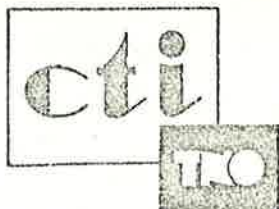


B05



CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 72-01718

Dossier: 02-4-40080

RAPPORT

Taxatie van het temperatuurverloop in de  
kern van een keramisch produkt tijdens  
het bakproces

door

J.H. v.d. Velden

Datum : April 1972

Bestemd voor: De Nederlandse Grofkeramische Industrie

202

## MEDEDELING AAN OPDRACHTGEVERS

Opdrachten die als voorlichting of keuring gekarakteriseerd kunnen worden en waarbij door TNO geen of vrijwel geen research wordt verricht, worden uitsluitend aangenomen op voorwaarde, dat de opdrachtgever afziet van een beding dat dergelijke opdrachten uitsluitend voor hem zullen worden uitgevoerd.

Bij andere opdrachten, in het bijzonder die van geringe omvang (waarvan de geschatte researchkosten minder dan f 10.000,- bedragen) en bij „trouble shooting“-problemen, kan op verzoek van de opdrachtgevers TNO zich verplichten gedurende de tijd waarin de opdracht in bewerking is, geen overeenkomstige opdrachten van derden te aanvaarden. Voor zover aan TNO specifieke bedrijfsgeheimen medegedeeld worden door de opdrachtgever, nodig voor de oplossing van het gestelde probleem, verplicht TNO zich tot geheimhouding.

Rechten op octrooieerbare vindingen ten gevolge van dergelijke opdrachten zijn het eigendom van TNO; op verkregen octrooien krijgt de opdrachtgever een gratis, exclusieve, overdraagbare licentie voor het gebied waarop de opdracht betrekking heeft. Indien en voor zover TNO geen gebruik wenst te maken van het recht octrooien op dergelijke vindingen aan te vragen, komt dit recht aan de opdrachtgever.

Bij grote researchopdrachten kunnen, op verzoek van de opdrachtgever, hiervan afwijkende voorwaarden betreffende octrooirechten, exclusiviteit en geheimhouding in onderling overleg contractueel worden vastgesteld.

Alle geoffreerde bedragen en kostenschattingen zijn exclusief omzetbelasting.

De aan een onderzoek verbonden kosten zullen per kwartaal worden gedeclareerd, ook wanneer het onderzoek nog niet is beëindigd.

Werkzaamheden ten behoeve van opdrachtgevers worden slechts uitgevoerd op voorwaarde, dat de opdrachtgever afstand doet van ieder recht op aansprakelijkstelling en zich verplicht tot vrijwaring voor iedere aansprakelijkheid jegens derden, een en ander behalve indien en voor zover grove schuld en/of opzet worden wordt aangetoond.

INHOUDSOPGAVE

	blz.
<u>SAMENVATTING</u>	3
<u>INLEIDING</u>	4
1. <u>DOELSTELLING VAN HET RAPPORT</u>	5
2. <u>HET GEBRUIKTE REKENMODEL</u>	6
3. <u>DE BETEKENIS VAN DE GEBRUIKTE SYMBOLEN</u>	7
4. <u>OVERZICHT VAN BEREKENINGSFORMULES</u>	9
4.1. <u>Temperatuurverdeling in het model tijdens de opwarming met constante snelheid in de evenwichtstoestand</u>	9
4.2. <u>Temperatuurverdeling in het model tijdens de koeling met constante snelheid in de evenwichtstoestand</u>	9
4.3. <u>Temperatuurvereffeningscoëfficiënt en specifiek warmte-uitwisselingsoppervlak</u>	9
4.4. <u>Temperatuurverloop in de kern van het model in afhankelijkheid van de tijd bij wijziging van de opwarmingssnelheid of koelsnelheid</u>	10
5. <u>REKENWAARDEN</u>	12
6. <u>REKENVOORBEELDEN</u>	14
7. <u>GERAADPLEEGDE LITERATUUR</u>	20

Bijlagen:

- 01 - afleiding van formules
- 02 - afleiding van formules
- 03 - soortelijke warmte van gebakken klei
- 04 - warmtegeleidingscoëfficiënt van klei
- 05 - temperatuurvereffeningscoëfficiënt van klei
- 06 - verloop van oppervlaktetemperatuur en kerntemperatuur in een metselsteenstapeling

SAMENVATTING

Dit rapport behandelt enige eenvoudig toepasbare methoden voor de taxatie van het temperatuurverloop in de kern van een op een willekeurige wijze gegroepeerd keramisch produkt in een oven.

Het rapport bevat voorts een aantal aan de vakliteratuur ontleende rekenwaarden.

De praktische betekenis van de ontwikkelde calculatiemethoden voor het ontwerpen van veilige bakregimes wordt tenslotte aangetoond aan de hand van een aantal rekenvoorbeelden.

## INLEIDING

Tijdens de warmtebehandeling van keramische produkten in de oven zal een willekeurig gekozen temperatuur eerder worden bereikt of gepasseerd aan het oppervlak van het produkt dan in de kern daarvan. De kennis van deze faseverschuiving is van uitzonderlijke betekenis voor het ontwerpen van bakregimes waarmee het produkt in zo kort mogelijke tijd schadevrij tot het gewenste kwaliteitsniveau en met de gewenste constantheid van kwaliteit kan worden gebakken.

In het bijzonder bij de experimentele vaststelling van de zogenaamde kritieke bakcurve van een produkt op laboratoriumschaal en bij het ontwerpen van de uit de kritieke bakcurve af te leiden optimale bakcurve, zijn gegevens over deze faseverschuiving onontbeerlijk. Deze bepalen namelijk de temperatuurgrenzen van de verschillende te doorlopen kritieke temperatuurtrajecten alsmede de tijdsduur van de in te lassen temperatuuregalisatieperioden.

In het rapport C.T.I.-TNO 71/0176 "De warmtehuishouding van een vlamovenkamer" door Ir. J. Claus en G. Wentink wordt de niet-stationaire warmtestroming in het produkt tijdens de warmtebehandeling, door gebruikmaking van de differentierekening, beschreven. Voor de uitvoering van de berekeningen is een computerprogramma opgesteld. Deze rekenmethode maakt het onder meer mogelijk relatief snel nauwkeurige ontwerpen te leveren voor de bakregimes van de opeenvolgende bakproeven nodig voor de vaststelling van de kritieke bakcurve. Dit neemt niet weg, dat er zowel tijdens het experimenteel onderzoek op laboratoriumschaal als bij de evaluatie van bakprocessen in de industrie, behoefte blijft bestaan aan nog eenvoudiger hanteerbare rekenwaarden en rekenmethoden.

In overleg met de auteurs van bovengenoemd rapport werd besloten in deze behoefte te voorzien.

Gezien de aanwezigheid van een volledig uitgewerkt computerprogramma gebaseerd op de differentierekening, werd het gestelde probleem mede aan de hand van de resultaten van een aantal door de heer Wentink uitgevoerde computerberekeningen geanalyseerd.

1. DOELSTELLING VAN HET RAPPORT

Dit rapport beoogt een overzicht te geven van een aantal eenvoudig toepasbare formules en rekenwaarden voor de vaststelling van het verloop van de kerntemperatuur van keramische produkten bij de warmtebehandeling in de oven.

Tevens heeft dit rapport tot doel aan de hand van enige rekenvoorbeelden de praktische betekenis van dit soort calculaties bij het ontwerpen van veilige bakregimes aan te tonen.

## 2. HET GEBRUIKTE REKENMODEL

Verondersteld wordt dat de warmtestroming in een produkt tijdens de warmtebehandeling in de oven sterke overeenkomst vertoont met de warmtestroming in een oneindig uitgestrekte planparallele plaat.

Een tweezijdig verwarmde of gekoelde oneindig uitgestrekte planparallele plaat is dan ook als rekenmodel gekozen. De aan een produktstapel gelijkwaardige plaatdikte kan door berekening of aan de hand van een bakproef door ijking worden vastgesteld.

Verondersteld wordt verder dat de warmtebehandeling die deze plaat ondergaat, wordt gekenmerkt door een rechtlijnig verloop van de oppervlaktetemperatuur met de tijd in de opeenvolgende temperatuurtrajecten.

De keuze van de opwarmsnelheid of koelsnelheid in elk van deze temperatuurtrajecten is vrij. Wel wordt verondersteld dat de uitgestrektheid of de doorlooptijd van elk van de temperatuurtrajecten zodanig is, dat de temperatuurverdeling in de plaat binnen elk van de temperatuurtrajecten haar "evenwichtstoestand" nagenoeg bereikt, en ten opzichte van de oppervlaktetemperatuur onafhankelijk wordt van de tijd.

In dit eenvoudige rekenmodel wordt ook verondersteld, dat de getalwaarde van de stofconstanten die het temperatuurverloop in de plaat bepalen, in temperatuurtrajecten waarop de te ontwikkelen berekeningswijze wordt toegepast, constant blijven.

3. BETEKENIS VAN DE GEBRUIKTE SYMBOLEN

$r$	- halve dikte van de planparallele plaat	in m
$x$	- willekeurige afstand van een plaatdoorsnede evenwijdig aan het plaatoppervlak tot aan dit plaatoppervlak	m
$p$	- opwarmsnelheid dan wel koelsnelheid gemeten aan het plaatoppervlak	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$
$p_1$	- opwarmsnelheid dan wel koelsnelheid vóór een wijziging daarvan	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$
$p_2$	- opwarmsnelheid dan wel koelsnelheid ná een wijziging daarvan	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$
$\Delta p$	- positief verschil $p_1 - p_2$ , dan wel $p_2 - p_1$	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$
$\vartheta_x$	- temperatuur van de plaat op een afstand $x$ van het oppervlak	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_o$	- temperatuur aan het oppervlak van de plaat	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_p$	- gemiddelde temperatuur van de plaat	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\vartheta$	- resterende afwijking van de evenwichtswaarde van het temperatuurverschil ( $\vartheta_o - \vartheta_k$ ), behorende bij de gewijzigde waarde van de opwarm- of koelsnelheid in $^{\circ}\text{C}$ , na een tijdsverloop <u>n.s.</u> vanaf het tijdstip van wijziging van $p$	$^{\circ}\text{C}$
$s$	- faseverschuiving in het passeren van een bepaald temperatuurniveau door het oppervlak en door de kern van het model	s
$n$	- tijdfactor; vermenigvuldigingsfactor van $s$ , ter berekening van de totale aanpassingstijd bij wijziging van opwarm- of koelsnelheid	dimensieloos



- q - rekengrootheid, waarvan de getalwaarde de mate bepaalt, waarin de nieuwe evenwichtswaarde van ( $\vartheta_o - \vartheta_k$ ), na een wijziging van p wordt benaderd . . . . . dimensieloos
- z - gewenst resterend percentage van het oorspronkelijk aanwezig temperatuurverschil ( $\vartheta_o - \vartheta_k$ ) bij temperatuuregalisatie . . . . . %
- $\alpha$  - temperatuurvereffeningscoëfficiënt . . . . .  $m^2/s$
- $\lambda$  - warmtegeleidingscoëfficiënt . . . . .  $J/m.s.^{\circ}C$
- c - soortelijke warmte . . . . .  $J/kg.^{\circ}C$
- $\rho$  - volumieke massa . . . . .  $kg/m^3$
- $A_s$  - specifiek warmteuitwisselingsoppervlak in  $m^2$  per kg te bakken produkt . . . . .
- t - tijd . . . . . s
- T - aanpassingstijdsduur T = n.s. in seconden . . . . .

#### 4. OVERZICHT VAN BEREKENINGSFORMULES

##### 4.1. Temperatuurverdeling in het model tijdens de opwarming met constante snelheid in de evenwichtstoestand

De afleiding en de toelichting van onderstaande formules is weergegeven in bijlage 01.

4.11. De temperatuurgradiënt aan het oppervlak van het model ( $x = 0$ )

$$\frac{d\vartheta}{dx} = - \frac{p r}{\alpha}$$

4.12. De temperatuurverdeling in het model, voor  $x = 0$  tot  $x = r$

$$\vartheta_x = \frac{p x^2}{2} - \frac{p r x}{\alpha} + \vartheta_0$$

4.13. Het verschil tussen oppervlaktetemperatuur en kerntemperatuur

$$\vartheta_0 - \vartheta_k = p \cdot \frac{r^2}{2\alpha}$$

4.14. Het tijdverschil in het passeren van een temperatuurniveau door het oppervlak en door de kern van het model

$$s = \frac{r^2}{2\alpha}$$

4.15. De gemiddelde temperatuur van het model

$$\vartheta_p = \vartheta_0 - 2/3 (\vartheta_0 - \vartheta_k)$$

##### 4.2. Temperatuurverdeling in het model tijdens de koeling met constante snelheid in de evenwichtstoestand

De afleiding van onderstaande formules is geheel overeenkomstig de afleiding in bijlage 01.

4.21. De temperatuurgradiënt aan het oppervlak van het model

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{p r}{\alpha}$$

4.22. De temperatuurverdeling in het model, voor  $x = 0$  tot  $x = r$

$$\vartheta_x = \frac{p \cdot r \cdot x}{\alpha} - \frac{p x^2}{2\alpha} + \vartheta_0$$

4.23. Het verschil tussen kerntemperatuur en oppervlaktetemperatuur

$$\vartheta_k - \vartheta_0 = p \cdot \frac{r^2}{2\alpha} = p \cdot s$$

4.24. Het tijdverschil in het passeren van een temperatuurniveau door het oppervlak en door de kern van het model

$$s = \frac{r^2}{2\alpha}$$

4.25. De gemiddelde temperatuur van het model

$$\vartheta_p = \vartheta_0 + 2/3 (\vartheta_k - \vartheta_0)$$

4.3. Temperatuur vereffeningscoëfficiënt en specifiek warmteuitwisselingsoppervlak

4.31. Temperatuurvereffeningscoëfficiënt

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

4.32. Specifiek warmteuitwisselingsoppervlak

$$A_s = \frac{1}{r \cdot \rho}$$

4.4. Temperatuurverloop in de kern van het model in afhankelijkheid van de tijd bij wijziging van de opwarmsnelheid of koelsnelheid

De toelichting van onderstaande formules is weergegeven in bijlage 02.

- 4.41. Resterende afwijking van de evenwichtswaarde van het temperatuurverschil tussen oppervlak en kern na een tijdsverloop n.s. vanaf het tijdstip waarop de opwarm- of koelsnelheid werd gewijzigd

$$\Delta\theta = q \cdot \Delta p \cdot s$$

- 4.42. Relatie tussen de tijdfactor n en de rekengrootheid q

$$n = - 2 \log q$$

- 4.43. Waarde van de rekengrootheid q indien de nieuwe evenwichtswaarde van het temperatuurverschil tussen kern en oppervlak tot op 10% is benaderd

$$q_{10} = \frac{0,1 p_2}{\Delta p}$$

- 4.44. Waarde van de rekengrootheid q indien de nieuwe evenwichtswaarde van het temperatuurverschil tussen kern en oppervlakte tot op 5% is benaderd

$$q_5 = \frac{0,05 p_2}{\Delta p}$$

- 4.45. Waarde van de rekengrootheid q, indien in het geval van temperatuur-egalitatie met  $p_2 = 0$ , het oorspronkelijk aanwezige temperatuurverschil tussen oppervlak en kern van het model,  $\theta_o - \theta_k = p_1 \cdot s$ , tot z% van deze waarde wordt gereduceerd

$$q_z = 0,01 z$$

- 4.46. Totale aanpassingstijd tot de gewenste mate van benadering van de evenwichtstoestand

$$T = n.s.$$

## 5. REKENWAARDEN

Zoals uit de in hoofdstuk 4. vermelde formules blijkt, is de getalwaarde van het tijdsverschil  $s$  voor tal van calculatiedoeleinden nodig.

Voor een gegeven stapelwijze van te bakken produkten kan de faseverschuiving  $s$ , in relatie tot de temperatuur en de toestand waarin de produkten verkeren, (vóór of na het sinterproces) het beste langs experimentele weg worden vastgesteld. Door de meting van het verloop van de oppervlaktetemperatuur en de kerntemperatuur van een zich in een stapel bevindend produkt dat met een constante snelheid wordt opgewarmd, daarna tot de gewenste scherfdichtheid wordt gesinterd en vervolgens met constante snelheid wordt gekoeld, is de effectieve waarde van  $s$  als functie van de temperatuur redelijk nauwkeurig vast te stellen.

Voor de berekening van  $s$  uit de formule  $s = \frac{r^2}{2\alpha}$  is de kennis van de gelijkwaardige halve plaatdikte  $r$  en de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $\alpha$  nodig.

Voor sommige eenvoudige stapelwijzen van enkele keramische produkten is  $r$  direct meetbaar of af te leiden uit de formule 4.32, door taxatie van het specifiek warmteuitwisselingsoppervlak.

Gezien het feit dat de getalwaarde van  $\alpha$ , althans tijdens de opwarmfase, in sterke mate wordt bepaald door de exotherme en endotherme reacties in het te bakken produkt, komt voor de vaststelling van de relatie van  $\alpha$  met de temperatuur tijdens de opwarmfase een soortgelijke bakproef in aanmerking als voor de bepaling van de waarde van de faseverschuiving  $s$ .

Voor de bepaling van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $\alpha$  dient het te bakken proefobject echter plaatvormig gekozen te worden, opdat de halve dikte  $r$  nauwkeurig bekend is.

Uit de proefresultaten kan dan aan de hand van de formule  $s = \frac{r^2}{2\alpha}$  de effectieve waarde van  $\alpha$  voor de verschillende temperatuurgebieden worden vastgesteld.

Voor de berekening van  $\alpha$  is de kennis van de warmtegeleidingscoëfficiënt, de soortelijke warmte en de volumieke massa van de keramische scherfnoodzakelijk.

Van keramisch materiaal waarin geen sterke endotherme en exotherme reacties meer plaatsvinden biedt de vakliteratuur voldoende betrouwbare rekenwaarden voor de soortelijke warmte en de warmtegeleidingscoëfficiënt.

Bijlage 03 geeft het verloop van de soortelijke warmte van gebakken klei met de temperatuur weer.

Deze curve werd ontleend aan Etherington [ 2 ] .

Bijlage 04 geeft rekenwaarden van de warmtegeleidingscoëfficiënt van keramisch materiaal van verschillende dichtheid en temperatuur.

De grafiek werd door steller dezes samengesteld aan de hand van een zeer groot aantal verspreid in de vakliteratuur aangetroffen meetwaarden.

Het zal een ieder duidelijk zijn dat deze grafiek uitsluitend rekenwaarden verschaft voor globale calculaties.

Bijlage 05 geeft rekenwaarden van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt als functie van de temperatuur. De grafiek werd door steller dezes samengesteld aan de hand van de gegevens uit de bijlagen 03 en 04.

In het speurwerkprogramma 1972/1973 van het C.T.I.-TNO, werkgroep Grofkeramiek, is een experimenteel onderzoek opgenomen naar de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van enkele Nederlandse kleisoorten. Aan de hand van de resultaten van dit onderzoek zullen de bovenbedoelde rekenwaarden te zijner tijd op juistheid getoetst kunnen worden.

## 6. REKENVOORBEELDEN

De in hoofdstuk 4. weergegeven formules kunnen bij het optimaliseren van het bakproces van keramische produkten voor het oplossen van tal van problemen worden gebruikt.

Onderstaand zullen uitsluitend enkele toepassingen worden behandeld die betrekking hebben op de vaststelling van de kritieke bakcurve van een keramisch produkt in een gegeven stapelwijze. Bij de vaststelling van deze kritieke bakcurve wordt aan de hand van een aantal bakproeven op laboratoriumschaal onder meer nagegaan welke opwarmsnelheden en koelsnelheden de te bakken produkten in de verschillende stadia van de warmtebehandeling nog juist kunnen verdragen zonder aanleiding te geven tot het ontstaan van ongewenste schade. Het resultaat van het onderzoek is een temperatuurverloop met de tijd, dat is opgebouwd uit een aantal rechte lijnstukken die elk de kritieke opwarmsnelheid of koelsnelheid in het betreffende temperatuurtraject aangeven.

Een belangrijk probleem bij dit experimenteel onderzoek vormt de juiste keuze van de grenzen van de opeenvolgende karakteristieke temperatuurtrajecten.

### Voorbeeld 1

Gesteld dat men metselsteenvormlingen in een gegeven stapelwijze aan een bakproef wil onderwerpen met een opwarmsnelheid van  $80^{\circ}\text{C}/\text{uur}$ , doch dat men het traject van  $500^{\circ}$  tot  $625^{\circ}\text{C}$  wil passeren met een snelheid van  $40^{\circ}/\text{per uur}$ .

Gesteld dat men daarbij eist dat op het moment dat het oppervlak van de produkten met een snelheid van  $40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  het  $500^{\circ}\text{C}$ -niveau passeert, het dan aanwezige temperatuurverschil tussen oppervlakte en kern van de produkten niet meer dan 10% afwijkt van de evenwichtswaarde behorende bij een opwarmsnelheid van  $40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$ .

Gevraagd wordt nu, bij welke oppervlaktetemperatuur de aanvankelijke opwarmsnelheid van  $80^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  moet worden gewijzigd in  $40^{\circ}\text{C}/\text{h}$  om het gewenste resultaat te bereiken.

Als aanvullend gegeven staat bij voorbeeld het meetresultaat uit bijlage O6 ter beschikking, waarin het temperatuurverloop van het oppervlak en de kern van de stenen in de betreffende stapeling bij een opwarmsnelheid van  $40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  is aangegeven.

Oplossing voorbeeld 1

De waarde van rekengrootheid  $q_{10} = \frac{0,1 p_2}{\Delta p} = \frac{0,1 \cdot 40}{80 - 40} = 0,1$  (form.4.43)

$$\log q_{10} = \log 0,1 = -1$$

$$n = -2 \log q = -2 \cdot -1 = 2 \text{ (form. 4.42)}$$

De waarde van  $s$  rond  $500^\circ\text{C}$  kan worden afgelezen uit bijlage 06 en bedraagt 1,2 uren.

De tijdsduur  $T$  nodig voor de aanpassing van het temperatuurverschil  $(\vartheta_o - \vartheta_k)$  aan de nieuwe snelheid  $p_2$  bedraagt dan

$$T = n \cdot s = 2 \cdot 1,2 = 2,4 \text{ uren (form. 4.46)}$$

Dat betekent dat de oppervlaktetemperatuur in deze periode  $2,4 \times 40 = 96^\circ\text{C}$  is gestegen.

Bij een oppervlaktetemperatuur van  $500 - 96 = 404^\circ\text{C}$ , afgerond  $400^\circ\text{C}$ , dient de opwarmsnelheid derhalve van  $80^\circ\text{C}$  tot  $40^\circ\text{C}$  te worden teruggebracht om het traject  $500 - 625^\circ\text{C}$  onder de geplande omstandigheden te kunnen passeren.

Voorbeeld 2

Gesteld dat men bij een bakproef met metselsteenvormlingen in een gegeven stapeling het baktemperatuurniveau van  $1085^\circ\text{C}$  wenst te bereiken met een opwarmsnelheid van  $125^\circ\text{C}/\text{uur}$ .

Gevraagd wordt vooraf de tijdsduur te taxeren, die voor temperatuu-egalitatie nodig is, tot het tijdstip waarop het resterende temperatuurverschil tussen het oppervlak en de kern van de proefstapeling nog slechts  $2^\circ\text{C}$  bedraagt.

Als aanvullend gegeven staat wederom het meetresultaat uit bijlage 06 ter beschikking.

Oplossing voorbeeld 2

De waarde van de faseverschuiving  $s$  die bij benadering van de baktemperatuur niet meer door sterke exotherme of endotherme reacties wordt beïnvloed, is op grond van de formule 4.24 onafhankelijk van de opwarmsnelheid en kan derhalve uit bijlage 06 worden afgelezen.



Nabij de baktemperatuur geldt  $s = 1,0$  uur. Het temperatuurverschil  $(\vartheta_o - \vartheta_k)$  zal bij een opwarmingsnelheid van  $125^\circ\text{C}/\text{uur}$

$$1,0 \times 125 = 125^\circ\text{C} \text{ bedragen (formule 4.23)}$$

Gewenst wordt een resterende  $(\vartheta_o - \vartheta_k)$  van  $2^\circ\text{C}$ , hetgeen betekent dat de oorspronkelijke waarde tot

$$\frac{2}{125} \times 100 = 1,76\% \text{ daarvan dient te worden gereduceerd.}$$

De waarde van de rekengrootheid  $q_z$  wordt dan  $0,0176$  (formule 4.45).

$$\log q_z = - 1,753$$

De tijdfactor  $n$  wordt dan:

$$n = - 2 \log q_z = - 2 \cdot - 1,753 = 3,506$$

(formule 4.42)

De gevraagde egalisatietijd bedraagt dan:

$$T = n \cdot s = 3,506 \times 1 = \text{circa } 3,5 \text{ uur}$$

(formule 4.46)

### Voorbeeld 3

Gesteld dat men een dicht gezet enkelbladig hulopakket aan een bakproef wenst te onderwerpen. Gesteld ook dat men de koeling vanaf de baktemperatuur tot aan het kwartsomzettingstraject van  $600^\circ\text{C} - 525^\circ\text{C}$  met een koelsnelheid van  $40^\circ\text{C}/\text{uur}$  wenst te doen verlopen, doch dat het kwartsomzettingstraject zelf met een snelheid van  $16^\circ\text{C}/\text{uur}$  moet worden gepasseerd. Gesteld verder dat men daarbij eist dat op het moment dat het oppervlak van het pakket het  $600^\circ\text{C}$ -niveau met een snelheid van  $16^\circ/\text{uur}$  passeert, het temperatuurverschil tussen oppervlak en kern reeds tot op 10%, de evengewichtswaarde behorende bij een koelsnelheid van  $16^\circ\text{C}/\text{uur}$ , heeft bereikt. Gesteld tenslotte, dat nog geen temperatuurcurven van het type uit bijlage 06 ter beschikking staan en uitsluitend de dikte van het pakket en de gewenste volumieke massa van de stenen bekend zijn.

Pakketdikte : 210 mm  
Volumieke massa : 1700 kg/m<sup>3</sup>

Gevraagd wordt nu bij welke oppervlaktetemperatuur de aanvankelijke koelsnelheid van 40°C/uur naar schatting zal moeten worden gewijzigd in 16°C/uur om het beoogde resultaat te verkrijgen.

Oplossing voorbeeld 3

De waarde van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $\alpha$  kan met behulp van de grafiek in bijlage 05 worden geschat of met behulp van de grafieken in de bijlagen 03 en 04 als volgt worden berekend:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{formule 4.31})$$

$\lambda$  bij 600°C en  $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$  bedraagt : 0,775 J/m.s °C  
 $c$  bij 600°C bedraagt 1165 J/kg°C

$$\alpha = \frac{0,775}{1700 \cdot 1165} = 392 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

De waarde van de faseverschuiving  $s$  wordt dan: (formule 4.24)

$$s = \frac{r^2}{2 \alpha} = \frac{0,105^2}{2 \cdot 392 \cdot 10^{-9}} = 14050 \text{ seconden} = 3,9 \text{ uren}$$

De waarde van de rekengrootheid

$$q_{10} = \frac{0,1 p_2}{\Delta p} = \frac{0,1 \cdot 16}{(40 - 16)} = 0,0667 \quad (\text{formule 4.43})$$

$$\log q_{10} = \log 0,0667 = -1,176$$

De tijdfactor  $n$  wordt dan:

$$n = -2 \log q = -2 \cdot -1,176 = 2,352 \quad (\text{formule 4.42})$$

De tijdsduur  $T$  nodig voor de beoogde aanpassing van het temperatuurverschil ( $\vartheta_k - \vartheta_o$ ) aan de nieuwe snelheid  $p_2$  bedraagt dan

$$T = n \cdot s = 2,352 \cdot 3,9 = 9,16 \text{ uren} \quad (\text{formule 4.46})$$

Dat betekent dat de oppervlaktetemperatuur in deze periode

$$9,16 \times 16 = 146,5^\circ\text{C} \text{ is gedaald.}$$

Bij een oppervlaktetemperatuur van  $600 + 146,5^{\circ}\text{C} = 746,5^{\circ}\text{C}$ , afgerond  $750^{\circ}\text{C}$  dient de koelsnelheid derhalve van  $40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  te worden teruggebracht tot  $16^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  om het temperatuurtraject van  $600$  tot  $525^{\circ}\text{C}$  onder de geplande omstandigheden te passeren.

#### Opmerking

In vorenstaand rekenvoorbeeld werd aangenomen dat het temperatuurverschil  $(\vartheta_k - \vartheta_o)$  tijdens de koeling vanaf de baktemperatuur de evenwichtswaarde behorende bij een koelsnelheid van  $40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  tijdig heeft bereikt.

Voor een globale controle hierop mag, gezien de geringe temperatuurafhankelijkheid van  $\alpha$  in het temperatuurtraject van  $350^{\circ}\text{C}$  tot  $1250^{\circ}\text{C}$  (zie bijlage 05), de waarde van de faseverschuiving  $s$  gelijk aan de bovenberekende waarde van  $3,9$  uur worden gesteld.

De waarde van de rekengrootheid  $q_{10}$  voor de overgang van het sintertraject met  $p_1 = 0$  tot het snelkoeltraject met  $p_2 = 40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  wordt

$$q_{10} = \frac{0,1 \cdot 40}{40 - 0} = 0,1 \quad \log q = - 1$$

De tijdfactor  $n$  wordt

$$n = - 2 \log q = 2.$$

De aanpassingstijd  $T$  zal dan zijn

$$n \cdot s = 2 \cdot 3,9 = 7,8 \text{ uur.}$$

De oppervlaktetemperatuur zal dan  $7,8 \times 40^{\circ} = 312^{\circ}\text{C}$  zijn gedaald. In het geval dat de baktemperatuur  $1100^{\circ}\text{C}$  bedraagt zal de oppervlaktetemperatuur derhalve zijn gedaald tot  $1100 - 312 = 788^{\circ}\text{C}$  eer de evenwichtstoestand behorende bij de koelsnelheid van  $40^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  nagenoeg is bereikt.

#### Voorbeeld 4

Gesteld dat bij rekenvoorbeeld 3 na het passeren van het kritieke koeltraject van  $600^{\circ}\text{C}$  -  $525^{\circ}\text{C}$  de koelsnelheid weer wordt opgevoerd.

Gesteld verder dat daarbij wordt geeist, dat de kerntemperatuur van het pakket met een snelheid van  $16^{\circ}\text{C}$  per uur het temperatuurniveau van  $525^{\circ}\text{C}$  dient te bereiken voordat de koelsnelheid aan het oppervlak mag worden opgevoerd.

Gevraagd wordt de oppervlaktetemperatuur te berekenen waarbij deze verhoging van koelsnelheid dan mag plaatsvinden.

#### Oplossing voorbeeld 4

Volgens bijlage 05 bedraagt de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $\alpha$  bij  $500^{\circ}\text{C}$  en een volumieke massa van  $1700\text{ kg/m}^3$  circa  $400 \cdot 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ .

De waarde van de faseverschuiving  $s$  is dan:

$$s = \frac{0.105^2}{2 \cdot 400 \cdot 10^{-9}} = 13800 \text{ seconden} = 3,83 \text{ uren.}$$

Het temperatuurverschil tussen kern en oppervlak zal bij een koelsnelheid van  $16^{\circ}\text{C}/\text{uur}$  in de evenwichtstoestand  $p \cdot s = 16 \times 3,83 = 61^{\circ}\text{C}$  bedragen. Dat betekent dat op het moment dat de kerntemperatuur  $525^{\circ}\text{C}$  wordt de oppervlaktetemperatuur gedaald zal zijn tot  $525 - 61 = 464^{\circ}\text{C}$ .

Zodra de oppervlakte van het pakket derhalve gekoeld is tot  $464^{\circ}\text{C}$  is voldaan aan de gestelde eis en kan de koelsnelheid weer worden opgevoerd.

7. GERAADPLEEGDE LITERATUUR

- [ 1 ] Ir. J. Claus en G. Wentink  
De warmtehuishouding in een vlammenkamer  
Rapport C.T.I.-TNO 71/0176
  
- [ 2 ] H. Etherington, B.Sc, ARSM, Modern Furnace Technoly  
Charles Griffin and Company Ltd., London. 1960

Afleiding van formules

Gegevens

- a. Het in hoofdstuk I. beschreven rekenmodel.
- b. Het model wordt tweezijdig verwarmd met een constante opwarmsnelheid  $p$ .

Gevraagd

In de evenwichtstoestand na de aanlooperperiode wordt gevraagd:

- a. De temperatuurgradiënt aan het oppervlak van het model,

$$\frac{d\vartheta}{dx} \text{ voor } x = 0.$$

- b. De temperatuurverdeling in het model ten opzichte van de oppervlaktetemperatuur,  $\vartheta_0$ .
- c. Het verschil tussen oppervlaktetemperatuur en kerntemperatuur van het model ( $\vartheta_0 - \vartheta_k$ ).
- d. De tijdsduur  $s$  tussen het tijdstip dat een gekozen temperaturniveau door het oppervlak van het model wordt bereikt en het tijdstip waarop dit temperaturniveau door de kern wordt gepasseerd.
- e. De gemiddelde temperatuur ( $\vartheta_p$ ) van het model, berekend ten opzichte van de oppervlaktetemperatuur  $\vartheta_0$ .

Oplossing

Het uitgangspunt voor de berekening is de vergelijking van Fourier:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \alpha \cdot \frac{d^2\vartheta}{dx^2}$$

Op een willekeurig tijdstip gekozen na de aanlooperperiode is  $\frac{d\vartheta}{dt}$  constant en gelijk aan  $p$ .

De vorenstaande formule wordt dan:

$$\frac{d^2 \vartheta}{d x^2} = \frac{p}{\alpha}$$

Integratie levert op:

$$\frac{d \vartheta}{d x} = \frac{p x}{\alpha} + B$$

Bij  $x = r$  wordt

$$\frac{d \vartheta}{d x} = 0$$

Hieruit volgt dat

$$B = - \frac{p r}{\alpha}, \text{ zodat}$$

$$\frac{d \vartheta}{d x} = \frac{p x}{\alpha} - \frac{p r}{\alpha}$$

Bij  $x = 0$

wordt 
$$\frac{d \vartheta}{d x} = - \frac{p r}{\alpha}$$

Dit is de temperatuurgradiënt aan het oppervlak tijdens het opwarmen. Het minteken geeft daarbij aan dat bij toeneming van  $x$  de temperatuur daalt.

Integratie van:

$$\frac{d \vartheta}{d x} = \frac{p x}{\alpha} + B$$

geeft

$$\vartheta = \frac{p x^2}{2 \alpha} - \frac{p r \cdot x}{\alpha} + D.$$

Bij  $x = 0$  is  $\vartheta$  gelijk aan  $\vartheta_0$ . Hieruit volgt dat  $D = \vartheta_0$ , zodat

$$\vartheta = \frac{p x^2}{2 \alpha} - \frac{p r \cdot x}{\alpha} + \vartheta_0$$

Dit is de formule voor de temperatuurverdeling in een planparallele plaat tijdens de opwarming.

Bij  $x = r$  is  $\vartheta = \vartheta_k$ . Hieruit volgt dat:

$$\vartheta_o - \vartheta_k = p \cdot \frac{r^2}{2\alpha}$$

Dit is het verschil tussen oppervlaktetemperatuur en kerntemperatuur.

De faseverschuiving tussen het passeren van een willekeurige temperatuur door het oppervlak van het model en de kern van het model bedraagt:

$$\frac{\vartheta_o - \vartheta_k}{p} = s = \frac{r^2}{2\alpha} \quad \text{onafhankelijk van } p !$$

De gemiddelde temperatuur van de plaat bedraagt:

$$\vartheta_p = \frac{\int_{x=0}^{x=r} \vartheta \cdot dx}{r} = \frac{p r^2}{6\alpha} - \frac{3 p r^2}{6\alpha} + \vartheta_o$$

of

$$\vartheta_p = - \frac{2 p r^2}{6\alpha} + \vartheta_o = - 2/3 \cdot \frac{p r^2}{2\alpha} + \vartheta_o$$

of 
$$\vartheta_p = - 2/3 (\vartheta_o - \vartheta_k) + \vartheta_o$$

of

$$\vartheta_p = \vartheta_o - 2/3 (\vartheta_o - \vartheta_k)$$

Voor de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $\alpha$  in bovenstaande formules kan gesubstitueerd worden:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Voor de halve plaatdikte  $r$  kan indien gewenst gesubstitueerd worden:

$$r = \frac{1}{A_s \cdot \rho}$$

waarin  $A_s$  het specifiek warmteuitwisselingsoppervlak van het rekenmodel is.



Afleiding en toelichting van formules

Gegevens

- a. Het in hoofdstuk I. beschreven rekenmodel.
- b. De in bijlage 01 afgeleide betrekkingen, geldend voor een opwarming of koeling met een constante snelheid in de evenwichtstoestand.
- c. De in rapport C.T.I.-TNO 71/0176, Appendix I. behandelde differentierekening voor de beschrijving van het temperatuurverloop in een steenstapel bij opwarming en koeling en het daarbij uitgewerkte computerprogramma.
- d. Op het tijdstip  $t = t_0$  wordt de aanvankelijk geldende opwarm- of koelsnelheid  $p_1$  aan het oppervlak gewijzigd in  $p_2$ .  $p_2$  wordt daarbij kleiner of groter dan  $p_1$  gekozen.  $p_2 - p_1$  dan wel  $p_1 - p_2 = \Delta p$ .

Gevraagd

- a. De tijdsduur  $T$ , die gerekend vanaf het tijdstip  $t_0$  verloopt, tot het bij de nieuwe evenwichtstoestand behorende temperatuurverschil tussen kern en oppervlakte van het model tot op 10 respectievelijk 5% is bereikt.
- b. Voor het geval dat  $p_2 = 0$  bij temperatuuregalisatie: de tijdsduur  $T$ , die gerekend van het tijdstip  $t_0$  verloopt, tot het aanvankelijk aanwezige temperatuurverschil tussen kern en oppervlak van het model tot  $z\%$  van de oorspronkelijk waarde is gereduceerd.

Oplossing

Bij een constante passeersnelheid  $p$  van een gegeven temperatuurtraject bedraagt het temperatuurverschil tussen oppervlakte en kern van het gekozen model in de evenwichtstoestand

$$\vartheta_o - \vartheta_k = p \cdot s$$

Verwacht mag worden dat na een tijdsverloop  $n \cdot s$  vanaf het tijdstip  $t_0$ , waarop de snelheid  $p_1$  in  $p_2$  wordt gewijzigd, de resterende

afwijking van het bij  $p_2$  behorende temperatuurverschil  $\vartheta_o - \vartheta_k$  beschreven kan worden met de formule:

$$\text{resterende afwijking } \Delta\vartheta = q \cdot \Delta p \cdot s$$

waarin voor de rekengrootheid  $q$  geldt:

$$q = f(n)$$

Besloten werd voor de vaststelling van het functioneel verband tussen  $q$  en  $n$  gebruik te maken van het hierboven gememoreerde computerprogramma gebaseerd op de differentierekening.

Aan de hand van een aantal rekenvoorbeelden werd gevonden:

$$n = - 2 \log q$$

De formules zijn geldig voor de berekening van het temperatuurverloop van de kern van het model wanneer het temperatuurverloop aan het oppervlak tijdens de gehele warmtebehandeling bekend is en grafisch gezien is opgebouwd uit rechte lijnstukken.

Bij een benadering van de nieuwe evenwichtswaarde van

$$\vartheta_o - \vartheta_k = p_2 s \text{ tot op } 10\%$$

geldt:

$$\Delta\vartheta = 0,1 p_2 s.$$

De rekengrootheid  $q$  wordt dan:

$$0,1 p_2 s = \Delta\vartheta = q_{10} \Delta p \cdot s$$

of

$$q_{10} = \frac{0,1 p_2}{\Delta p}$$

Bij een nadering van de nieuwe evenwichtswaarde van

$$\vartheta_o - \vartheta_k = p_2 s \text{ tot op } 5\%$$

geldt:

$$\Delta\vartheta = 0,05 p_2 s$$

De rekengrootheid  $q$  wordt dan:

$$q_5 = \frac{0,05 p_2}{\Delta p}$$

In het geval van een temperatuuregalisatie met  $p_2 = 0$ , geldt voor het reduceren van het oorspronkelijk aanwezige temperatuurverschil  $\vartheta_o - \vartheta_k = p_1 s$  tot  $z\%$  van deze waarde:

$$0,01 z \cdot p_1 s = \Delta\vartheta = q_z \cdot p_1 s$$

of

$$q_z = 0,01 z$$

Wanneer de tijdfactor  $n$  uit de rekengrootheid  $q$  is berekend, wordt de totale aanpassingstijd  $T$  gevonden uit:

$$T = n \cdot s$$

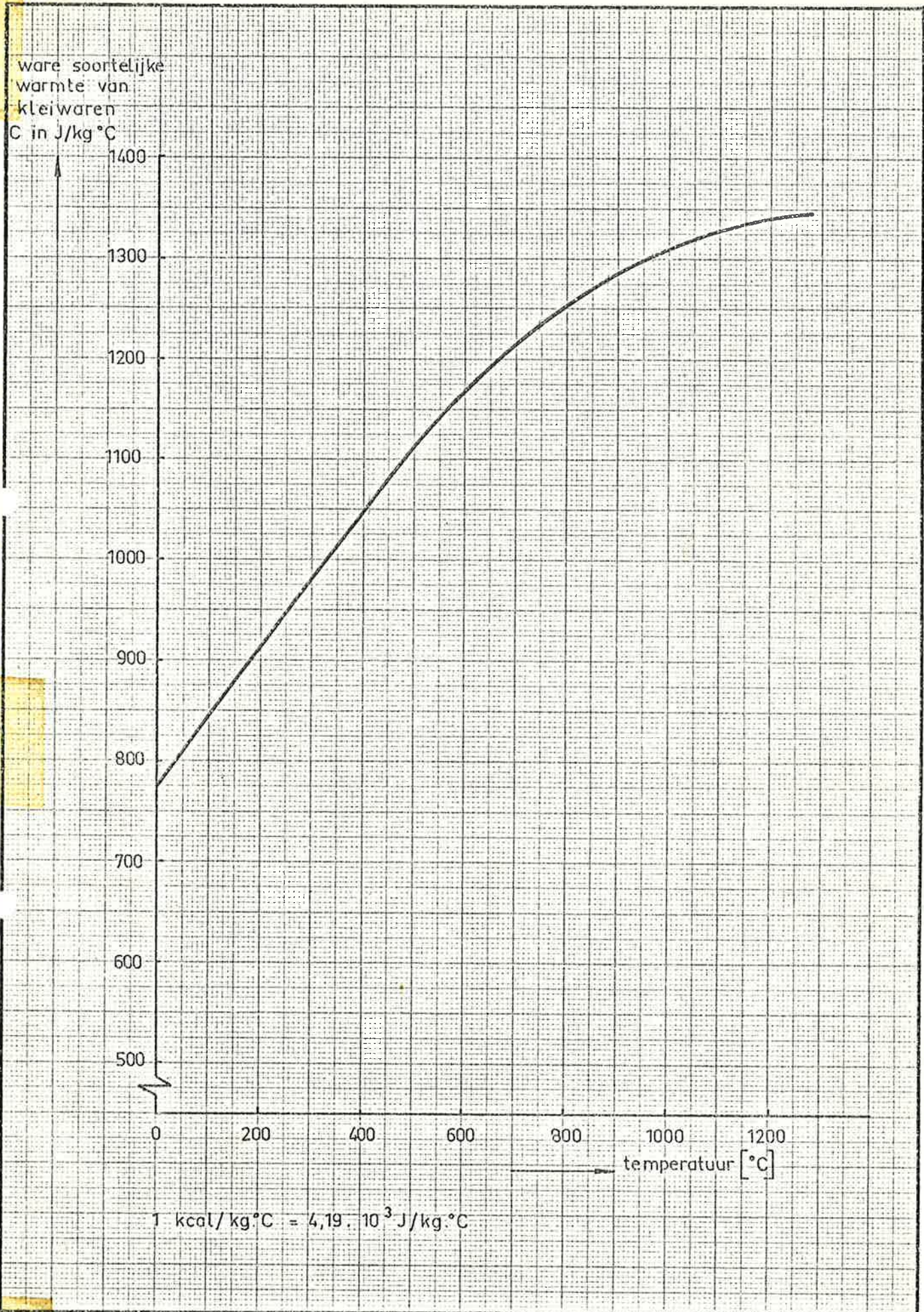


ware soortelijke  
warmte van  
kleiwaren  
C in J/kg °C

1400  
1300  
1200  
1100  
1000  
900  
800  
700  
600  
500

0 200 400 600 800 1000 1200  
temperatuur [°C]

$1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$



Ware soortelijke warmte van gebakken kleiwaren

CTI-TNO  
Werkgr.Grofkeramiek  
doss. 02.4.40080  
bijl. 720401\_03

4286



warmtegeleidings coëfficiënt  
van gebakken kleiwaren  
 $\lambda$  in  $J/m \cdot s \cdot ^\circ C$

2,0

1,5

1,0

0,5

0

1200

1400

1600

1800

2000

2200

2400

$^\circ C$

1200

1000

800

600

400

200

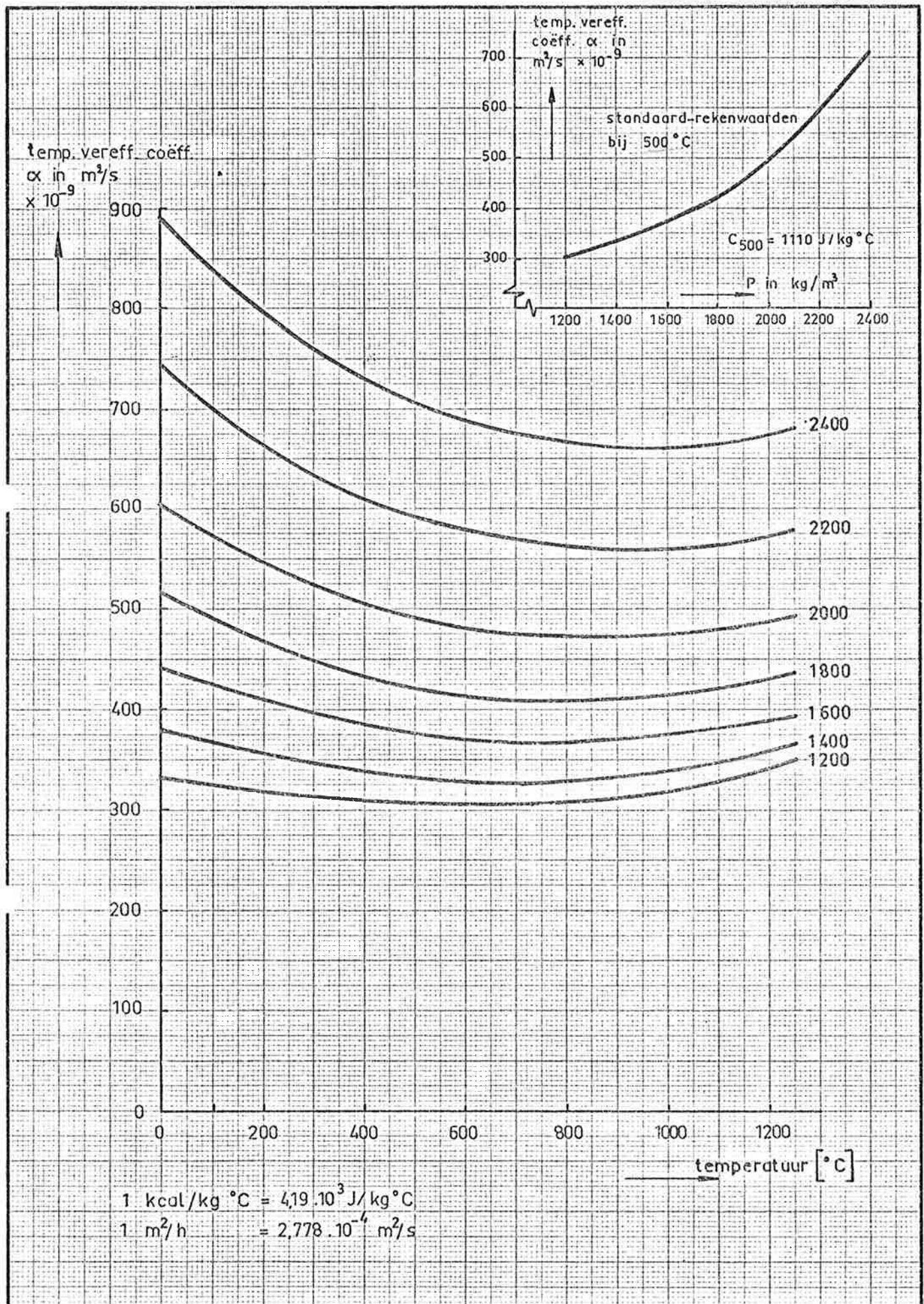
0

1 kcal./m.h. $^\circ C$  = 1,163 J/m.s. $^\circ C$

$\rho$  = volumieke massa  $kg/m^3$

Warmtegeleidingscoëfficiënt van gebakken kleiwaren

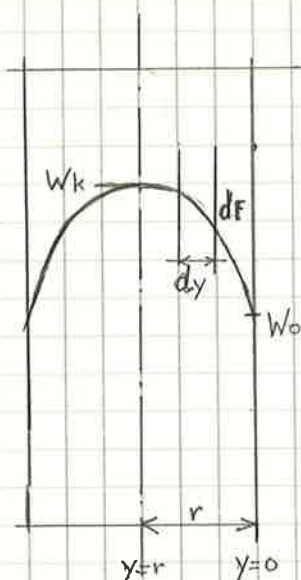
CTI-TNO  
Werkgr.Grofkeramiek  
doss. 02.4.40080  
bijl. 720401.04



Rekenwaarden voor de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van gebakken kleiwaren, alsmede standaardrekenwaarden voor  $\alpha$  en  $c$  bij  $500^\circ\text{C}$

CTI-TNO  
 Werkgr. Grofkeramiek  
 doss.nr. 02.4.40080  
 bijl. 720401\_05





Formule voor het monodimensionaal  
watertransport in een drogende  
kleimassa tijdens de periode van  
verdamping aan het oppervlak.  
(Fourier 1822).

$$A = k \cdot \rho^s \frac{dw}{dy} \quad (1)$$

Waarin is:

$A$  = massa-stroomdichtheid in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$k$  = vochtgeleidingscoëfficiënt in  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$\rho^s$  = volumieke massa van de klei, in  $\text{kg}$  droge klei  
per  $\text{m}^3$  vochtige klei ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\frac{dw}{dy}$  = vochtgradient, d.w.z. het verschil in watergehalte  
 $W$  (in  $\text{kg}$  water per  $\text{kg}$  droge klei) per lengte-eenheid  
in de richting van de waterbeweging

Neem een volumelement, met lengte  $dy$  en doorsnede  $dF$ .

Watertransport door opp  $dF$  in tijd  $dt$

$$m = k \cdot \rho^s \frac{dw}{dy} \cdot dF \cdot dt.$$

Verander het verschil tussen de oppervlakkige en binnenvloeiende waterhoeveelheid.

$$\frac{dm}{dy} = -k \cdot \rho^s \frac{d^2w}{dy^2} \cdot dF \cdot dt.$$

$$\frac{dm}{dt} = -k \cdot \rho^s \frac{d^2w}{dy^2} \cdot dy \cdot dF.$$

Stel ~~positieve~~ massa van droge klei in volumelement  $dy \cdot dF = G$ .

$$G = \rho^s \cdot dy \cdot dF.$$

$$dm = dw \cdot G.$$

} substitueren.

$$\frac{dw}{dt} = -k \cdot \frac{d^2w}{dy^2} \quad (2)$$

In de evenwichtstoestand zal  $\frac{dw}{dt}$  voor elke waarde van  $y$  constant zijn:

Indien droogsmeltheid per  $m^2$  per sec.  $A \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$  bedraagt, en wanneer halve dikte van plaatklei  $\frac{r}{2} \text{ m}$  is geldt:

$$\text{voor. nat volume } 1 \text{ m}^2 \text{ plaat} = \frac{r}{2} \text{ m}^3$$

$$\text{voor droog gewicht } 1 \text{ m}^2 \text{ plaat} = r \cdot \rho' \text{ kg.}$$

$$\text{derhalve geldt. } A = r \cdot \rho' \frac{dw}{dt} \quad \frac{dw}{dt} = \frac{A}{r \cdot \rho'}$$

ge substitueerd in (2) geeft.

$$\frac{d^2w}{dy^2} = -\frac{A}{r \cdot \rho' \cdot k} \quad \text{Integreren}$$

$$\frac{dw}{dy} = -\frac{A}{k \cdot \rho' \cdot r} \cdot y + B \quad (3)$$

$$\text{voor. } y = r \text{ wordt. } \frac{dw}{dy} = 0 \quad \text{dus } B = \frac{A \cdot r}{k \cdot \rho' \cdot r} = \frac{A}{k \cdot \rho'}$$

$$\frac{dw}{dy} = -\frac{A}{k \cdot \rho' \cdot r} \cdot y + \frac{A}{k \cdot \rho'} \quad (3a)$$

$$\text{voor } y = 0 \text{ wordt. } \frac{dw}{dy} = \frac{A}{k \cdot \rho'} \quad (4) \Rightarrow \text{gradient van opp.}$$

Integratie van formule (3a) geeft:

$$W = \frac{A}{k \cdot \rho'} y - \frac{1}{2} \frac{A y^2}{k \cdot \rho' \cdot r} + \Pi$$

$$\text{voor } y = 0 = W = W_0 \quad \Pi = W_0$$

$$W = \frac{A \cdot y}{k \cdot \rho'} - \frac{A \cdot y^2}{2 \cdot k \cdot \rho' \cdot r} + W_0 \quad (5)$$



Voor  $y = r$ . ~~het~~ geldt  $W = W_k$ .

$$W_k = \frac{A \cdot r}{k \cdot \rho'} - \frac{A \cdot r}{2 \cdot k \cdot \rho'} + W_0$$

$$(W_k - W_0) = \frac{A \cdot r}{2 \cdot k \cdot \rho'} \quad (6)$$

Wanneer de dichtheid die verloopt tussen het passeren van een bepaald vochtfractie aan het oppervlak en aan in de kern.  $s$ . secundum bedraagt.,  
is in deze  $s$ . sec.  $A \cdot s$ . kg. water verdampt.

Waterfractie verschil bedraagt.  $(W_k - W_0)$ .

Verdampt is:  $(W_k - W_0) \cdot r \cdot \rho'$

derhalve geldt:  $s = \frac{(W_k - W_0) \cdot r \cdot \rho'}{F}$

$$s = \frac{A \cdot r \cdot r \cdot \rho'}{2 \cdot k \cdot \rho' \cdot A} \neq ; \quad s = \frac{r^2}{2k} \quad (7)$$

gasverschuiwing blijkt derhalve onafhankelijk van  $A$ !!

Voor het gemiddelde waterfractie  $W$  van een plaat geldt.

$$W_{\text{gem}} = \frac{\int_{y=0}^{y=r} W \cdot dy}{r} =$$

$$\int_{y=0}^{y=r} W \cdot dy = \frac{1}{2} \frac{A}{k \cdot \rho'} r^2 - \frac{1}{6} \frac{A \cdot r^2}{k \cdot \rho'} + W_0$$

$$W_{\text{gem}} = \frac{3}{6} \frac{A \cdot r}{k \cdot \rho'} - \frac{1}{6} \frac{A \cdot r}{k \cdot \rho'} + W_0$$

$$W_{\text{gem}} = W_0 + \frac{2}{6} \frac{A \cdot r}{k \cdot \rho'} \equiv W_0 + \frac{2}{3} \cdot \frac{A \cdot r}{2 \cdot k \cdot \rho'}$$

$$W_{\text{gem}} = W_0 + \frac{2}{3} (W_k - W_0) \quad (8)$$

$$\text{Mel: } k_{\text{eff}} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

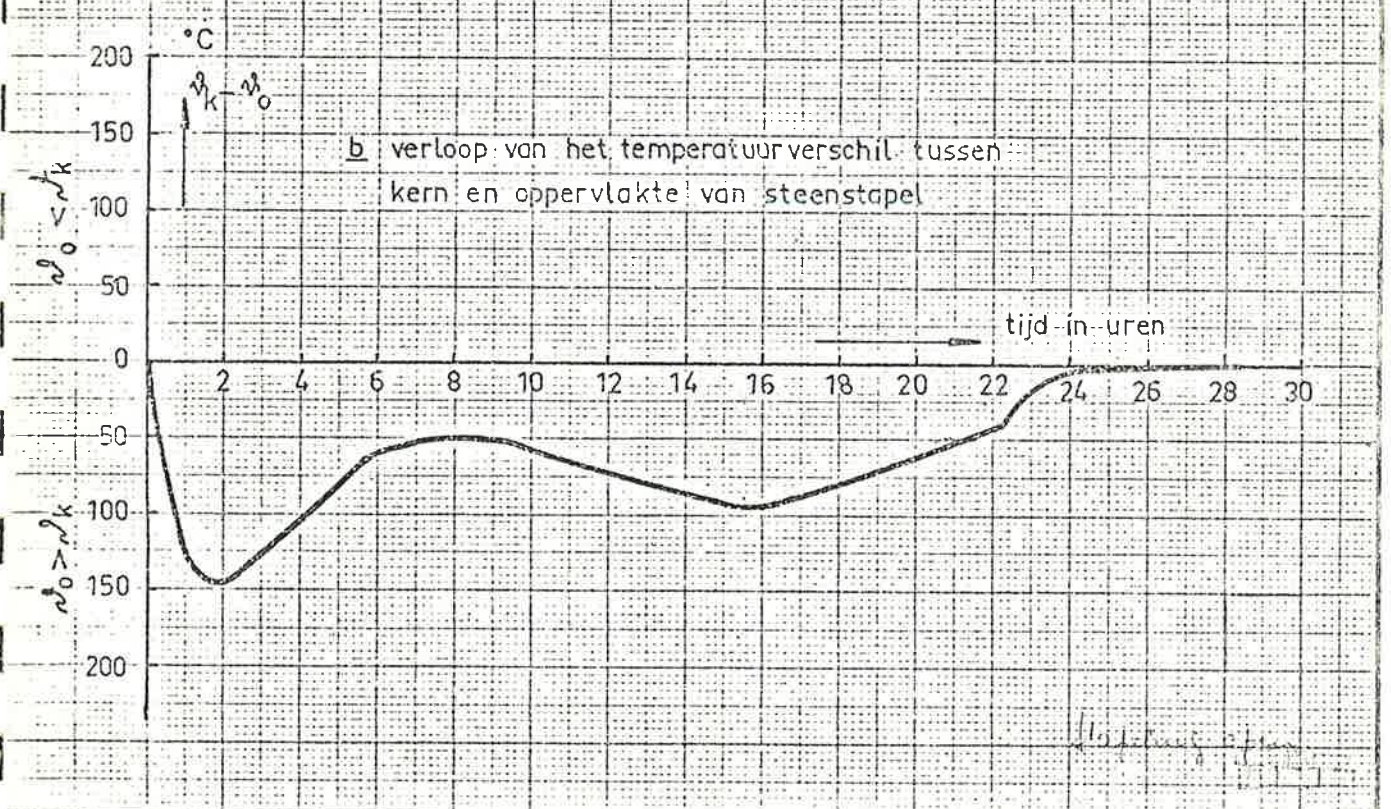
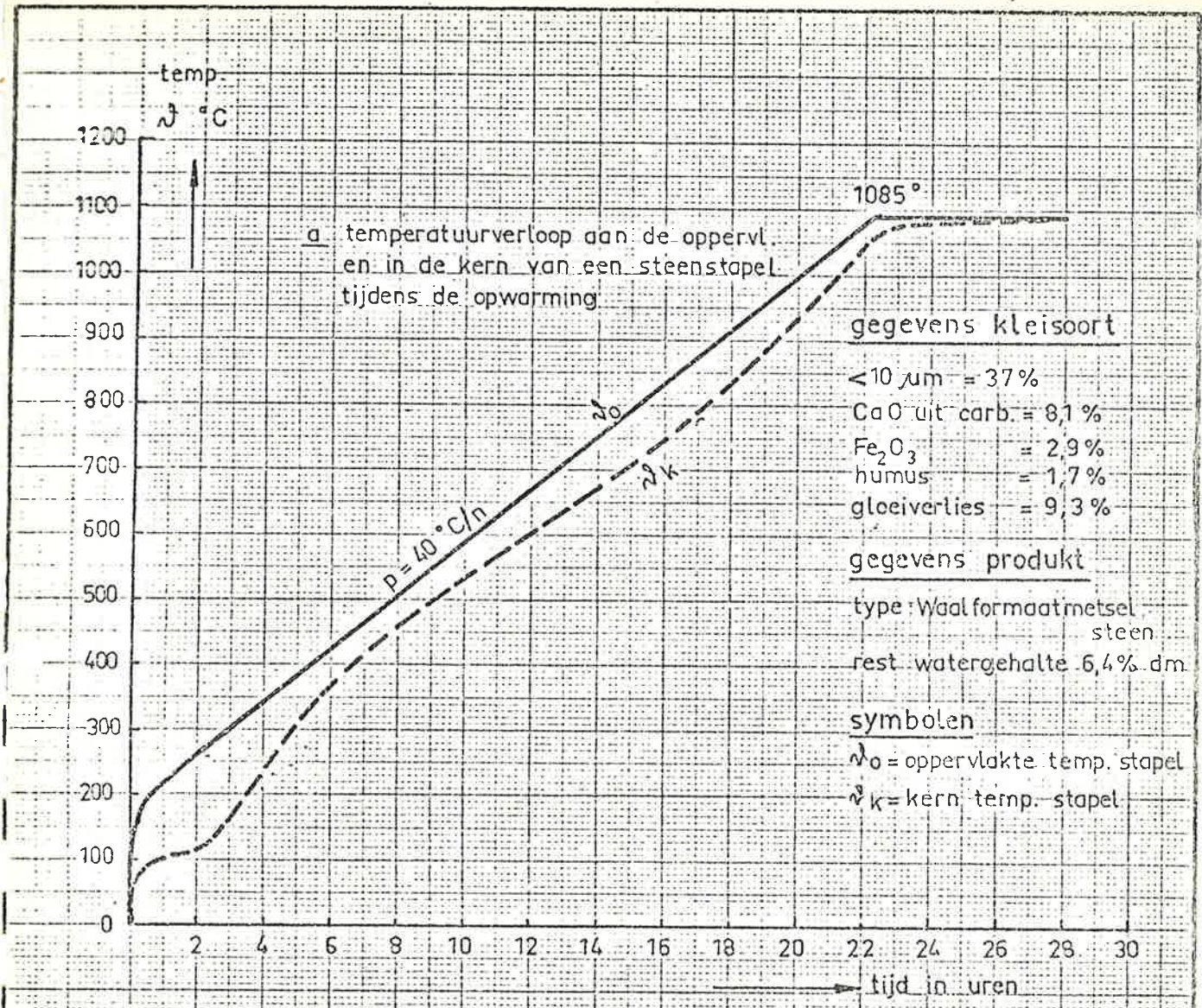
$$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 100 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{Gesucht } r = 0,025 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Gesucht: } (W_k - W_0) : \frac{A \cdot r}{2 \cdot k \cdot \rho} &= \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,025}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 1600} \\ &= \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{32 \cdot 10^{-6}} = 0,0694 \\ &= \underline{\underline{6,94 \%}} \end{aligned}$$





Voorbeeld van het verloop van oppervlaktetemperatuur en kerntemperatuur van een stapel metselsteen vormlingen tijdens de opwarming met 40 °C/h

4205

CTLTNO  
 Werkgr. Grofkeramiek  
 doss. 02.4.40080  
 bijl. nr. 720401\_06