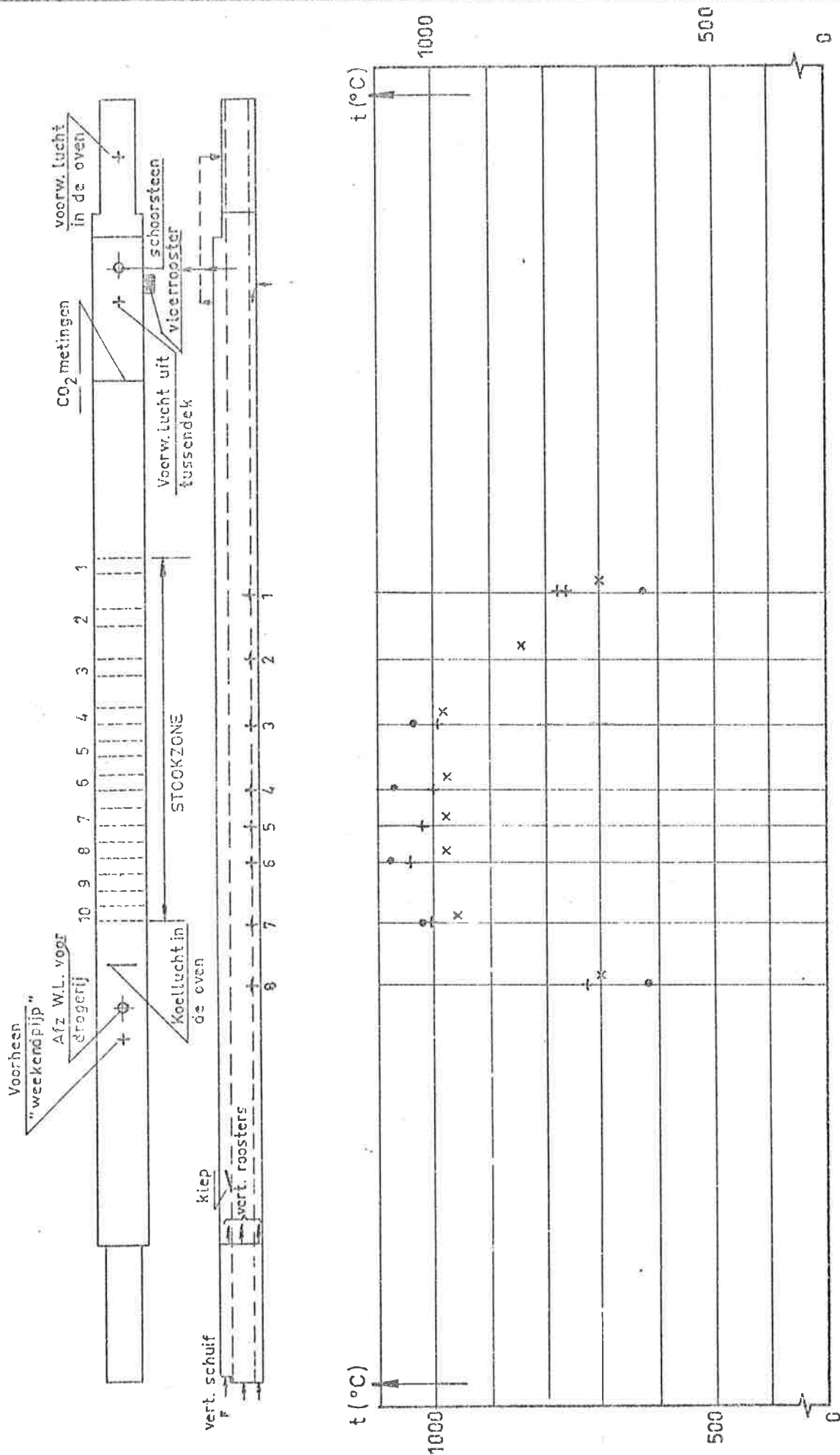
Gegevens Bavelse klei, ovenmeting Fa.Lust, Oosterhout-Z (gewichtsprocenten).

Kalk(CaO uit carbonaat)	14%
CO ₂	11%
humus	1,5%
chemisch gebonden H ₂ O	1,5%
fysisch " "	1,3%
restwater	0,8%



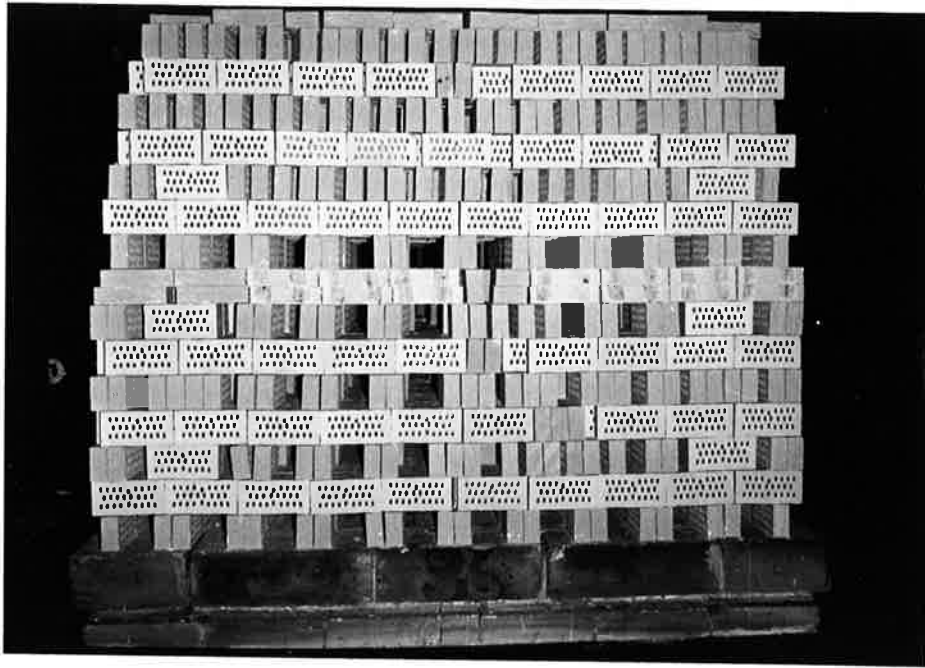
Schema tunneloven Fa. G. Lust te Oosterhout

CTI_TNO
 3572 G_2412
 Fig.1



Schema tunneloven op schaal 1 : 500
(+ verschillende temperaturen)

x opp. temp. steenstapeling tijdens 't verschuiven y/d wagens (gloeidraad pyr. m.)
 • gastemp. 15 cm binnen de wand
 + opp. temp. ovenwand (gloeidraad pyr.)



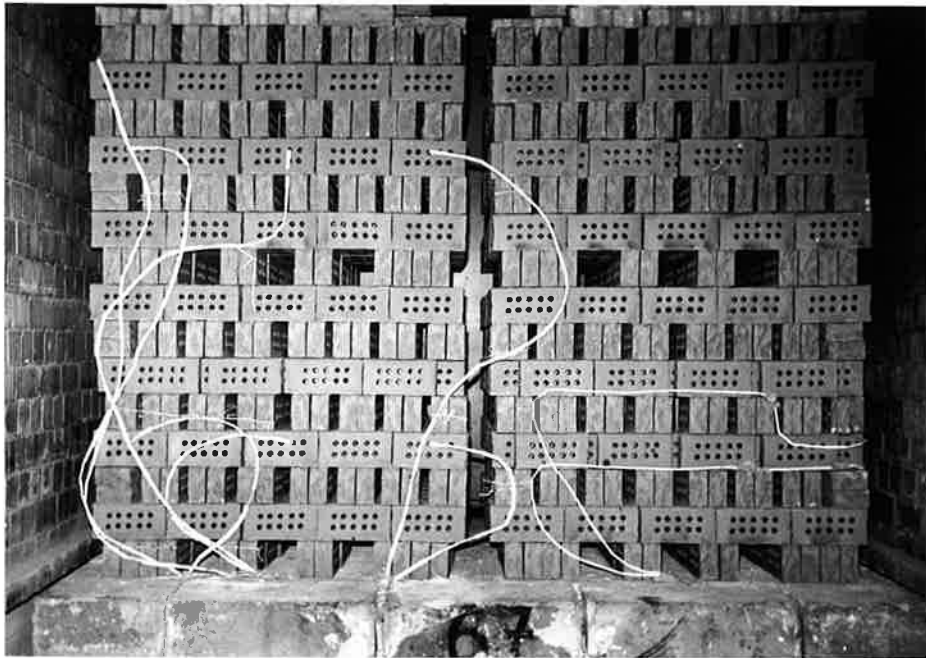
Vooraanzicht van de wagen



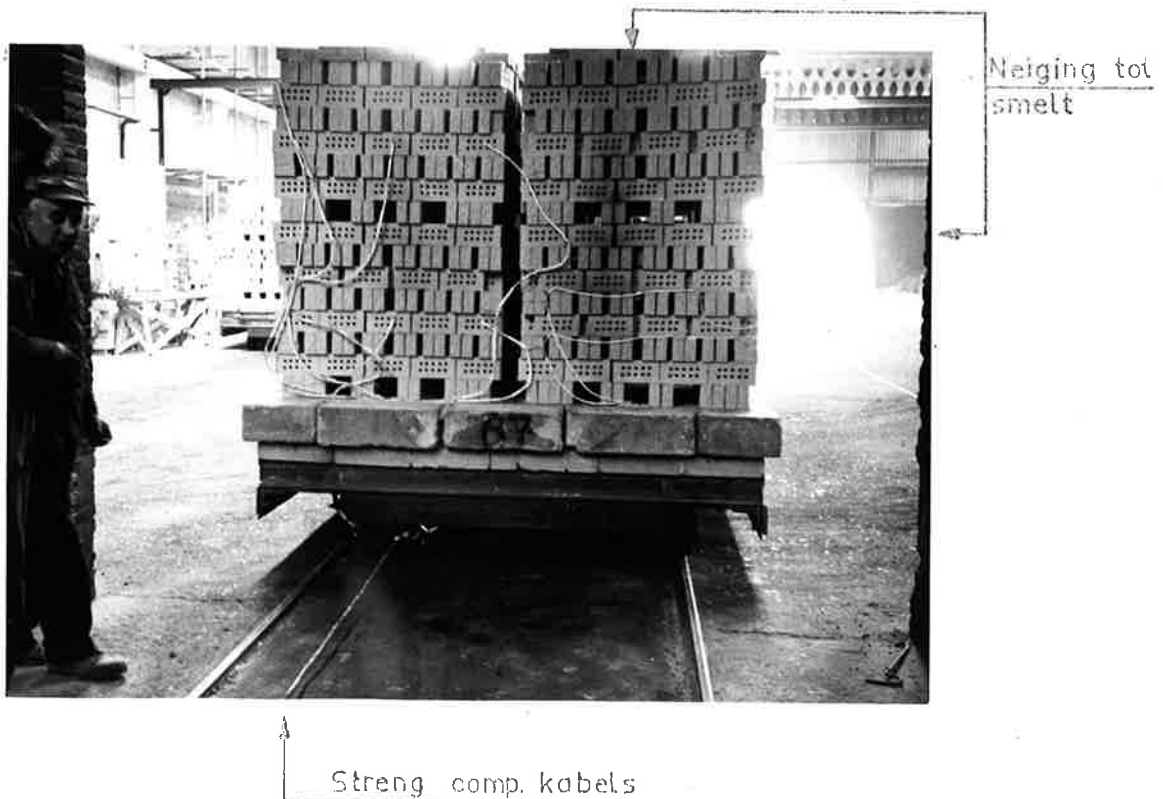
Zijaanzicht van de wagen

Steenstapeling bij A en B

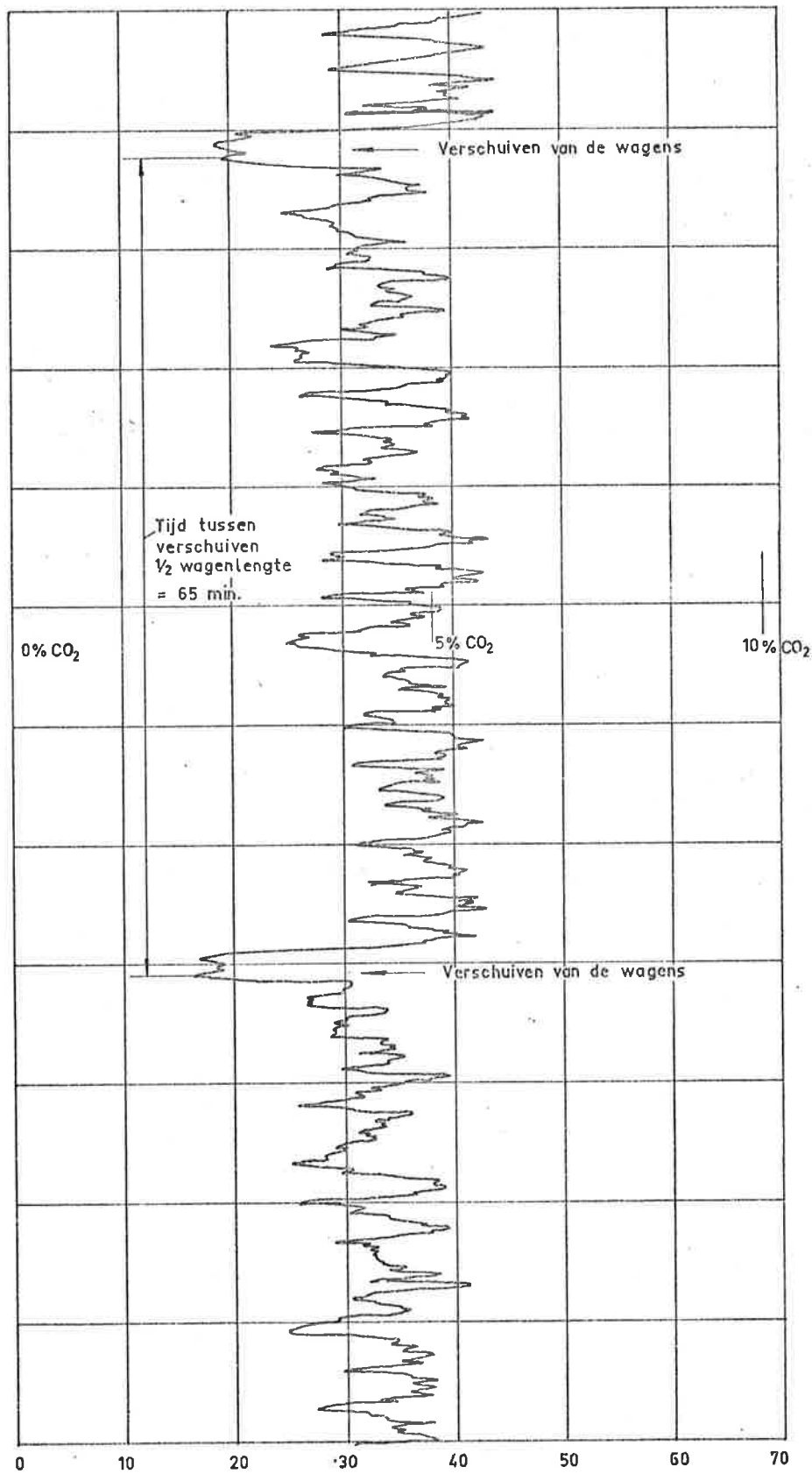
CTI - TNO
3572 G.2412
Fig. 3



Overzicht plaatsing thermokoppels (inrijden van de meetwagen in de oven)
en de wijze van stapelen (situatie C 2)



Uitrijden van de meetwagen uit de oven (situatie C 2)

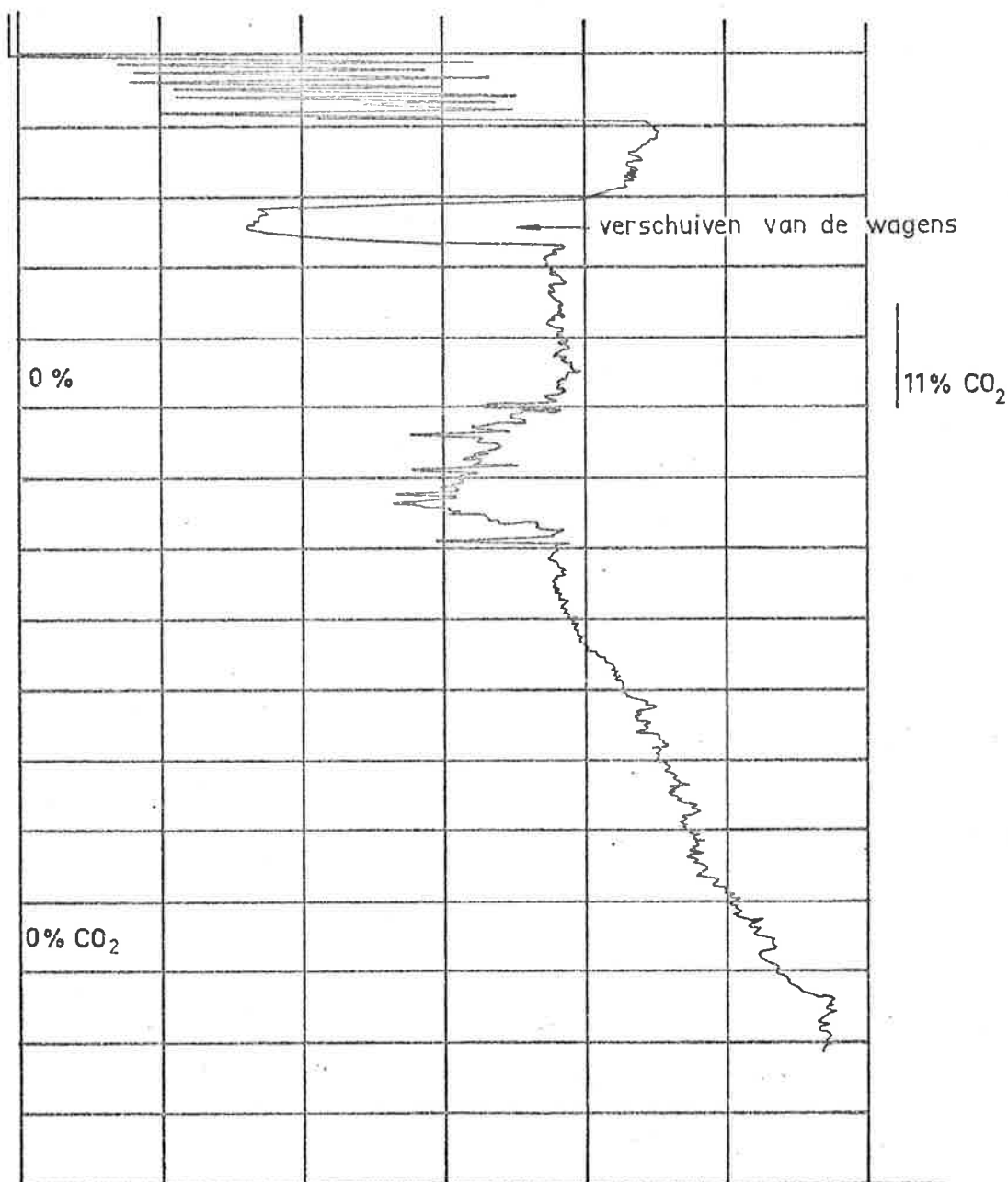


Verhouding:

- ca. 0,6 t.g.v. vormlingen
- ca. 0,4 t.g.v. aardgas

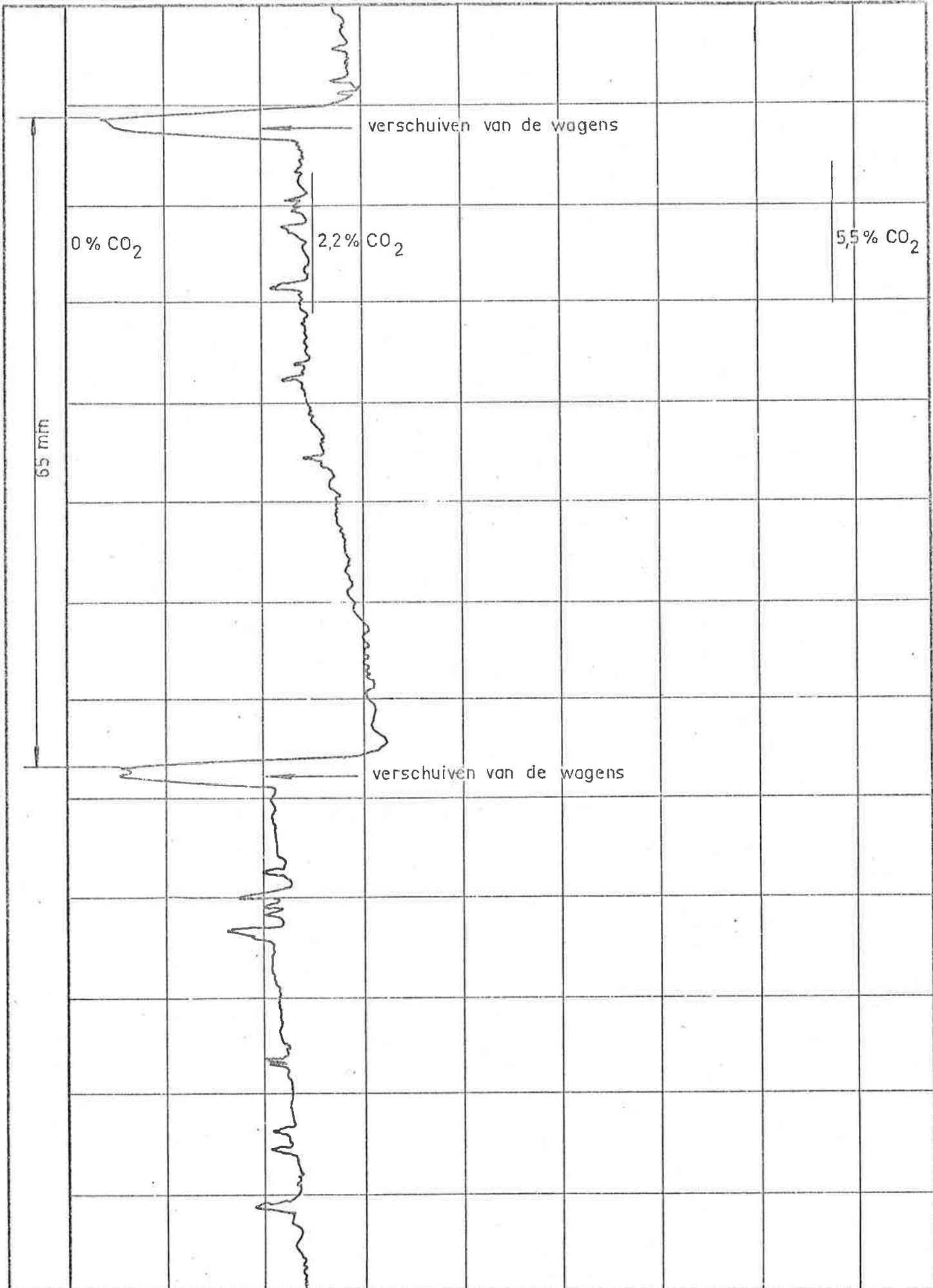
CO₂ in de oven (bedrijfsvoering A)

CTI_TNO
3572G_2412
Fig. 5



CO₂ in de oven (bedrijfsvoering B)

CTI - TNO
3572 G_2412
Fig. 6



CO₂ in de schoorsteen (situatie B)

CTI - TNO
3572 G_2412
Fig. 7

temperatuur (°C)

1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0

Maandag 26-4-'71
Dinsdag 27-4-'71
Woensdag 28-4-'71
Donderdag 29-4-'71

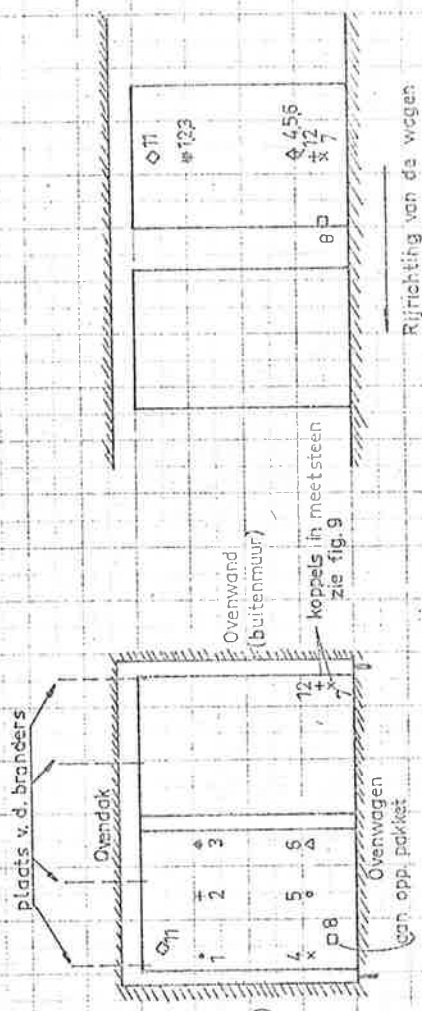
0 25 50 75 100 125 150 175

25, 70, 90
koppels 1 1/2 m 6
0,48 binnen de oven

15 m 10
wagen begin
nog 60 cm
binnen de
oven

Temperatures in steenpakket

CTL-TNO
35726-2412
Fig. 8



koellucht in de oven geblazen met ventilator

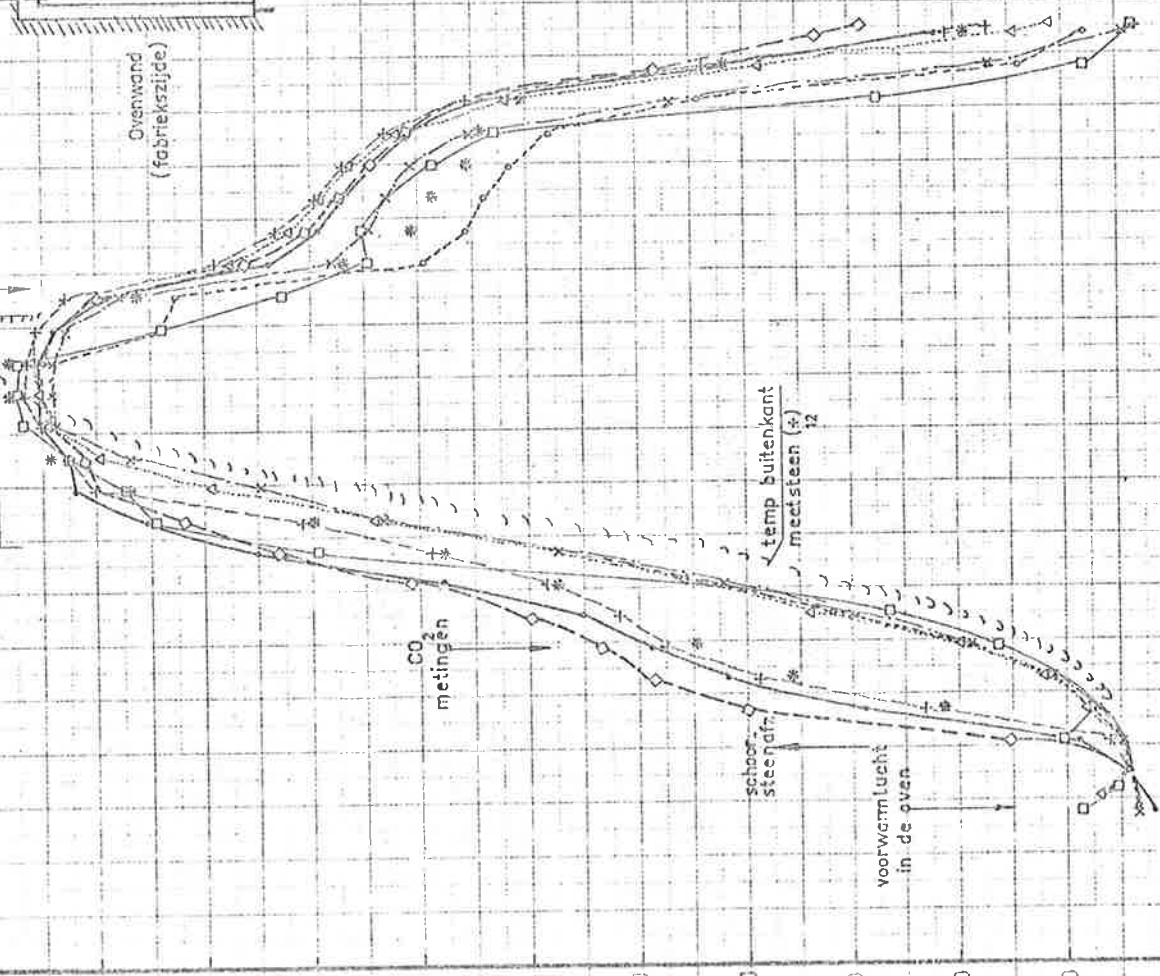
stookzone

metingen

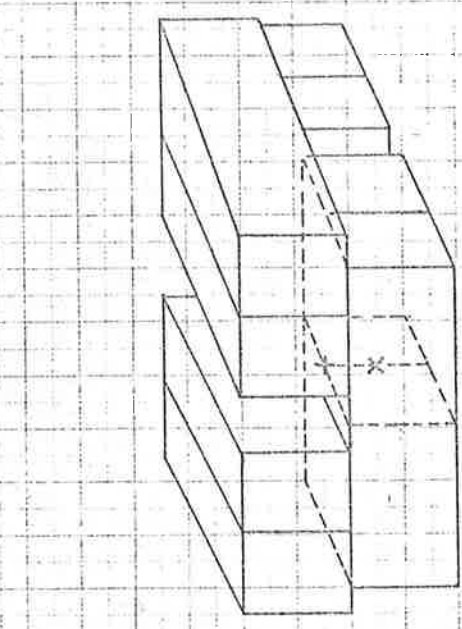
temp buitenkant meesteen (*)

schone steenaf

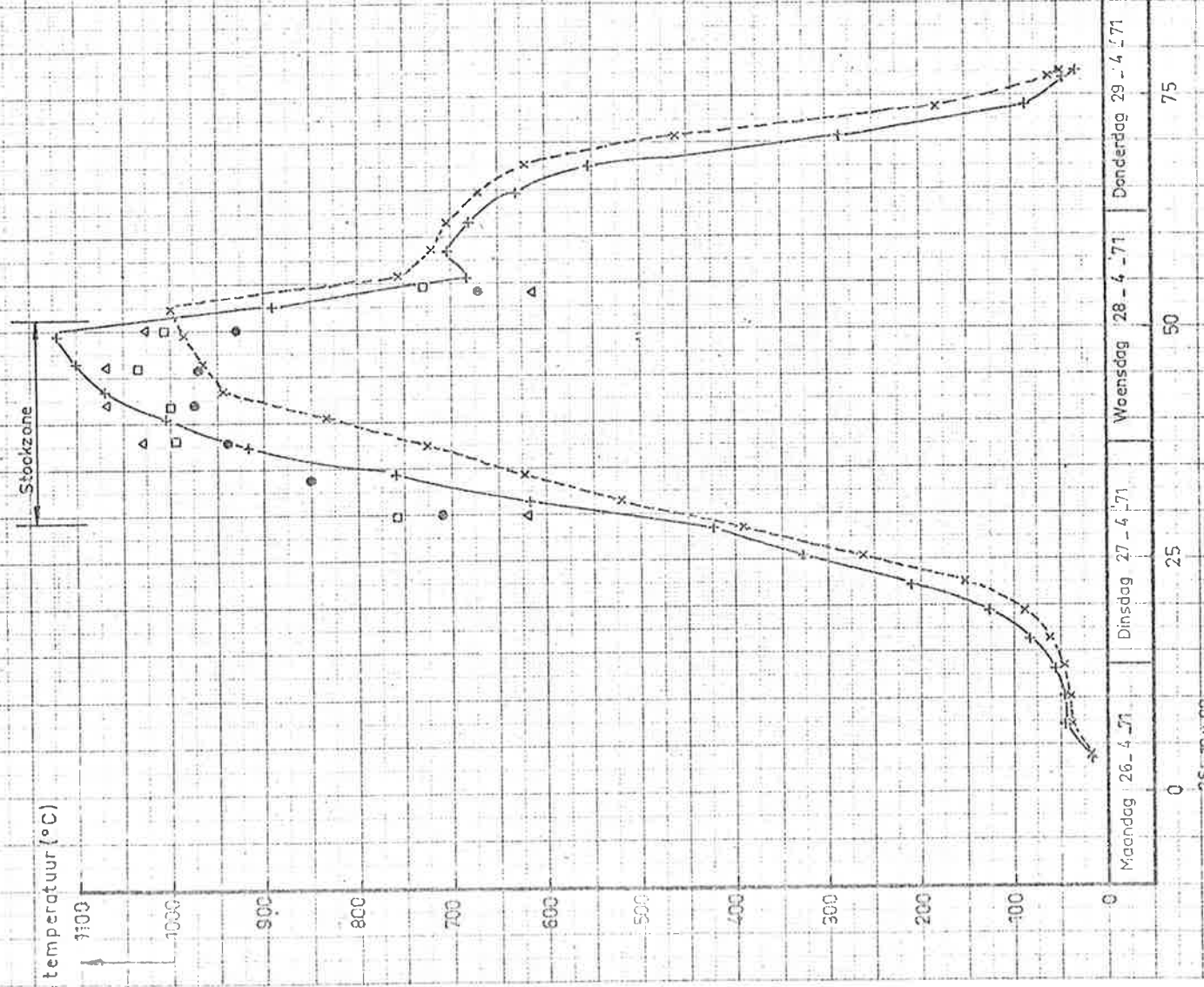
voorvermlucht in de oven



tijd (uren)



- + Temp. buitenkant meetstenen (12)
- x Temp. midden meetstenen
- Δ Gastemperatuur
- Opp. temp. steenpakket (gloeiraadpyr, m.)
- Opp. temp. ovenwand (gloeiraadpyr, m.)



Temperaturen buitenkant en midden meetsteen

CTI-TNO
35726-2412
Fig. 3

temperatuur (°C)

1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0

Maandag 26.12.71 Dinsdag 27.12.71 Woensdag 28.12.71 Donderdag 29.12.71

0 25 50 75 100 125 150 175

26 10 00

tijd (uren)

Bovenkant van de wagen

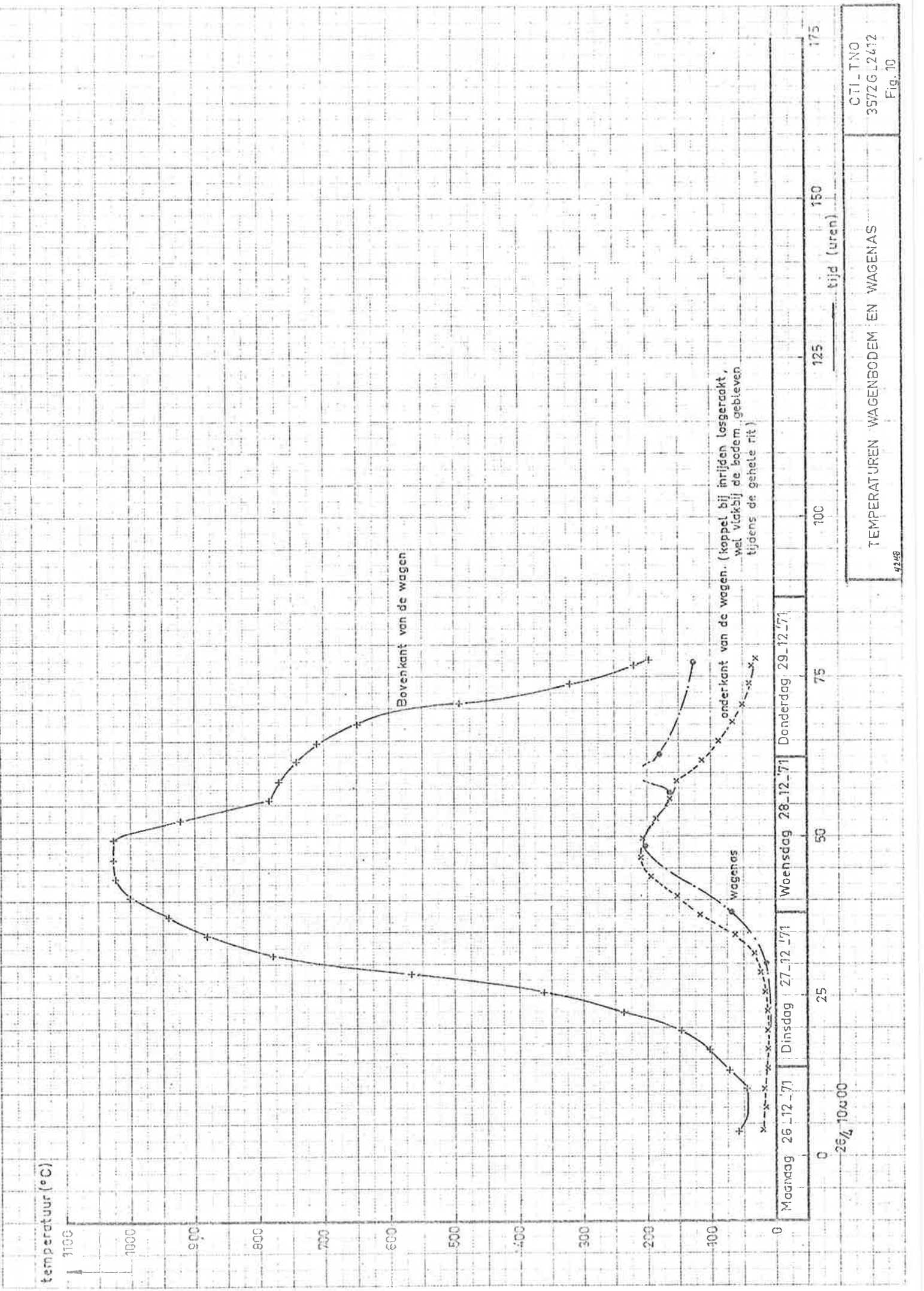
onderkant van de wagen. (koppel bij inrijden losgeraakt, wel vlakbij de bodem gebleven tijdens de gehele rit)

wagenas

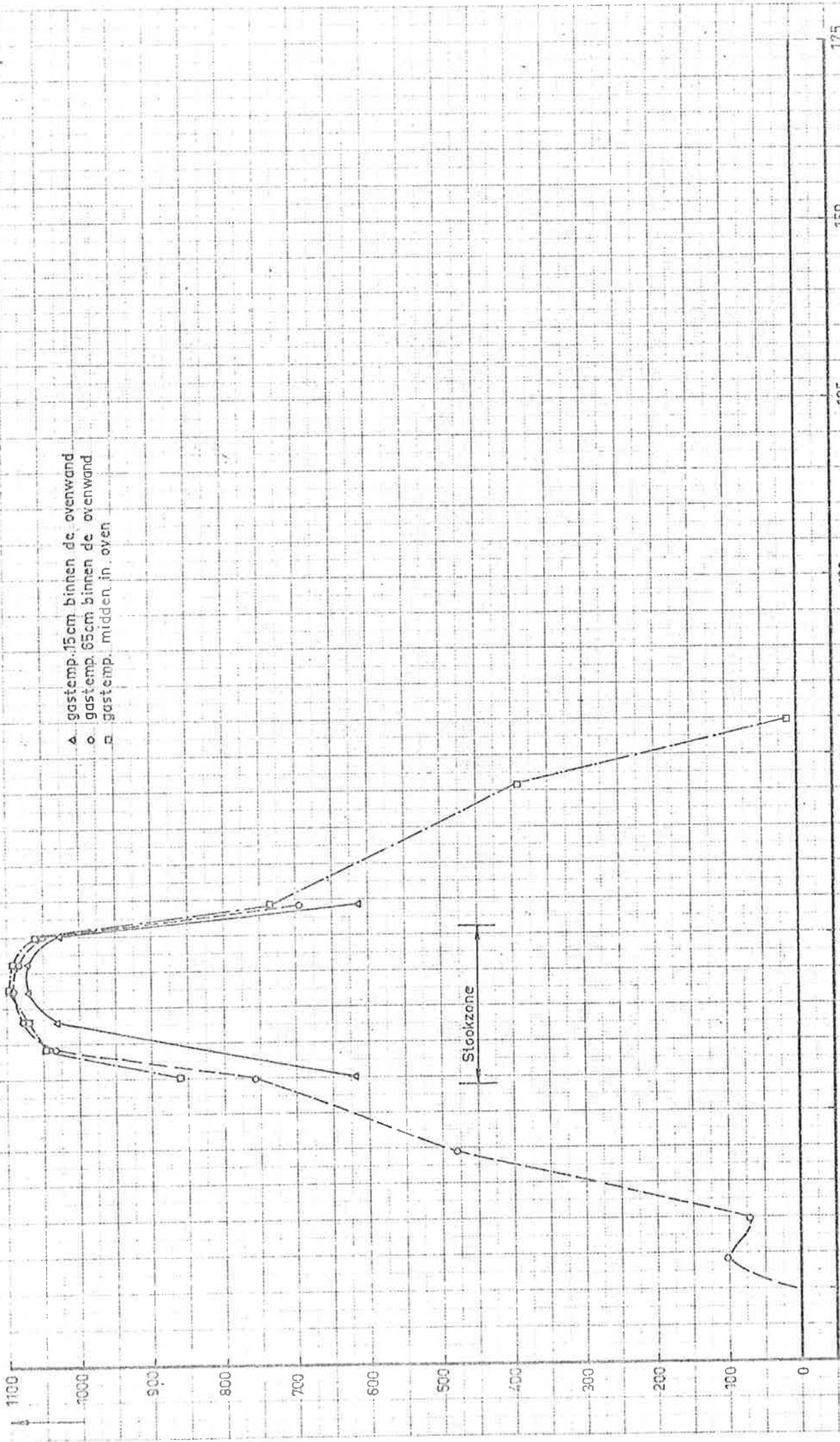
CTI_TNO
35726 L2412
Fig. 10

TEMPERATUREN WAGENBODEM EN WAGENAS

4298



temperatuur (°C)

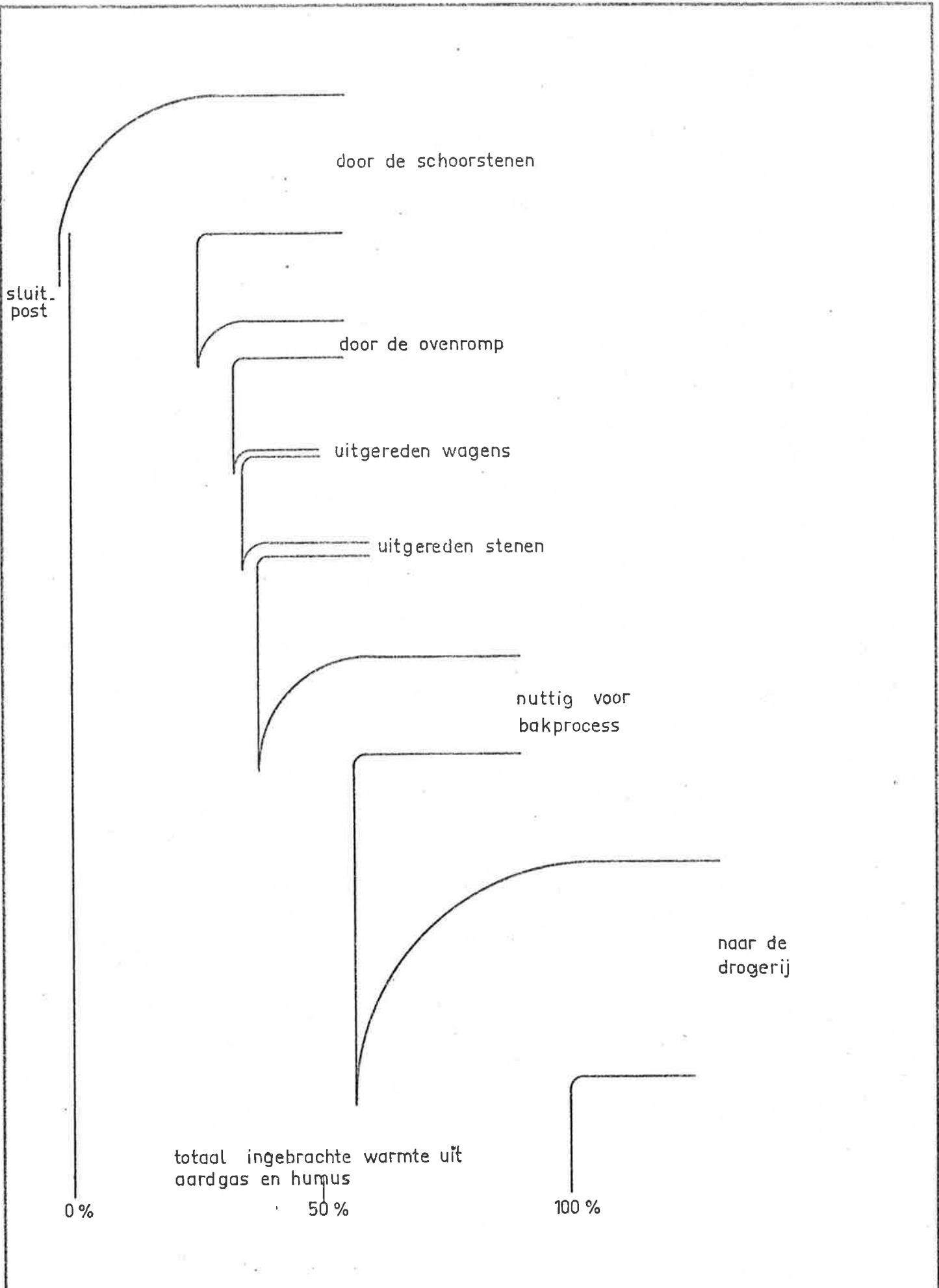


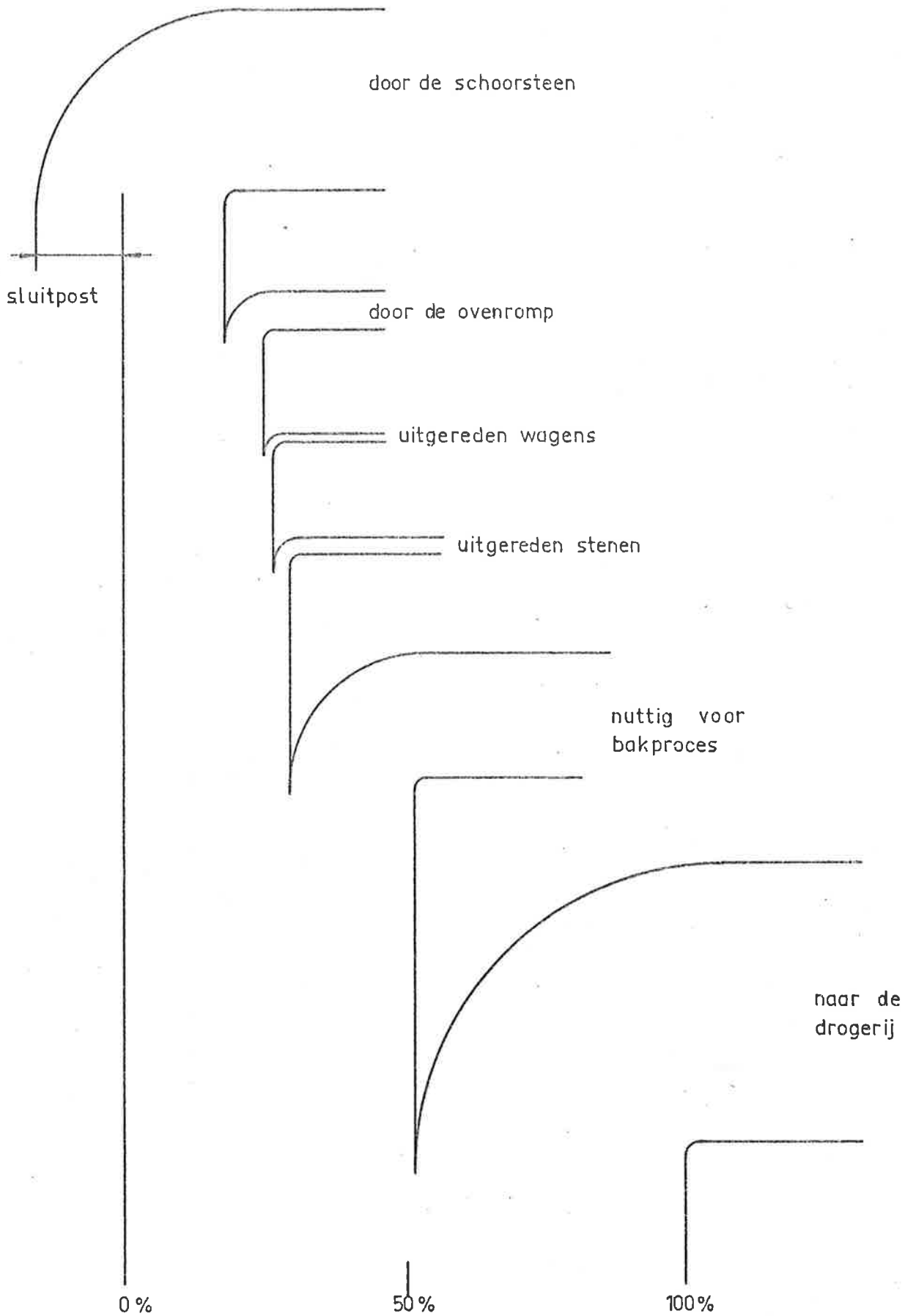
- ▲ gastemp. 15cm binnen de ovenwand
- gastemp. 65cm binnen de ovenwand
- gastemp. midden in oven

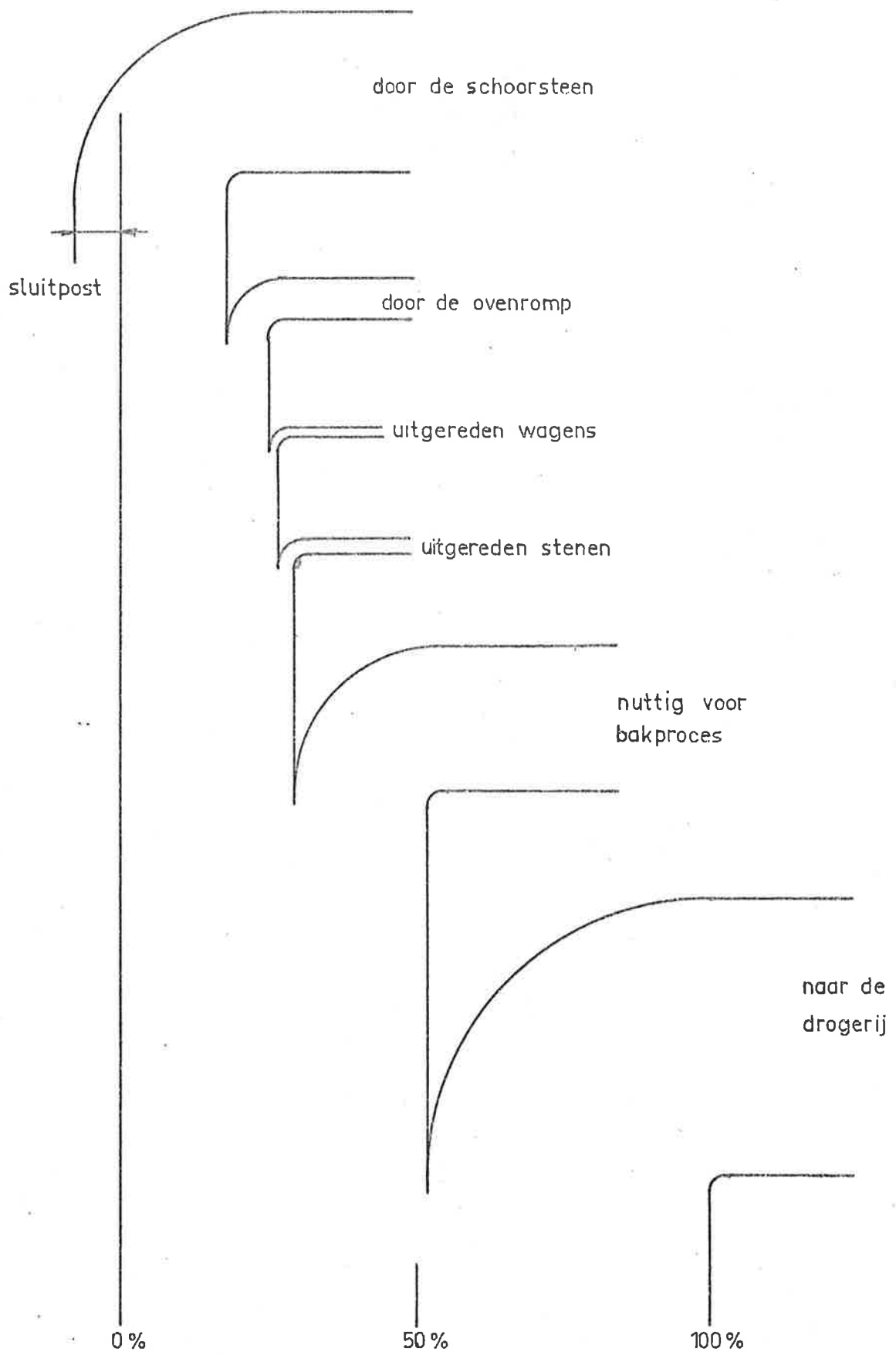
Stookzone

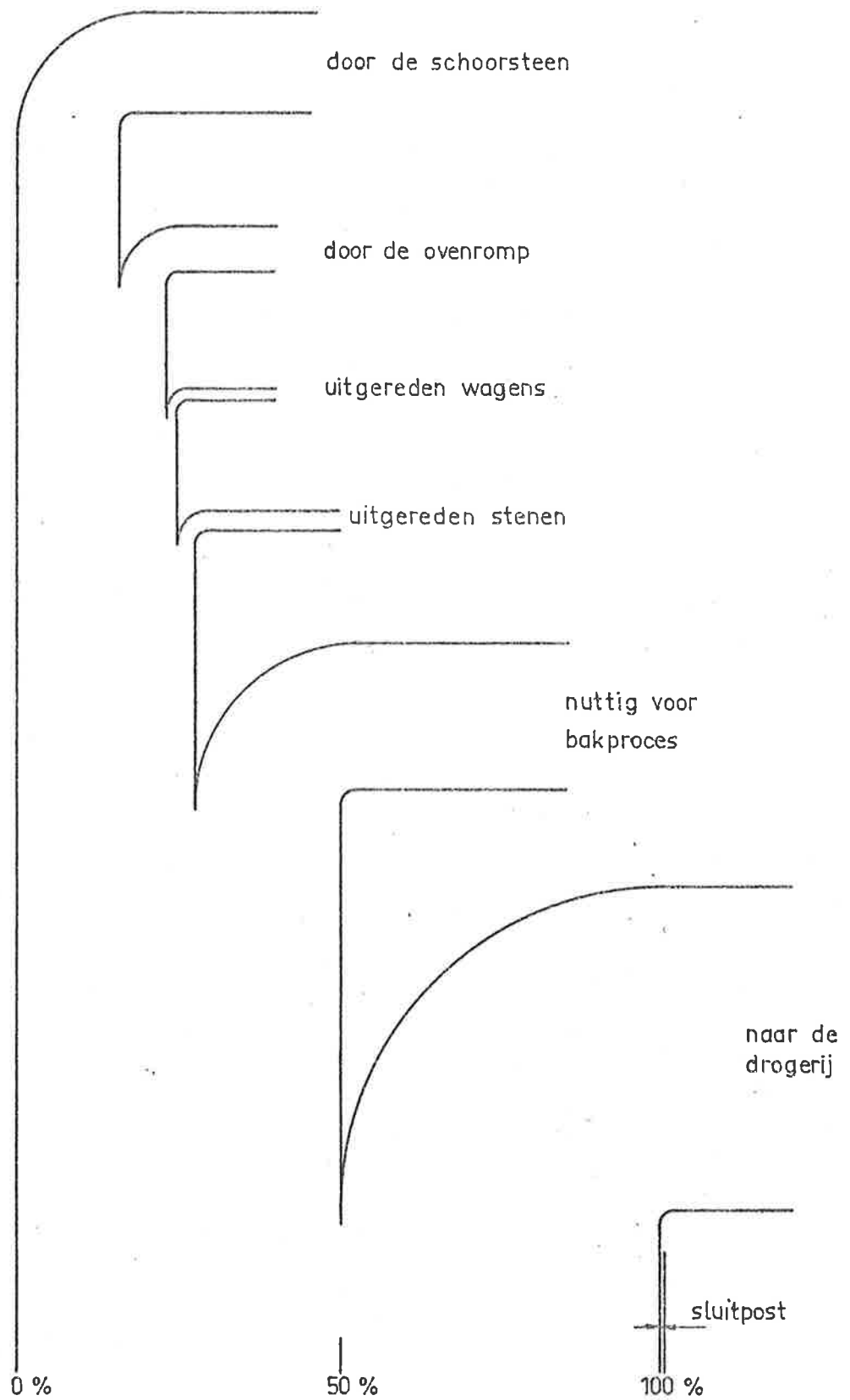
CTL-TNO
35726:2412
Fig. 11

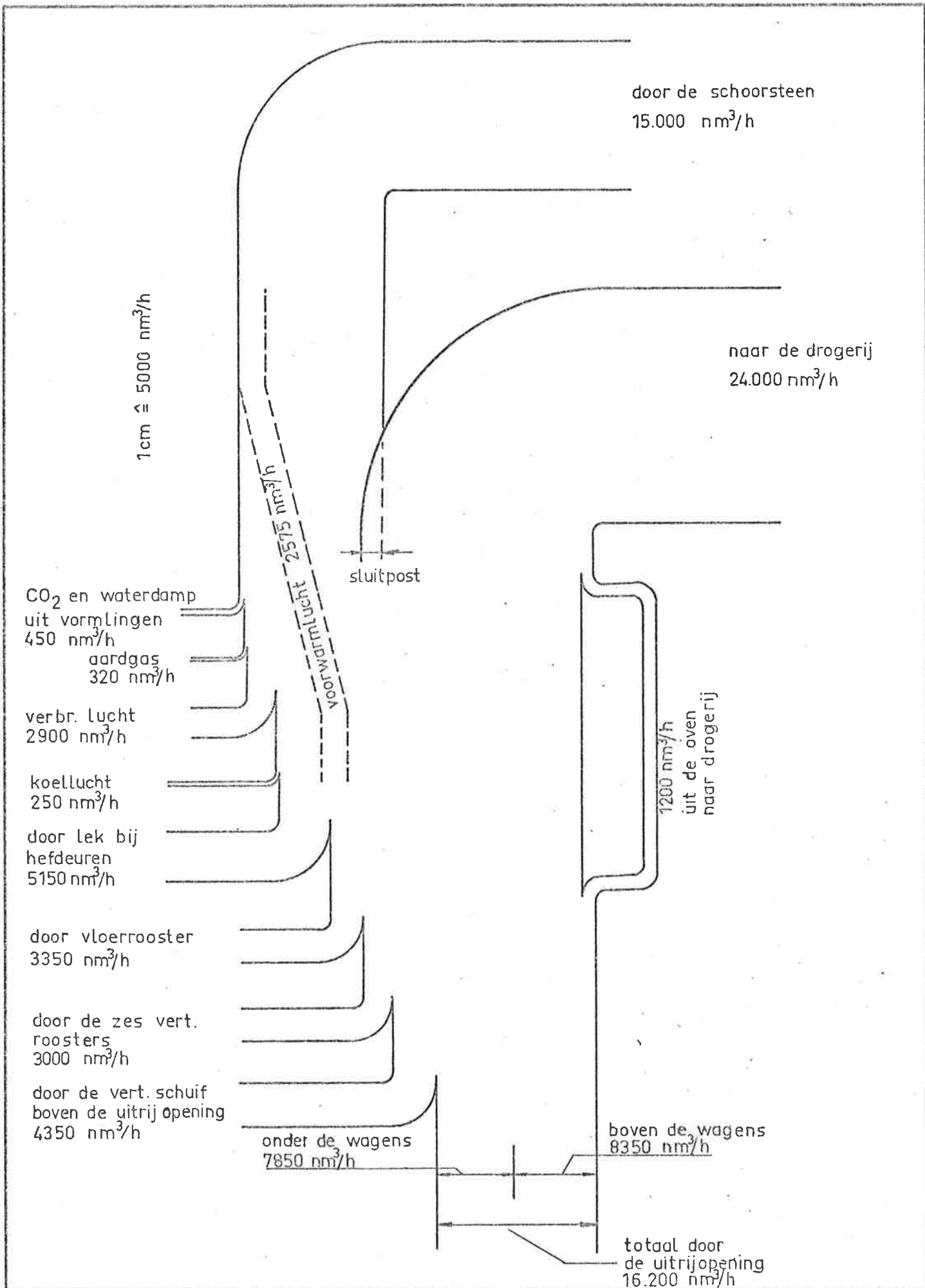
GASTEMPERATUREN IN DE OVEN

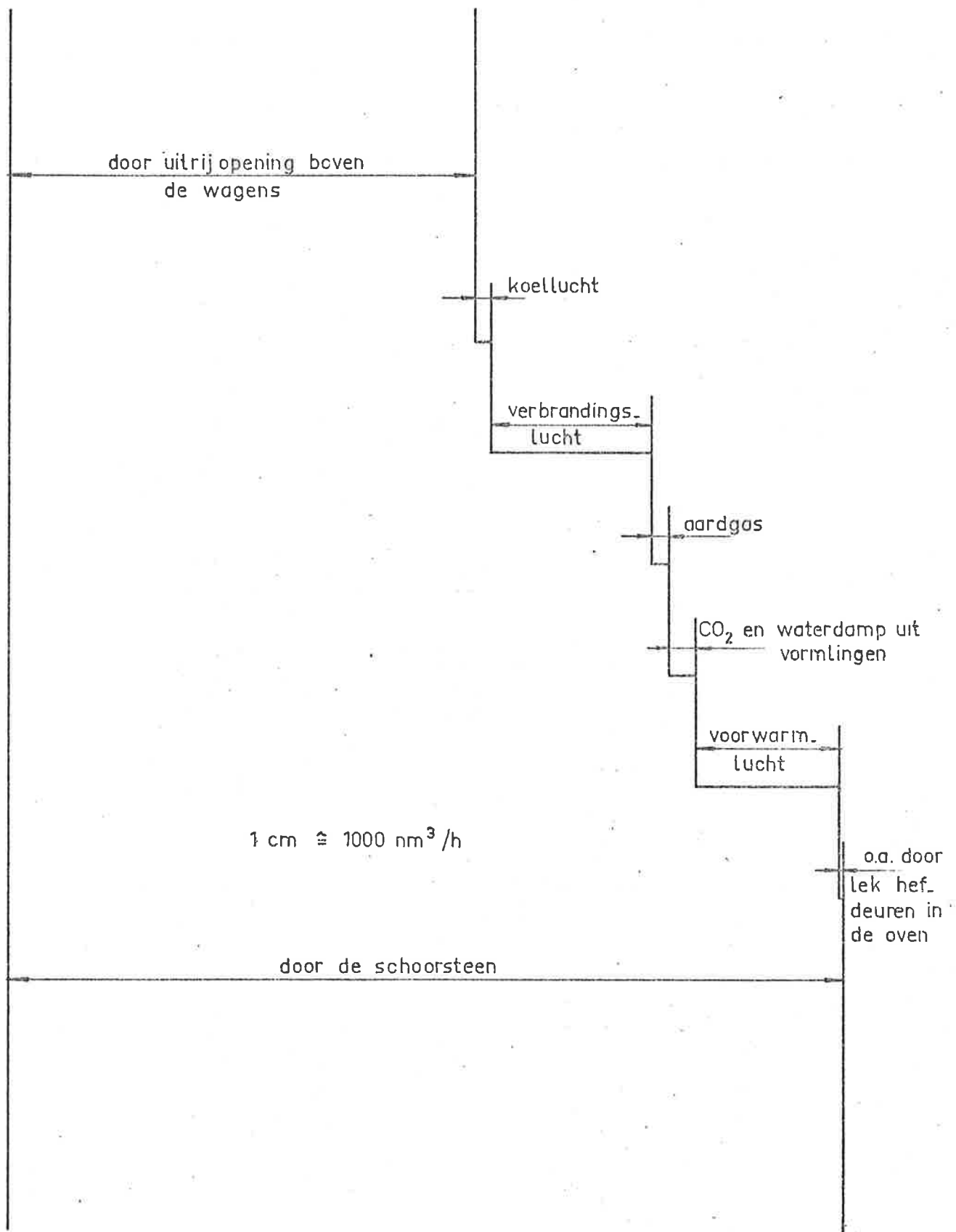






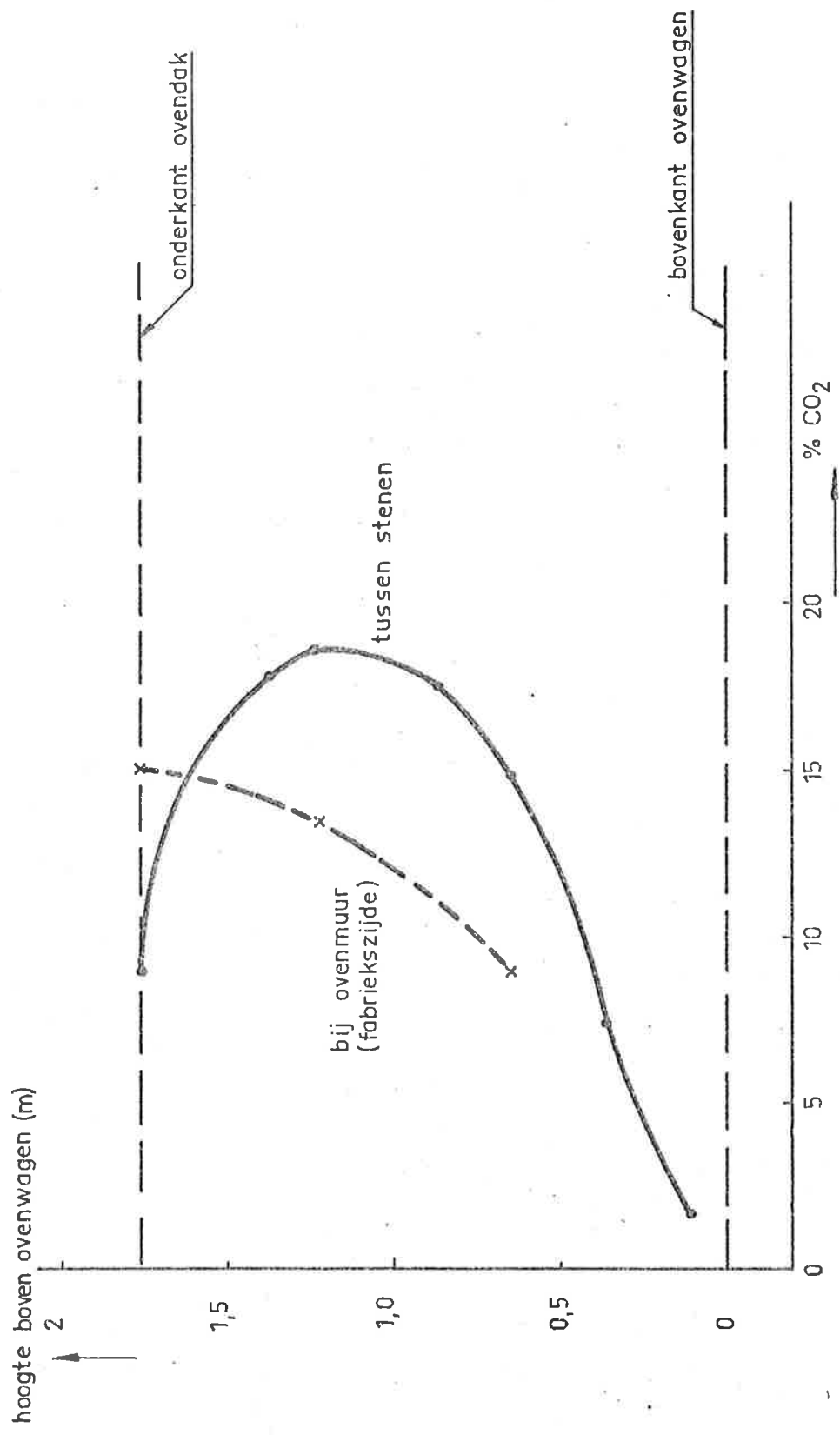






De door de oven stromende gashoeveelheid (sit. C 2)

CTI - TNO
3572 G. 2412
Fig. 17



CO₂ - concentraties in de oven

CTI - TNO
3572 G_2412
Fig. 18