

CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 71/0176

Dossier: 3572F-2412

RAPPORT

De warmtehuishouding
van een vlamovenkamer

Ir. J. Claus

G. Wentink

Datum : Maart 1971

Bestemd voor: De Nederlandse Grofkeramische Industrie

INHOUDSOPGAVE

1. SAMENVATTING

2. INLEIDING

3. DE BEREKENING

3.1 De bepaling van de effectieve temperatuursvereffenings-
coëfficiënt

3.2 Het computer programma

4. DE WARMTEBALANS

5. BESPREKING VAN DE RESULTATEN

6. CONCLUSIE

7. SLOTBESCHOUWING

8. LITERATUUR

9. SYMBOLENLIJST

APPENDIX

Tabellen 1 t/m 13

Figuren 1 t/m 10

1. SAMENVATTING

Dit rapport bevat de resultaten van een berekening van de warmtehuishouding in een kamer van een moderne met gasgestookte vlamoven.

Met behulp van een experimenteel bepaalde temperatuurvereffeningscoëfficiënt van de inzet, werd de warmteopname van de inzet berekend.

Voor die ovenkamers waarin gedurende de rondbrand door het regelen van de gastoevoer een uniforme temperatuur wordt ingesteld (stookkamers), werd een goed sluitende warmtebalans opgesteld. Voor de opwarmkamers en de afkoelkamers gelden de berekende waarden voor dat stuk van de kamer waar de randinvloeden kunnen worden verwaarloosd.

Door een onderlinge vergelijking van de warmtestromen naar de inzet en de verschillende ovenonderdelen, kon een dieper inzicht in de warmtehuishouding van de ovenkamer worden verkregen.

2. INLEIDING

In het kader van het speurwerk voor de Nederlandse Grofkeramische Industrie is een uitgebreide meting verricht aan een moderne met gasgestookte vlamoven. De opzet van de metingen was een zo volledig mogelijk beeld te geven van wat zich in de vlamoven afspeelt zodat een analytische beschrijving van het ovenproces mogelijk zou worden.

Het onderzoek is in eerste instantie gericht geweest op het bepalen van de warmte- en stromingstechnische eigenschappen van de vlamoven als geheel. De resultaten van deze studie zijn weergegeven in het verslag "Het warmte- en stromingstechnische gedrag van een vlamoven" (1).

In aansluiting op deze studie zijn een aantal berekeningen uitgevoerd waarmee dieper is ingegaan op de warmteoverdracht in een ovenkamer. In dit soort berekeningen dient het niet-stationaire gedrag van de steenstapeling, de ovenwanden, de vloer, het dak etc. te worden betrokken.

In dit verslag zal nader op deze berekening worden ingegaan voor zover het de resultaten betreft die voor het opstellen van de warmtebalans van de ovenkamer van belang zijn.

3. DE BEREKENING

In de berekening van de warmtebalans van de ovenkamer dient rekening te worden gehouden met het niet-stationaire gedrag van de kamer en de inzet.

De berekening van de doorwarming van een steenstapel of van de ovenwanden kan slechts voor zeer eenvoudige opwarm- of afkoelkrommen analytisch worden berekend en dan alleen wanneer wordt aangenomen dat de stofconstanten tijdens het proces constant zijn.

In de praktijk zal zelden een stookcurve worden aangetroffen die op eenvoudige wijze analytisch kan worden beschreven. Een analytische aanpak van het niet-stationaire gedrag is dan onmogelijk. In een dergelijk geval zal gebruik kunnen worden gemaakt van de zogenaamde differentierekening. Bij deze methode wordt de differentiaal-vergelijking van Fourier omgevormd tot een differentie-vergelijking waarvan de oplossing langs numerieke weg kan worden bepaald. Een groot voordeel van deze methode is, dat de variatie van de stoffeigenschappen met de temperatuur in de berekening kan worden verwerkt. Bij het berekenen van het thermisch gedrag van de kamer en de inzet is van deze rekenmethode gebruik gemaakt. Hoewel deze methode in de literatuur is beschreven (2) (3) (4) leek het zinvol om, aangezien met deze berekeningsmethode een groot aantal berekeningen is uitgevoerd de uitgangspunten van de berekening kort te resumeren. Voor dit resumé zij verwezen naar Appendix I.

Een vereiste voor de berekening is, dat de stoffeigenschappen van de diverse materialen die in de oven worden toegepast, in formule worden gebracht.

De volgende formules werden opgesteld (3) (4):

Vuurvaste stenen van ovendak, vloer en tussenmuur

$$\lambda = 0,67 + 0,00026 \theta \quad \text{kcal/m h}^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = 0,78 + 0,0003 \theta \quad \text{kJ/m s K}$$

$$C = 0,19 + 0,000155 \theta \quad \text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$C = 0,795 + 0,00065 \theta \quad \text{kJ/kg K}$$

$$\rho = 1800 \quad \text{kg/m}^3$$

Zandvulling van ovendak en vloer

λ	= 0,24 + 0,00075 ϑ	kcal/m h ^o C
λ	= 0,28 + 0,00085 ϑ	kJ/m s K
C	= 0,21	kcal/kg ^o C
C	= 0,88	kJ/kg K
ρ	= 1500	kg/m ³

Voor het warmtetransport door de luchtspouw in de ingemetselde poort werd uit de metingen een effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt berekend, deze bedroeg:

λ	= 0,024 + 0,000153	kcal/m h ^o C
λ	= 0,028 + 0,000178	kJ/m s K

Over de grootte van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de inzet kon in de literatuur geen informatie worden verkregen. Alleen de gegevens over de warmtegeleidingscoëfficiënt van gereede keramische producten waren in de literatuur voorhanden. Aangezien tijdens het bakproces ongetwijfeld veranderingen in de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bakken- de steen optreden kan in de berekening niet van een voor een gereed product bepaalde warmtegeleidingscoëfficiënt worden uitgegaan. Ten einde een indruk te krijgen van het verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt tijdens het bakproces werd een meting uitgevoerd waarmee de effectieve temperatuursvereffeningscoëfficiënt van de steen tijdens het bakken werd bepaald.

3.1 De bepaling van de effectieve temperatuursvereffeningscoëfficiënt

Bij het bepalen van de effectieve temperatuurvereffeningscoëfficiënt werd als volgt te werk gegaan:

In een volledig automatisch gestookt gasoventje werd een pakket vormlingen geplaatst van 0,66 m lang x 0,66 m hoog. De breedte bedroeg 1 steenlengte dus 0,22 m. In het pakket werden tijdens de 1^e bakproef in 2 vormlingen op regelmatige afstanden thermokoppels aangebracht (zie fig. 1). Bovendien werden aan de buitenkant van de "meetstenen" thermokoppels aangebracht.

Voor de 2^e en 3^e bakproef werd met één "meetsteen" volstaan.

Bij het opstoken van de oven warmt het koppel aan de buitenzijde van de steen eerder op dan dat midden in de steen. Op een bepaald tijdstip zal er dus een temperatuurverloop door de steen zijn zoals bijvoorbeeld weergegeven is in fig. 2. De temperatuursverschillen in de steen worden bij het verder opwarmen steeds kleiner en zullen tijdens het aanhouden bij de maximale temperatuur vrijwel geheel verdwijnen. Het temperatuurverloop in de steen wordt bepaald door de warmtegeleidingscoëfficiënt, de soortelijke warmte en de dichtheid van de steen. Des te hoger de warmtegeleidingscoëfficiënt is, des te sneller zal de warmte in de steen doordringen en des te kleiner zal het temperatuurverschil tussen de buitenkant en het midden van de steen zijn.

Met een voor een vlakke plaat opgesteld computerprogramma kan, wanneer de stofeigenschappen bekend zijn, de warmteindringing in de steen worden berekend. Dit computerprogramma kan echter ook worden gebruikt om de temperatuurvereffeningscoëfficiënt uit de gemeten temperaturen te berekenen. Wanneer het soortelijke gewicht en de soortelijke warmte van de vormling resp. gebakken steen bekend zijn, kan dan tevens de warmtegeleidingscoëfficiënt worden bepaald. Het soortelijk gewicht van de vormling resp. gebakken steen is eenvoudig te bepalen. Voor de klei die tijdens de metingen in Druten werd gebruikt, bedroeg deze 1880 resp. 1500 kg/m³. Hoe tijdens het bakken het verloop tussen deze twee waarden zal zijn is niet vastgesteld. De invloed van het soortelijk gewicht op de grootte van de warmtegeleidingscoëfficiënt is echter klein. Voorlopig is daarom een rechtlijnig verloop tussen deze twee waarden aangenomen. (De soortelijke gewichten werden bij omgevingstemperatuur vastgesteld; de volumeverandering t.g.v. de temperatuur is dus verwaarloosd). De tweede veranderlijke grootte, de s.w., werd uit literatuur overgenomen (fig. 3).

Uit 3 bakproeven met dezelfde klei die tijdens de vlamovenmeting werd gebruikt, werd de "effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt" bij verschillende temperaturen bepaald. Van de derde bakproef, waarbij twee thermokoppels in de meetsteen waren aangebracht, zijn de gemeten temperatuurcurves weergegeven in fig. 4.

Deze figuur illustreert de veranderingen in de warmtegeleidingscoëfficiënt. Het elkaar naderen en later verder uiteenlopen van de temperaturen gemeten aan de buitenkant en in het midden van de steen is een gevolg van variaties in de warmtegeleidingscoëfficiënt of een gevolg van geheel andere invloeden zoals het uitdrijven van het adsorptiewater, het uitdrijven van het chemisch gebonden water en de verbranding van de humus.

Het verloop van de berekende effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt en de temperatuurvereffeningscoëfficiënt tijdens de bakproeven is weergegeven in fig. 5. Beide waarden zijn uitgezet als functie van de gemiddelde temperatuur tussen de buitenkant en het midden van de steen. In de grafiek zijn de temperatuurgebieden ingetekend waarin zich de verschillende fysische en chemische processen in de steen afspelen.

Het grillige verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt kan met deze processen als volgt worden verklaard:

Bij het begin van de rondbrand verdwijnt het fysisch gebonden water uit de vormlingen. Dit heeft tot gevolg dat de warmtegeleidingscoëfficiënt na enige tijd teruggelopen is van 0,73 tot 0,6 kcal/m h^oC (0,85-0,7 kJ/m s K). Na ± 300^oC worden door de verbranding van de humus in de steen de temperatuurverschillen tussen het oppervlak en het hart geringer. Dit resulteert in een stijging van de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt tot een maximum waarde van ongeveer 0,85 kcal/m h^oC (0,99 kJ/m s K).

Tussen 500^oC en 600^oC verdwijnt het chemisch gebonden water uit de steen. Dit heeft tot gevolg dat de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt tot 0,4 kcal/m h^oC (0,465 kJ/m s K) daalt. Daarna neemt de warmtegeleidingscoëfficiënt weer toe door de grotere stralingsinvloed op het warmtetransport bij deze hoge temperaturen. De indruk bestaat dat tijdens het warmte-vragende proces van de CaO-vorming (tussen 650^oC en 800^oC) de toename in de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt tijdelijk minder is.

Bij 1000^oC bereikt de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt de waarde 1,05 kcal/m h^oC (1,22 kJ/m s K). Deze waarde stemt goed overeen met de in de literatuur voor deze temperatuur vermelde

waarden (3)(5).

Voor temperaturen boven de 1000°C is de toegepaste bepalingmethode niet meer geschikt. Door het aanhouden van de oven worden de temperatuurverschillen dan zo gering, dat een voldoende nauwkeurige bepaling van λ niet meer mogelijk is.

Voor het temperatuurgebied van $1000-100^{\circ}\text{C}$ zijn in figuur 5 de in de literatuur voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van steen opgegeven waarden opgenomen.

Het verloop van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt met de temperatuur vertoont eenzelfde beeld als het verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt. Doordat de temperatuurvereffeningscoëfficiënt een combinatie is van de soortelijke warmte, de warmtegeleidingscoëfficiënt en de dichtheid, zal, teneinde eventuele onzekerheden in de waarde van de soortelijke warmte en de dichtheid te voorkomen, in de berekeningen bij voorkeur van deze temperatuurvereffeningscoëfficiënt gebruik moeten worden gemaakt. Bij het uitvoeren van berekeningen is het niet altijd nodig om het grillige verloop van de vereffeningscoëfficiënt nauwkeurig te volgen. Wanneer het er bijvoorbeeld om gaat om de temperatuurverdeling en de temperatuurgradiënt tijdens de sintering te kennen, zal bij de berekening van deze waarden kunnen worden uitgegaan van een verdeling en een gradiënt die is berekend met een gemiddelde temperatuurvereffeningscoëfficiënt in het gebied van 20 tot 800°C .

Wat betreft de experimentele bepaling van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt dient nog het volgende te worden opgemerkt.

- a. De bepaling is uitgevoerd bij een stapelwijze zoals in fig. 1 is aangegeven. In ieder geval zal nog een meting bij een andere stapelwijze moeten worden gedaan om vast te stellen of de in figuur 5 weergegeven relatie ook voor andere steenstapelingen mag worden toegepast.
- b. De bepaling is een tijdrovende zaak. Het zal nuttig zijn na te gaan of het rechtstreeks bepalen van de warmtegeleidingscoëfficiënt met behulp van bijvoorbeeld de niet-stationaire methode sneller tot resultaten voert.

3.2 Het computerprogramma

Voor de berekening van de warmteoverdracht in de steen, de ovenwanden, de ovenvloer en het ovendak werd een computerprogramma opgesteld.

Hiermee werden, om na te gaan of de berekende temperaturen met de gemeten waarden overeenstemden, eerst temperaturen in de diverse onderdelen van de oven berekend.

De figuren 6, 7 en 8 laten zien dat de met het programma berekende temperaturen en de gemeten temperaturen goede overeenstemming vertoonden, zodat kon worden geconcludeerd, dat het opgesteld computerprogramma voldeed.

Het computerprogramma werd opgesteld voor een geschematiseerde doorsnede van de vlamovenkamer. Hierbij werd het gewelf benaderd door een plat dak, terwijl de tussenmuur zodanig verhoogd werd, dat de hoogte van de aldus gevormde rechthoekige doorsnede overeenkwam met de gemiddelde gewelfhoogte in de vlamovenkamer.

4. DE WARMTEBALANS

Met het computerprogramma kunnen de warmtestromen die door het oppervlak van de ovenwand, ovendak, ovenvloer, tussenmuren, en de inzet gaan worden berekend.

Uit deze waarden kan dan voor ieder moment tijdens de rondbrand de warmtebalans van de ovenkamer worden berekend wanneer tevens de in de kamer door het rookgas afgestane warmte, de door aardgas en humus verbranding ontwikkelde warmte en de warmte die nodig is om de inlekkende lucht op te warmen bekend is.

De resultaten van de berekening zijn opgenomen in de tabellen 1 t/m 13. In deze tabellen is onderscheid gemaakt tussen drie hoofdgroepen te weten:

- A. De in de kamer afgestane warmte door warmteafgifte van het rookgas betrokken op de hoeveelheid rookgas die de kamer instroomt, de warmteontwikkeling door de verbranding van aardgas en humus en de warmte die nodig is om de door de ovenwanden inlekkende lucht en het toegevoerde aardgas op te warmen.
- B. De voor het vrijmaken van het water en de vorming van CaO benodigde warmte.
- C. De in de oveninzet en het ovenlichaam opgenomen of afgestane warmte.

Bij de presentatie is steeds de opgenomen warmte als zijnde positief aangehouden wanneer inderdaad warmte in de wand of de inzet wordt opgenomen. Negatieve waarden voor de opgenomen warmte betekenen dus dat er warmte wordt afgestaan. De opgegeven waarden zijn betrokken op een meter kamerlengte. Het aandeel van de ovenpoort en de achtermuur in de warmtebalans is dus verdeeld over de gehele kamerlengte.

Het tijdstip waarop de opgegeven waarden zijn berekend is het midden van een periode waarin de meetkamer de positie van de in de tabel genoemde kamer innam. In figuur 9 waarin het temperatuurverloop in de inzet is uitgezet zijn deze tijdstippen aangegeven.

Het al of niet kloppen van de warmtebalans kan worden beoordeeld door de totaal afgestane warmte en de totaal opgenomen warmte met elkaar

te vergelijken. Bij deze vergelijking blijkt dat alleen in de stookkamers een goed sluitende warmtebalans kan worden opgesteld. De sluitpost bedraagt gemiddeld 15 %. Dit gemiddelde wordt ongunstig beïnvloed door de sluitpost van 42 % van de 1^e stookkamer. In de opwarmkamers en de afkoelkamers is de overeenstemming tussen de "totaal afgestane" en "totaal opgenomen warmte" veel minder goed. De reden voor deze afwijking is de veel grotere temperatuurgelijkmatigheid in de stookkamers. In de stookkamers wordt door de stokers de temperatuur over de gehele kamerdiepte constant gehouden. De in de berekening gebruikte temperaturen, die in het midden van de kamer werden gemeten, zijn in dat geval ook voor andere plaatsen in de kamer correct. Wanneer niet meer wordt gestookt zal de temperatuurverdeling in de kamer niet meer gelijkmatig zijn. In de koelkamers zal de afkoeling van de inzet, de muren en de vloer aan de poortzijde sterker zijn dan we berekenen uit de steentemperatuur die in het midden van de oven gemeten is. Hierdoor is de berekende afgestane warmte te laag. Evenzo is de berekende opgenomen warmte in de opwarmkamers te laag. De geringe sluitpost in de stookkamers duidt er op, dat de berekening voor een kamer waarin temperatuurgelijkmatigheid bestaat met voldoende nauwkeurigheid kan worden toegepast. Voor die kamers waarin deze temperatuurgelijkmatigheid niet bestaat, zullen de berekende waarden gelden voor dat gedeelte van de ovenkamer dat niet door randeffecten wordt beïnvloed. Aangezien dit laatste op de plaats waar het meetpakket is opgesteld zeker het geval is, kunnen de in de tabellen gegeven waarden wel worden gebruikt voor het verkrijgen van inzicht in de grootte van de verschillende warmtestromen gedurende het bakproces.

5. BESPREKING VAN DE RESULTATEN

Voor het trekken van conclusies met betrekking tot de werking van de oven moeten de berekende warmtestromen worden beoordeeld in samenhang met de temperaturen die in het steenpakket zijn gemeten.

In figuur 9 is aangegeven wat de positie van de meetkamer was op verschillende tijdstippen gedurende de rondbrand. Uit figuur 9 blijkt dat reeds direct in het begin van de rondbrand de temperaturen in het onderste gedeelte van het steenpakket achter blijven. De reden hiervoor wordt veelal gezocht in een warmte opname van de ovenvloer. Uit de berekeningen blijkt nu dat dit niet het geval is. In tegendeel, in het begin van de rondbrand wordt door de ovenvloer nog warmte afgestaan. Het achterblijven van de temperaturen ter plaatse van de meetpunten 8 en 12 moet dan ook uitsluitend geweten worden aan het binnendringen van koude omgevingslucht door het papierlek. De opvatting dat de reeds in een vorig verslag (1) genoemde voorziening, n.l. een afscherming tegen de inzet ter plaatse van het fietsenrek, een gunstig effect zal hebben op de temperatuurverdeling in de inzet, wordt door de resultaten van deze berekening ondersteund. Ook door het dak wordt in het begin nog warmte afgestaan aan de rookgassen en door straling aan de bovenzijde van de inzet. Deze hoeveelheid is echter gering.

In de tweede opwarmkamer gaat de tussenmuur een aanzienlijke hoeveelheid warmte opnemen (+40% van de warmte die naar de inzet gaat) waardoor de temperatuur van de inzet aan die zijde (meetpunten 6 en 7) minder snel kan stijgen. Dit effect komt in het gemeten temperatuurverloop tot uiting.

Een remedie tegen deze slechte invloed van de tussenmuur zal moeten worden gezocht in het toepassen van materialen met een minder grote warmteaccumulatie.

In de 3^e opwarmkamer wordt overal zowel door de oveninzet als door het ovenlichaam warmte opgenomen uit de rookgasstroom. Ook hier blijft de warmte die in de tussenmuur wordt opgenomen verhoudingsgewijs belangrijk. Het aandeel van de vloer is zeer gering (2%). Het ovendak warmt in verhouding tot de vloer veel sneller op doordat de uit de 4^e opwarmkamer komende warme rookgasstroom in de relatief koude 3^e opwarmkamer opstijgt en het ovengewelf treft. Hetzelfde geldt uiteraard ook voor de 4^e op-

warmkamer en een aantal stookkamers.

In de 4^e opwarmkamer bedraagt het aandeel van de door de ovenpoort afgevoerde warmte 1000 kcal/h m (1163 W/m). Voor een \pm 14 m diepe kamer komt dit neer op een totaal verlies van 14.000 kcal/h. Vergelijken we deze waarde met de waarde van 17.500 kcal/h die bij een gelijkmatige temperatuurverdeling in het steenpakket over de eerste meter kamer zou worden opgenomen, dan blijkt daaruit duidelijk de grote invloed van de ovenpoort.

In ovenkamers waarin de verliezen door de ovenpoort niet worden gecompenseerd door een extra hoeveelheid aardgas, zal door dit effect een temperatuurongelijkmatigheid ontstaan. Het effect hiervan op de warmtebalans (hoofdstuk 4) is reeds ter sprake gebracht.

In de 1^e stookkamer bereikt de in de inzet opgenomen warmte absoluut gezien een maximum waarde. De totaal in de tussenmuur en het ovendak opgenomen warmte is nu even groot als de in de inzet opgenomen warmte. De vloer blijft met 10% een relatief geringe hoeveelheid warmte opnemen. Dit is ook in de 2^e stookkamer nog het geval.

In de 3^e stookkamer wordt de warmteopname in de vloer relatief gezien veel belangrijker. In de temperatuurverdeling in de inzet komt dit tot uiting in de minder sterke steiging van de temperaturen ter plaatse van de koppels 8 en 12.

In de 4^e stookkamer wordt de maximum temperatuur van de inzet bereikt. Het aandeel van de inzet in de "warmteconsumptie" daalt nu sterk. Het grootste gedeelte van de door aardgasverbranding ontwikkelde warmte gaat naar het ovendak (28%) en de ovenvloer (27%).

In de 5^e, 6^e en 7^e stookkamer wordt de temperatuur van de inzet (aan de hand van metingen met de optische bedrijfspyrometer) constant gehouden. De warmteverliezen zijn nu vrijwel uitsluitend een gevolg van warmteafvoer door het ovendak en de ovenvloer.

Omdat in de 7^e stookkamer juist de overgang naar het afkoelen van de inzet plaatsvindt, wordt op het moment dat de inzet reeds gaat afkoelen en dus warmte af gaat geven nog warmte opgenomen door de veel tragere ovenvloer en ovendak. De netto afgestane warmte is hierdoor gering.

Door de grote relatieve invloed van een in absolute zin kleine

afwijking in de waarde C zullen de t.o.v. C berekende relatieve waarden sterk gaan afwijken. De betekenis van deze waarden is voor de 7^e stookkamer zo dubieus dat van het opnemen ervan in tabel 11 is afgezien.

In de 1^e koelkamer wordt met uitzondering van de ovenvloer door alle onderdelen warmte afgestaan aan de door de oven stromende gassen. De in vergelijking met de andere koppels minder sterke daling van de koppels 8 en 12 is hiervan een gevolg.

Vanaf de 2^e koelkamer wordt door alle ovendelen en de inzet warmte aan de gasstroom overgedragen.

6. CONCLUSIE

De belangrijkste conclusies uit dit rapport zijn:

- Van de stookkamers van een vlamoven kon een goed sluitende warmtebalans worden opgesteld (De sluitpost voor de stookkamers bedroeg gemiddeld 15%). In de andere kamers was dit, door de grote invloed van de binnenmuur en de ovenpoort op de temperatuurverdeling, niet mogelijk.
- De met het opgesteld computerprogramma berekende temperaturen in het ovenlichaam, komen goed overeen met de gemeten temperaturen.
- Tijdens het bakproces variëren de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt en de effectieve temperatuurvereffeningscoëfficiënt sterk. Vooral het vrijmaken van het chemisch gebonden water en de verbranding van de humus, hebben een grote invloed op deze waarden.
- In de 1^e en 2^e opwarmkamer wordt door de ovenvloer nog warmte afgestaan. Het achterblijven van de temperatuur in het gedeelte van de inzet dicht bij het fietsenrek, wordt veroorzaakt door de door het fietsenrek binnenstromende lucht.
- Tijdens het opwarmen wordt door de tussenmuur een aanzienlijke hoeveelheid warmte (40% van de warmte die naar de inzet gaat) opgenomen.
- De hoeveelheid warmte die door de ovenpoort wordt opgenomen en afgevoerd, is van dezelfde grootte als de hoeveelheid warmte die wordt opgenomen door de op de eerste meter kamervloer geplaatste inzet.
- Tijdens het aanhouden wordt ruim 50% van de aan de kamer toegevoerde warmte opgenomen door het ovendak en de ovenvloer.

7. SLOTBESCHOUWING

In dit verslag zijn resultaten opgenomen van computerberekeningen en metingen waarmee de warmtehuishouding in een vlamovenkamer is berekend.

Voor het ontwerp van een oven is het van belang te kunnen beschikken over inzicht in de grootte van de warmteoverdrachtcoëfficiënten tussen inzet, oven en gasstroom.

Met de in dit verslag berekende warmtestromen en de temperatuurmetingen die reeds zijn verricht, kunnen deze warmteoverdrachtscoëfficiënten worden berekend. Op dit aspect van het onderzoek zal in een volgend verslag dieper worden ingegaan.

8. LITERATUUR

- (1) Claus, J. en G. Wentink
Het warmte- en stromingstechnische gedrag van een vlamoven
C.T.I.-TNO, Ref. Nr. 70-0615, Doss. Nr. 3572D-6412
- (2) Jakob, M.
Heat Transfer
John Wiley and Sons, New York
- (3) Cammerer, J.S.
Wärme- und Kälteschutz in der Industrie
Springer Verlag
- (4) V.D.I.- Wärme-Atlas
- (5) Raznjevic, K.
Tables et Diagrammes Thermodynamiques
Ed. Eyrolles, 1970

9. SYMBOLENLIJST

λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt	J/msK
C	Soortelijke warmte	kJ/kg K
ρ	Dichtheid	kg/m ³
θ	Temperatuur	°C
t	Tijd	s

APPENDIX I

De beschouwing over het temperatuurverloop in een stapel stenen of een ovenwand die wordt verwarmd, kan in eerste benadering beperkt blijven tot een ééndimensionaal probleem. Dit betekent dat wordt aangenomen dat de netto-warmtegeleiding in de steen in de y-richting (fig. 10) gelijk is aan nul.

Voor de warmtegeleiding in de richting x kan nu worden geschreven:

$$c \rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Bij de differentierekening wordt een steenelement langs de x-as onderverdeeld in een aantal stukken met een lengte Δx .

Voor een tijdstip k kan worden geschreven:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} = \frac{\Theta_{n+1, k} - \Theta_{n, k}}{\Delta x} \quad (2)$$

en

$$\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} = \lambda_{n, n+1} \frac{\Theta_{n+1, k} - \Theta_{n, k}}{\Delta x} \quad (3)$$

Hieruit volgt:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) = \frac{\lambda_{n, n+1} \frac{\Theta_{n+1, k} - \Theta_{n, k}}{\Delta x} - \lambda_{n, n-1} \frac{\Theta_{n, k} - \Theta_{n-1, k}}{\Delta x}}{\Delta x} \quad (4)$$

Het temperatuurverschil in element n tussen een tijdstip k en k + 1 volgt dan uit de formule:

$$\frac{\Theta_{n, k+1} - \Theta_{n, k}}{\Delta t} = \frac{\lambda_{n, n+1} (\Theta_{n+1, k} - \Theta_{n, k}) - \lambda_{n, n-1} (\Theta_{n, k} - \Theta_{n-1, k})}{\rho c_n (\Delta x)^2} \quad (5)$$

Wanneer kleine variaties in de warmtegeleidingscoëfficiënt worden verwaarloosd, dan wordt

$$\lambda_{n, n+1} = \lambda_{n, n-1} = \lambda_n$$

Hierdoor vereenvoudigt formule (5) tot:

$$\Theta_{n, k+1} = \Theta_{n, k} + \frac{\lambda_n t}{\rho C_n (\Delta x)^2} (\Theta_{n+1, k} + \Theta_{n-1, k} - 2\Theta_{n, k}) \quad (6)$$

$\frac{\lambda}{\rho C}$ is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt.

Met deze vergelijking kan de temperatuurtoename in het segment n worden berekend uit de bekende temperaturen $\Theta_{n+1, k}$, $\Theta_{n, k}$ en $\Theta_{n-1, k}$ en gebruik makend van de temperatuurafhankelijke stofconstanten λ_n en C_n .

Door deze procedure ook voor andere elementen te herhalen, kan de gehele steen worden doorgerekend. Uitgangspunt van deze berekening kan bij voorbeeld een volgens een bepaalde curve verlopende oppervlaktetemperatuur zijn.

De nauwkeurigheid van de berekening kan worden vergroot door de grootte Δx van het segment en de grootte van het tijdsinterval Δt kleiner te kiezen. In verband met de stabiliteit van de berekening moet in ieder geval

$$\frac{\lambda_n \Delta t}{\rho C_n (\Delta x)^2} > 2.$$

Uit voor stenen uitgevoerde berekeningen blijkt dat een goede nauwkeurigheid wordt bereikt indien

$$\frac{\lambda_n \Delta t}{\rho C_n (\Delta x)^2} > 8$$

wordt genomen.

Tabel 1

1^o Opwarmkamer

	kcal/h per meter kamerdikte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-	-	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	-	-	
4) Opwarmen leklucht	-	-	
5) Opwarmen aardgas	-	-	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	-	-	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	-	-	-
9) Opgenomen in vloer	-500	-	42
10) Opgenomen in dak	-200	-	16
11) Opgenomen in tussenmuur	-500	-	42
12) Opgenomen in voormuur	-	-	
13) Opgenomen in achtermuur	-	-	
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	-1.200	-	100

Tabel 2

2^e Opwarmkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-	-	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	-	-	
4) Opwarmen leklucht	-	-	
5) Opwarmen aardgas	-	-	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	-	-	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	2.000	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	2.000	-	
8) Opgenomen in steenpakket	6.500	-	77
9) Opgenomen in vloer	-500	-	-6
10) Opgenomen in dak	-100	-	-1
11) Opgenomen in tussenmuur	2.500	-	30
12) Opgenomen in voormuur	-	-	
13) Opgenomen in achtermuur	-	-	
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	8.400	-	100

Tabel 3

3^e Opwarmkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-	-	
2) Uit verbranding huus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	-	-	
4) Opwarmen leklucht	-500	-	
5) Opwarmen aardgas	-	-	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	- 500	-	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	4.000	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	4.000	-	
8) Opgenomen in steenpakket	13.500	-	57
9) Opgenomen in vloer	500	-	2
10) Opgenomen in dak	2.500	-	11
11) Opgenomen in tussenmuur	6.000	-	26
12) Opgenomen in voormuur	500	-	2
13) Opgenomen in achtermuur	500	-	2
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in overwanden en inzet	23.500	-	100

Tabel 4
 4^e Opwarmkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	57.500	82	
2) Uit verbranding humus	13.500	19	
3) Uit verbranding aardgas	-	-	
4) Opwarmen leklucht	-1.000	-1	
5) Opwarmen aardgas	-	-	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	70.000	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	17.500	25	48
9) Opgenomen in vloer	2.500	4	7
10) Opgenomen in dak	6.500	9	18
11) Opgenomen in tussenmuur	8.000	11	21
12) Opgenomen in voormuur	1.000	1	3
13) Opgenomen in achtermuur	1.000	1	3
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	36.500	52	100

Totaal afgestaan 71.000 kcal/m h = 100%

Totaal opgenomen 37.500 kcal/m h = 53%

Tabel 5

1^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdiente	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	57.500	63	
2) Uit verbranding humus	--	--	
3) Uit verbranding aardgas	36.000	40	
4) Opwarmen leklucht	-1.000	-1	
5) Opwarmen aardgas	-1.500	-2	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	91.000	100	
6) Vorming CaO	--	--	
7) Vrijmaken en verdampen van water	6.000	7	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	6.000	7	
8) Opgenomen in steenpakket	19.500	21	42
9) Opgenomen in vloer	4.500	5	10
10) Opgenomen in dak	10.000	11	22
11) Opgenomen in tussenmuur	9.500	10	20
12) Opgenomen in voormuur	1.000	1	2
13) Opgenomen in achtermuur	1.500	2	4
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	46.000	50	100

Totaal afgestaan 93.500 kcal/m h = 100%

Totaal opgenomen 54.500 kcal/m h = 58%

Tabel 6

2^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdikte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	34.000	49	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	39.000	56	
4) Opwarmen leklucht	-1.500	-2	
5) Opwarmen aardgas	-2.000	-3	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	69.500	100	
6) Vorming CaO	24.500	35	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	24.500	35	
8) Opgenomen in steenpakket	16.000	23	38
9) Opgenomen in vloer	5.000	7	12
10) Opgenomen in dak	10.000	14	24
11) Opgenomen in tussenmuur	8.500	12	20
12) Opgenomen in voormuur	1.000	1	2
13) Opgenomen in achtermuur	1.500	2	4
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	42.000	60	100

Totaal afgestaan 73.000 kcal/m²h = 100%
 opgenomen 70.000 kcal/m²h = 96%

Tabel 7

3^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdiente	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	4.000	15	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	26.000	96	
4) Opwarmen leklucht	-1.500	-6	
5) Opwarmen aardgas	-1.500	-6	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	27.000	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	9.000	33	32
9) Opgenomen in vloer	5.500	20	19
10) Opgenomen in dak	6.000	22	21
11) Opgenomen in tussenmuur	5.500	20	19
12) Opgenomen in voormuur	1.000	4	4
13) Opgenomen in achtermuur	1.500	6	5
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenvanden en inzet	28.500	106	100

Totaal afgestaan 30.000 kcal/m²h = 100%

opgenomen 31.500 kcal/m²h = 105%

Tabel 8

4^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdiente	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	1.000	5	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	21.000	111	
4) Opwarmen leklucht	-1.500	-8	
5) Opwarmen aardgas	-1.500	-8	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	19.000	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	2.500	13	15
9) Opgenomen in vloer	4.500	24	27
10) Opgenomen in dak	4.500	24	28
11) Opgenomen in tussenmuur	3.000	16	18
12) Opgenomen in voormuur	1.000	5	6
13) Opgenomen in achtermuur	1.000	5	6
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	16.500	87	100

Totaal afgestaan 22.000 kcal/m.h = 100%

opgenomen 19.500 kcal/m.h = 89%

Tabel 9

5^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	1.500	10	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	15.500	107	
4) Opwarmen leklucht	-1.500	-10	
5) Opwarmen aardgas	-1.000	-7	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	14.500	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	500	3	4
9) Opgenomen in vloer	4.500	31	39
10) Opgenomen in dak	4.000	28	35
11) Opgenomen in tussenmuur	1.000	7	9
12) Opgenomen in voormuur	500	3	4
13) Opgenomen in achtermuur	1.000	7	9
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	11.500	79	100

Totaal afgestaan 17.000 kcal/m h = 100%

opgenomen 14.000 kcal/m h = 82%

Tabel 10

6^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-3.000	-30	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	15.500	155	
4) Opwarmen leklucht	-1.500	-15	
5) Opwarmen aardgas	-1.000	-10	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	10.000	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	-	-	-
9) Opgenomen in vloer	4.500	45	45
10) Opgenomen in dak	4.000	40	40
11) Opgenomen in tussenmuur	500	5	5
12) Opgenomen in voormuur	500	5	5
13) Opgenomen in achtermuur	500	5	5
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	10.000	100	100

Totaal afgestaan 15.500 kcal/m.h = 100%

opgenomen 15.500 kcal/m.h = 100%

Tabel 11

7^e Stookkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-12.000		
2) Uit verbranding humus	-		
3) Uit verbranding aardgas	22.000		
4) Opwarmen leklucht	-1.500		
5) Opwarmen aardgas	-1.500		
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	7.000		
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	-6.000		
9) Opgenomen in vloer	2.500		
10) Opgenomen in dak	3.500		
11) Opgenomen in tussenmuur	-3.000		
12) Opgenomen in voormuur	500		
13) Opgenomen in achtermuur	500		
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	-2.000		

Totaal afgestaan 31.000 kcal/m h = 100%

Totaal opgenomen 22.000 kcal/m h = 71%

Tabel 12
1^e Koelkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-40.500	96	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	-	-	
4) Opwarmen leklucht	-1.500	4	
5) Opwarmen aardgas	-	-	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	-42.000	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	-16.000	38	65
9) Opgenomen in vloer	500	-1	-2
10) Opgenomen in dak	-1.000	2	4
11) Opgenomen in tussenmuur	-7.500	18	31
12) Opgenomen in voormuur	-	-	-
13) Opgenomen in achtermuur	-500	1	2
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	-24.500	58	100

Totaal afgestaan 25.000 kcal/m h = 100%

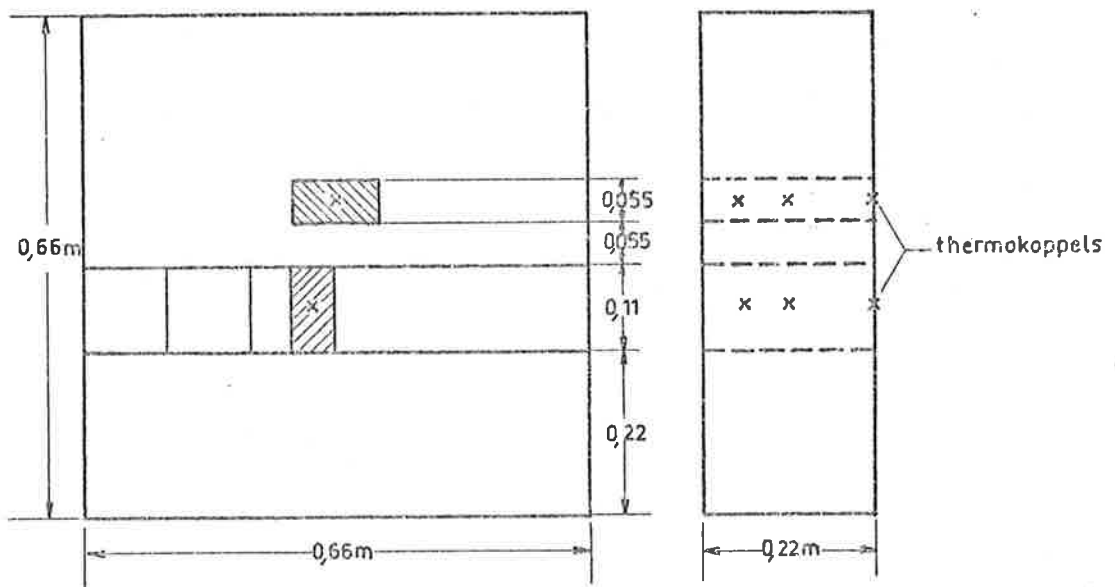
Totaal opgenomen 42.500 kcal/m h = 170%

Tabel 13
2^e Koelkamer

	kcal/h per meter kamerdiepte	% van A	% van C
1) In kamer afgestaan door rookgas	-49.000	98	
2) Uit verbranding humus	-	-	
3) Uit verbranding aardgas	-	-	
4) Opwarmen leklucht	-1.000	2	
5) Opwarmen aardgas	-	-	
A. Totaal in kamer afgestaan (1+2+3+4+5)	-50.000	100	
6) Vorming CaO	-	-	
7) Vrijmaken en verdampen van water	-	-	
B. Totaal nuttig gebruikt (6+7)	-	-	
8) Opgenomen in steenpakket	-18.000	36	54
9) Opgenomen in vloer	-2.000	4	6
10) Opgenomen in dak	-3.000	6	9
11) Opgenomen in tussenmuur	-9.000	18	27
12) Opgenomen in voormuur	-500	1	1
13) Opgenomen in achtermuur	-1.000	2	3
C. Totaal opgenomen warmte (8+9+10+11+12+13) in ovenwanden en inzet	-33.500	67	100

Totaal afgestaan 33.500 kcal/m h = 100%

Totaal opgenomen 50.000 kcal/m h = 149%



Plaats van de thermokoppels

CTI — TNO
3572F-2412
Fig. 1

temperatuur(°C)

300

200

100

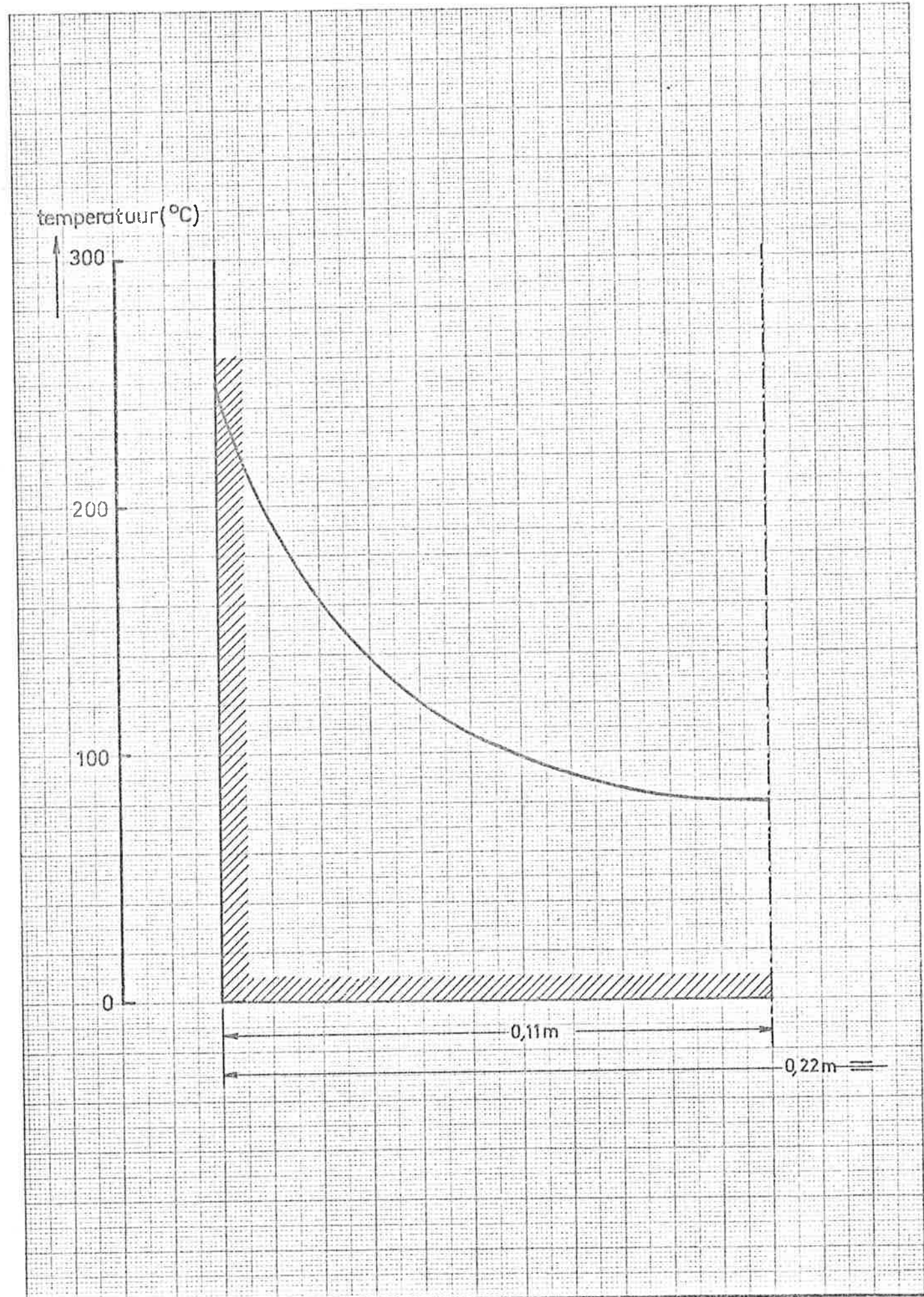
0

0,11m

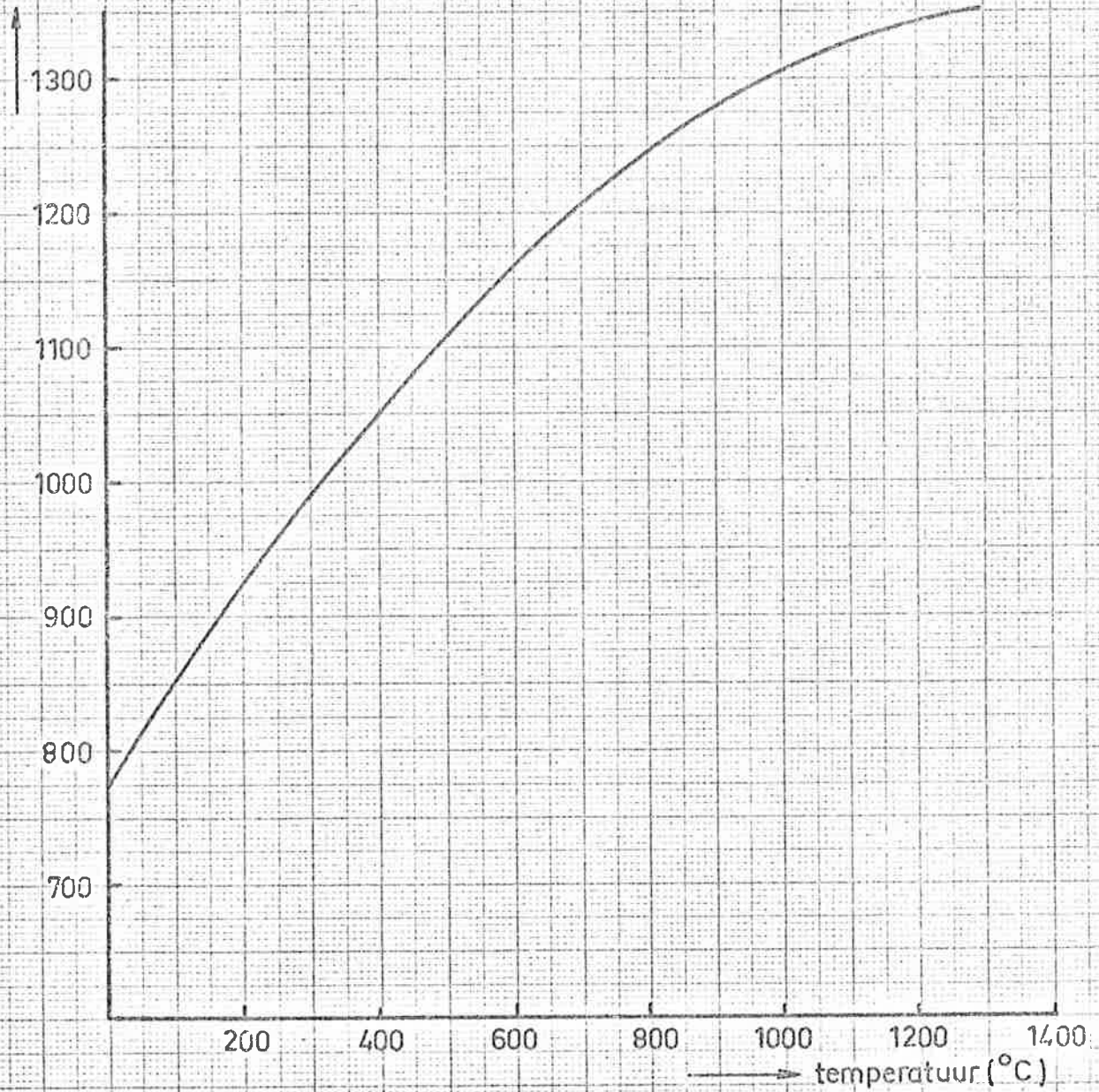
0,22m

Temperatuurverloop in steen

CTI-TNO
3572F-2412
Fig. 2

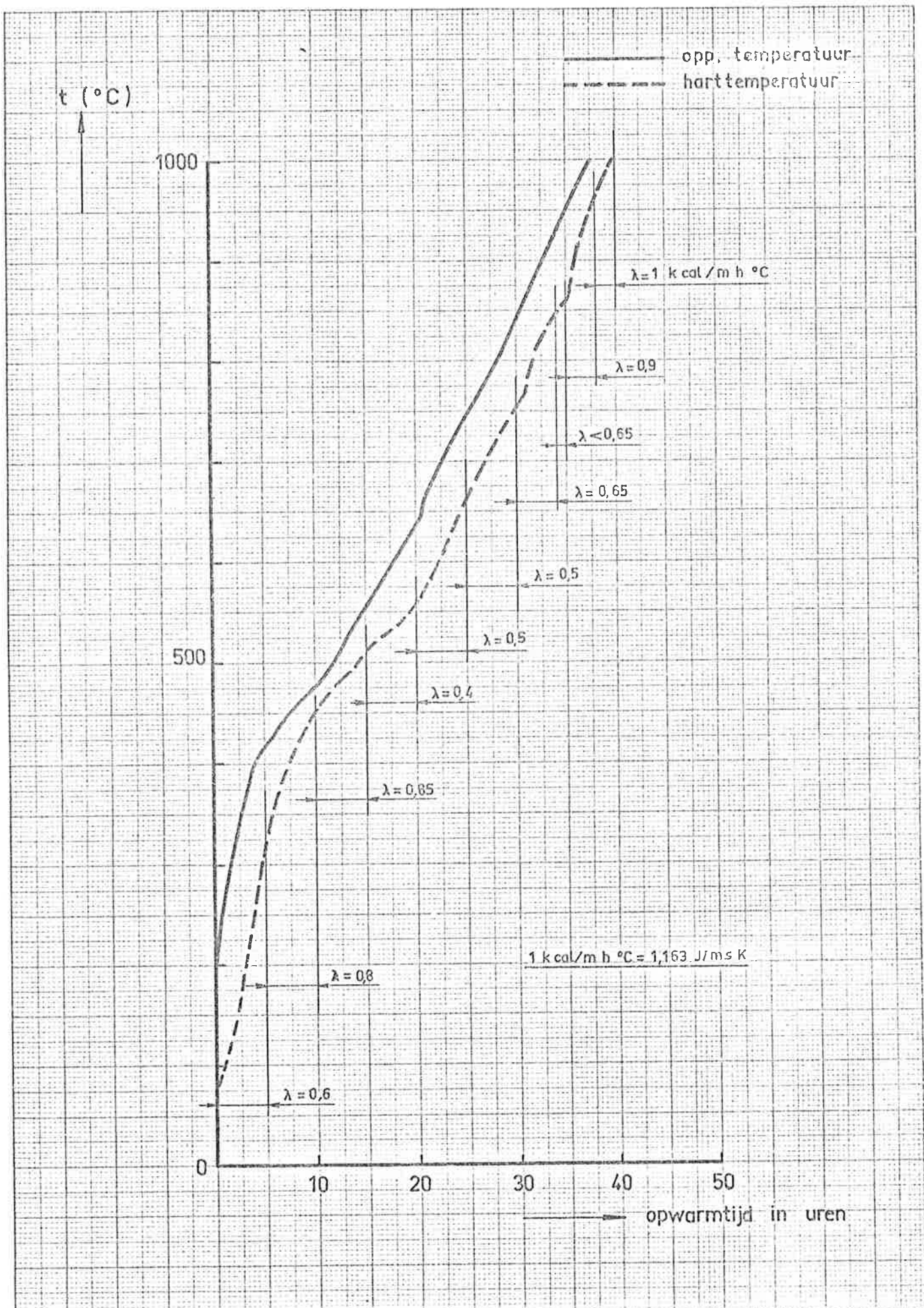


s.w. (J/kgK)



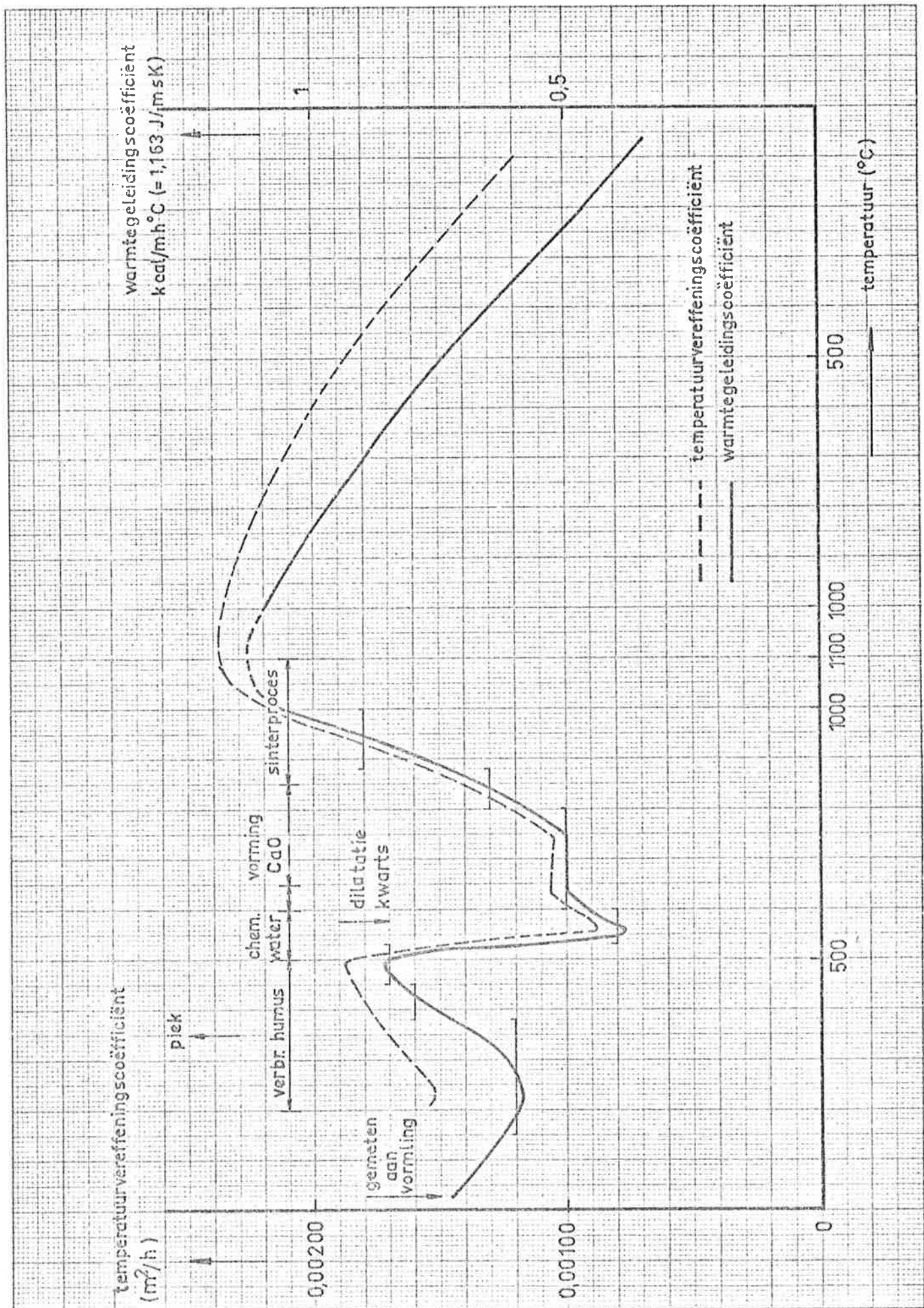
Soortelijke warmte van steen als functie van de temperatuur

CTI-TNO
3572F-2412
Fig. 3



Temperatuur van de steen tijdens het opwarmen

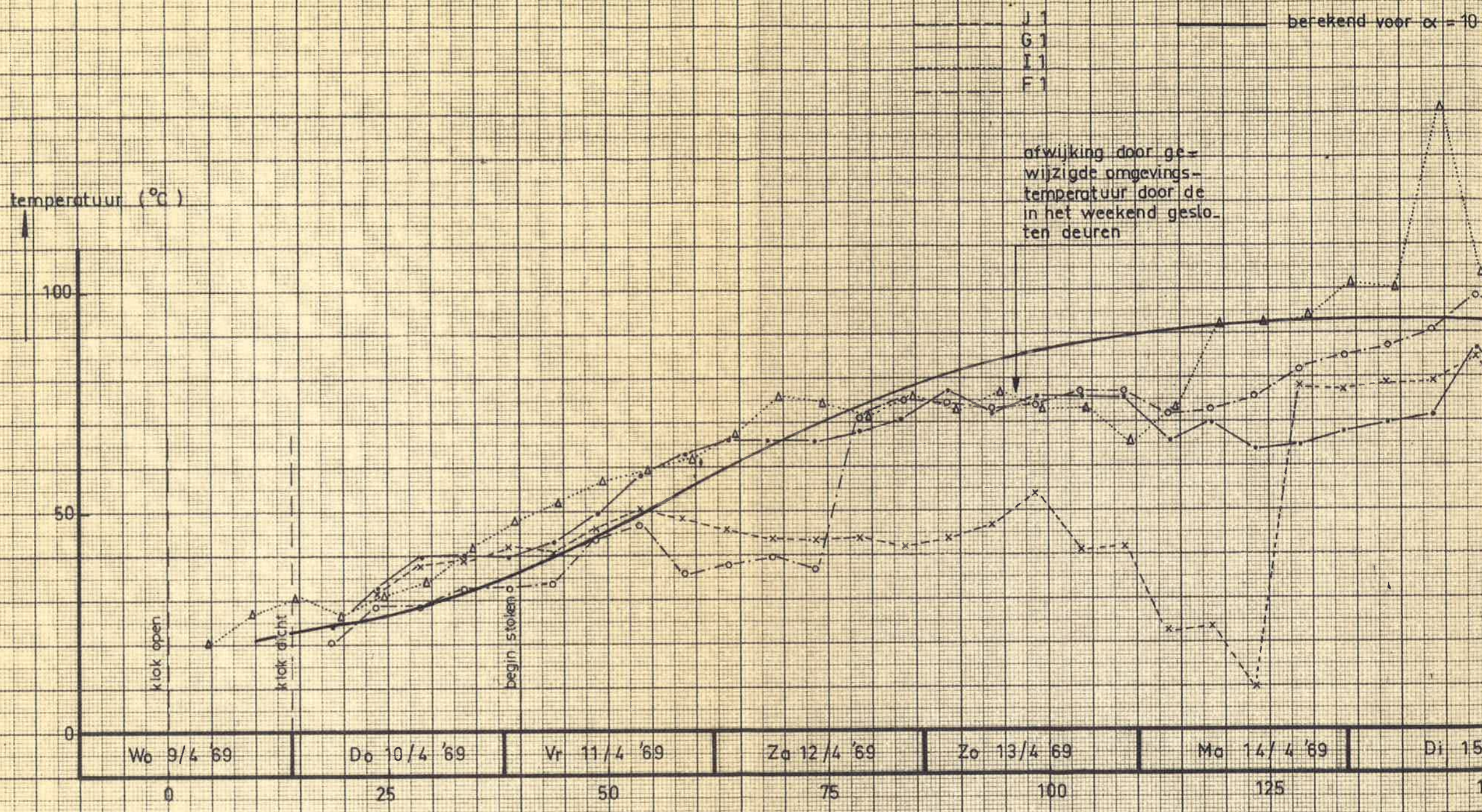
CTI_TNO
 3572F_2412
 Fig. 4

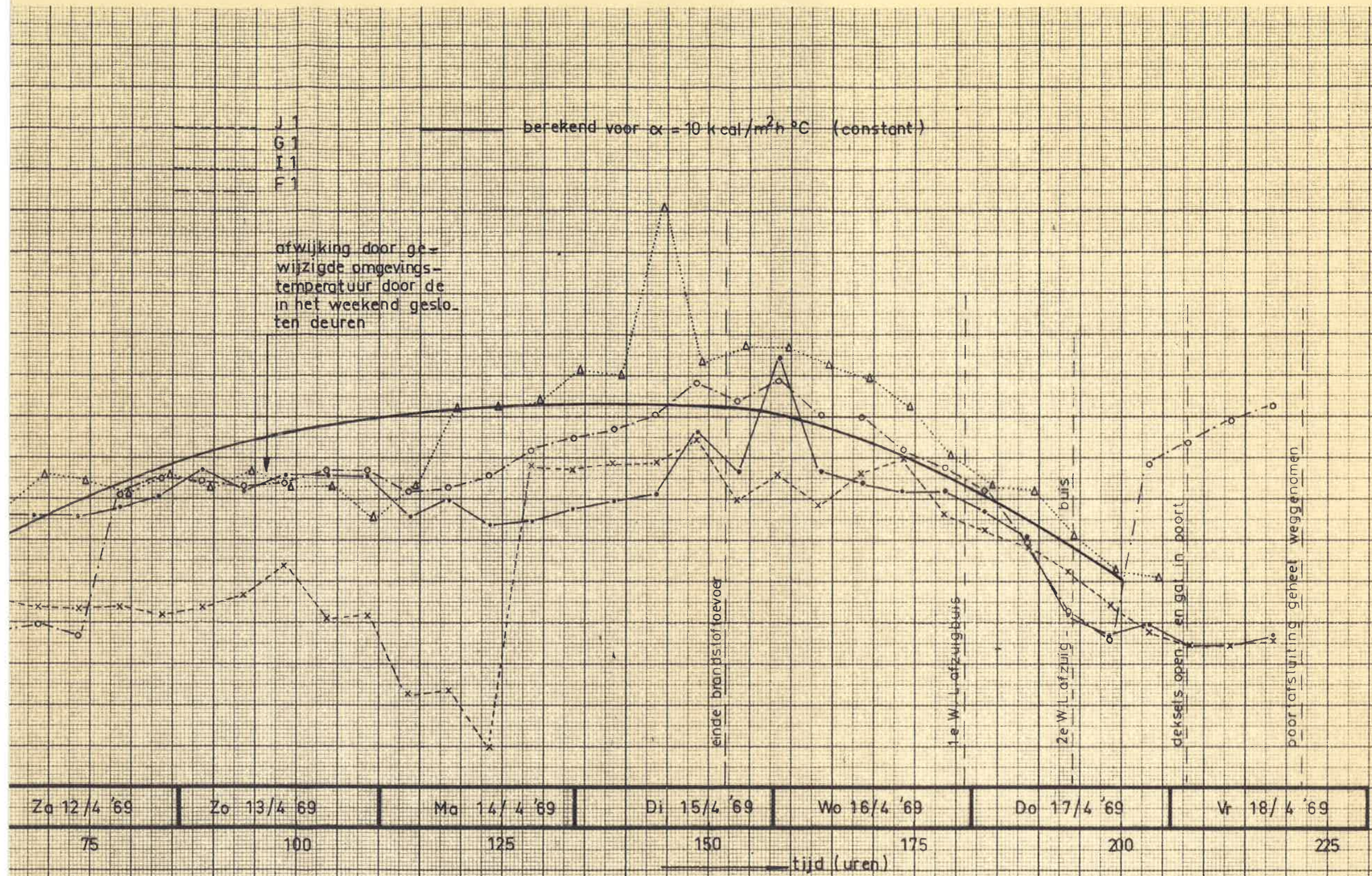


Effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt en effectieve temperatuurvereffeningscoëfficiënt van bakkende steen

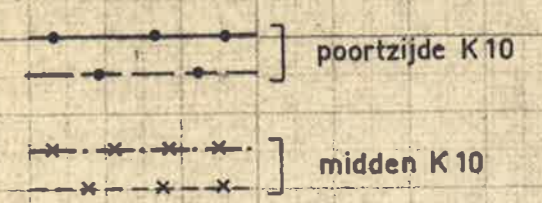
CTI_TNO
3572_F_2412

Fig. 5

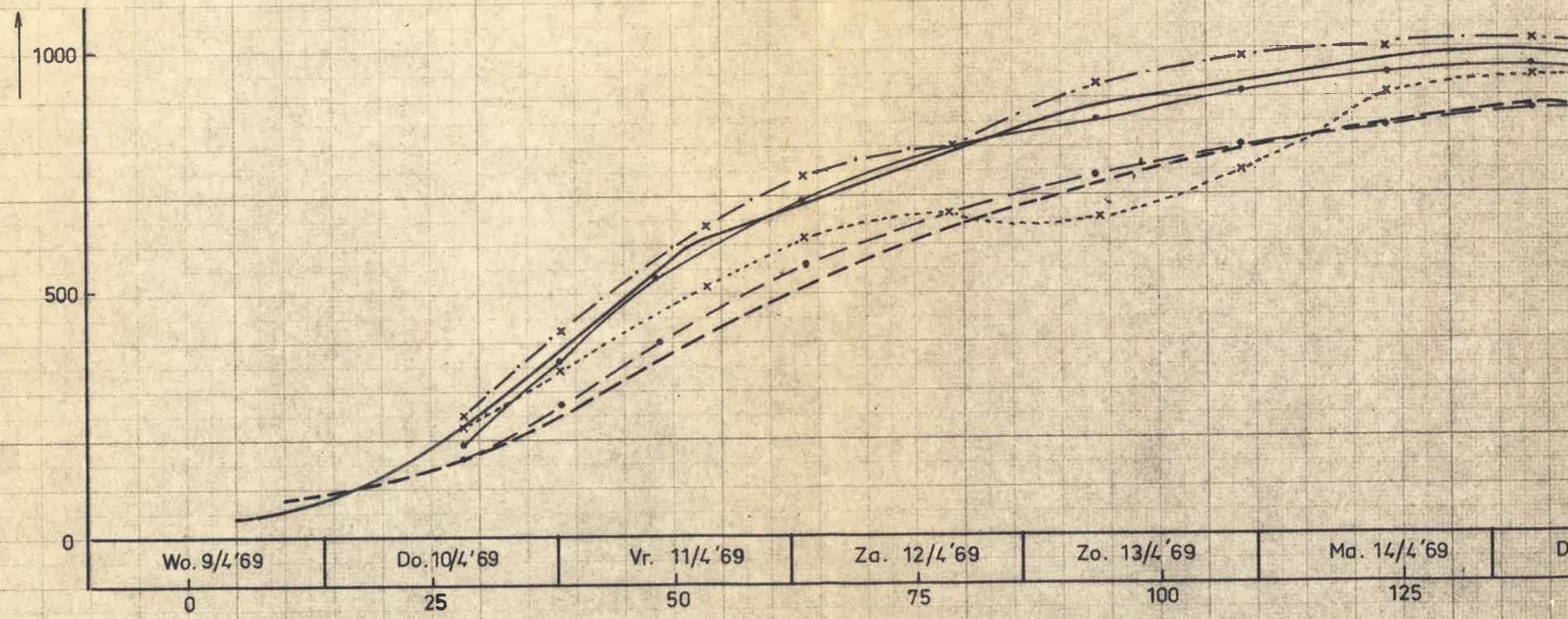




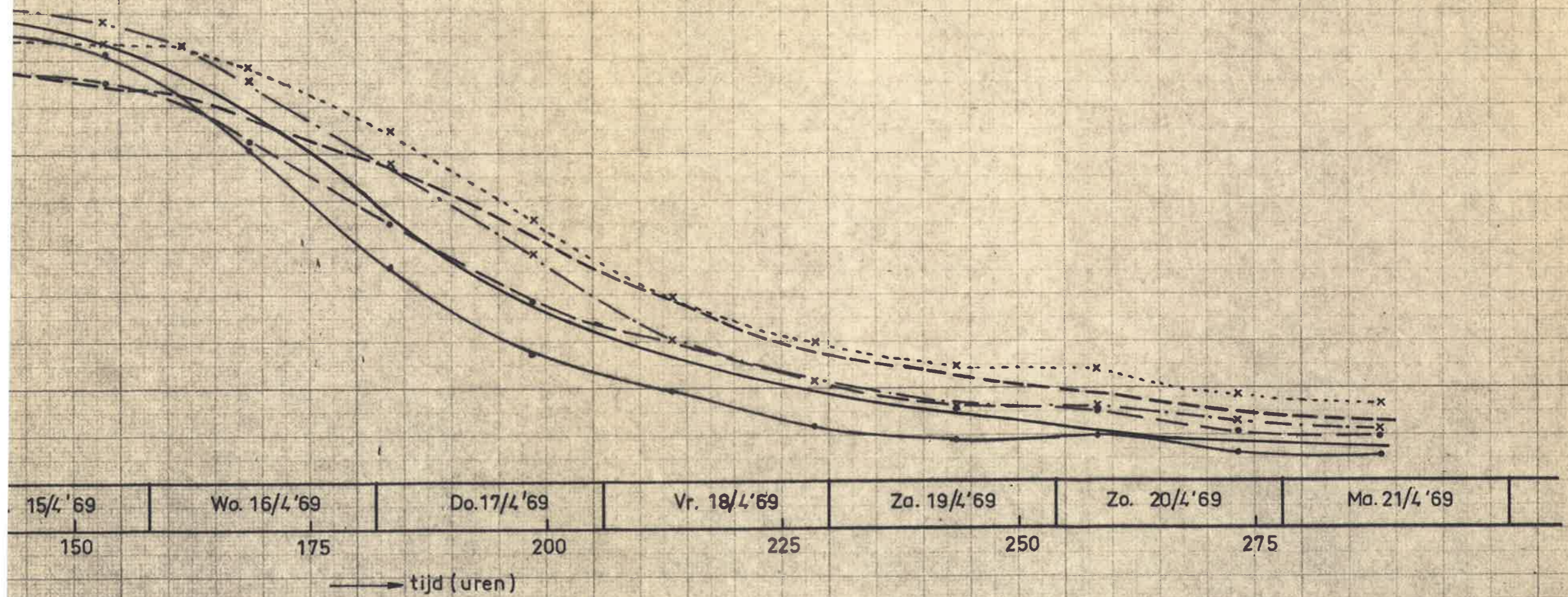
temperatuur vloerstenen



temperatuur (°C)



————— oppervlaktetemperatuur van de vloer
 die in het computerprogramma is gebruikt
 - - - - - berekende temperatuur onderaan de
 steen (aangenomen koppelafstand 10 cm)
 voor de aangenomen waarden van λ en C
 aangenomen is tevens dat het verlies naar
 de vloer over de gehele rondbrand 90 kcal/m²h
 constant bedraagt
 dit betekent in het begin een kleine overschat-
 ting van de verliezen en dus een te lage temperatuur



Temperaturen van de vloer

CTI-TNO
 3572F-2412
 Fig. 7

temperatuur (°C)

1000
500
0

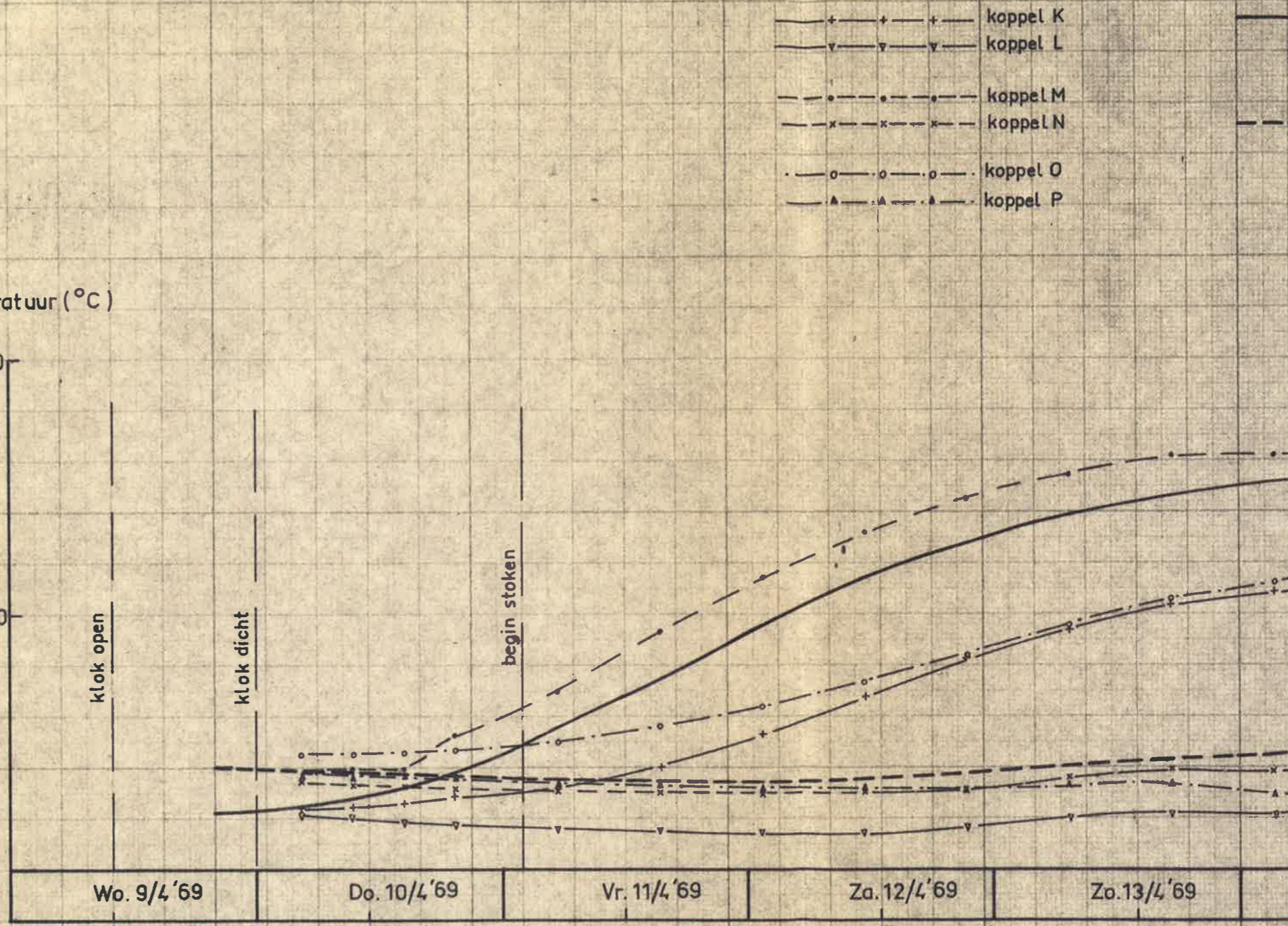
Wo. 9/4 '69 Do. 10/4 '69 Vr. 11/4 '69 Za. 12/4 '69 Zo. 13/4 '69

klok open

klok dicht

begin stoken

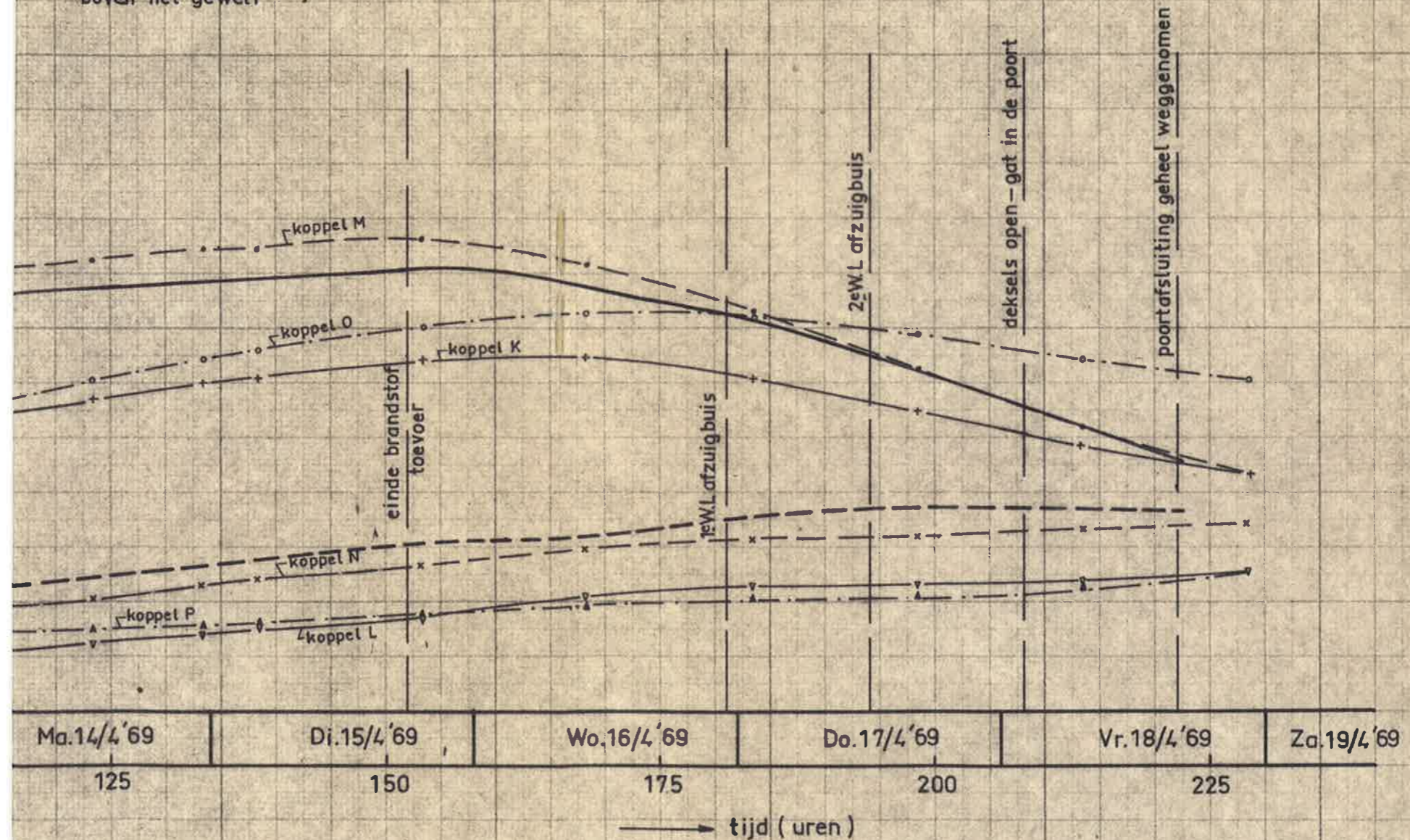
- +—+—+— koppel K
- v—v—v— koppel L
- koppel M
- x—x—x— koppel N
- o—o—o— koppel O
- ▲—▲—▲— koppel P



N.B.: koppel P wijkt af van wat zou worden verwacht [1], door de betere isolatie ter plaatse van P (grotere laagdikte) zou een temperatuur die hoger is dan N worden verwacht de berekende lijn (die een gemiddelde geeft) is hiermee in overeenstemming

— voor een gemiddelde dakdikte van 115 cm berekend temperatuurverloop op het gewelf

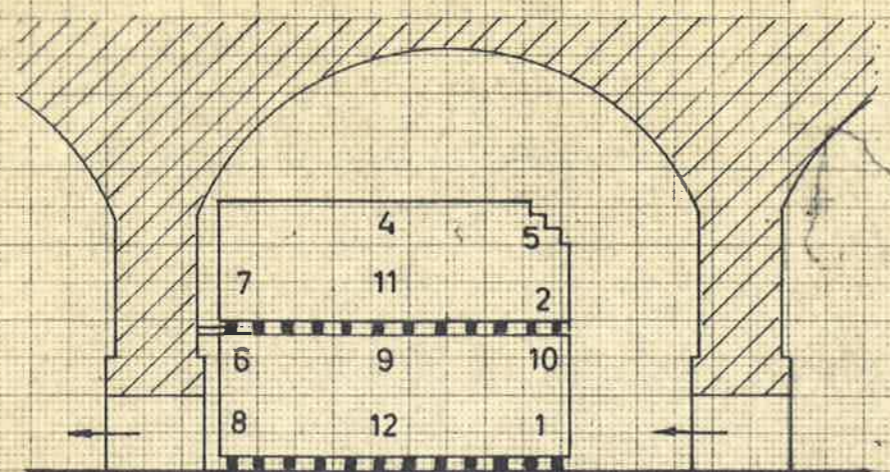
— voor een gemiddelde dakdikte van 115 cm berekend temperatuurverloop op ± 0,5m boven het gewelf



Temperaturen in het ovendak

temperatuur (°C)

1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0



OPT. PYROMETER

STOOKTIJD 112 UUR

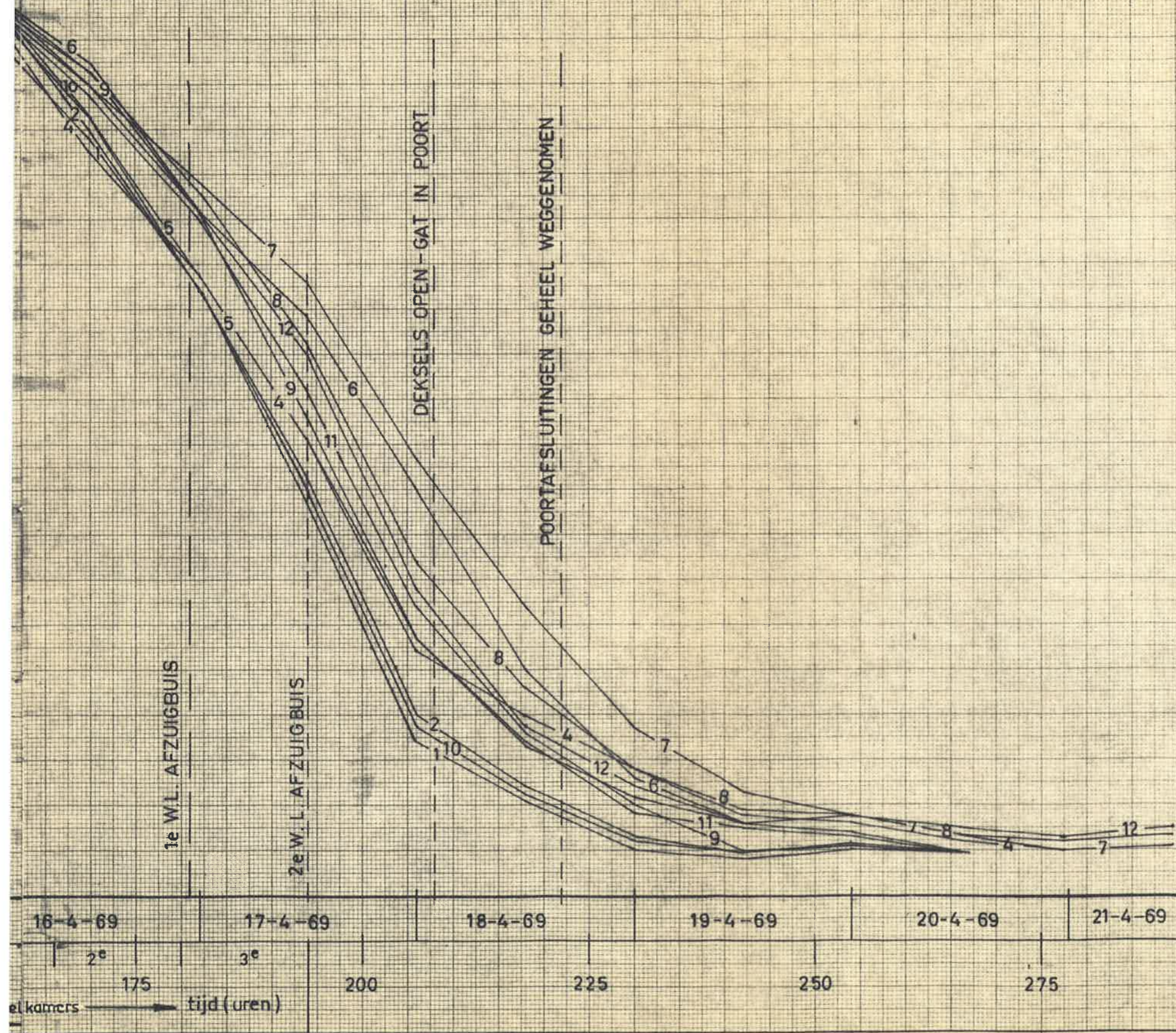
KLOK OPEN

KLOK DICHT

BEGIN STOKEN

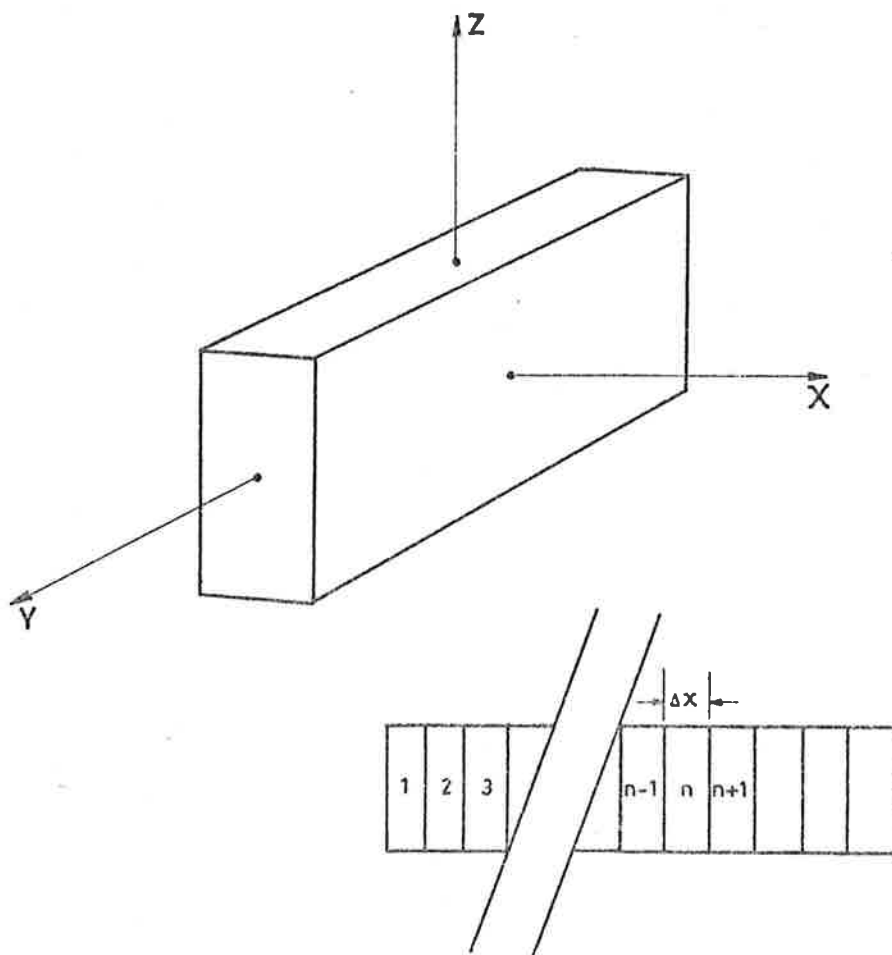
EINDE BRANDSTOF TOEVOER

9-4-69	10-4-69	11-4-69	12-4-69	13-4-69	14-4-69	15-4-69	18			
0	25	50	75	100	125	150				
2 ^e	3 ^e	4 ^e	1 ^e	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e	6 ^e	7 ^e	1 ^e
opwarmkamers			stookkamers			stookkamers			ko	



Temperaturen in het steenpakket

4/39



Verdeling van de steen in elementen

CTI - TNO
3572F- 2412
Fig. 10