

BASISGEGEVENS VOOR WARMTE-TECHNISCHE
BEREKENINGEN IN DE GROFKERAMISCHE
INDUSTRIE

door

J.H. van der Velden



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Ref.nr. : 85-07557

Dossier nr.: 8725-13482

Datum : 8 juni 1985

P

Trefwoorden:

- Warmtetechniek
- Keramiek
- Basisgegevens

„Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.”

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de „Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelingsopdrachten aan TNO, 1979” dan wel de desbetreffende terzake tussen partijen gesloten overeenkomst.

De Nederlandse Keramische Industrie

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Pag.</u>
SAMENVATTING	3
1. INLEIDING	4
2. THERMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN COURANTE KERAMISCHE MATERIALEN	5
3. REACTIEPRODUKTEN EN REACTIEWARMTEN VAN KLEIPRODUKTEN	8
4. EIGENSCHAPPEN VAN LUCHT EN GRONINGS AARDGAS	10
5. GEGEVENS BETREFFENDE TRANSMISSIE EN ACCUMULATIE VAN WARMTE IN ISOLERENDE BEKLEDINGEN	11
6. INFORMATIE OVER WARMTE-UITWISSELING TUSSEN OVENGASSEN EN OVENCHARGE IN TUNNELOVENS	15
7. GERAADPLEEGDE LITERATUUR	18
BIJLAGEN: 01 tot en met 41.	

SAMENVATTING

In 41 informatiebladen zijn basisgegevens verzameld, die het opstellen van gedetailleerde warmtebalansen van tunnelovens voor grofkeramische produkten mogelijk maken en voorts gebruikt kunnen worden voor het optimaliseren van de bedrijfsvoering van tunnelovens.

De basisgegevens hebben betrekking op de thermische eigenschappen van courante keramische materialen, de reactieprodukten en reactiewarmten van klei, de eigenschappen van lucht en Gronings aardgas, de transmissie en accumulatie van warmte in isolerende bekledingen, alsmede op de warmte-uitwisseling tussen ovengassen en ovencharge in tunnelovens.

1. INLEIDING

Het navolgende rapport is vooral bestemd voor diegenen die geconfronteerd worden met vragen betreffende de ontwerp kwaliteit of de optimale bedrijfsvoering van tunnelovens in de grofkeramische industrie.

In veel gevallen heeft men daarbij behoefte aan basisgegevens, die een kwantitatieve benadering van de problematiek mogelijk maken. Het onderzoek naar betrouwbare getalwaarden voor de relevante parameters is in veel gevallen zeer tijdrovend en leidt vaak tot een weinig degelijke keuze ad-hoc, die de vergelijkbaarheid en de betrouwbaarheid van studieresultaten schaadt.

In dit rapport zijn een aantal belangrijke basisgegevens voor warmtetechnische berekeningen met betrekking tot het bakproces in de grofkeramische industrie verzameld. Ze zijn na een uitgebreide literatuurstudie met zorg gekozen en toegelicht met opmerkingen ten aanzien van de geldigheid in concrete gevallen.

Achtereenvolgens komen aan de orde, een aantal thermische eigenschappen van courante keramische materialen, de reactieproducten en reactiewarmten van klei, eigenschappen van lucht en Gronings aardgas, gegevens inzake de transmissie en accumulatie van warmte in isolerende bekledingen alsmede informatie betreffende de warmte-uitwisseling tussen ovengassen en ovencharge in tunnelovens. De verzameling gegevens opent in bijlage 01 met omrekeningsfactoren van eenheden.

2. THERMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN COURANTE KERAMISCHE MATERIALEN

Voor de berekening van de geleiding of accumulatie van warmte in bijvoorbeeld wanden van drogers en ovens in de grofkeramische industrie, in bekledingen van tunnelovenwagens of in grofkeramische produkten, die gebakken worden, zijn de volumieke massa, de soortelijke warmte en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de betrokken materialen onontbeerlijke grootheden.

Vaak staan wat de soortelijke warmte en de warmtegeleidingscoëfficiënt betreft geen betrouwbare gegevens ter beschikking en is men aangewezen op het gebruik van globale getalwaarden, die men aan de literatuur en aan commerciële materiaalspecificaties ontleent.

Uit een analyse van een ruim aantal literatuurgegevens blijkt, dat de soortelijke warmte van een groot aantal materialen, zoals gedroogde en gebakken kleiprodukten, vuurvaste chamotte stenen, diverse al dan niet isolerende betonmassa's, keramische vezels en calciumsilicaat-isolatiemateriaal, althans in temperatuurgebieden waarin deze materialen doorgaans worden toegepast, globaal beschreven kan worden met de formule:

$$c = 800 + 0,578.\theta$$

Hierin is:

C = soortelijke warmte in J/(kg.K)

θ = materiaalsoorttemperatuur in °C.

Voor de enthalpie h_w ten opzichte van 0 °C in J/kg geldt dan:

$$h_w = 800 + 0,289.\theta^2$$

De enthalpie ten opzichte van 0 °C bij een standaard temperatuur van het industriële binnenklimaat van 15 °C bedraagt:

$$h_{15} = 12065 \text{ J/kg}$$

In bijlage 02 zijn deze betrekkingen grafisch weergegeven.

Uit de literatuurgegevens van de in het voorgaande bedoelde mate-

riaalsoorten blijkt voorts, dat een globale getalwaarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt λ_{θ} in W/(m.K) van die materialen bij θ °C, aan de hand van de formule:

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 + Z \cdot \theta,$$

kan worden ontleend aan de meestal wel vrij nauwkeurig bekende waarde van de volumieke massa ρ in kg/m³ van het materiaal.

Bijlage 03 toont het zo zorgvuldig mogelijk gekozen verloop van de warmtegeleidingscoëfficiënt λ_0 bij 0 °C en het verloop van de temperatuurfactor Z met de volumieke massa van het materiaal. Het gebruik van de bijlagen 02 en 03 komt vooral in aanmerking bij warmtetechnische studies waarin de keuze van een bepaalde fabrikaat van een materiaal niet of nauwelijks relevant is. Het vereenvoudigt in dat geval de berekeningen en bevordert de vergelijkbaarheid van studieresultaten. Uiteraard dient in gevallen, waarin de fabriekkeuze wel van belang is en bovendien vertrouwenwekkende informatie over soortelijke warmte en warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de temperatuur wordt verstrekt, aan het gebruik van laatstbedoelde gegevens de voorkeur te worden gegeven.

Bijlage 04 toont, onder gebruikmaking van de gegevens in de bijlagen 02 en 03, voor verschillende temperatuurniveaus het verloop van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt α met de volumieke massa van een materiaal.

Bij verhitting van een materiaal levert een lage waarde van α een trage doorwarming van dat materiaal op. - Het valt op, dat in het bijzonder materialen met een volumieke massa tussen 800 en 1250 kg/m³ in dit opzicht het traagst zijn. Het gegeven is van belang bij het ontwerpen van brandwerende wanden en tunnelovenwagenbekledingen.

Bijlage 05 geeft een overzicht van de thermische eigenschappen van een aantal courante ovenbouwmaterialen.

Aangezien bij een materiaalkeuze op warmtetechnische gronden in het algemeen ook de mechanische eigenschappen van het materiaal een belangrijke rol spelen, is in bijlage 06 zeer globaal en uitsluitend ter oriëntatie de relatie tussen de druksterkte in koude toestand en de volumieke massa van courante keramische bouwmaterialen aangegeven.

Opmerking.

Ter voorkoming van misverstand zij opgemerkt, dat tal van in de grofkeramische industrie overigens nauwelijks toegepaste keramische materialen, zoals bijvoorbeeld magnesietstenen, chroomertsstenen, zirkoonsilicaatstenen, siliciumcarbide-materialen en mullietstenen thermische eigenschappen vertonen, die in belangrijke mate afwijken van het in het vorenstaande geschetste standaard gedrag. Controle op de toepasbaarheid van de gegeven algemene informatie in concrete gevallen blijft derhalve noodzakelijk.

3. REACTIEPRODUKTEN EN REACTIEWARMTEN VAN KLEIPRODUKTEN

Voor het opstellen van warmte- en stofbalansen van grofkeramische bakprocessen dient men onder meer te beschikken over rekenwaarden voor de exotherme en endotherme reacties die in de te bakken grondstof plaatsvinden.

Aangezien een nauwkeurige vaststelling van alle tijdens de warmtebehandeling van een gegeven klei optredende warmte-effecten een bijzonder uitgebreide onderzoek zou vergen is er naar gestreefd de gezochte warmte-effecten aan de hand van literatuurgegevens en enkele eenvoudige analyseresultaten berekenen. Die analyses zijn:

- het rest-watergehalte van de vormelingen aan het begin van het bakproces [W_r]'
- het gloeiverlies [GV]'
- het gehalte aan organische stof [OM]'
- het gehalte aan koolzuur, afkomstig van de in de grondstof aanwezige carbonaten [CO_2]'
- het gehalte aan chemisch gebonden water in de grondstof [W_c]' te berekenen uit

$$[W_c]' = [GV]' - [OM]' - [CO_2]'$$

Bijlage 07 geeft een overzicht van de reactiewarmten bij de opwarming van kleiprodukten tot de baktemperatuur.

In bijlage 08 zijn de berekeningen van de enthalpie, en de warmtebehoefte van kleiprodukten in voorwarmzone en voorvuur van een tunneloven geprogrammeerd. De schoorsteenverliezen voortvloeiend uit de afvoer van de gasvormige reactieprodukten kunnen aan de hand van de in de bijlage vermelde formules eveneens vastgesteld worden.

Bijlage 09 geeft voorts een overzicht van de hoeveelheden gasvormige reactieprodukten, die bij de verhitting van kleiprodukten ontstaan. Zoals het schema laat zien worden gloeiverlies en poriënwater naast de hoofdstroom van gebakken produkt als aparte stofstromen beschouwd. Alle grootheden in de bijlagen 07, 08 en 09 zijn daartoe

op 1 kg gebakken produkt betrokken. Een en ander vergemakkelijkt warmtetechnische studies aan continue ovens in sterke mate.

4. EIGENSCHAPPEN VAN LUCHT EN GRONINGS AARDGAS

Bijlage 10 geeft een aan gegevens van de N.V. Nederlandse Gasunie ontleend overzicht van de eigenschappen van Gronings aardgas. Voorts zijn in deze bijlage standaard begincondities van verbrandingslucht en proceslucht gespecificeerd. Zij definiëren tevens een standaard industrieel binnenklimaat.

Bijlage 11 toont het verloop van de ware soortelijke warmte van lucht en verbrandingsgassen van Gronings aardgas met de temperatuur. De grafiek geeft tevens het ter vereenvoudiging van berekeningen veronderstelde verloop van elk der getekende curven aan. De opneming van de in verbrandingstechnisch opzicht hoge luchtfactoren in de grafiek houdt verband met het gebruik, dat van deze gassen in de voorwarmzone van continue ovens wordt gemaakt.

Bijlage 12 geeft informatie over de enthalpie ten opzichte van 0 °C van lucht en verbrandingsgassen van aardgas.

In bijlage 13 zijn de formules weergegeven waarmee de soortelijke warmte en de enthalpie van lucht en verbrandingsgassen bij gegeven temperatuur en luchtfactor kunnen worden berekend.

Ten behoeve van droogtechnische berekeningen is in bijlage 14 een Mollierdiagram voor vochtige lucht opgenomen. In fabricage-eenheden voor keramiek vindt voor allerlei doeleinden transport van lucht en rookgassen plaats. Ter beperking van investeringskosten en energieverliezen, alsmede op grond van allerlei stromingstechnische overwegingen is men bij de projectering van deze transportsystemen niet vrij in de keuze van de gassnelheden in de kanalen. Bijlage 15 doet ten aanzien van dit punt aanbevelingen.

Ter karakterisering van de stromingstoestand van lucht met het getal van Reynolds Re is in bijlage 16 tenslotte de kinematische viscositeit van lucht als functie van de temperatuur weergegeven.

5. GEGEVENS BETREFFENDE TRANSMISSIE EN ACCUMULATIE VAN WARMTE IN ISOLERENDE BEKLEDINGEN

Bijlage 17 geeft een inzicht in het geheel van warmte- en stofstromen, dat zich bijvoorbeeld in de voorwarmzone van een tunneloven manifesteert. Wat de warmtestromen door de wanden en de plafonds van de ovenruimte betreft heeft men te maken met een stationair warmte-transport, dat, afhankelijk van de binnenwandtemperatuur en de wandconstructie, van plaats tot plaats in de oven verschillend zal zijn, en zich betrekkelijk eenvoudig laat berekenen.

Het warmtetransport in de bekleding van de tunnelovenwagens is niet stationair. Een belangrijk deel van de warmte, die per tijdseenheid de bekleding in de voorwarmzone binnenstroomt, wordt gebruikt voor de opwarming van die bekleding. Zeker aan het begin van de reis van de wagens door de oven zal slechts een gering deel van de toegevoerde warmte aan de onderzijde van de wagens worden afgevoerd.

Het warmtestroomdiagram in bijlage 18 geeft gedetailleerd overzicht van de verschillende warmtestromen in een tunneloven.

De onderbroken lijnen 0-0, 1-1, 2-2 en 3-3 geven de grenzen aan van de verschillende ovenzones.

De lijn A-A markeert de warmtestroom die in het ovenfundament verloren gaat.

De lijnen B-B en C-C stellen respectievelijk de onderzijde van de wagentrein en het ovenplafond voor. Bij de warmtestroomposten 1, 2 en 5 aan de grenslijn C-C zijn de warmteverliezen van de zijwanden inbegrepen.

De onderbroken lijn D-D is het loopdek van een tunneloven die voorzien is van een hangdek met bijbehorend koelsysteem.

Aan de grenslijn HE-HE in het midden van het warmtestroomdiagram vindt de warmteuitwisseling plaats tussen de ovencharge inclusief wagens (onderhelpt) en de ovengassen (bovenhelpt). De posten 3 en 4 aan de grenslijn HE-HE vertegenwoordigen de hoeveelheden reactiewarmte die in voorwarmzone en stookzone moeten worden geleverd.

Geheel boven en links in de figuur ziet men de stroom afvalwarmte voor droogdoeleinden. De met letters aangeduide warmtestroomposten hebben voornamelijk betrekking op de voorwarmtunnel.

Het diagram werd speciaal ontworpen voor het opstellen van gedetailleerde warmtebalansen van ovenzones en studies ter besparing op het energiegebruik van tunnelovens.

De overige bijlagen van dit hoofdstuk geven aanvullende basisinformatie voor de berekening van de warmtestromen door de grenzen A-A, B-B, C-C en D-D, alsmede door de grenzen 0-0, 1-1, 2-2 en 3-3 en HE-HE wat betreft de ovenwagenbekledingen.

De warmtetransmissie door gelaagde wanden kan voor stationair warmte-transport beschreven worden met:

$$\phi = \frac{(\theta_i - 15)}{\sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{a}}$$

Hierin is:

ϕ = warmtestroomdichtheid in W/m^2 .

θ_i = oppervlaktetemperatuur van de hete binnenwand in $^{\circ}C$.

d = wanddikte van de lagen waaruit de wand is samengesteld in m.

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt van de lagen bij de heersende temperatuur in $W/(m.K)$.

a = warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de koude zijde van de wand in $W/(m^2.K)$.

Wat betreft de warmtegeleidingscoëfficiënt verwijst hoofdstuk 2 naar de nodige gegevens.

De bijlagen 19 en 20 doen aanbevelingen inzake de berekening van de warmteoverdracht naar een omgeving van $15^{\circ}C$ onder verschillende omstandigheden.

De warmteafgifte van de onderzijde van tunnelovenwagens wordt bepaald door de warmtestraling naar het ovenfundament en de warmteoverdracht naar de koellucht van het koelsysteem van de wielstellen. Laatstbedoelde warmteoverdracht zal tengevolge van de meestal verscholen positie van de wagenonderzijde tussen de chassisbalken hoofdzakelijk door natuurlijke convectie plaats vinden. De bijlagen

21 en 22 geven de warmtestroomdichtheid als gevolg van straling, respectievelijk natuurlijke convectie, onder verschillende omstandigheden weer. Voor een breed veld van mogelijke omstandigheden tonen de bijlagen 23 en 24 de in totaal ten gevolge van straling en natuurlijke convectie door een wagenbodem overgedragen warmte. Voor een globale standaardberekening van het thermodynamisch gedrag van ovenwagenbekledingen is de veronderstelling gerechtvaardigd, dat de warmteoverdrachtscondities te vinden zijn langs de onderbroken lijn, die het totale veld van mogelijke condities doorsnijdt. De standaardwarmteoverdrachtscoëfficiënt α aan de onderzijde van de wagenbekledingen bedraagt dan:

$$\alpha = 4 + 0,015 \cdot \theta_e$$

θ_e is hierin de temperatuur van de onderzijde van de bekleding in °C. De warmtestroomdichtheid ϕ in W/m² wordt onder deze standaardcondities:

$$\phi = (4 + 0,015 \cdot \theta_e) (\theta_e - 15).$$

Eenzelfde soort calculaties is van toepassing op de warmteoverdracht van een hangdek in tunnelovens naar het zich daarboven bevindende loopdek en naar het koelsysteem van het hangdek. Bijlage 25 toont de resultaten van die calculaties. De warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt daarbij:

$$\alpha = 4,9$$

De totale warmtestroomdichtheid in ϕ in W/m² wordt:

$$\phi = 4,9 (\theta_e - 15)$$

Hierin is θ_e de temperatuur van de bovenzijde van het ovenruimteplafond in °C.

De rekenarbeid verbonden aan zowel de vaststelling van het stationaire warmtetransport in wanden als de vaststelling van het

thermodynamisch gedrag van ovenwagenbekledingen kan met behulp van een daartoe strekkend gebruikersvriendelijk computerprogramma worden uitgevoerd. Zo'n rekenprogram werd door MT-TNO ontwikkeld.

Bijlage 26 toont het voor dit programma ontworpen formulier met invoergegevens en berekeningsresultaten - Voor een toelichting op het gebruik van het rekenprogramma zij hier verwezen naar rapport MT-TNO nr. 85-07064.

6. INFORMATIE OVER WARMTEUITWISSELING TUSSEN OVENGASSEN EN OVENCHARGE IN TUNNELOVENS

Bijlage 27 toont het processchema van een wagentunneloven voor het bakken van keramische produkten. De routing van de wagens wordt daarbij aangepast aan lokale mogelijkheden en eisen. De bijlagen 28 en 29 geven hiervan een aantal voorbeelden.

Een tunneloven bestaat uit twee in serie geschakelde tegenstroom-warmtewisselaars, die van elkaar gescheiden zijn door een stookzone. De toelaatbare opwarm- en koelsnelheden worden bepaald door de ontwerp kwaliteit van het te bakken produkt, de materiaaleigenschappen in de verschillende te doorlopen temperatuurtrajecten en de geometrie van de afzonderlijke produkten of de daaruit opgebouwde stapelingen.

Vooraf de te doorwarmen of te doorkoelen dikte van de keramische scherf speelt daarbij een grote rol. Deze bepaalt namelijk in sterke mate de temperatuurgradiënt en daarmee de thermische spanningen, die zich in het produkt, dat de warmtebehandeling ondergaat, zullen ontwikkelen.

Bijlage 30 geeft die relatie weer. De getalwaarden van de in de formules voorkomende temperatuurvereffeningscoëfficiënt α zijn in bijlage 31 voor twee courante massadichtheden van keramische scherven als functie van de temperatuur weergegeven.

Bijlage 32 geeft een indruk van de temperatuurverschillen die zich in een produkt tussen het oppervlak en de kern daarvan, tijdens de opwarming en koeling kunnen ontwikkelen. Het voorbeeld heeft betrekking op de tweezijdige opwarming of koeling met constante snelheid van een keramische plaat, die een dichtheid van 1700 kg/m^3 heeft en waarvan de temperatuurvereffeningscoëfficiënt $400 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bedraagt. De gekozen dichtheid komt overeen met de gemiddelde dichtheid van vormbakstenen. De temperatuurvereffeningscoëfficiënt is, zoals uit bijlage 31 blijkt, gekozen bij een zowel in de opwarmfase als in de koelfase kritiek en tevens gemiddeld temperatuurniveau van $525 \text{ }^\circ\text{C}$.

In de grafiek is horizontaal het temperatuurverschil tussen het oppervlak en de kern van de plaat uitgezet en vertikaal zowel de halve dikte r van de plaat, als het hieruit af te leiden massieke warmte-uitwisselingsoppervlak S_s in m^2/kg . De grafiek geeft aan, dat

een opwarm- of koelsnelheid van 30 °C/h in bijvoorbeeld een blad bakstenen met een halve dikte van 100 mm reeds een temperatuurverschil tussen oppervlak en kern doet ontstaan van 100 °C.

Ten behoeve van warmteoverdrachtsberekeningen dient men uiteraard ook te beschikken over getalwaarden van de warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen ovengassen en ovencharge.

Een betrouwbare vaststelling hiervan, anders dan langs experimentele weg, is onder meer gezien de grote diversiteit in vormen, afmetingen en stapelwijzen van keramische produkten een schier onmogelijke taak.

Ten behoeve van vergelijkende modelstudies, zijn in bijlage 33 enkele zeer globale vuistregels voor deze warmteoverdrachtscoëfficiënt in de koelzone en opwarmzone van gasgestookte tunnelovens weergegeven. Zo mogen uitsluitend in het voortdurende besef van de beperkte nauwkeurigheid worden gebruikt.

Bijlage 34 geeft de afleiding van de overall-warmteoverdrachtscoëfficiënt K betrokken op 1 kg van het produkt in $W/(kg.K)$.

De temperatuurverlopen in de als tegenstroomwarmtewisselaars fungerende voorwarm- en koelzone van een tunneloven, worden in sterke mate mede bepaald door de verhouding η van de warmtestroomcapaciteiten van de produktstroom en de gasstroom. De bijlage 35 en 36 verschaffen een overzicht van de formules, die het temperatuurverloop in de voorwarmzone, respectievelijk koelzone van een tunneloven beschrijven. De formules [3] vinden het meest toepassing.

De bijlagen 37 en 38 laten zien hoe het in de bedoelde formules markante quotiënt $\frac{k}{c_w}$ van plaatvormige produkten met een dichtheid van 1700 kg/m³, tijdens de opwarming en de koeling, op verschillende temperatuurniveaus varieert met het massieke warmteuitwisselingsoppervlak S_s .

Het valt op, dat dit quotiënt zowel tijdens de opwarming als tijdens de koeling weinig afhankelijk is van de temperatuur. Dit feit maakt het mogelijk in modelstudies over het temperatuurverloop in opwarm- en koelzone te veronderstellen, dat het quotiënt $\frac{k}{c_w}$ in het gehele

temperatuurbereik een getalwaarde heeft die uitsluitend afhankelijk is van het massiek warmteuitwisselingsoppervlak S_g van het produkt. Bijlage 39 toont dat verband voor de opwarming en de koeling van produkten met een volumieke massa van 1700 kg/m^3 in respectievelijk rookgassen en lucht.

Op de grondslag van het vorenstaande zijn in de bijlagen 40 en 41 diagrammen weergegeven, die het mogelijk maken, voor een gegeven opwarm- of koelsnelheid en een gegeven massiek warmteuitwisselingsoppervlak af te lezen, hoe groot het daarmee gepaard gaande verschil tussen de ovengastemperatuur en de gemiddelde produkttemperatuur zal zijn.

Dit betekent bijvoorbeeld, dat men voor kritieke gemiddelde produkttemperaturen in opwarmzone en koelzone, aan de hand van de daarbij geldende, experimenteel op laboratoriumschaal vastgestelde maximaal toelaatbare opwarm- en koelsnelheden, de maximaal toelaatbare rookgas- respectievelijk luchttemperaturen en kritieke temperatuursverschillen kan schatten. In bijlage 27 zijn deze bij wijze van voorbeeld gemarkeerd met HM en CM.

Voortbouwend op deze kennis kan vervolgens onder gebruikmaking van de formules in de bijlagen 35 en 36 het in energetisch en keramisch-technisch opzicht optimale temperatuurverloop met de tijd in de voorwarmzone en de koelzone van een tunneloven met een hier verder buiten beschouwing blijvend iteratief rekenprogramma worden ontwikkeld.

Wat het optimale temperatuurverloop met de tijd in de stookzone betreft zij hier verwezen naar een publikatie in de Transactions of the 13th International Ceramic Congress at Amsterdam in 1974, pag. 35-45, "Some aspects of the vitrification process of products of the heavy clay industry".

7. GERAADPLEEGDE LITERATUUR

- [1] H. van Amerongen en J.H. van der Velden,
Samenstelling en eigenschappen van 31 kleisoorten,
rapport CTI-TNO 70-04032.
- [2] A. Simon en R. Meijer,
Beiträge zur Kenntnis der Ausblühungen keramischer Massen,
Berichte DKG 23 (1942) p. 3-24.
- [3] W.E. Brounell,
Efflorescence resulting from pyrit in clay raw materials,
Journal American Society 41 (1958) p. 261.
- [4] H. Etherington,
Modern Furnace Technology,
3rd edition, revised (1961), Charles Griffin & Com.
Ltd London; p. 142.
- [5] E. Schmidt,
Chemische Reaktionen während des Ziegelbrandes,
Ziegeltechnisches Jahrbuch 1962; p. 297.
- [6] E. Schmidt,
Die Physikalischen und chemischen Veränderungen beim
Ziegelbrand,
Ziegeltechnisches Jahrbuch 1968; p. 208.
- [7] Salmang, Scholze Keramik,
Teil 1 en Teil 2
6e Auflage (1982) Springer-Verlag-Berlin.
- [8] W. Fassotte en M. Saussez,
Onderzoekingen over de kinetica van het decarbonateren
van kalksteen,
Technisch Tijdschrift Mijnen en Groeven nr. 132 juli 1971,
van "Institut National des Industries Extractives,
Belgique-Bois du Val-Benoît, rue du Chéra" 4000 Liege.

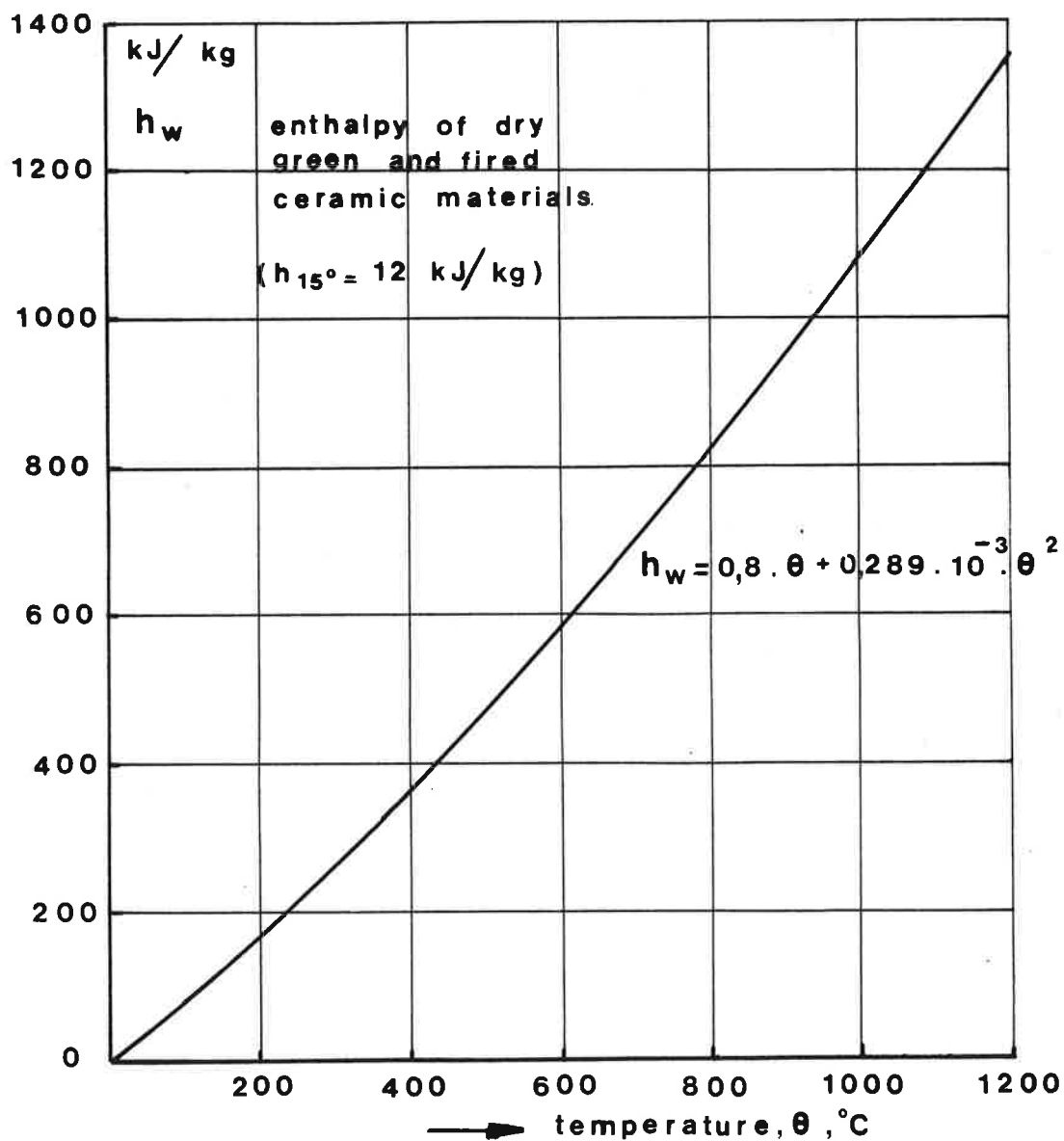
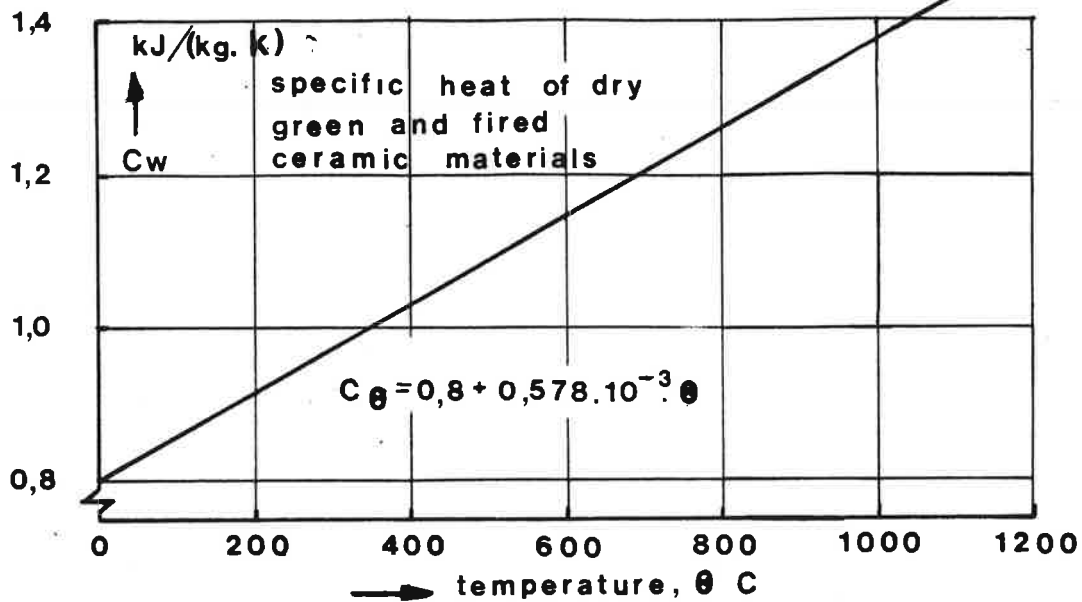
- [9] H.M. Spiers,
Technical data on Fuel Sixth Edition (1962)
The British National Committee World Power Conference,
Trafalger Square London WC2.
- [10] J.H. van der Velden,
Rekenwaarden ten behoeve van de warmte- en stofbalans
van een bakproces van keramische produkten.
Rapport CTI-TNO 72/01662.
- [11] G. de Clercq,
Vaste Brandstoffen
Techniek en Ambachtserie Nr. 4
Uitgeverij. Kluwer Deventer 1944.
- [12] Basisgegevens aardgassen,
N.V. Nederlandse Gasunie 1980.
- [13] J.H. Brunklaus,
Industrie ofenbau
Vulkan-Verlag, Essen
- [14] E. Schmidt,
"Thermodynamik"
Springer-Verlag, Berlin 1963
- [15] W.H. Mc Adams,
"Heat Transmission"
Mc Graw - Hill Book Company Inc.,
New York
- [16] F. Sass, Ch. Bouché, A. Leitner,
"Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau"
Springer Verlag Berlin
- [17] W. Trinks,
"Industrial Furnaces"
Jonh. Wiley and Sons, Inc, New York

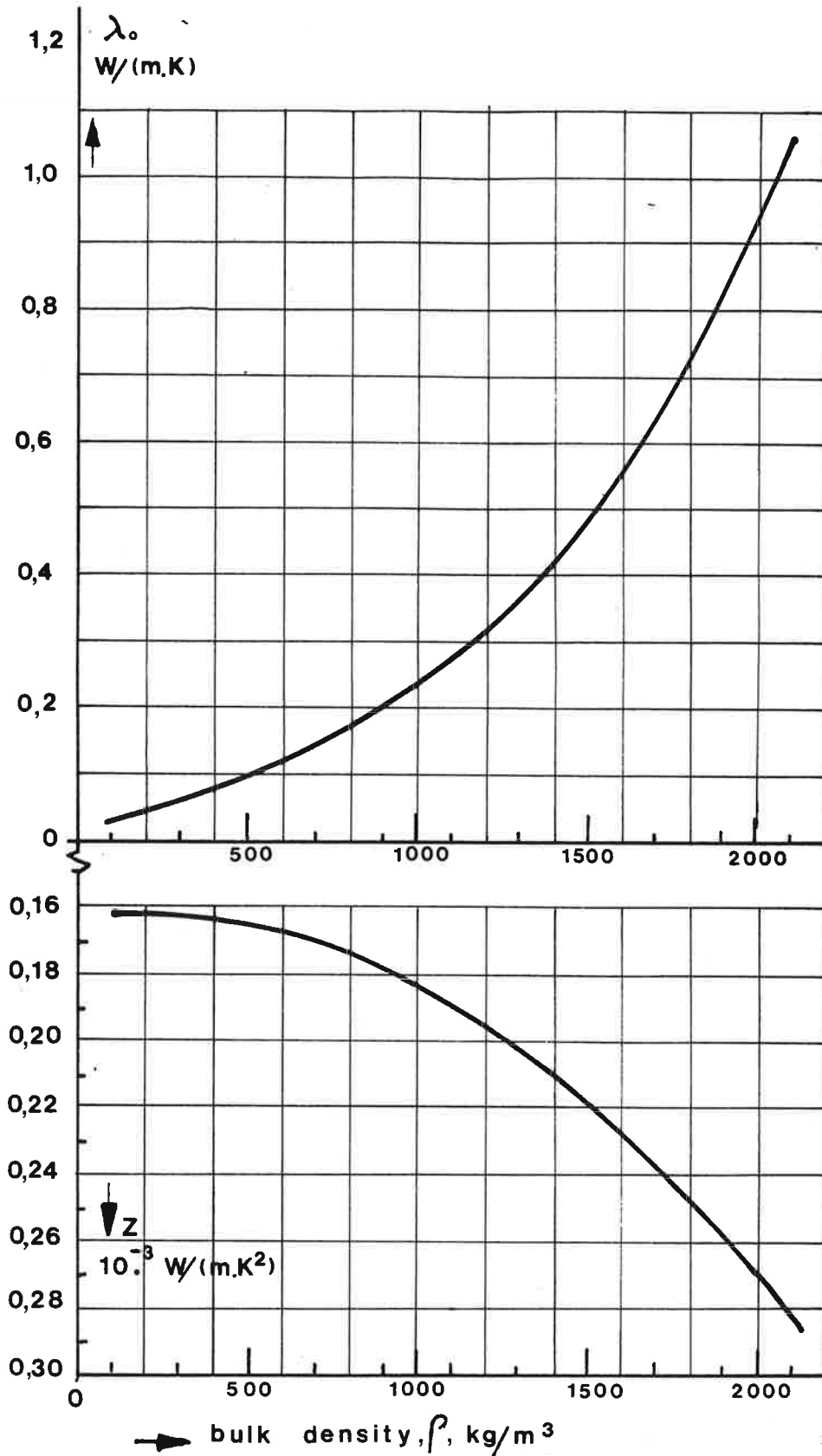
- [18] "Handbook of Chemistry and Physics",
55th Edition - 1975.
CRC Press Inc. Cleveland, Ohio

- [19] "Perry's Chemical Engineers Handbook",
Mc Graw Hill Book Company Inc, New York

- [20] "Produktspecificaties van diverse leveranciers".

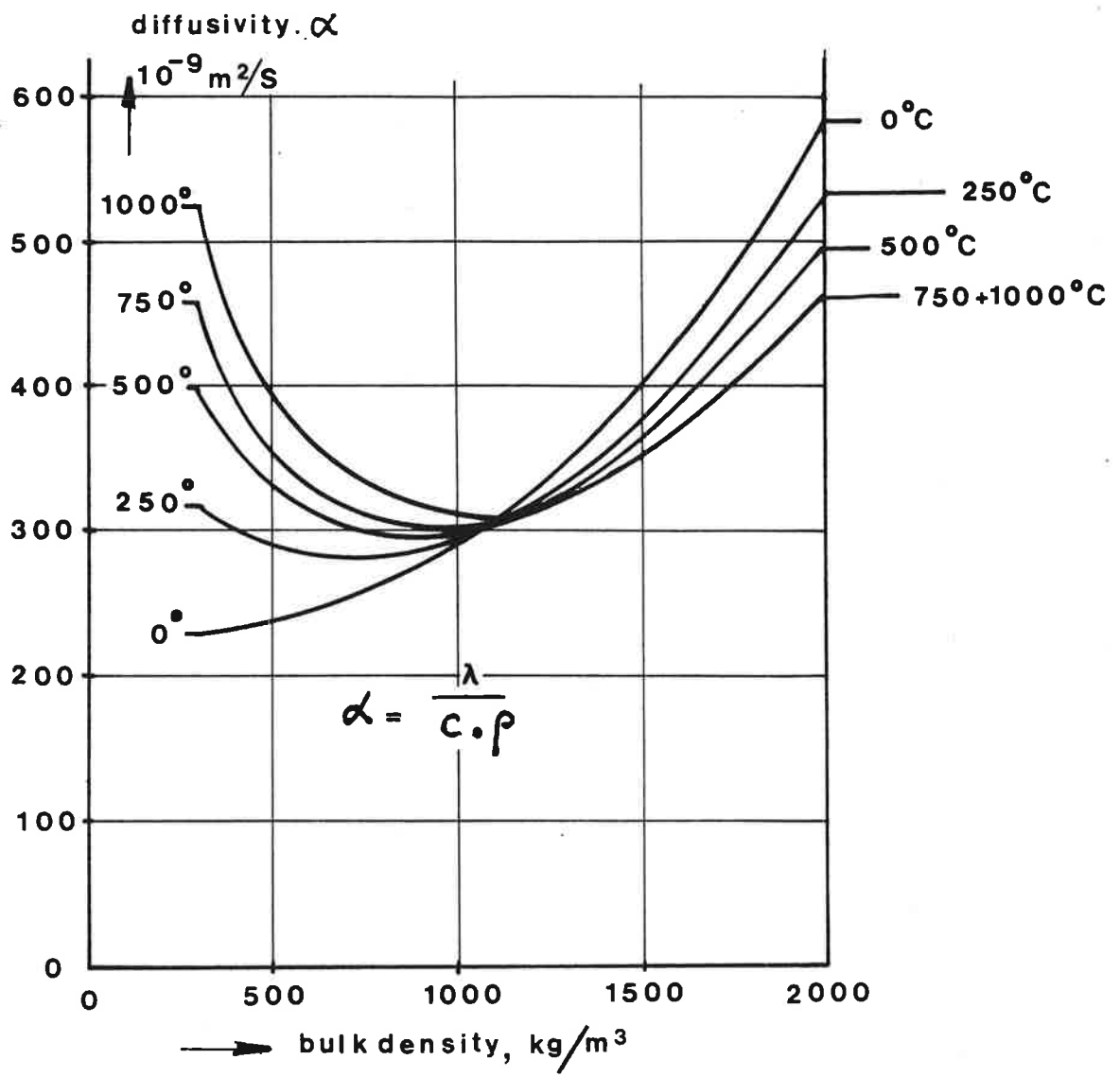
ENIGE S.I.-GRONDEENHEDEN			ENIGE DECIMALE VOORVOEGSELS VAN S.I.-EENHEDEN					
lengte	meter	m	FACTOR	VOORV.	SYMBOOL	FACTOR	VOORV.	SYMBOOL
tijd	seconde	s	10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
massa	kilogram	kg	10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
electrische stroom	ampère	A	10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
absolute temperatuur	kelvin	K	10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
ENIGE AFGELEIDE S.I.-EENHEDEN MET EIGEN NAAM			DECIMAAL VERWANTE EENHEDEN					
frequentie	hertz	Hz	NAAM		SYMBOOL	SI-EQUIVALENT		
kracht	newton	N	hectare		ha	10^4 m^2		
energie	joule (zjoel)	J	liter		l	10^{-3} m^3		
vermogen	watt	W	milliliter		ml	10^{-6} m^3		
electr. spanning	volt	V	ton		t	10^3 kg		
electr. weerstand	ohm	Ω	bar		bar	10^5 N/m^2		
vloeistof-, gasdruk	pascal	Pa	millibar		mbar	10^2 N/m^2		
HERLEIDING VAN EENHEDEN								
GROOTHEID		NIEUWE EENHEID			EQUIVALENT IN OUDE EENHEID			
korrelgrootte		1 μm			1 μ (micron)			
golflengte		1 nm			10 Å(angström)			
volume (in chemie)		1 ml			1 cc			
massa		1 kg			0,102 kgf.s ² /m			
kracht, last, gewicht		1 N, [1kg.m/s ²]			0,102 kgf			
mechanische spanning, sterkte		1 N/mm ²			0,102 kgf/mm ²			
elasticiteitsmodulus					10,2 kgf/cm ²			
dynamische viscositeit		1 N.s/m ² , [1 Pa.s]			1000 cP(centipoise)			
oppervlaktespanning		1 N/m			1000 dyn/cm			
vloeistofdruk, gasdruk		1 N/m ² , [1 Pa]			0,102 mm H ₂ O			
		1 kN/m ² , [1 kPa]			102 mm H ₂ O			
					7,5 mm Hg			
					0,0102 kgf/cm ²			
					0,0102 at, ato, ata			
		1 mbar, [100 Pa]			10,2 mm H ₂ O			
					0,75 mm Hg			
		1 bar, [100 kPa]			1,02 kgf/cm ²			
					1,02 at, ato, ata			
mechanische arbeid		1 J, [1 N.m], [1 W.s]			0,102 kgf.m			
electrische energie		1 kJ			0,239 kcal			
hoeveelheid warmte		1 MJ			239 kcal			
					0,278 kW.h			
					0,378 pk.h			
mechanisch vermogen		1 W, [1N.m/s], [1J/s]			0,102 kgf.m/s			
electrisch vermogen					0,86 kcal/h			
warmtestroom		1 kW			1,36 pk			
soortelijke warmte, massieke warmte		1 kJ/(kg.K)			0,239 kcal/(kg.°C)			
massiek warmteverbruik		1 MJ/kg			239 kcal/kg			
bovenste verbrandingswarmte		1 MJ/kg			239 kcal/kg			
stookwaarde		1 MJ/m ³			239 kcal/m ³			
warmteprijs		1 HF1/GJ			4,186 HF1/Gcal			
lineaire uitzettingscoëfficiënt		1 K ⁻¹			1 °C ⁻¹			
warmtegeleidingscoëfficiënt		1 W/(m.K), [1 J/(m.s.K)]			0,86 kcal/(m.h.°C)			
warmteoverdrachtscoëfficiënt		1 W/(m. ² K), [1 J/(m ² .s.K)]			0,86 kcal/(m ² .h.°C)			
warmtedoorgangcoëfficiënt								
warmte weerstand		1 m ² .K/W, [1 m ² .s.K/J]			1,163 m ² .h.°C/kcal			
OMREKENING VAN S.I.-EENHEDEN NAAR OUDE EENHEDEN					M.T. T.N.O.			
S.I. = Système International d'Unités					Werkgr. Grofkeramiek			
(Internationaal Stelsel van Eenheden)					Juli 1984.			
Normbladen: NEN 950, 1000, 1221, 1222, 1223, 1224, 3021								





thermal conductivity : $\lambda_{\theta} = \lambda_0 + z \cdot \theta$	$[W/(m.K)]$
--	-------------

θ = temperature, °C.



- α = diffusivity m^2/s
- λ = coeff. of thermal conductivity $W/(m.K)$
- c = true specific heat $J/(kg.K)$
- ρ = bulk density kg/m^3

Thermal conductivity:

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 + z \cdot \theta \text{ [W/(m.K)]}$$

θ = temperature [°C]

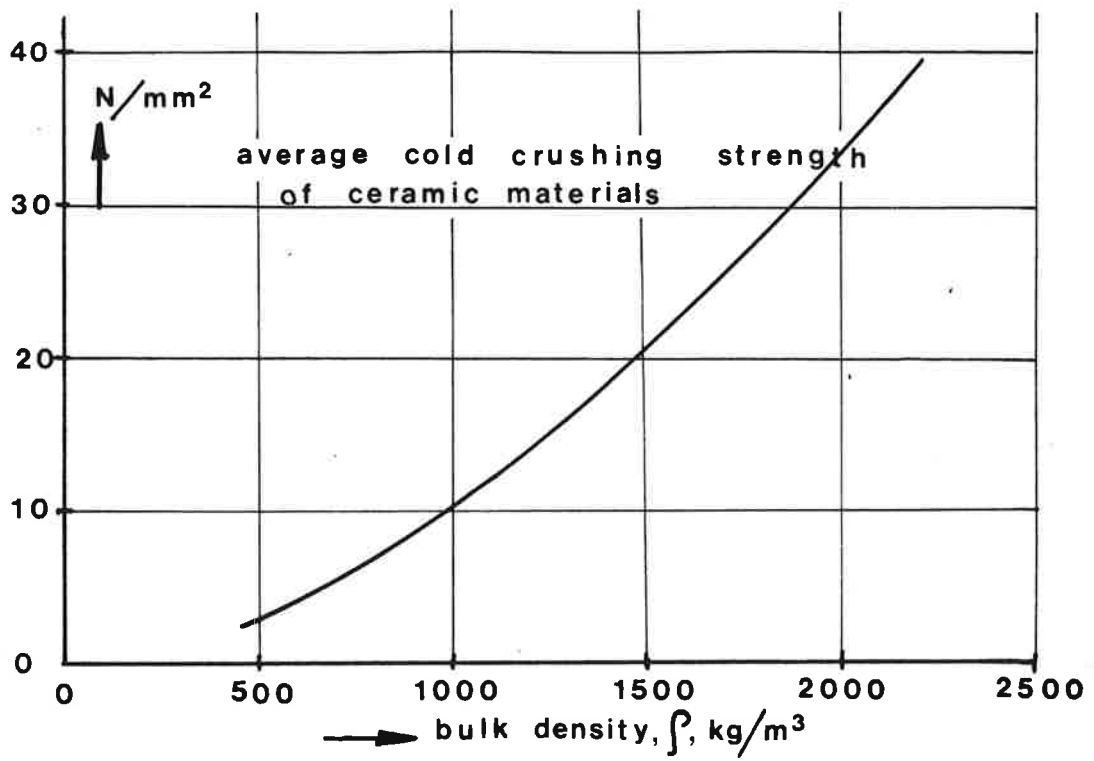
Various kiln construction materials

construction material	bulk density [kg/m ³]	λ_0 [W/(m.K)]	z [10 ⁻³ W (m.K ²)]
fireclay bricks, blocks	2050	0,990	0,276
common brick-work	1600	0,550	0,227
insulating refractories and concretes	1600	0,550	0,227
idem	1150	0,290	0,192
insulating concretes	700	0,140	0,170
idem	475	0,089	0,164
calcium silicate blocks	250	0,050	0,162
insulating fibres	125	0,033	0,162

(Dimensions of construction elements corresponding with the commercial supply)

Average thermal conductivity of materials for tunnelkiln
construction

MT-TNO Apeldoorn
Section Ceramics



Components of the mass-loss during heating-up of clay products

gaseous reaction products expressed as mass-percentage of the dry mass of a clay sample			mass of reaction products per unit of mass of a clay sample in the <u>fired</u> state		
Component	symbol	% (m/m _d)	formula	symbol	kg/kg
residual pore water	[W _r]'		$\frac{[W_r]'}{100 - [GV]'}$	[W _r]	
loss on ignition	[GV]'		$\frac{[GV]'}{100 - [GV]'}$	[GV]	
organic matter [OM]' = 1,724.[C]'	[OM]'		$\frac{[OM]'}{100 - [GV]'}$	[OM]	
carbon dioxide [CO ₂]' = 0,7843.[CaO]'	[CO ₂]'		$\frac{[CO_2]'}{100 - [GV]'}$	[CO ₂]	
combined water [W _c]' = [GV]' - [OM]' - [CO ₂]'	[W _c]'		$\frac{[W_c]'}{100 - [GV]'}$	[W _c]	

Heats of reaction -ΔH during the heating-up of clay products, expressed in MJ per kg of the clay body in the fired state

reaction	temp. °C	-ΔH in MJ/kg	accuracy
Evaporating of pore water (endothermic)	15°C	-ΔH ₁₅ = -2,466.[W _r]	± < 0,1%
	75°C	-ΔH ₇₅ = -2,322.[W _r]	± < 0,1%
Driving out of combined water (endothermic)	75°C	-ΔH ₇₅ = -5 . [W _c]	± circ.15%
Oxidizing of organic matter ¹⁾ (exothermic)	75°C	-ΔH ₇₅ = +13 . [OM]	± circ.15%
Decomposing of carbonates (endothermic) 1kg CaCO ₃ → 0,56kg CaO + 0,44kg CO ₂	75°C	-ΔH ₇₅ = -4,04 . [CO ₂]	± circ. 1%
	750°C	-ΔH ₇₅₀ = -3,84 . [CO ₂]	± circ. 1%

1) accepted general formula: (C₆H_{5,8}O_{2,9}); [C]': 58%, [H]': 4,7%, [O]': 37,3%
Loss on smouldering up to 550°C: 63,5%. Reaction products: CO₂, H₂O and CH₄

Enthalpy of clay bodies in MJ above 15°C and related to 1 kg of the clay body in the fired state

Component	h at 75°C		h at 750°C	
	formula	MJ/kg	formula	MJ/kg
inert clay body 1 kg	0,0496 . 1	0,0496	0,7506 . 1	0,7506
loss on ignition	0,0496 . [GV]		0,200 . [CO ₂]	
residual pore water	0,2510 . [Wr]		-----	nil
		+		+
	Σh		Σh	

Heat requirements due to reactions in MJ and related to 1 kg of the clay body in the fired state

in the preheating-zone from 75 to 750°C (mean product temperatures)		in the early firing zone from 750 to 900°C	
reaction formulae	MJ/kg	formula	MJ/kg
$[2,322 + 1,880 \cdot 10^{-3} \cdot (T_e - 75)] \cdot [Wr]$	+	----	nil
$[5,000 + 1,880 \cdot 10^{-3} \cdot (T_e - 75)] \cdot [Wc]$	+	----	nil
$[0,200 + 0,915 \cdot 10^{-3} \cdot (T_e - 75)] \cdot [CO_2]$	+	3,84 . [CO ₂]	
$[-13,00 + 2,131 \cdot 10^{-3} \cdot (T_e - 75)] \cdot [OM]$	-	----	nil
	Σ		Σ

Exhaust losses caused by the gaseous reaction products during the heating up of clay bodies in MJ above 15°C and related to 1 kg of the clay body in the fired state at a temperature T_e °C of the exhaust gases

CALCULATION
DATA

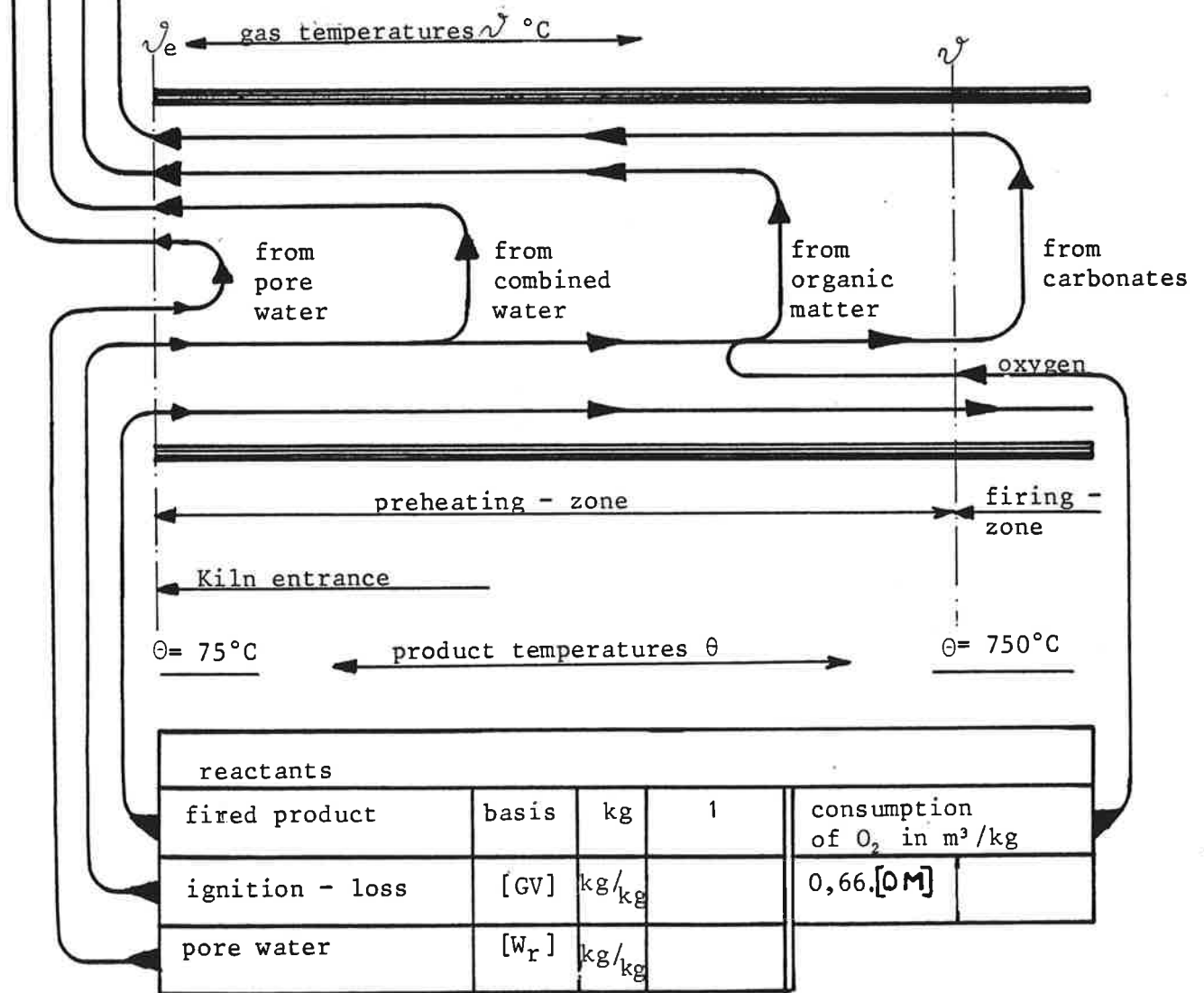
formulae	heat loss MJ/kg	components	
		symbol	kg/kg
$1,867 \cdot 10^{-3} \cdot [Wr] \cdot (T_e - 15)$		[Wr]	
$1,867 \cdot 10^{-3} \cdot [Wc] \cdot (T_e - 15)$		[Wc]	
$2,041 \cdot 10^{-3} \cdot [OM] \cdot (T_e - 15)$		[OM]	
$0,887 \cdot 10^{-3} \cdot [CO_2] \cdot (T_e - 15)$		[CO ₂]	
Σ - exhaust losses from reactions		T_e	°C

Heat flow due to reactions in the clay body during the heating-up period in tunnelkilns

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics

gaseous reaction products, m ³ /kg ¹⁾					
H ₂ O	m ³ /kg	CO ₂	m ³ /kg	CH ₄	m ³ /kg
1,201.[W _p]					
1,201.[W _c]					
0,120.[OM]		0,870.[OM]		0,212[OM]	
		0,506.[CO ₂]			
Σ H ₂ O		Σ CO ₂		Σ CH ₄	
total volume of wet gases, m ³ /kg					

1) m³ under standard conditions (0°C, 101325 Pa) per kg of clay in the fired state.



reactants				
fired product	basis	kg	1	consumption of O ₂ in m ³ /kg
ignition - loss	[GV]	kg/kg		0,66.[OM]
pore water	[W _r]	kg/kg		

Mass - flow diagram of the components of the ignition - loss of clay products in a tunnel kiln.

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics

Composition of Dutch natural gas (Groningen field)

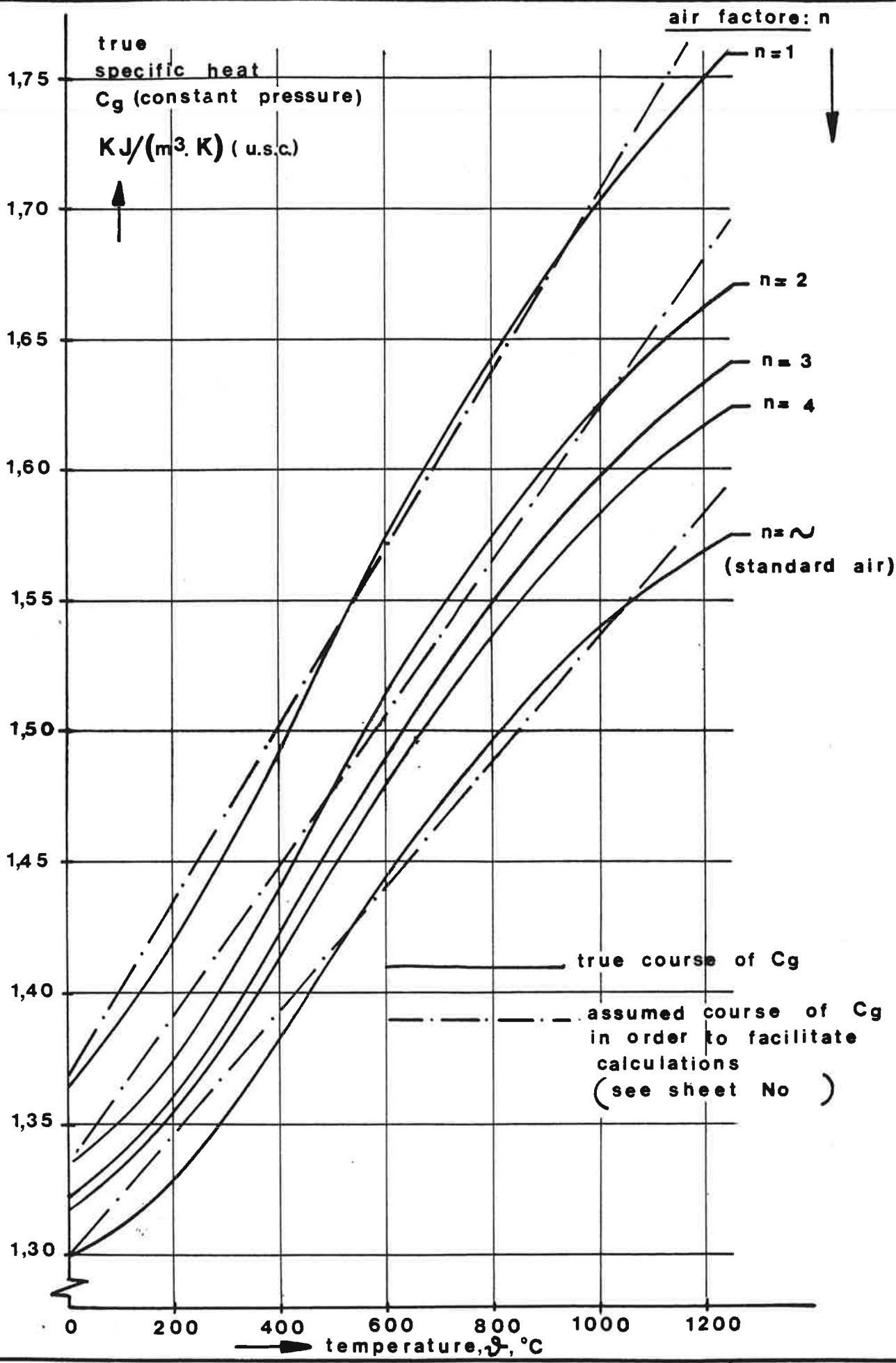
comp.	CH ₄	C ₂ H ₆	C _n H _{2n+2}	N ₂	CO ₂	O ₂
% (v/v)	81,30	2,85	0,60	14,35	0,89	0,01

Some general properties of the natural gas and the components of combustion air	molar mass kg/k mol	molar volume m ³ /k mol	density (u.s.c.) kg/m ³
natural gas (Groningen field)	18,637	22,356	0,834
dry air [N ₂ = 79% (v/v), O ₂ = 21% (v/v)]	28,966	22,400	1,293
H ₂ O-vapour	18,015	21,629	0,833

Assumed properties of available combustion air	standard air
temperature in °C	15,0
humidity in kg H ₂ O per kg of dry air	0,0060
humidity in m ³ H ₂ O per m ³ of dry air (u.s.c.)	0,0093
enthalpy above 0°C of air and H ₂ O-vapour in kJ per kg of dry air	15,26
enthalpy above 0°C of air and liquid H ₂ O in kJ per kg of dry air	30,27

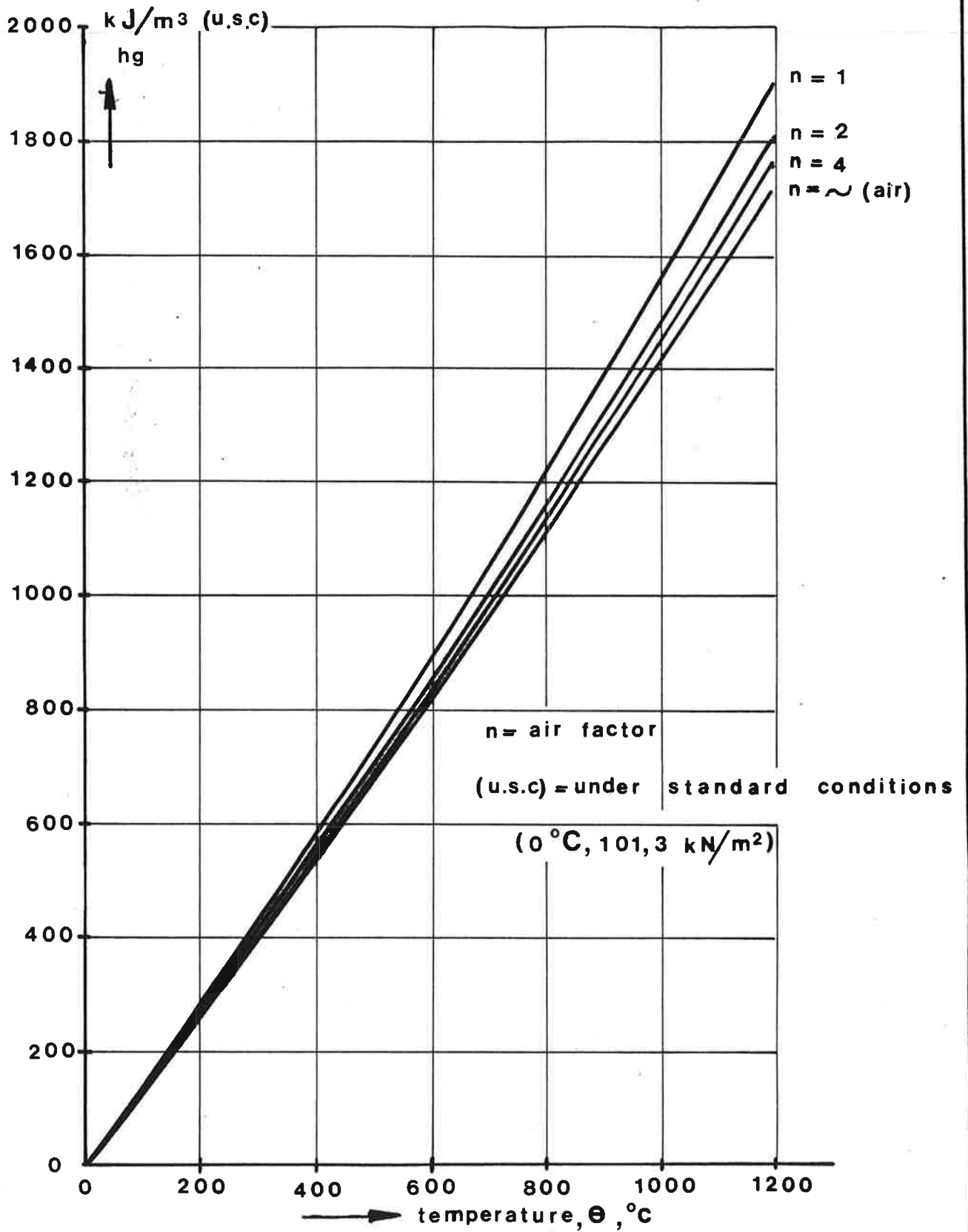
Stoichiometric combustion of 1 m ³ (u.s.c.) of natural gas		
gross caloric value at 15°C in MJ		35,14
nett caloric value at each temperature in MJ		31,68
auto-ignition temperature in °C, circ.		700
mean specific heat, 0 - 700°C, in kJ/(m ³ ·K) (u.s.c.)		2,301
oxygen requirement in m ³ (u.s.c.)		1,766
Combustion of 1 m ³ of natural gas with	dry air	stand. air
air requirement in m ³ (u.s.c.)	8,41	8,49
wet combustion gases in m ³ (u.s.c.)	9,37	9,45
composition in m ³ (u.s.c.)		
nitrogen, N ₂	6,79	6,79
carbon dioxide, CO ₂	0,90	0,90
water vapour, H ₂ O	1,68	1,76

u.s.c. = under standard conditions (0°C, 101325 Pa)



True specific heat of standard air and combustion gases of Dutch natural gas.
(volume basis, $0^\circ\text{C} - 101,325 \text{ Pa}$)

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



enthalpy of combustion gases of Dutch natural gas and air above 0°C

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics

Combustion gases of 1 m³ (u.s.c.) Dutch natural gas and standard air (0,006 kg H₂O/kg dry air) in m³ (u.s.c.). Air factor = n

Wet gases, V_{gw} in m³/m³

$$V_{gw} = 8,49.n + 0,96$$

Dry gases, V_{gd} in m³/m³

$$V_{gd} = 8,41.n - 0,72$$

H₂O-vapour in m³/m³

$$H_2O = 0,08.n + 1,68$$

True specific heat at constant pressure and on volume basis (u.s.c.) of combustion gases of natural gas and of standard air in J/(m³.K) in relation with the gas temperature ϑ in °C

General formula: $C_g = A + B.\vartheta$ (accuracy $\pm 1\%$)

$$C_g = \left(1300 + \frac{68}{n}\right) + \left(238 + \frac{100}{n}\right) \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta$$

$$\text{for standard air } (n = \infty) : C_a = 1300 + 238 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta$$

Enthalpy above 0°C and on volume basis (u.s.c.) of combustion gases of natural gas and of standard air in J/m³

General formula: $h_g^0 = A.\vartheta + \frac{B}{2}.\vartheta^2$

$$h_g^0 = \left(1300 + \frac{68}{n}\right) \cdot \vartheta + \left(119 + \frac{50}{n}\right) \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2$$

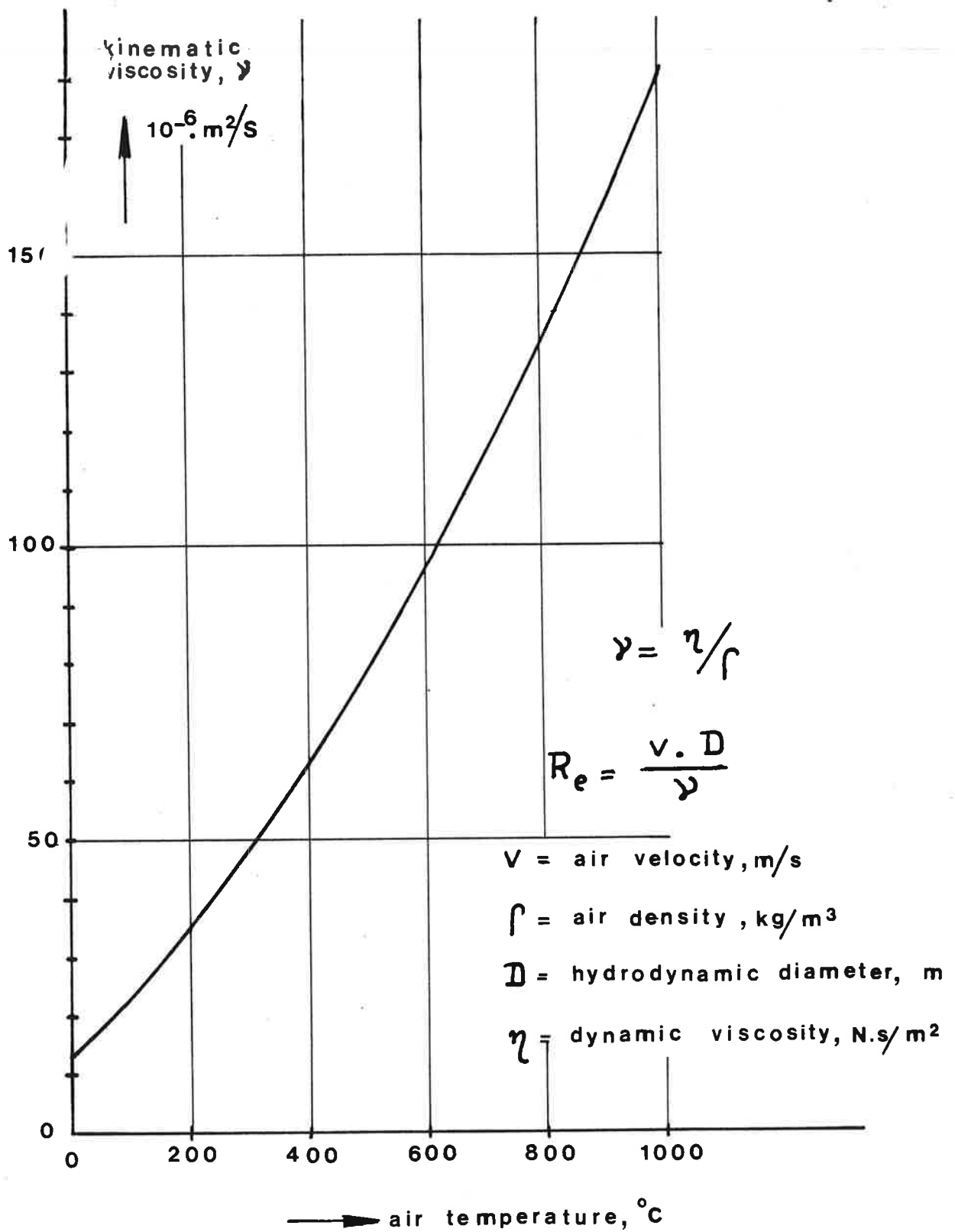
$$\text{for standard air } (n = \infty) : h_a^0 = 1300 \cdot \vartheta + 119 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2$$

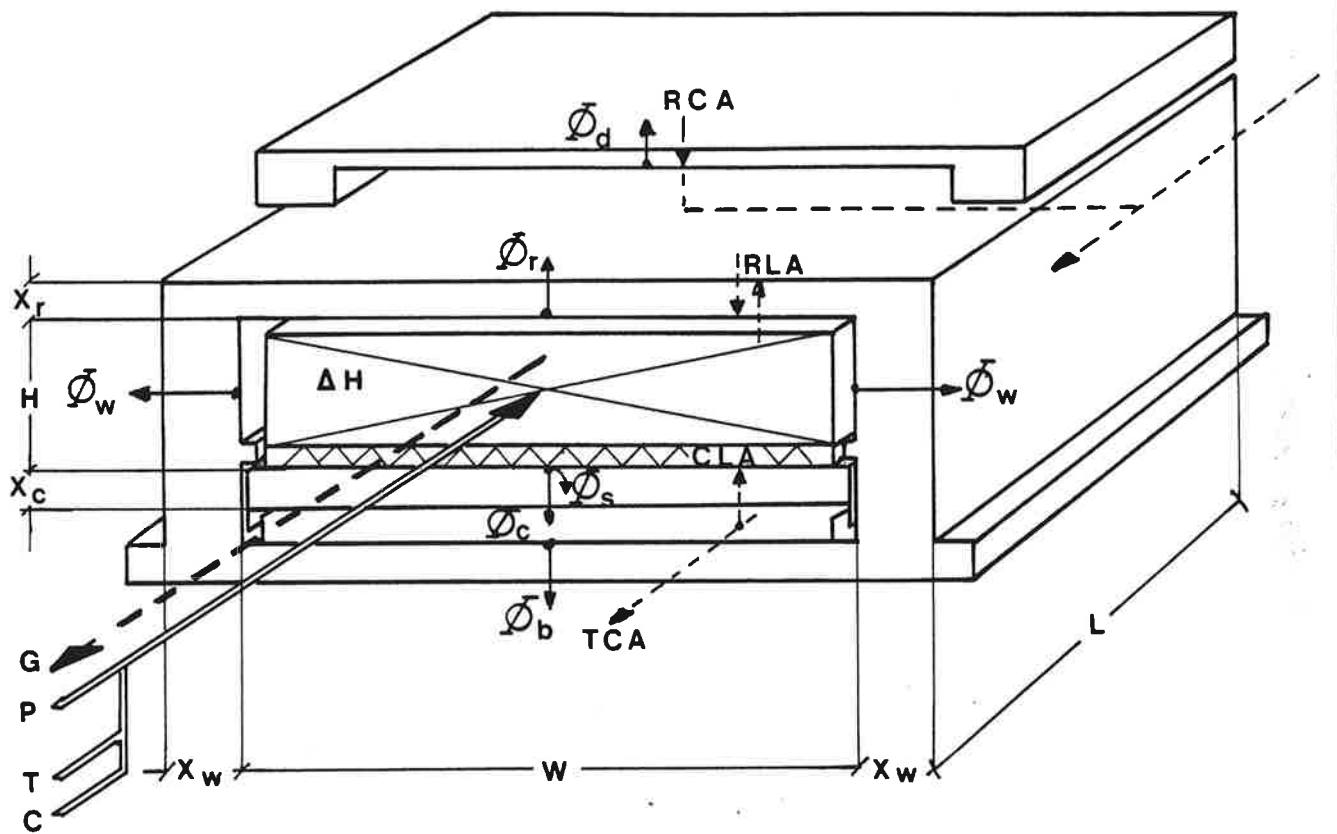
Enthalpy above 15°C and on volume basis (u.s.c.) of combustion gases of natural gas and of standard air in J/m³

$$h_g^{15} = \left(119 + \frac{50}{n}\right) \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 + \left(1300 + \frac{68}{n}\right) \cdot \vartheta - 19527 - \frac{1031}{n}$$

$$\text{for standard air } (n = \infty) : h_a^{15} = 1300 \cdot \vartheta + 119 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 - 19527$$

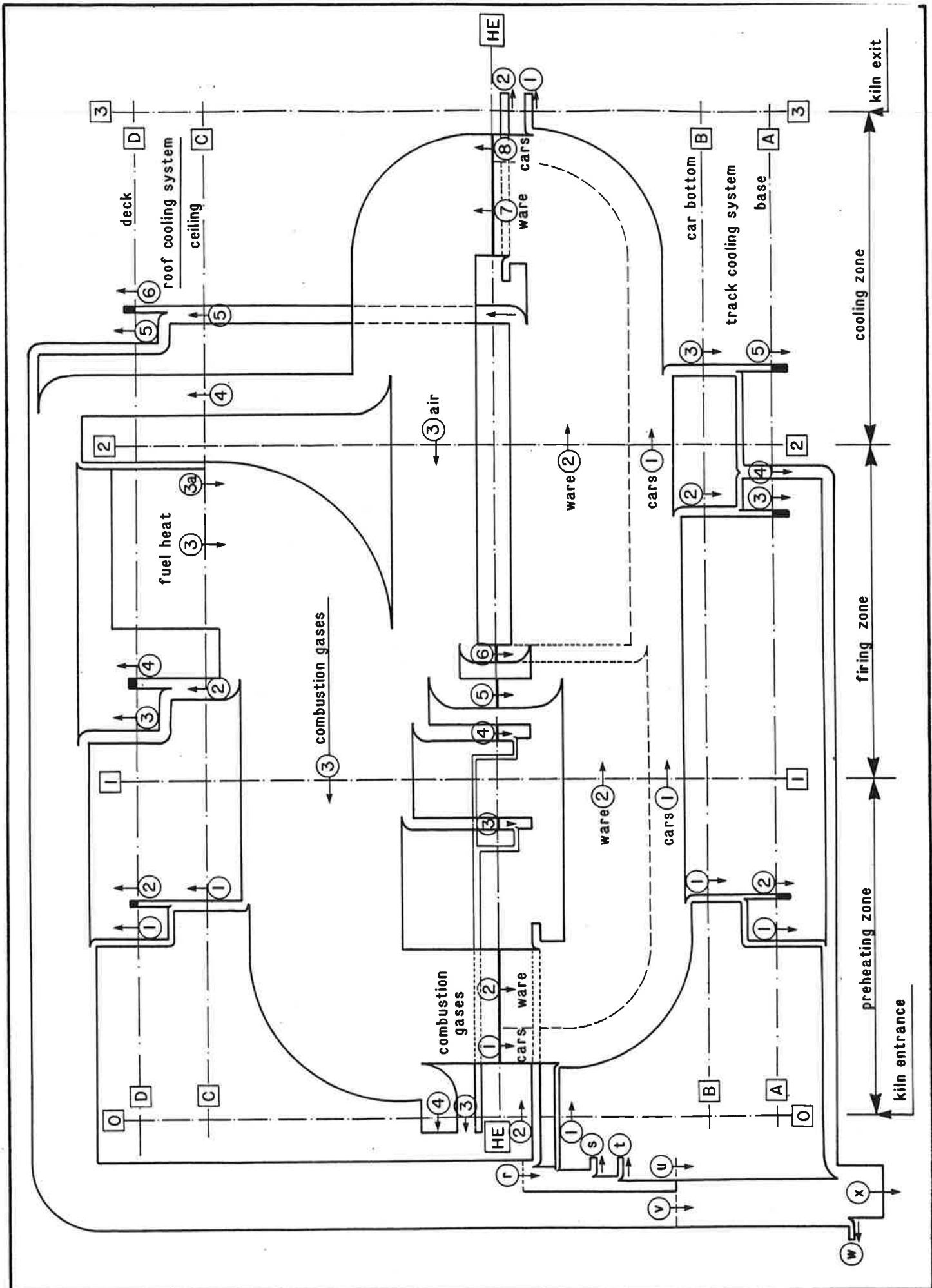
(u.s.c.: under standard conditions (0°C, 101325 Pa)).





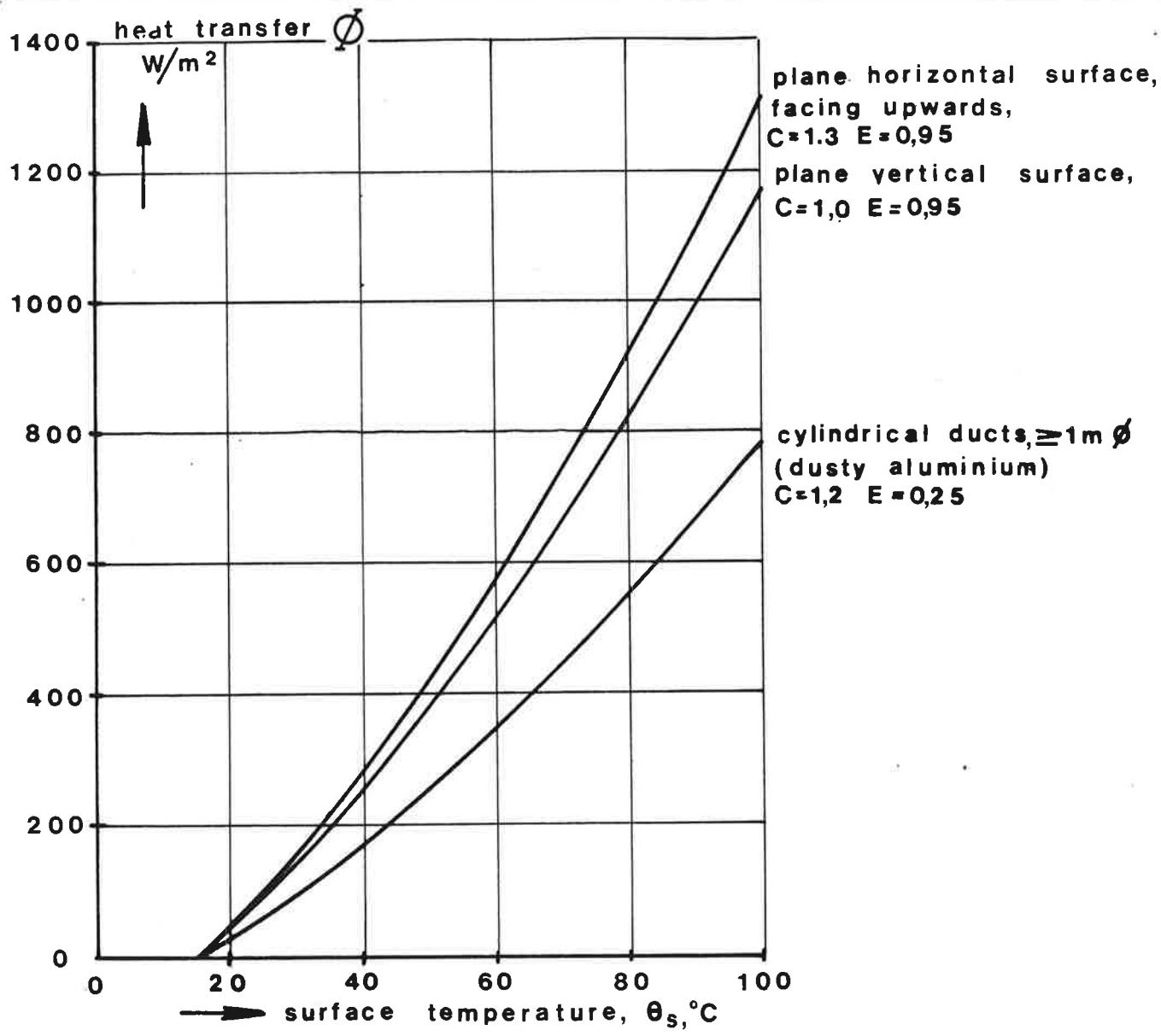
L length of kiln section
 W width of kiln
 H height of kiln
 X_w thickness of sidewalls
 X_r thickness of roof
 X_d thickness of deck
 X_c thickness of car top
 G gas flow through kiln
 P flow of product
 T flow of tare
 C flow of cars

RCA roof-cooling air
 TCA track-cooling air
 RLA roof-leakage air
 CLA car-leakage air
 Φ_d heat flow through deck
 Φ_r heat flow through roof
 Φ_w heat flow through wall
 Φ_c heat flow through car top
 Φ_s heat storage in car top
 Φ_b heat flow through tunnelkiln base
 ΔH heat of reactions



Heat flow diagram of a tunnel kiln

MT-TNO
APELDOORN



Radiation:

$$\phi_r = 5,67 \cdot E \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Natural convection:

$$\phi_e = 1,93 \cdot C \cdot (\Delta\theta)^{1,25} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

where: T : surface temperature, K

T_s : temperature of surroundings, K [15°C = 288 K]

$\Delta\theta$: temperature difference, K

E : emissivity :

C : heat transfer factor

Heat transfer by natural convection and radiation to surroundings of 15°C.

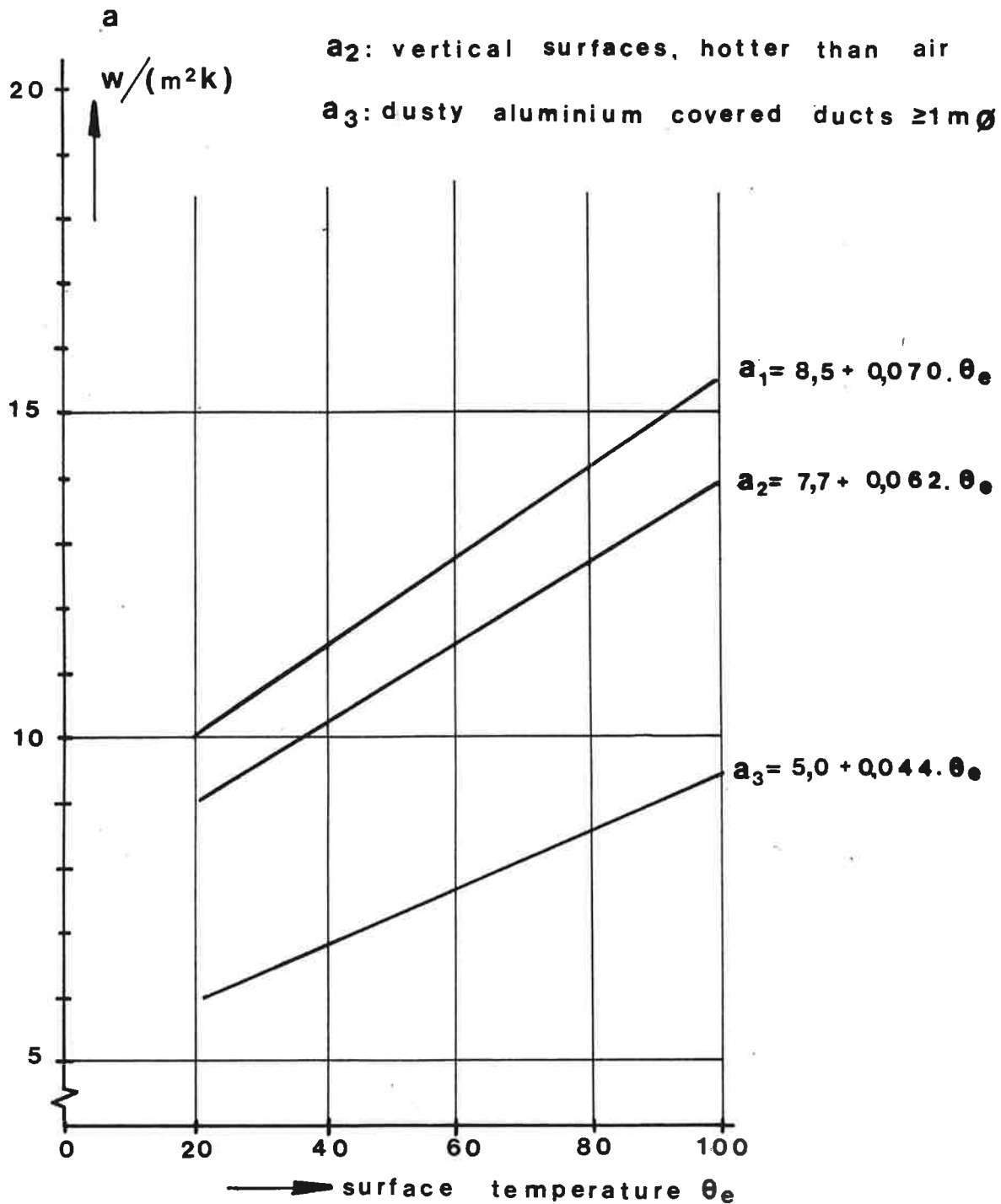
(Fishenden and Saunders)

MT-TNO Apeldoorn
Section Ceramics

a₁: horizontal surfaces, facing upwards
hotter than air

a₂: vertical surfaces, hotter than air

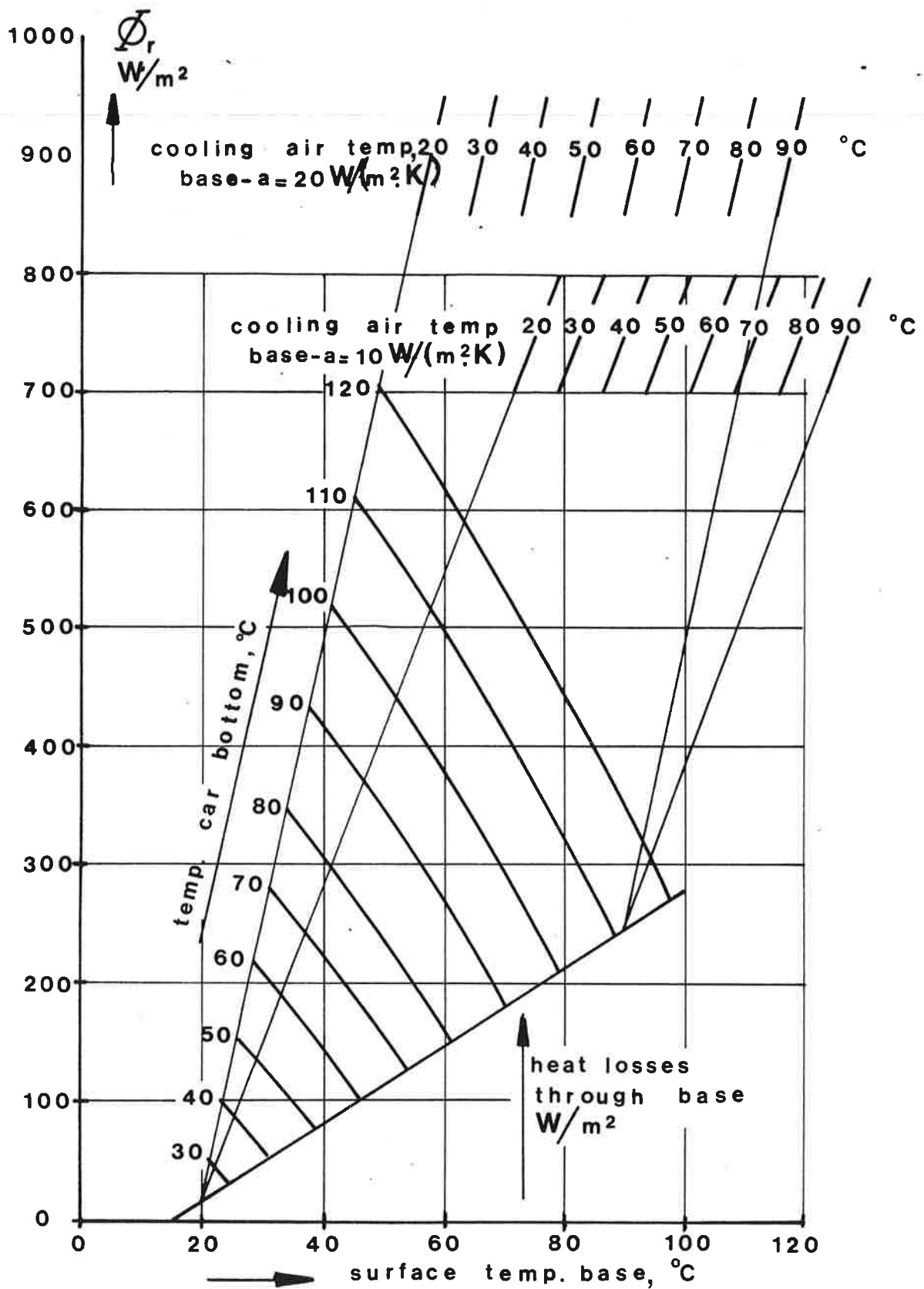
a₃: dusty aluminium covered ducts $\geq 1m\varnothing$



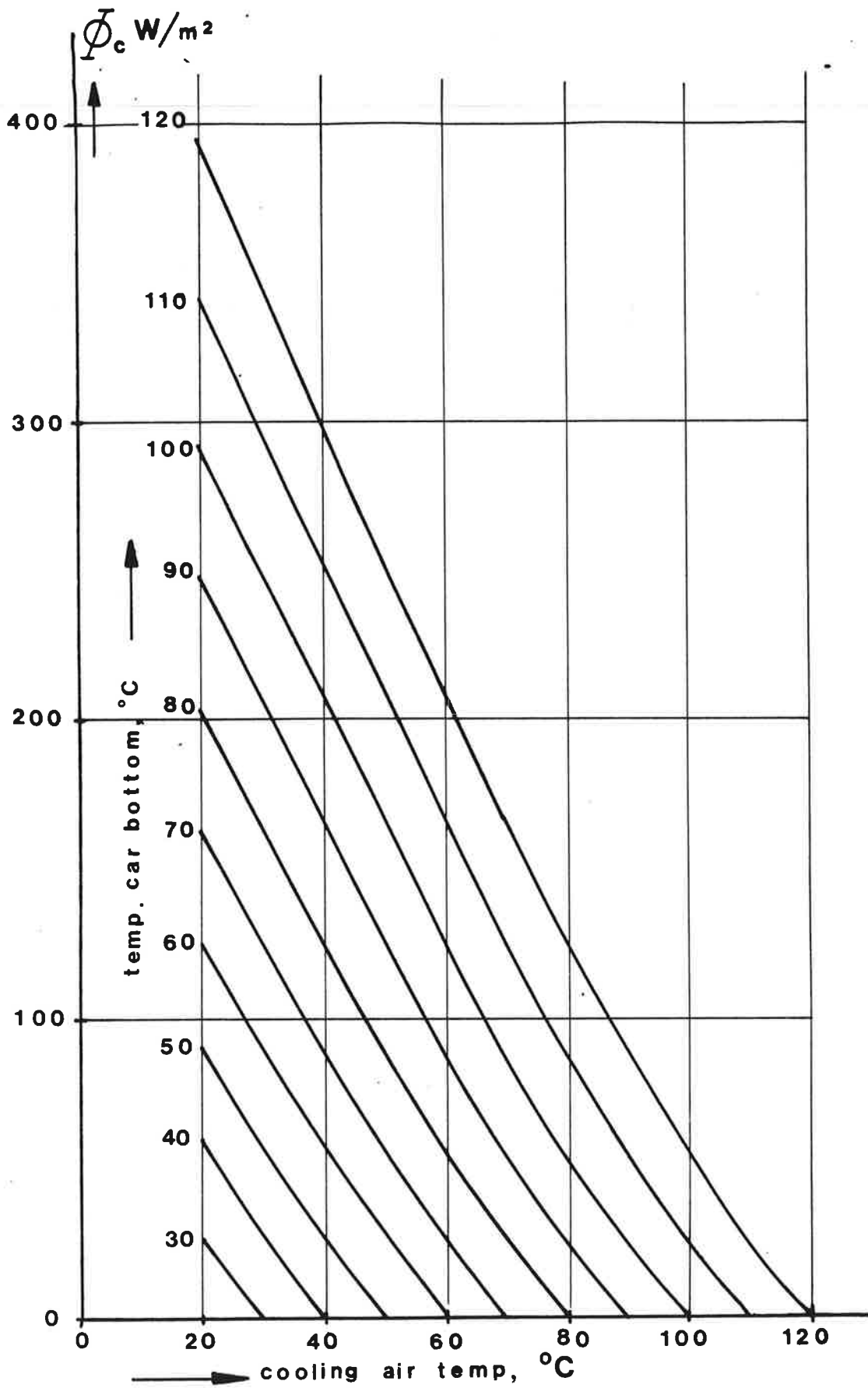
valuable for surface temperatures $> 20^{\circ}C$, $< 100^{\circ}C$

θ_e : temperature of external surface $^{\circ}C$

source: Fishenden and Saunders



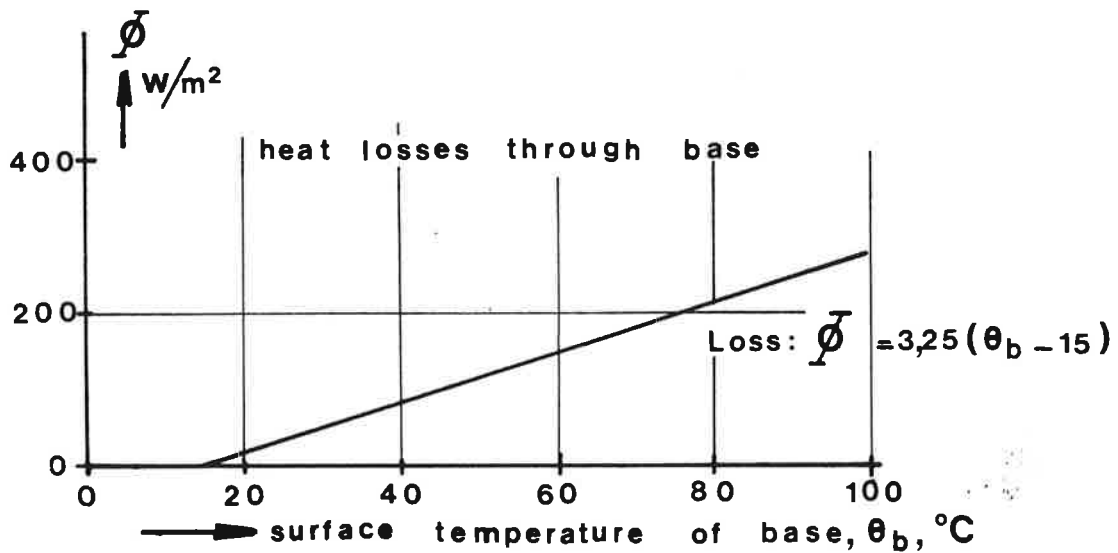
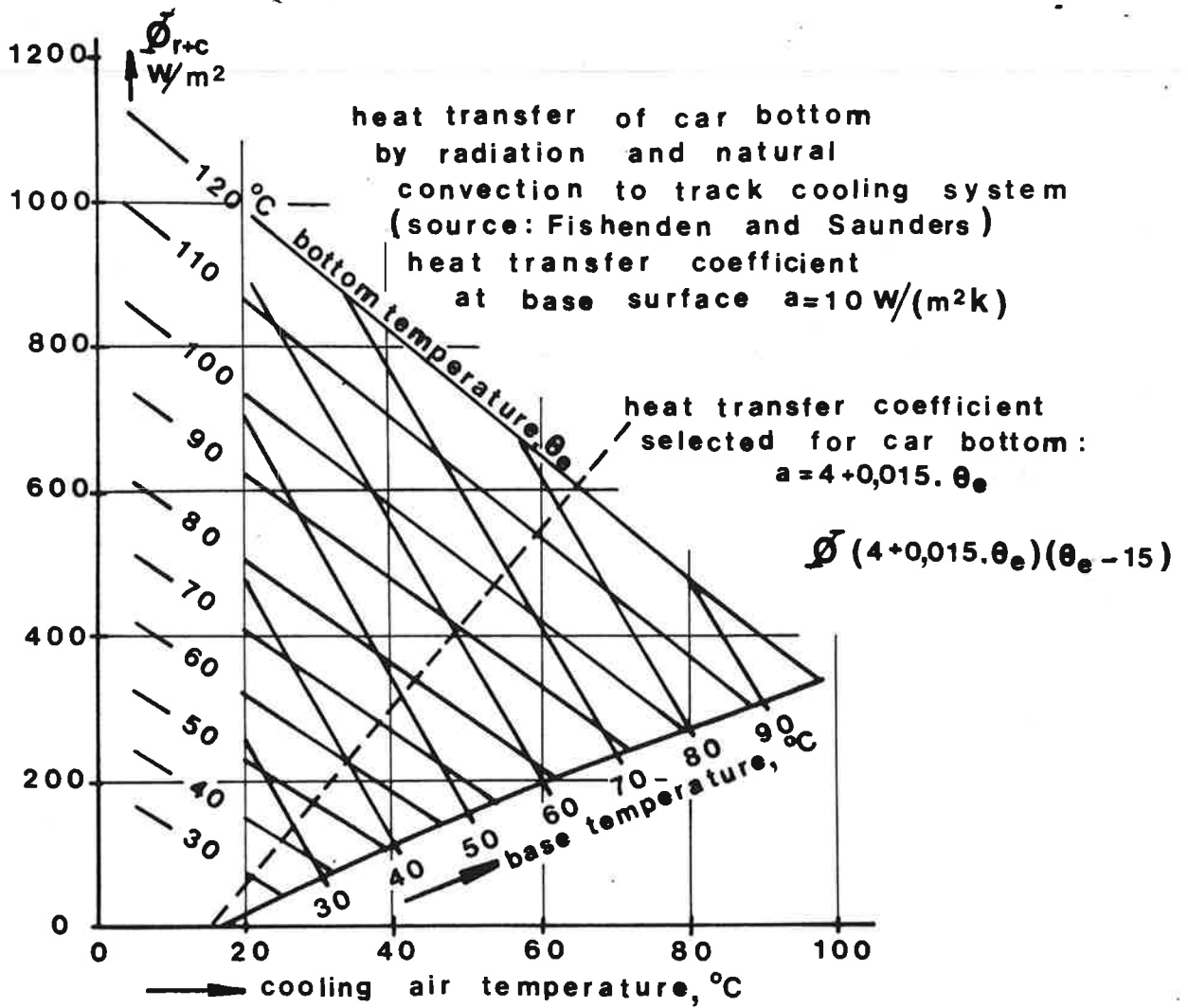
the point of intersection of the cooling air temp. lines with the car bottom temp. lines gives the heat transfer caused by radiation to air and base under these conditions in the steady state.



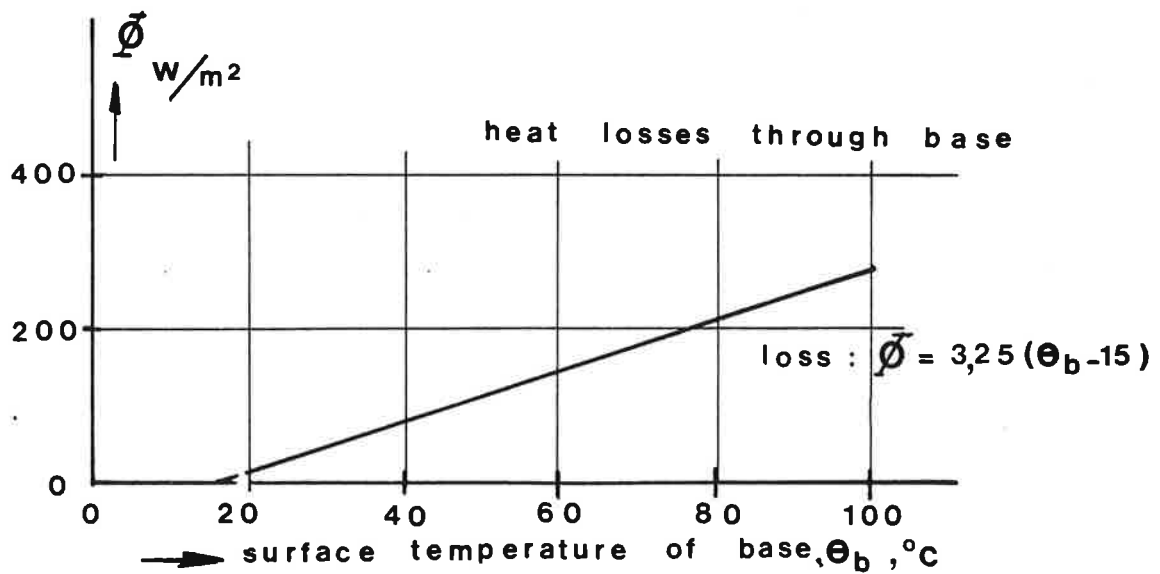
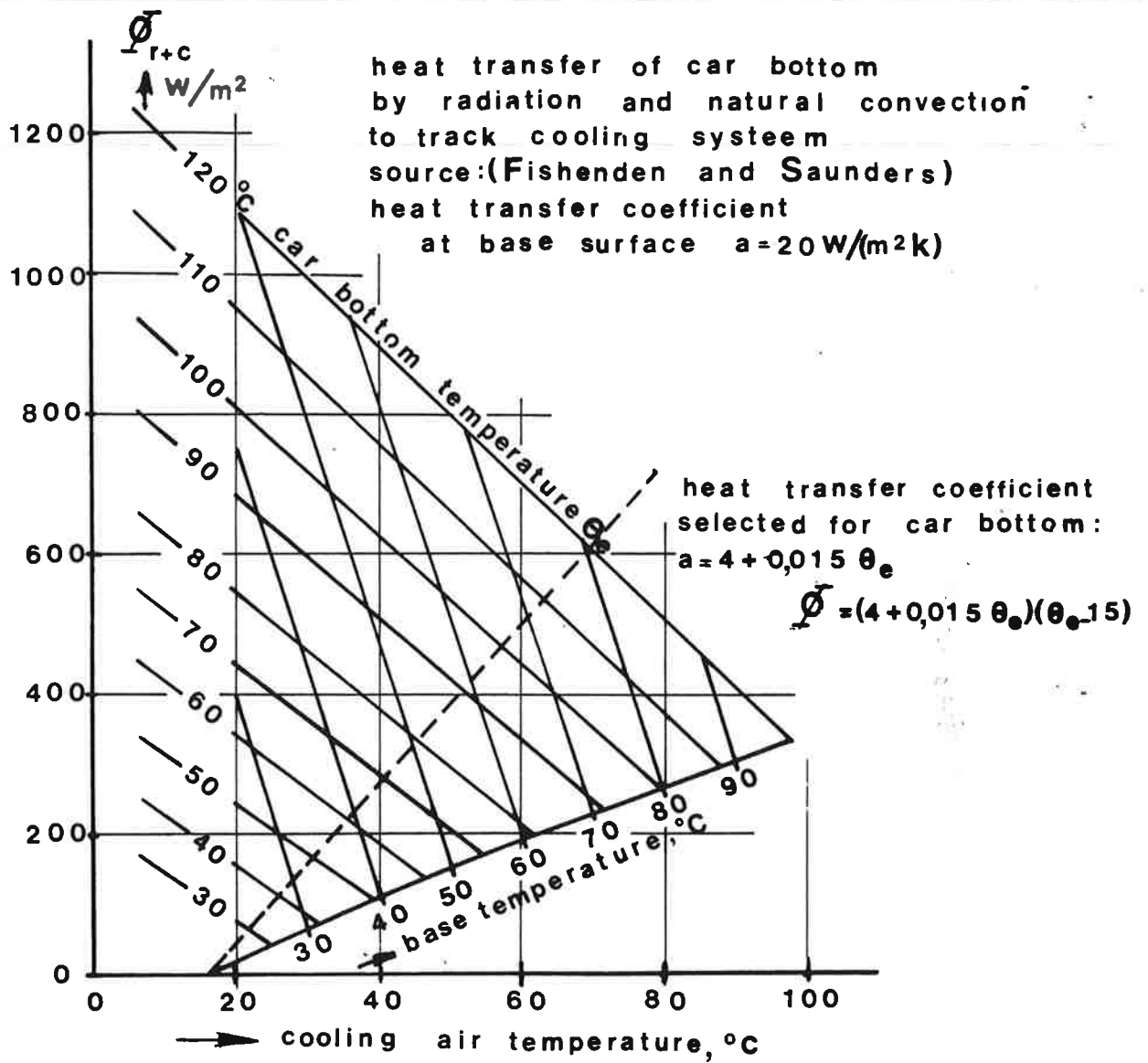
source: Fishenden and Saunders

Heat losses of kiln car bottoms by natural convection to track-cooling system.

MT-TNO Apeldoorn
Section Ceramics

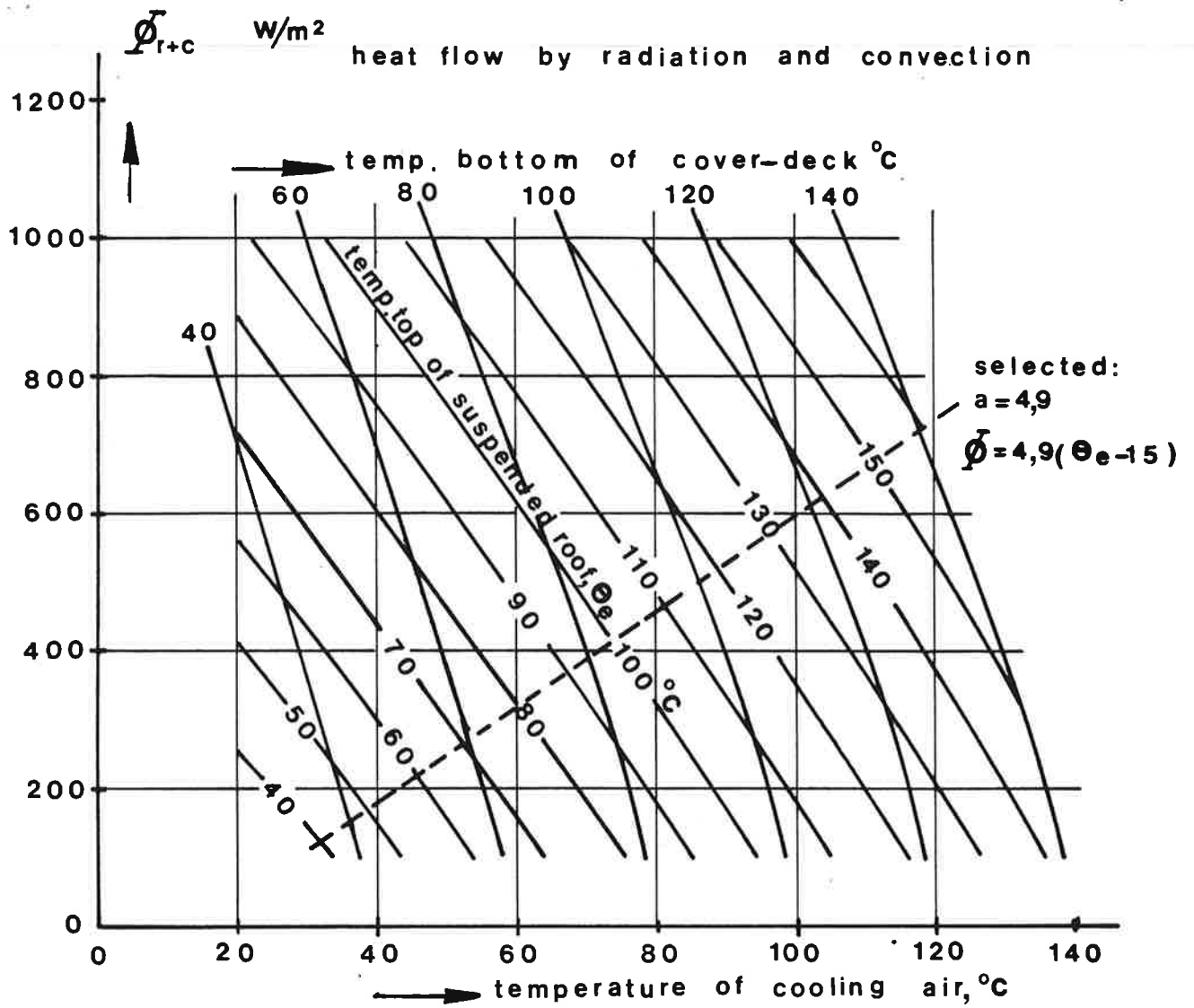


Heat transfer of car bottom by radiation and
natural convection to track cooling system
for $a\text{-base} = 10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

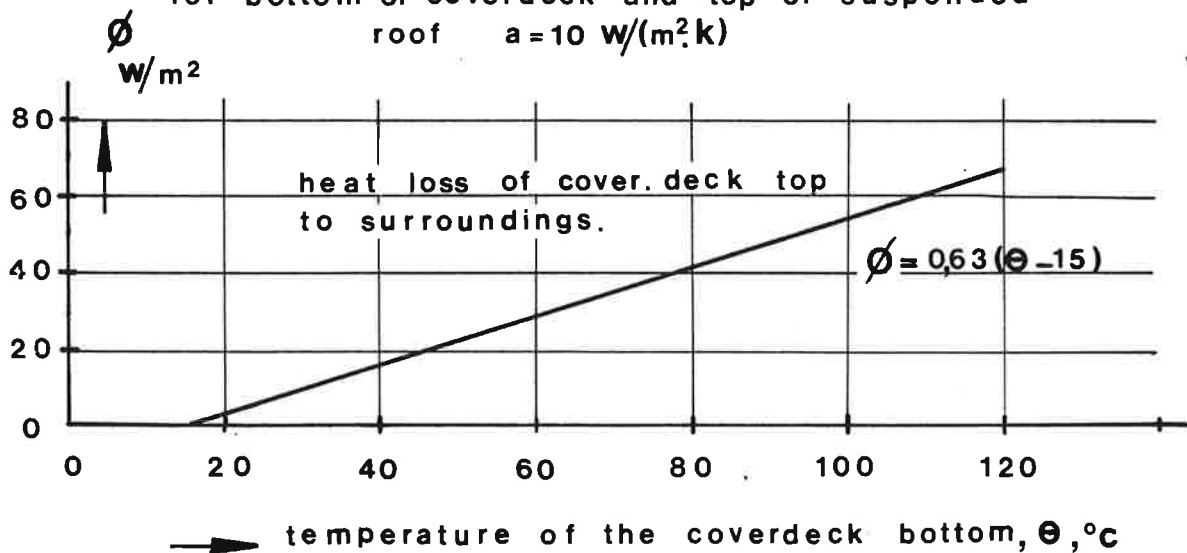


heat transfer of car bottom by radiation and natural convection to track cooling system for a -base = $20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{.K})$

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



(coefficient of heat transfer by convection for bottom of coverdeck and top of suspended roof $a = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$)



Object : Car No _____ Item No _____ Exposed surface : _____ m²
 Identification data of construction materials : Sheet No _____

Thermal data of construction materials								Steady state heat flow		
layer No	layer thickness	number of elements	bulk density	thermal conductivity		specific heat		inter-face temp.	enthalpy above 15 °C	heat flow
				$\lambda\theta = \lambda_0 + z.\theta$ [W/(m.K)]		$c = u + v.\theta$ [J/(kg.K)]				
[-]	[m]	[-]	[kg/m ³]	λ_0	z	u	v	[°C]	[MJ/m ²]	[W/m ²]
HF										
1										
2										
3										
4										
5										

Boundary Conditions

Maximum hot face temperature _____ [°C] _____
 Materials temperature at start _____ [°C] _____
 Temperature of external surroundings _____ [°C] _____
 Time-step _____ [s] _____

Heat transfer coefficient at external surface of θ_e [°C]
 $a = R + S.\theta_e$ [W/(m².K)]
 $R =$ _____ $S =$ _____

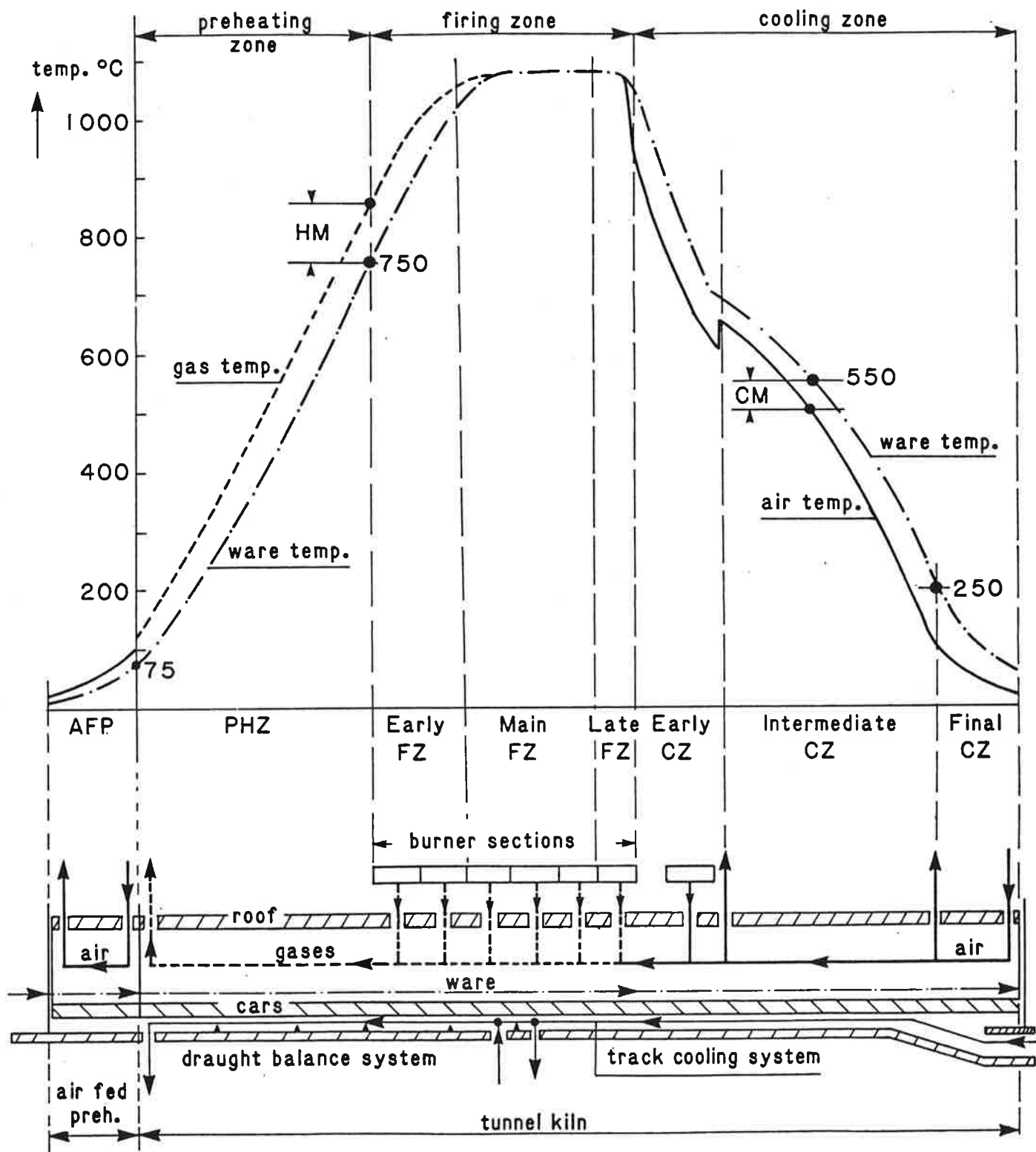
Temperature distribution and thermodynamic behaviour

kiln. zone	section	time at finish of section [h]	hot face temp. at finish [°C]	interface temperatures at the finish of the kiln sections in between the layers:					amount of heat		enthalpy of car at finish of section [MJ/m ²]
				1/2 [°C]	2/3 [°C]	3/4 [°C]	4/5 [°C]	5/- [°C]	in car at the top [MJ/m ²]	out of car at the bottom [MJ/m ²]	
start	→	0,00	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	-	-	0,000
	0- 1										
	1- 2										
	2- 3										
	3- 4										
	4- 5										
	5- 6										
	6- 7										
	7- 8										
	8- 9										
	9-10										
	10-11										

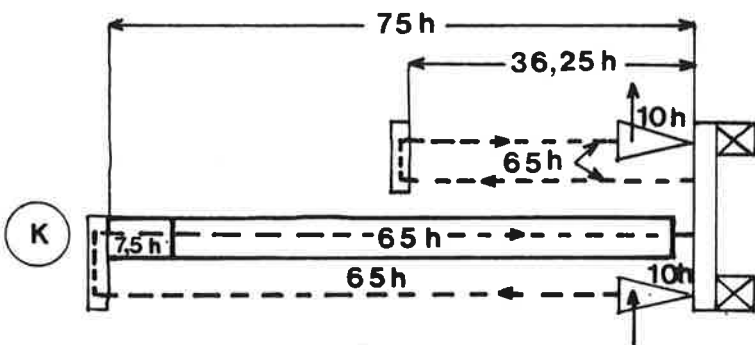
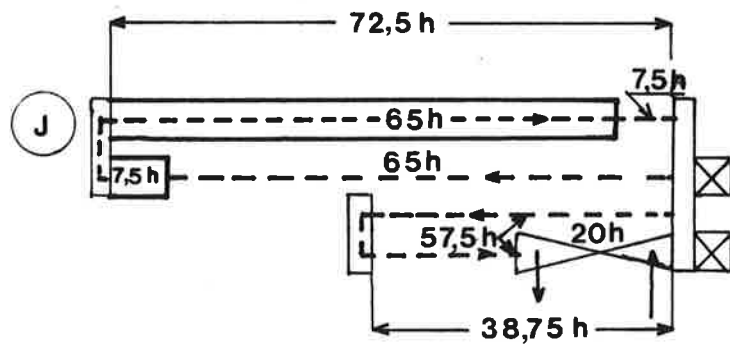
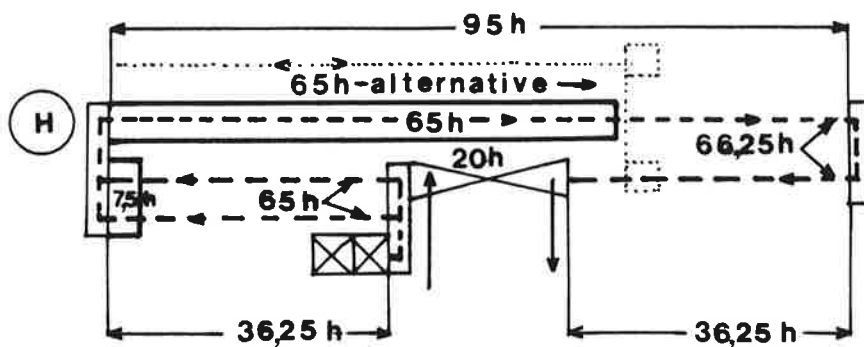
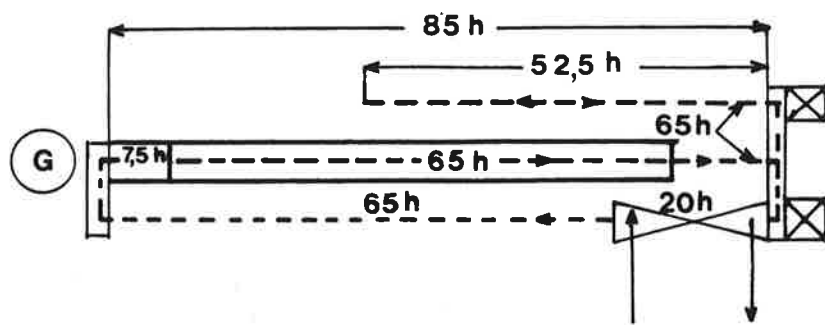
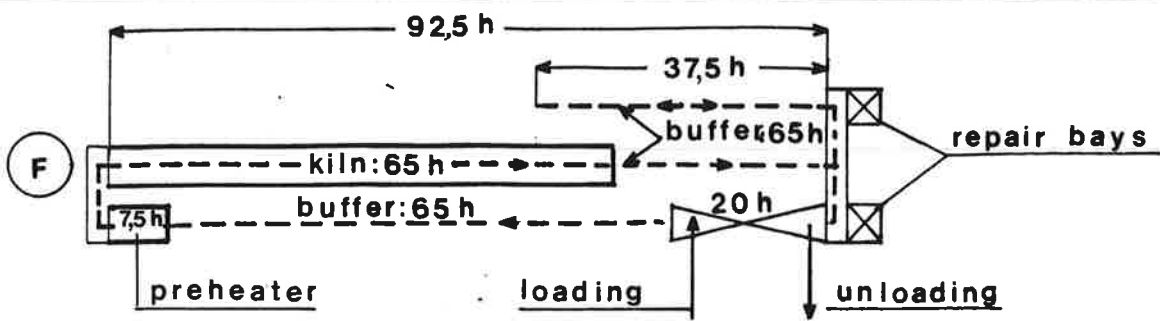
References

- temperature curve, sheet No. _____
 - drawings of car, sheet No. _____

Customer

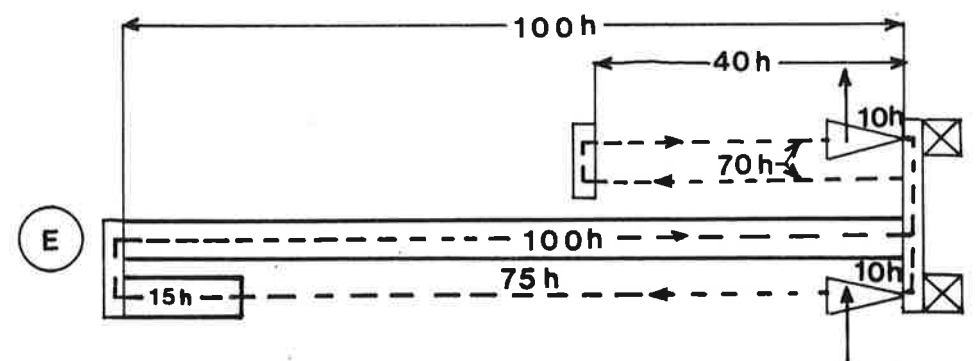
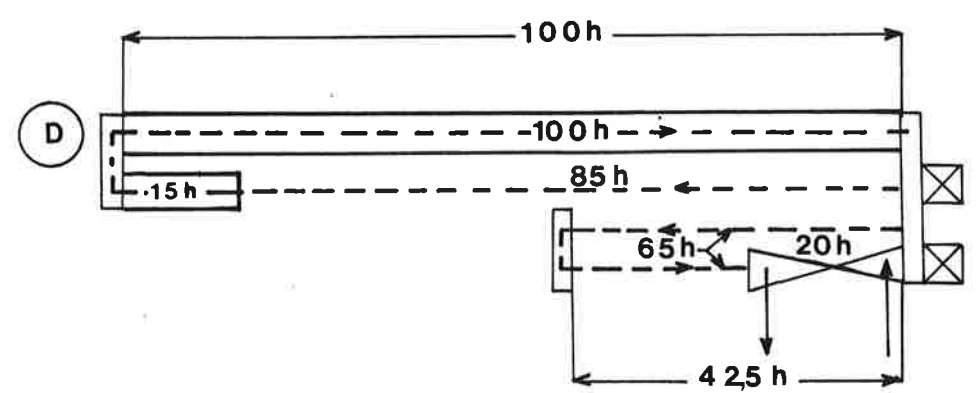
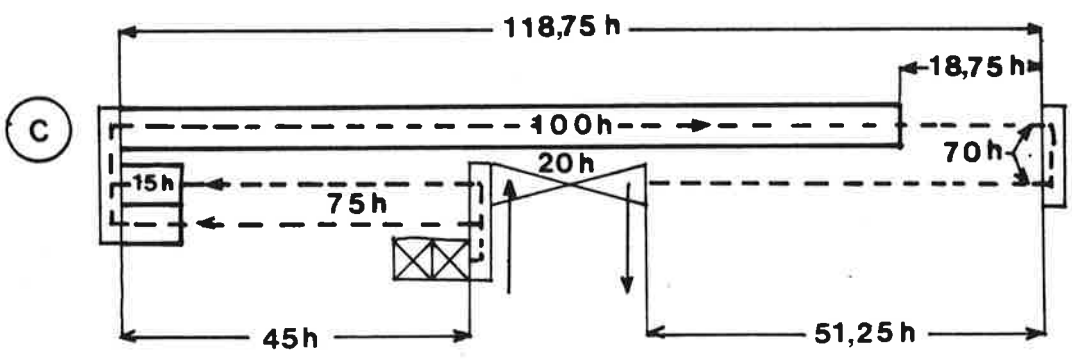
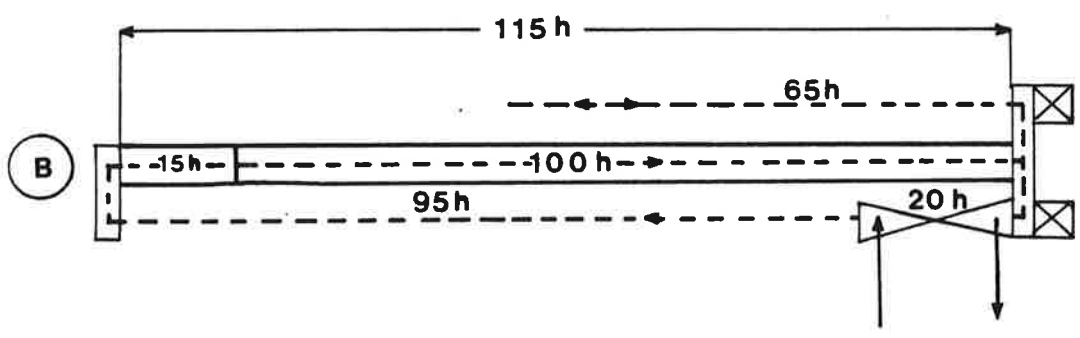
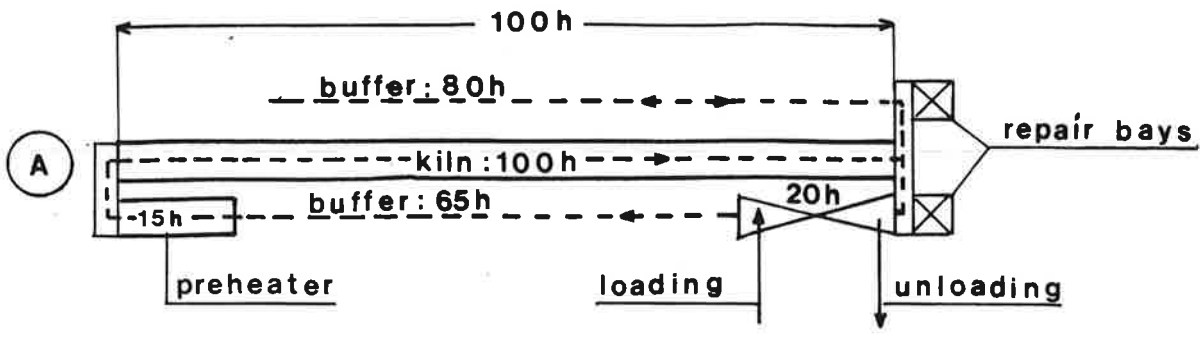


Process flow diagram of a tunnel kiln for firing structural clay products

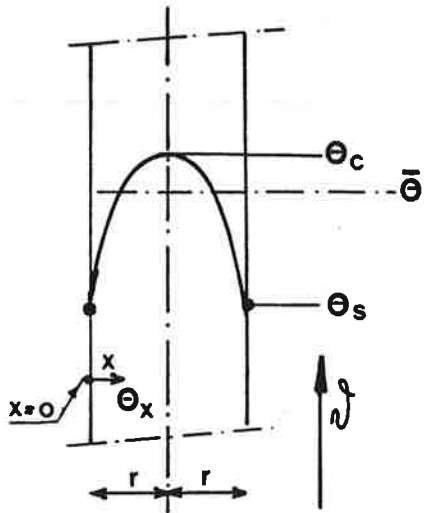


routing of kilncars for a firing cycle of 65 hours.
 Criteria: weekend buffer at least 65h. and accomodation
 for all kilncars standing outside the kiln.

MT-TNO Apeldoorn
 Section Ceramics



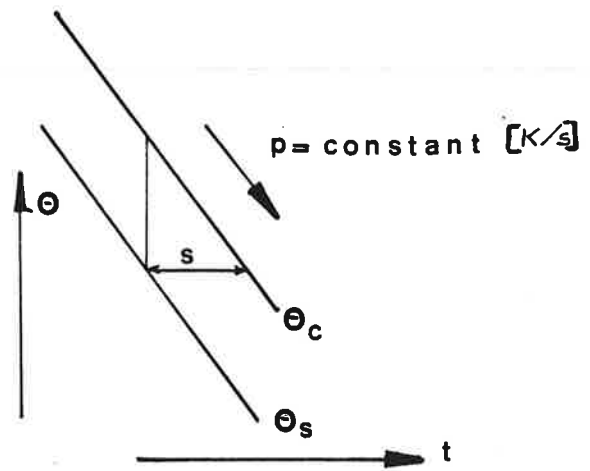
Routing of kiln cars for a firing cycle of 100 hours. Criteria: weekend buffer at least 65h. and accomodation for all kilncars standing outside the kiln.



$$(\theta_c - \theta_s) = p \cdot s$$

$$s = \frac{r^2}{2\alpha} = \text{time lag.}$$

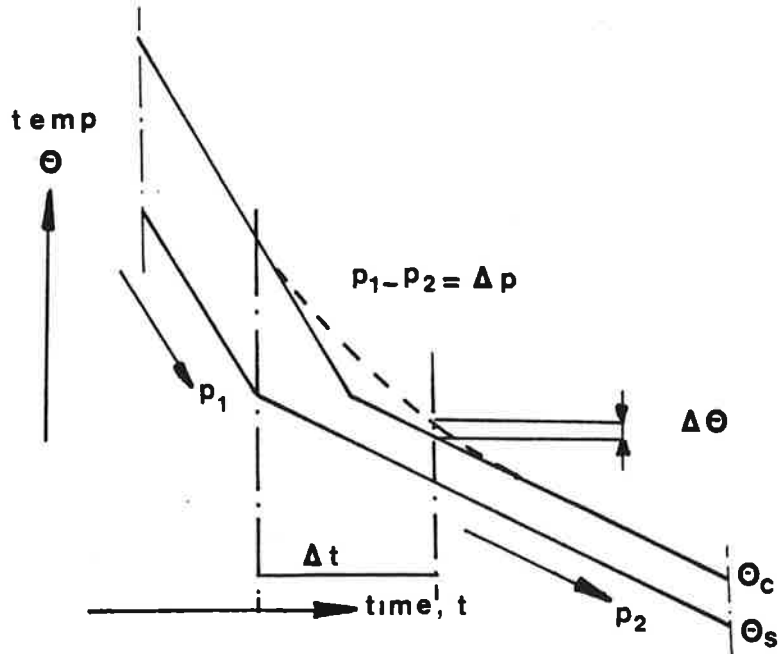
$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$



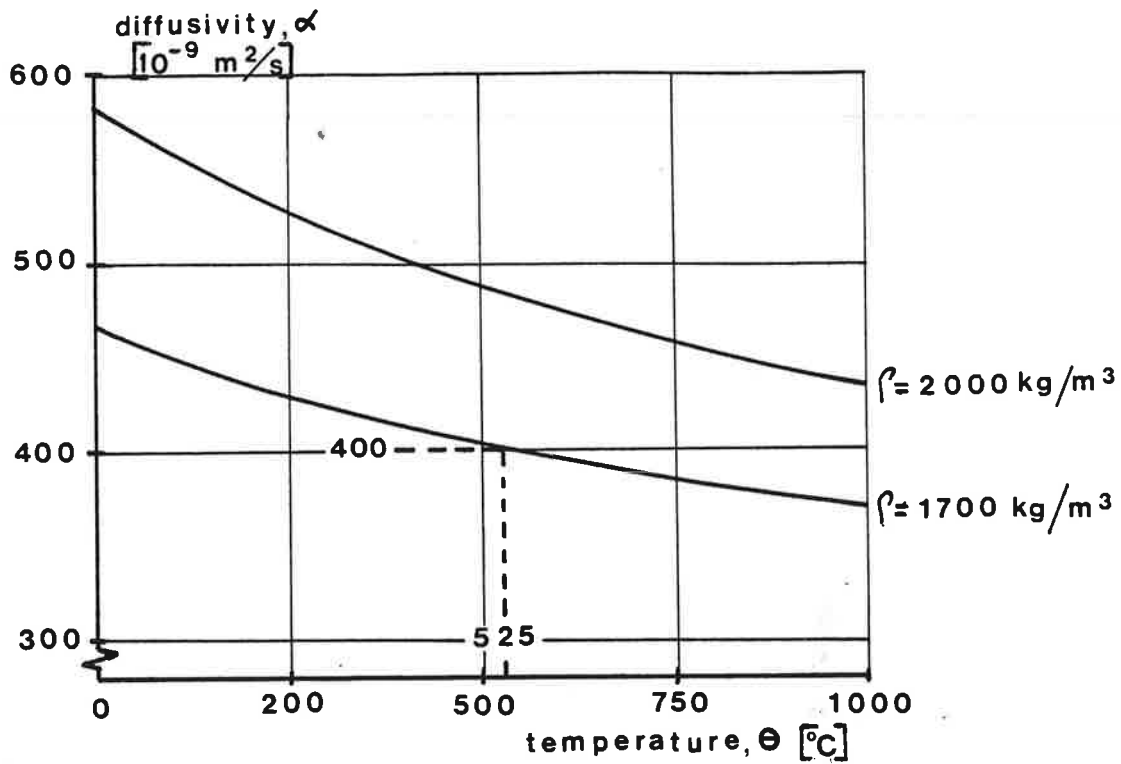
$$\bar{\theta} = \theta_s + \frac{2}{3} (\theta_c - \theta_s)$$

$$\theta_x = \frac{p \cdot r \cdot x}{\alpha} - \frac{p \cdot x^2}{2\alpha} + \theta_s$$

$$\frac{d\theta}{dx} \text{ at surface} = \frac{p \cdot r}{\alpha}$$



$$\Delta t = -1,9 \cdot s \cdot \log \left[\frac{\Delta \theta}{\Delta p \cdot s} \right]$$



$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 (1 + \mu \cdot \theta) \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

$$C_{\theta} = 800 + 0,578 \cdot \theta \quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$$

ρ [kg/m ³]	λ_0 [W/(m.K)]	μ [-]
1700	0,630	0,00037
2000	0,930	0,00028

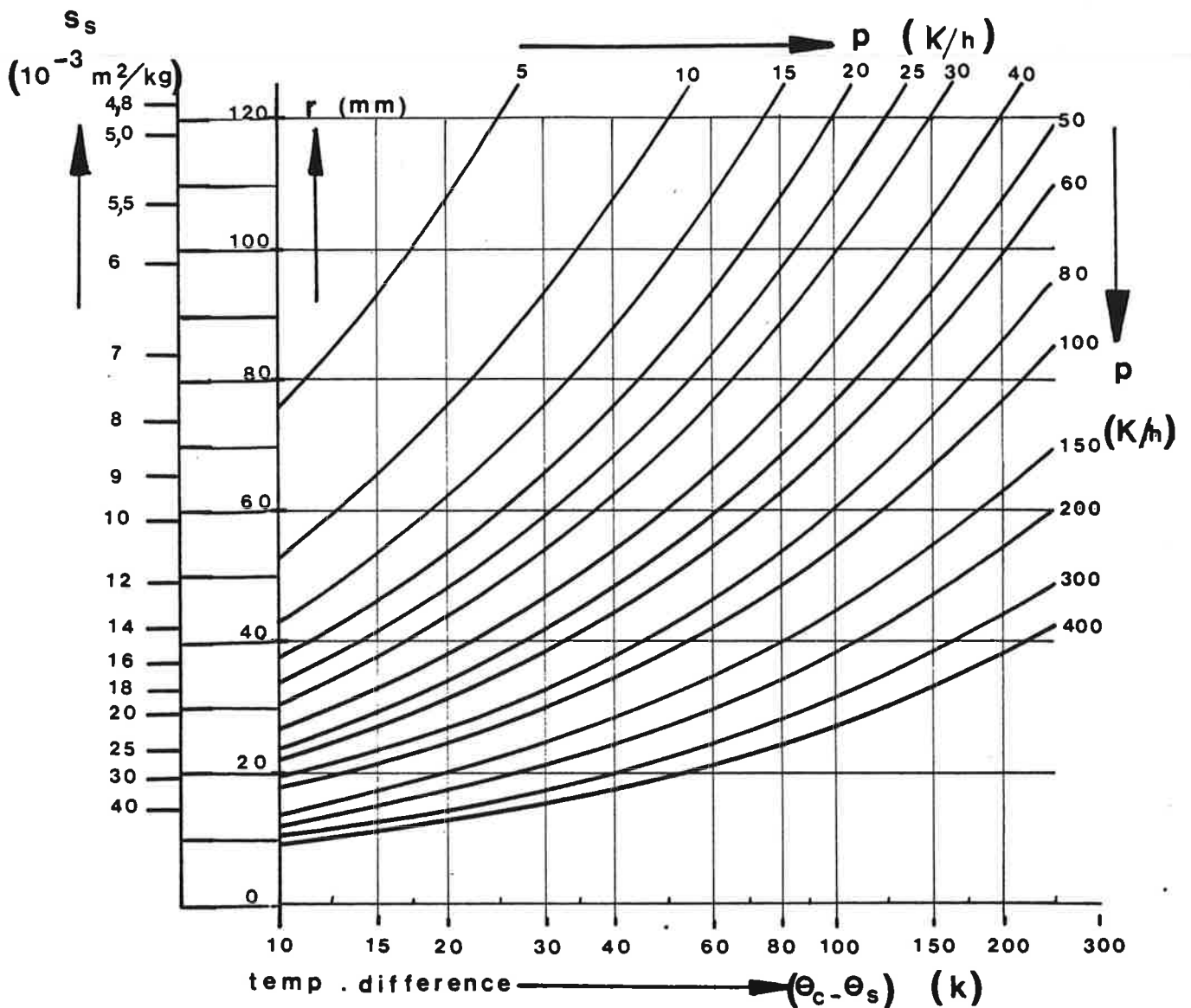
The diffusivity at 525°C of ware with a bulk density of 1700 kg/m^3 has been selected as the standard value for the calculation of temperature difference ($\theta_c - \theta_s$) between the centre and the surface of a cooled or a heated clay slab.

$$\theta_c - \theta_s = P \cdot s = P \cdot \frac{r^2}{2\alpha}$$

P = cooling rate [K/s]

r = half thickness of the slab. [m]

s = time lag [s]



$$\theta_c - \theta_s = \frac{r^2}{2\alpha} \cdot P$$

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

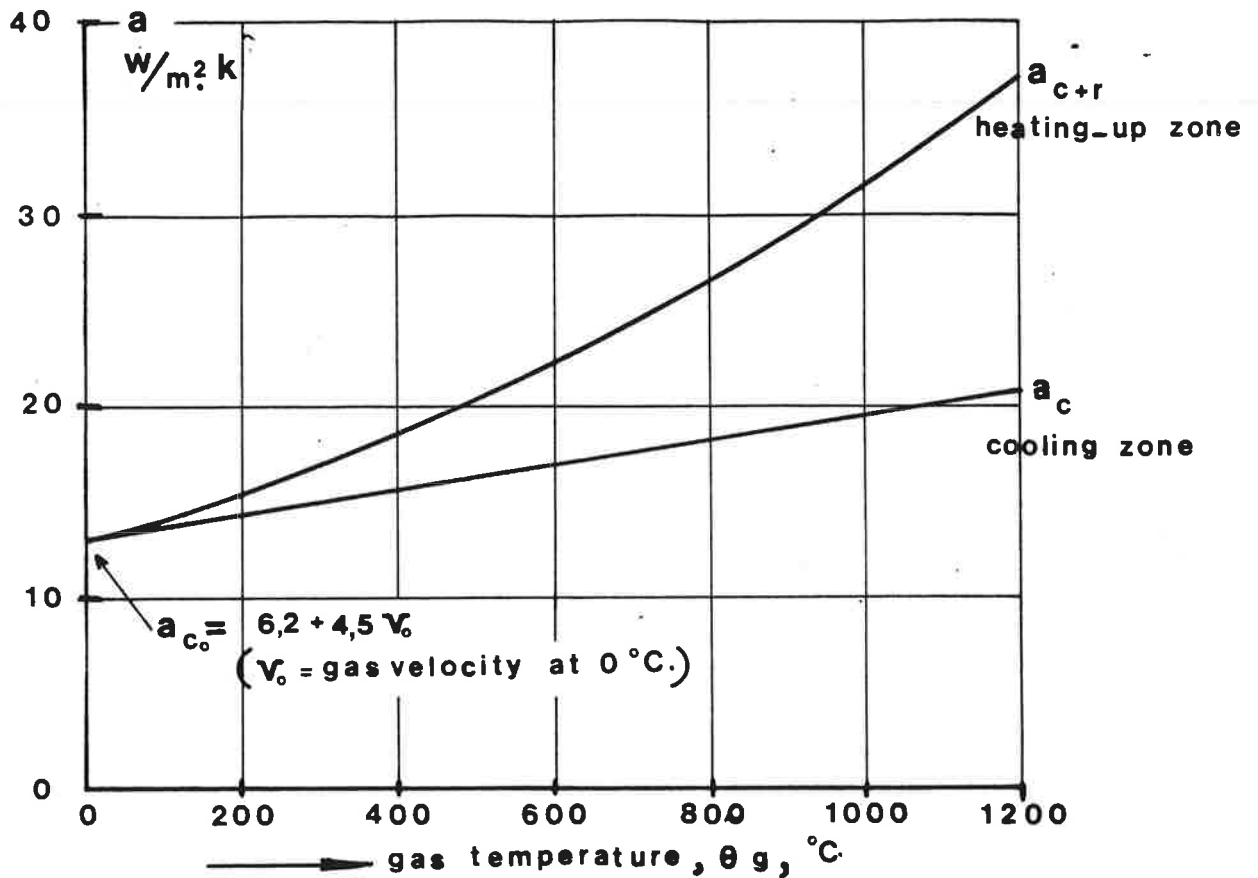
- θ_c : centre temperature [K]
- θ_s : surface temperature [K]
- r : half thickness of slab [m]
- α : diffusivity of slab, $400 \cdot 10^{-9} [\text{m}^2/\text{s}]$ at $525 [^\circ\text{C}]$
- ρ : bulk density, $1700 [\text{kg}/\text{m}^3]$
- P : cooling- or heating-up rate $[\text{K}/\text{s}]$ (constant)
- S_s : specific heat exchange surface $[\text{m}^2/\text{kg}]$

The mean temperature $\bar{\theta}$ of the slab will be:

$$\bar{\theta} = \theta_s + \frac{2}{3} (\theta_c - \theta_s) \quad (\text{on cooling})$$

temperature difference between the centre and the surface of a slab for several cooling- or heating-up rates P

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



Heat transmission in the heating-up zone and the cooling zone of tunnel kilns.

sources : Jürges, Heiligenstaedt, Schack

assumptions :

gas velocity at 0 C	1,5 m/s
partial pressure of CO ₂	0,08 bar
partial pressure of H ₂ O	0,16 bar
thickness of gas stream	0.075 m
temperature difference	100 °C
emissivity	0,85

Heat transmission coefficient for convection by air and combustion gases. a_c :

global value: $a_c = 13 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_g$ [W/m².K]

Heat transmission coefficient for gas radiation in heating-up zone. a_r :

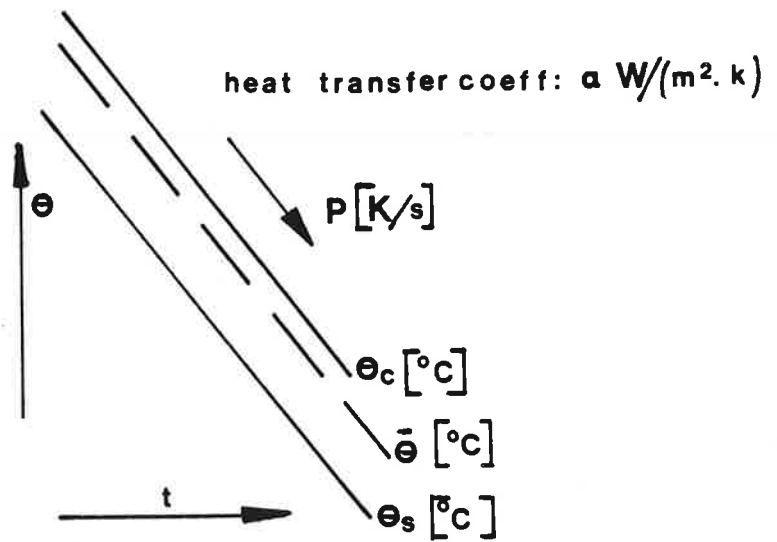
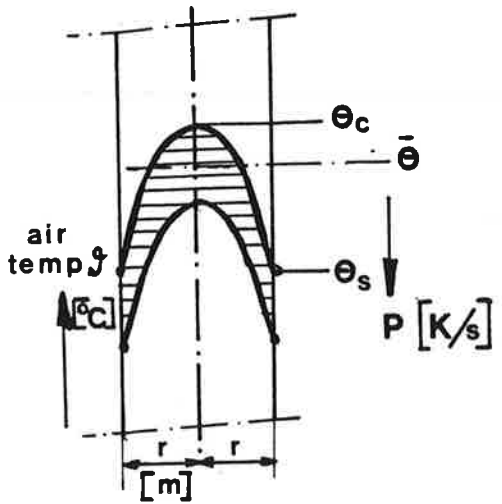
global value: $a_r = 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_g + 7,9 \cdot 10^{-6} \theta_g^2$ [W/m².K]

Heat transmission coefficient for convection and gas radiation in heating-up zone. a_{c+r} :

$a_{c+r} = 13 + 10,6 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_g + 7,9 \cdot 10^{-6} \theta_g^2$ [W/m².K]

global values for heat transmission in the heating-up zone and the cooling zone of tunnel kilns.

MT-TNO Apeldoorn
Section Ceramics



$$\theta_c - \theta_s = p \cdot \frac{r^2}{2\alpha}$$

$$\bar{\theta} - \theta_s = \frac{p \cdot r^2}{3\alpha} \quad (1)$$

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

Heat flow density: $q = p \cdot r \cdot \rho \cdot c_w$ [W/m²] (2)

$$q = a (\theta_s - \bar{\theta}) \quad [W/m^2] \quad (3)$$

Eliminating θ_s in (3) with (1) \longrightarrow

$$q = a \left(\bar{\theta} - \frac{p \cdot r^2}{3\alpha} - \bar{\theta} \right) \quad (4)$$

(2) and (4) give:

$$q = \frac{(\bar{\theta} - \bar{\theta})}{\left(\frac{1}{a} + \frac{r}{3\lambda} \right)}$$

$$\text{or: } q = y \cdot (\bar{\theta} - \bar{\theta}) \quad (5)$$

$$\frac{1}{y} = \left(\frac{1}{a} + \frac{r}{3\lambda} \right) \quad (5a)$$

y = overall heat transfer coefficient [W/(m².K)]

The overall heat transfer coefficient per kg of the ware will be ;

$$k = y \cdot S_s \quad [W/kg.K] \quad (6)$$

$$S_s = \frac{1}{r \cdot \rho} = \text{heat exchange surface} \quad (m^2/kg) \quad (7)$$

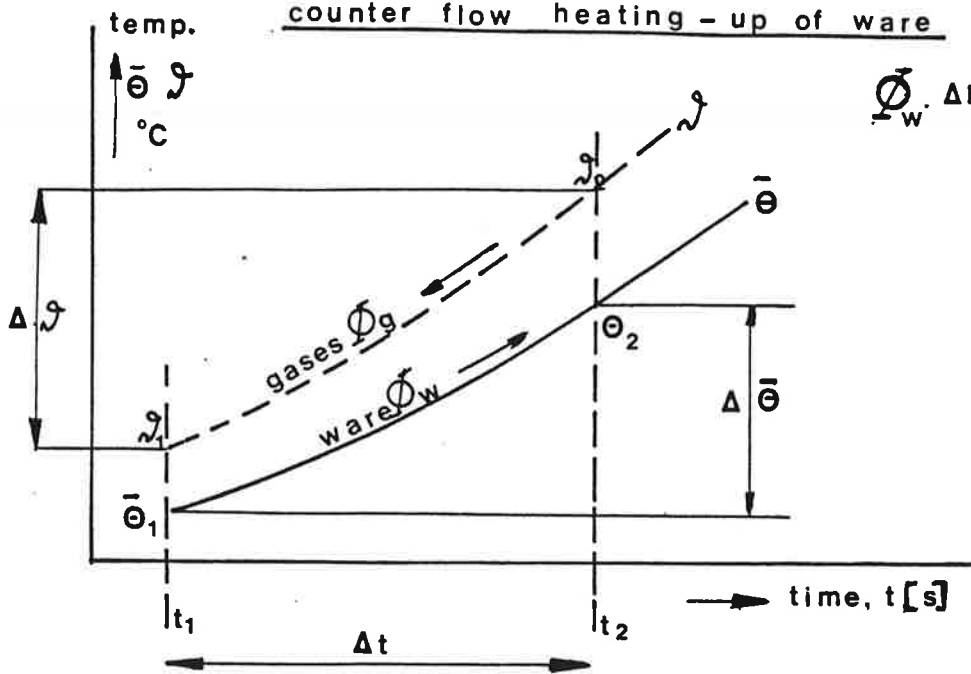
(5a), (6), (7) give:

$$k = y \cdot S_s = \frac{3 \cdot a \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s^2}{3 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s + a} \quad W/(kg.K) \quad (8)$$

$$\Phi_h = k \cdot (\bar{\theta} - \bar{\theta}) = p \cdot c_w \quad [W/kg.] \quad (9)$$

$$P = \frac{k}{c_w} \cdot (\bar{\theta} - \bar{\theta}) \quad (10)$$

counter flow heating - up of ware



$$\Phi_w \cdot \Delta h_w = \Phi_g \cdot \Delta h_g \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Phi_w \cdot \bar{C}_w}{\Phi_g \cdot \bar{C}_g} = \frac{\Phi_w \cdot (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)}{\Phi_g \cdot (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)} = \frac{\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1}{\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1} = \frac{\Delta \bar{\theta}}{\Delta \bar{\theta}_g} \quad [2]$$

$$(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_2) = (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_1) \cdot e^{-(1-\eta) \cdot \frac{k}{C_w} \cdot \Delta t} \quad \text{for } 1 > \eta > 1 \quad [3]$$

$$(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_2) = (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_1) \quad \text{for } \eta = 1 \quad [3a]$$

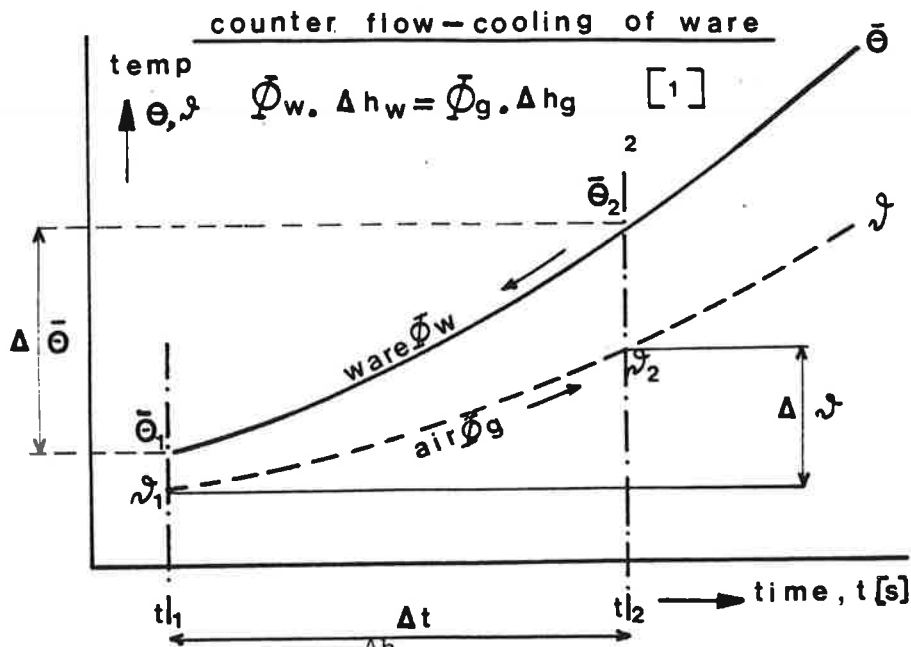
$$\Delta \bar{\theta} = - \frac{(\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_1)}{(1 - \eta)} \cdot \left\{ e^{-(1-\eta) \cdot \frac{k}{C_w} \cdot \Delta t} - 1 \right\} \quad \text{for } 1 > \eta > 1 \quad [4]$$

$$1 - \frac{\Delta \bar{\theta} \cdot (1 - \eta)}{(\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_1)} = e^{-(1-\eta) \cdot \frac{k}{C_w} \cdot \Delta t} \quad \text{for } 1 > \eta > 1 \quad [4a]$$

$$\Delta \bar{\theta} = (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_1) \cdot \frac{k}{C_w} \cdot \Delta t \quad \text{for } \eta = 1 \quad [4b]$$

$$(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_2) = (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_1) - \Delta \bar{\theta} \cdot (1-\eta) \quad \text{for } 1 > \eta > 1 \quad [5]$$

- $\bar{\theta}$: mean temperature of ware, $^{\circ}\text{C}$
- $\bar{\theta}_g$: temperature of combustion gases, $^{\circ}\text{C}$
- Φ_w : mass flow of ware, kg/s
- Φ_g : flow of gases, m^3/s (u.s.c.)
- Δh_w = change of enthalpy of ware J/k
- Δh_g = change of enthalpy of gases J/m^3 (u.s.c.)
- \bar{C}_w = mean specific heat of ware between $\bar{\theta}_1$ and $\bar{\theta}_2$, $\text{J}/(\text{kg},\text{K})$
- \bar{C}_g = mean specific heat of gases between $\bar{\theta}_1$ and $\bar{\theta}_2$, $\text{J}/(\text{m}^3, \text{K})$



$$\eta = \frac{\Phi_w \cdot \bar{c}_w}{\Phi_g \cdot \bar{c}_g} = \frac{\Phi_w \cdot \frac{\Delta h_w}{(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)}}{\Phi_g \cdot \frac{\Delta h_g}{(\nu_2 - \nu_1)}} = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1} = \frac{\Delta \nu}{\Delta \bar{\theta}} \quad [2]$$

$$(\bar{\theta}_2 - \nu_2) = (\bar{\theta}_1 - \nu_1) \cdot e^{(1 - \eta) \cdot \frac{k}{c_w} \cdot \Delta t} \quad \text{for } 1 > \eta > 0 \quad [3]$$

$$(\bar{\theta}_2 - \nu_2) = (\bar{\theta}_1 - \nu_1) \quad \text{for } \eta = 1 \quad [3a]$$

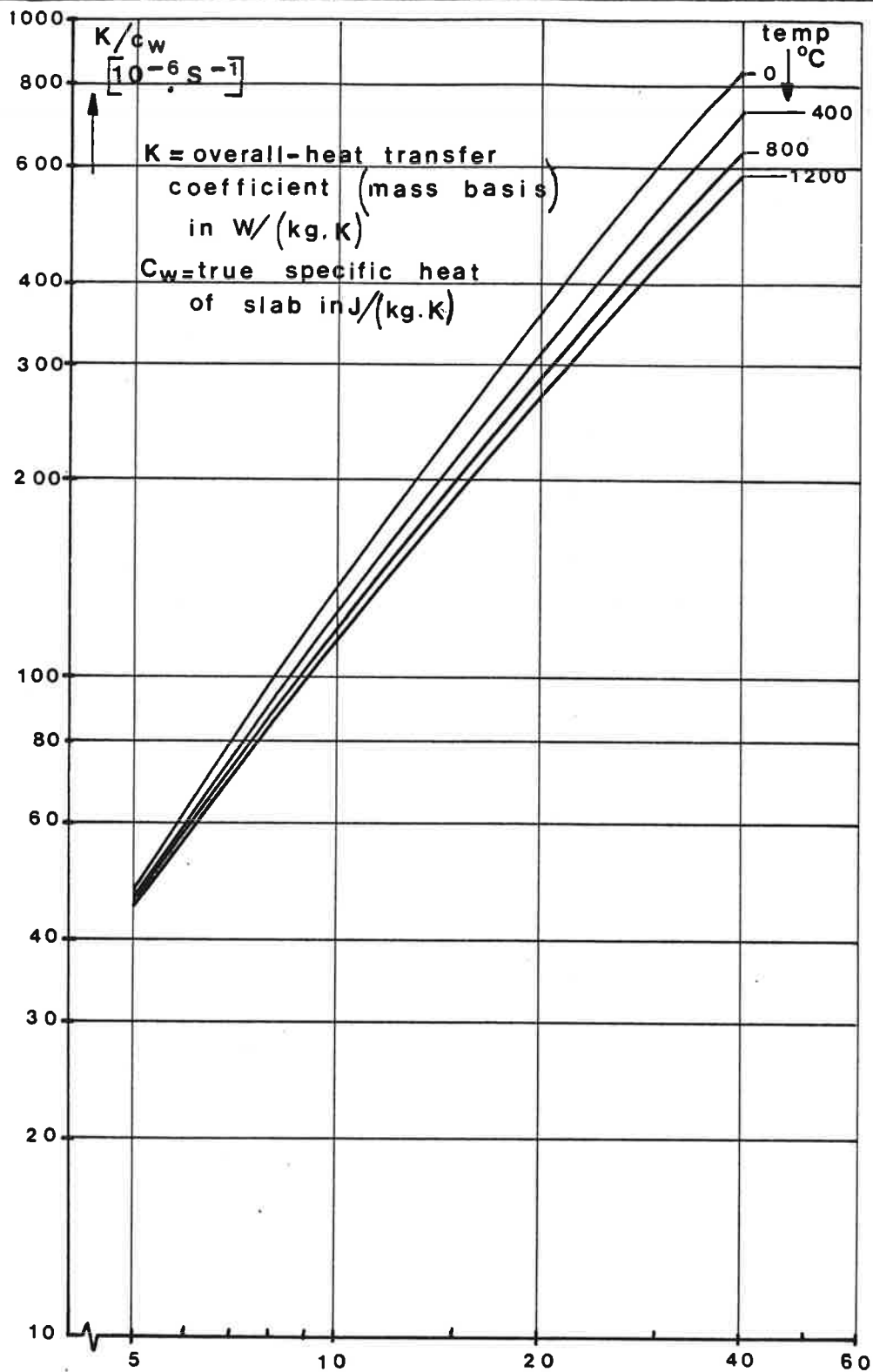
$$\Delta \bar{\theta} = \frac{(\bar{\theta}_1 - \nu_1)}{(1 - \eta)} \cdot \left\{ e^{(1 - \eta) \cdot \frac{k}{c_w} \cdot \Delta t} - 1 \right\} \quad \text{for } 1 > \eta > 0 \quad [4]$$

$$\frac{\Delta \bar{\theta} \cdot (1 - \eta)}{(\bar{\theta}_1 - \nu_1)} + 1 = e^{(1 - \eta) \cdot \frac{k}{c_w} \cdot \Delta t} \quad \text{for } 1 > \eta > 0 \quad [4a]$$

$$\Delta \bar{\theta} = (\bar{\theta}_1 - \nu_1) \cdot \frac{k}{c_w} \cdot \Delta t \quad \text{for } \eta = 1 \quad [4b]$$

$$(\bar{\theta}_2 - \nu_2) = (\bar{\theta}_1 - \nu_1) + \Delta \bar{\theta} \cdot (1 - \eta) \quad \text{for } 1 > \eta > 0 \quad [5]$$

- $\bar{\theta}$: mean temperature of ware, °C
- ν : air temperature, °C
- Φ_w : mass flow of ware, kg/s
- Φ_g : flow of air, m³/s (u.s.c)
- Δh_w : change of enthalpy of ware J/kg
- Δh_g : change of enthalpy of air J/m³ (u.s.c)
- \bar{c}_w : mean specific heat of ware between $\bar{\theta}_1$ and $\bar{\theta}_2$, J/(kg · K)
- \bar{c}_g : mean specific heat of air between ν_1 - ν_2 , J/(m³ · K)



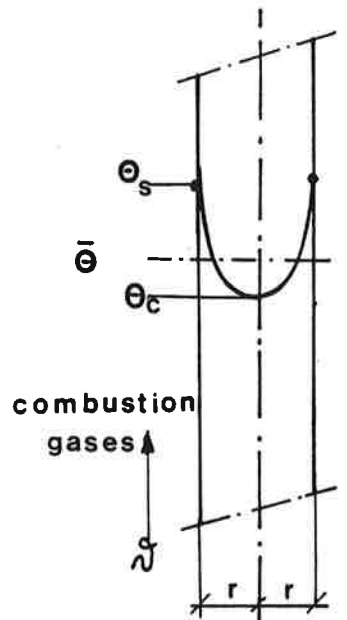
→ Specific Heat Exchange Surface, S_s , [$10^{-3} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$]

- ϕ_h : heat flow (mass basis) [W/kg]
- $\bar{\theta}$: average temperature of heated slab [$^{\circ}\text{C}$]
- \mathcal{T} : temperature of combustion gases [$^{\circ}\text{C}$]
- r : half thickness of slab [m]
- ρ : bulk density of slab (1700 kg/m^3)
- λ : thermal conductivity [W/m.K]
- a : heat transfer coefficient [W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$); $a = 13 + 10,6 \cdot 10^{-3} \cdot \mathcal{T} + 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \mathcal{T}^2$]
- p : heating-up rate [K/s]

$$\phi_h = k \cdot (\mathcal{T} - \bar{\theta})$$

$$p = \frac{k}{c_w} \cdot (\mathcal{T} - \bar{\theta})$$

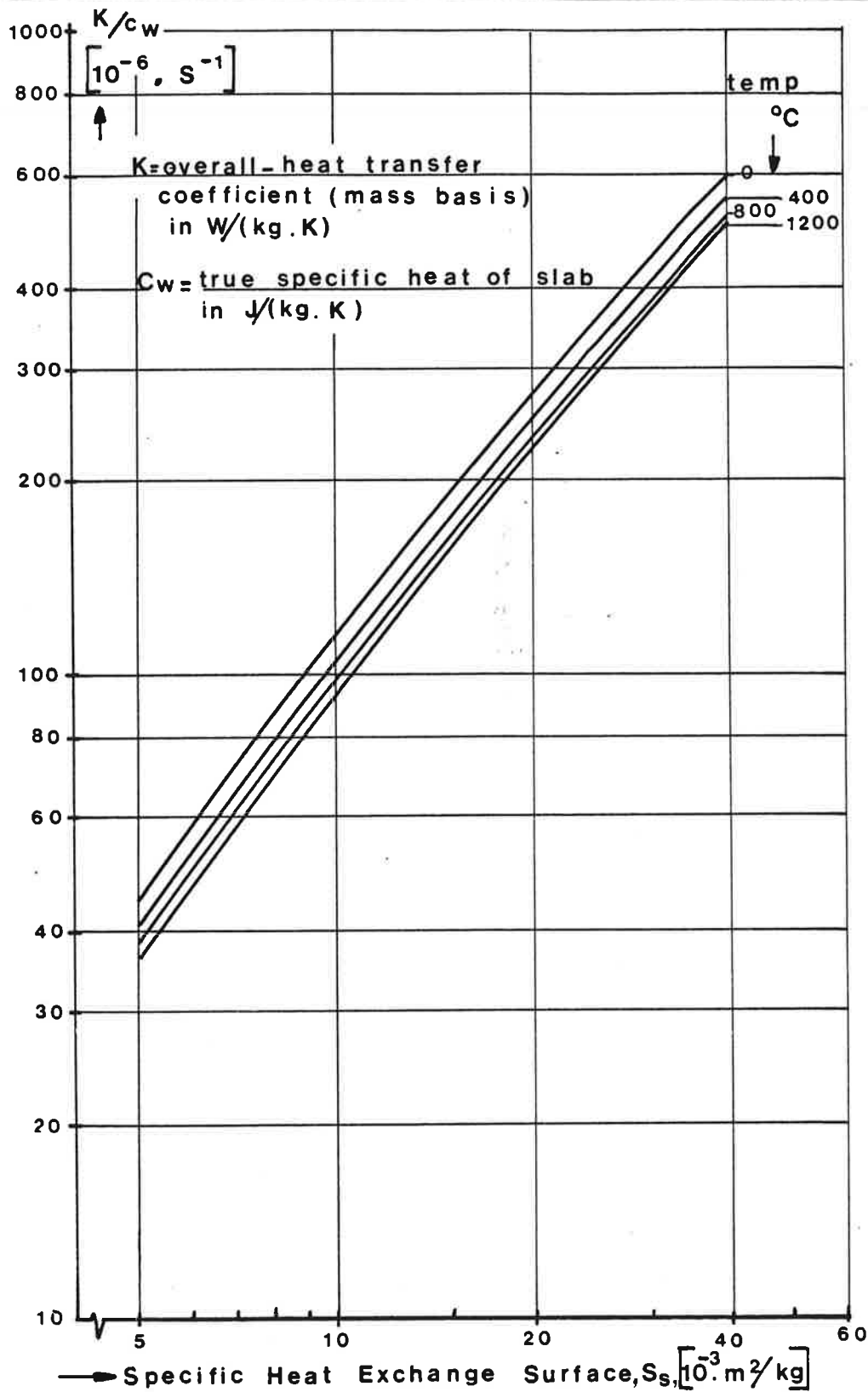
$$S_s = \frac{1}{r \cdot \rho}$$



$$k = \frac{3 \cdot a \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s^2}{3 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s + a}$$

Values of K/c_w for the heating-up of slabs with combustion gases at different temperature levels

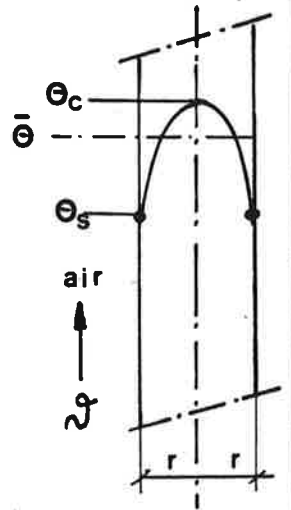
MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



$$\Phi_h = k \cdot (\bar{\theta} - \mathcal{T})$$

$$p = \frac{k}{C_w} \cdot (\bar{\theta} - \mathcal{T})$$

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

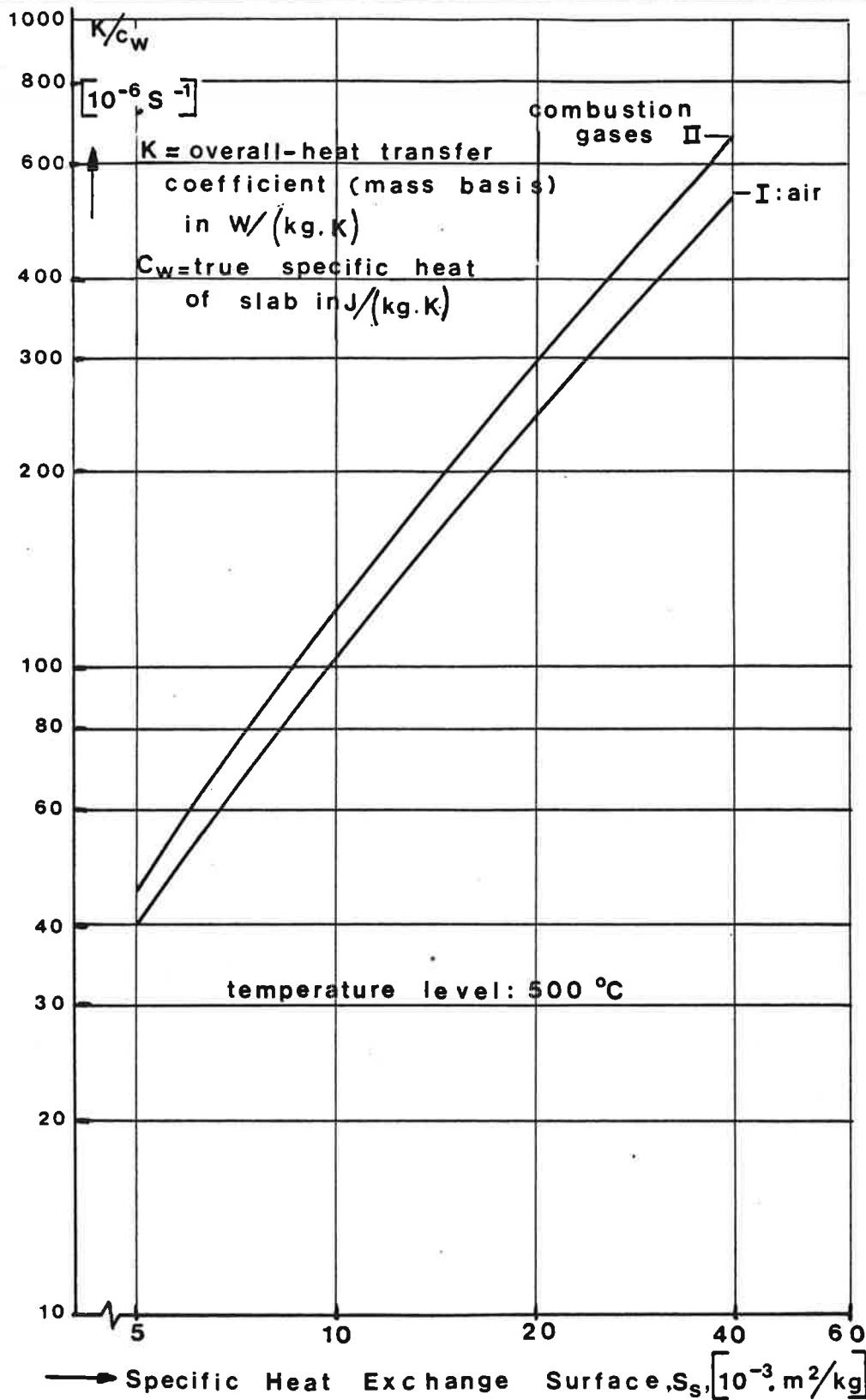


$$k = \frac{3a \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s^2}{3\lambda \cdot \rho \cdot S_s + a}$$

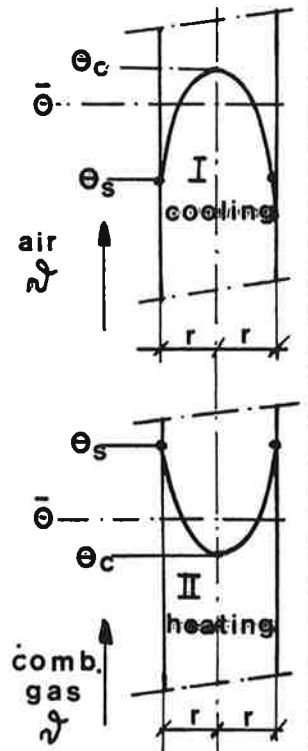
- Φ_h : heat flow (mass basis), [W/kg]
- $\bar{\theta}$: average temperature of cooled slab, [°C]
- \mathcal{T} : temperature of cooling air, [°C]
- r : half slab thickness, [m]
- ρ : bulk density of slab, (1700 kg/m³)
- λ : thermal conductivity, [W/(m.K)]
- a : heat transfer coefficient, [W/(m².K)]; $a = 13 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot \mathcal{T}$ (Sheet No)
- p : cooling rate, [K/s]

Values of K/C_w for the cooling of slabs with air at different temperature levels

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



S_s 10^{-3} m^2/kg	$K/C_w \cdot 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$ at 500 °C	
	air	comb. gases
5	40,3	45,1
10	104,6	121,6
20	246,2	294,4
40	539,8	658,1



$$\Phi_h = K \cdot (\mathcal{T} - \bar{\theta})$$

$$p = \frac{K}{C_w} \cdot (\mathcal{T} - \bar{\theta})$$

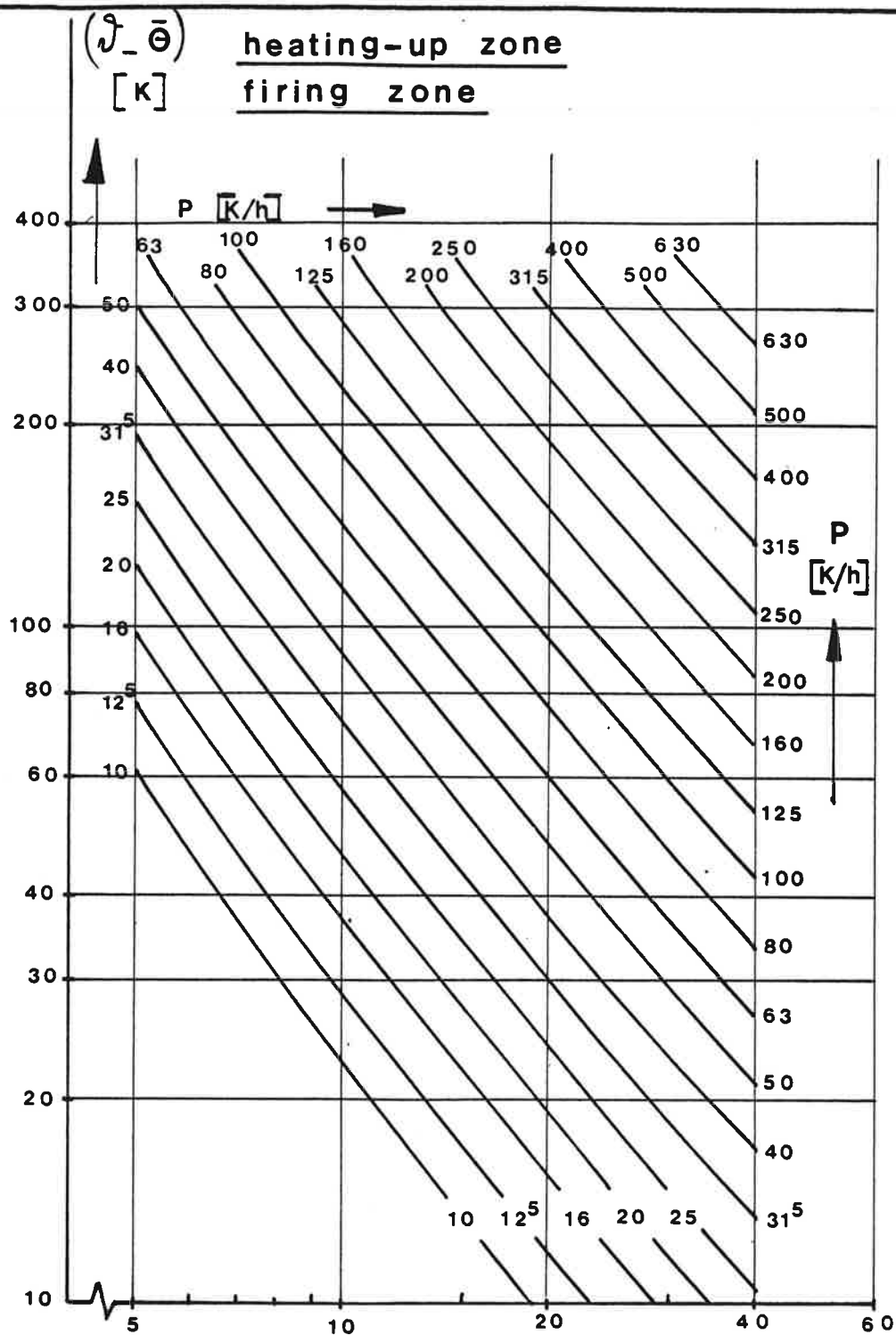
$$S_s = \frac{1}{r \cdot \rho}$$

$$K = \frac{3 \cdot a \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s^2}{3 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot S_s + a}$$

- Φ_h : heat flow (mass basis), [W/kg]
- $\bar{\theta}$: average temperature of slab, [°C]
- \mathcal{T} : gas temperature, [°C]
- r : half thickness of slab, [m]
- ρ : bulk density of slab, 1700 kg/m³
- λ : thermal conductivity, [W/(m.K)]
- a : heat transfer coefficient, [W/(m².K)]
- p : heating-up or cooling rate, [K/s]

Assumed standard values of K/C_w for the heating-up zone and firing zone (II) and the cooling zone (I) of a tunnelkiln ($\eta=1$)

MT-TNO, Apeldoorn
 Section Ceramics



$$P = \frac{k}{c_w} \cdot (\mathcal{T} - \bar{\theta})$$

$$\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$$

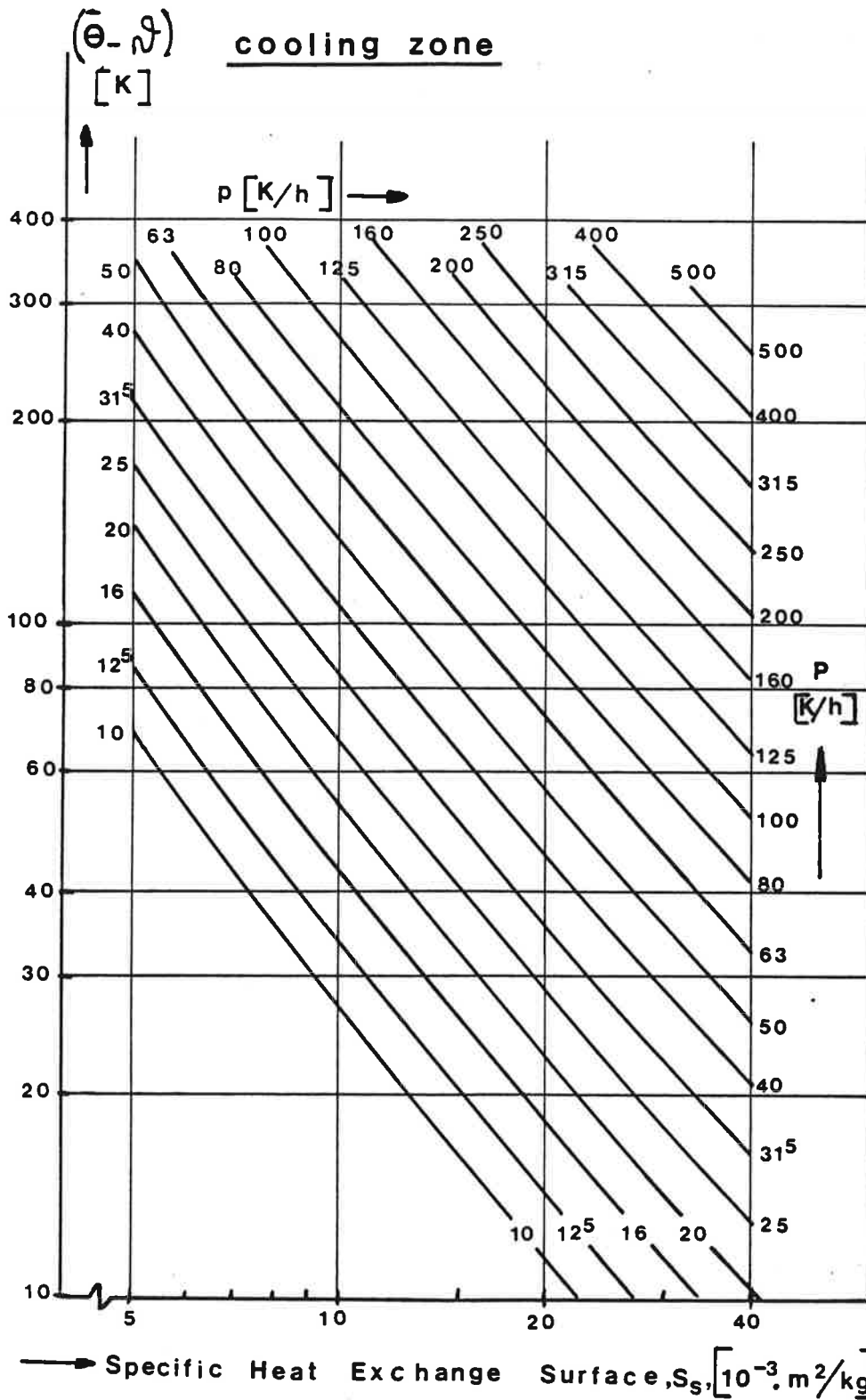
$$\frac{k}{c_w} = \text{value at } 500^\circ\text{C}$$

- p : heating-up rate, [K/h]
- C_w : true specific heat of slab, [J/(kg.K)]
- k : overall heat transfer coefficient (mass basis), [W/(kg.K)]
- $\bar{\theta}$: average temperature of slab, [°C]
- \mathcal{T} : temperature of combustion gases, [°C]

It is assumed that the value of $\frac{k}{c_w}$ does not vary with temperature (accuracy $\pm 10\%$).

Temperature difference between the ware and the combustion gases in relation to heating-up rate and specific heat exchange surface

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



$$p = \frac{k}{c_w} \cdot (\bar{\Theta} - \vartheta)$$

$$\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$$

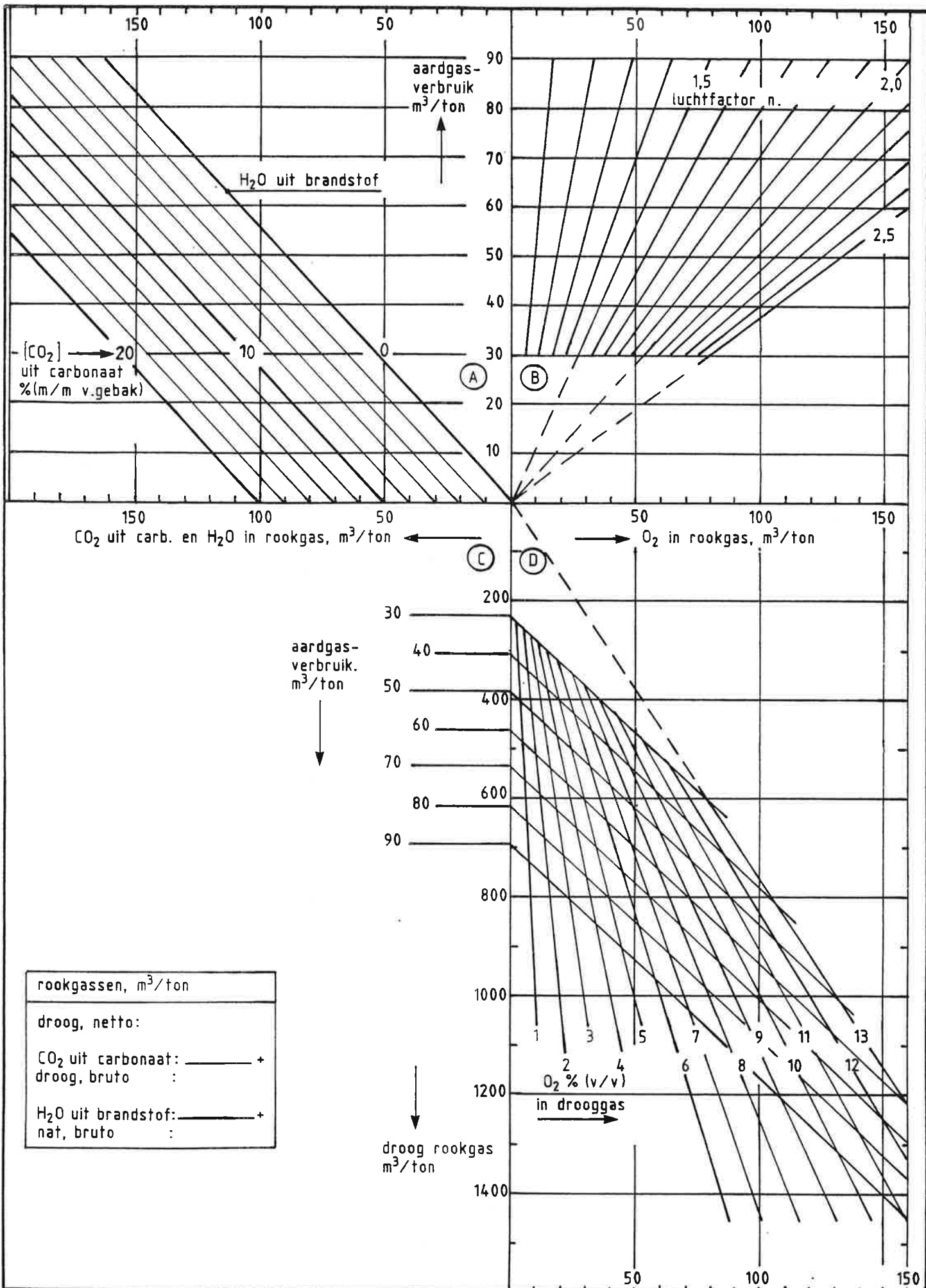
$$\frac{k}{c_w} = \text{value at } 500^\circ\text{C}$$

- p : cooling rate [K/h]
- k : overall heat transfer coefficient (mass basis), [W/(kg.K)]
- c_w : true specific heat of slab, [J/(kg.K)]
- $\bar{\Theta}$: average temperature of slab, [$^\circ\text{C}$]
- ϑ : air temperature, [$^\circ\text{C}$]

It is assumed that the value of $\frac{k}{c_w}$ does not vary with temperature (accuracy $\pm 10\%$).

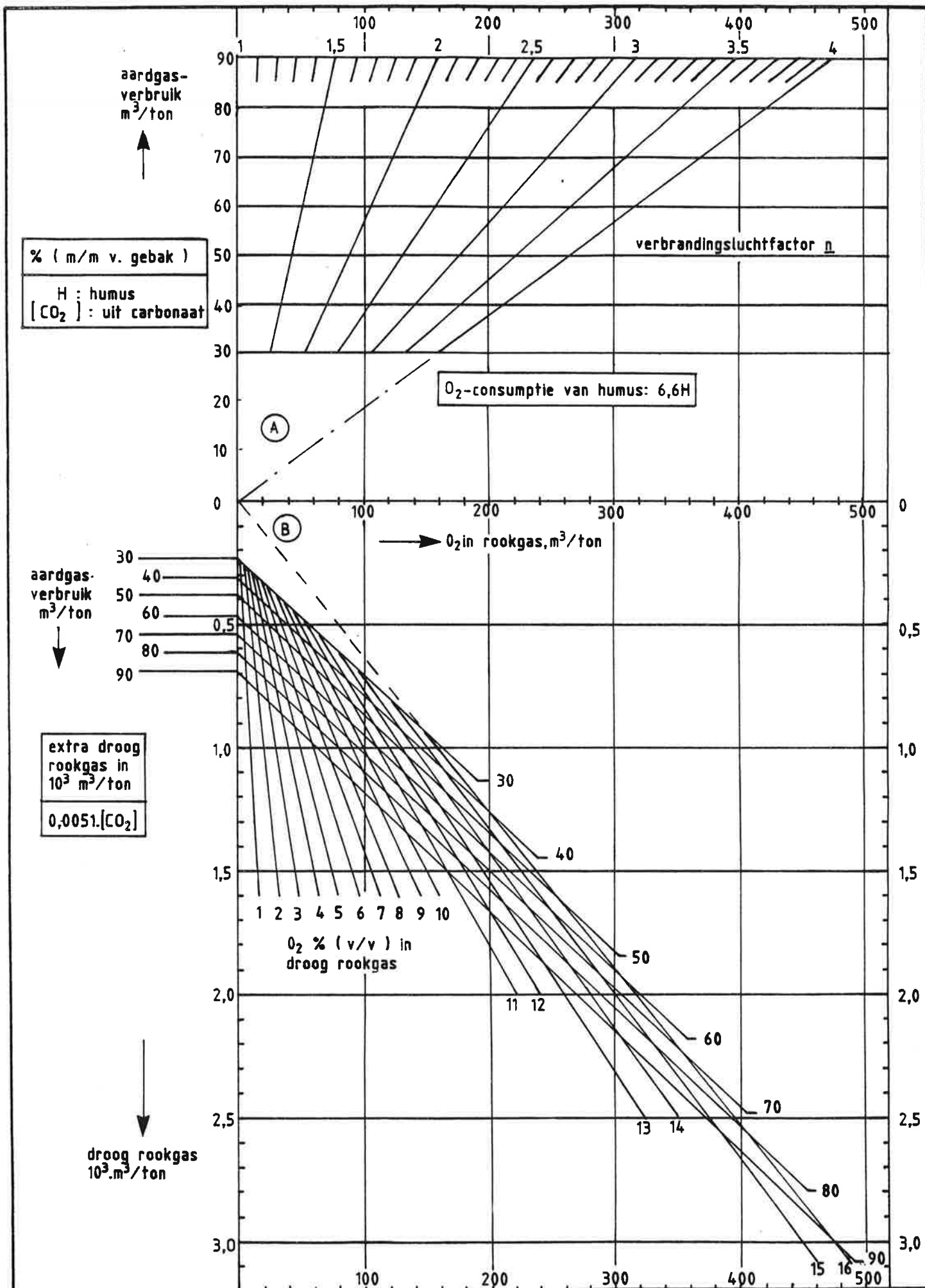
Temperature difference between the ware and the cooling air in relation to cooling rate and specific heat exchange surface

MT-TNO, Apeldoorn
Section Ceramics



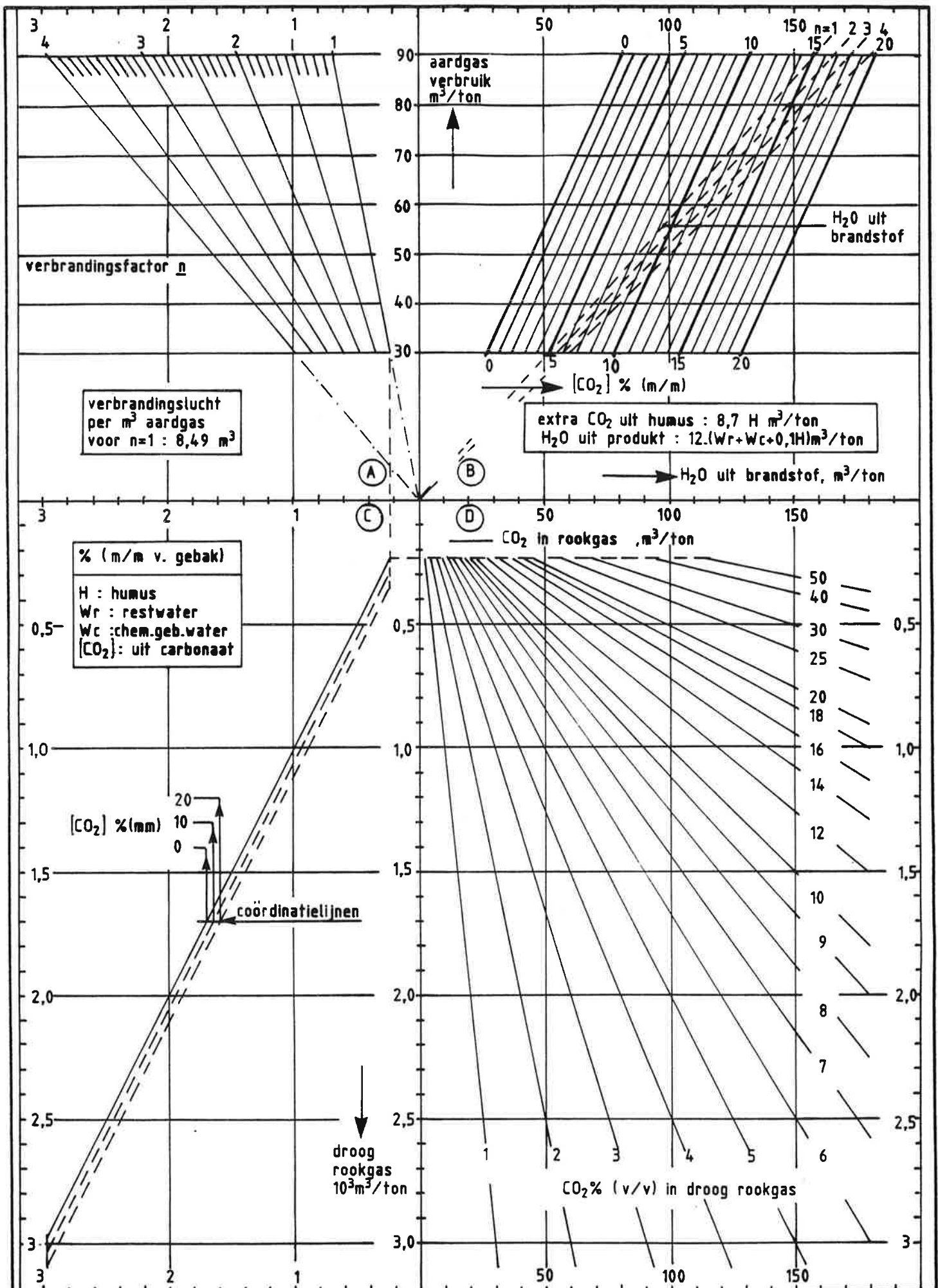
Hoeveelheid rookgassen per ton gebakken produkt en luchtvermaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit O_2 -metingen op de grens van voorwarm- en stookzone.

MT-TNO
15961



Hoeveelheid rookgassen per ton gebakken produkt en lucht-overmaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit O_2 -metingen in de rookgaszone.

MT-TNO
15961



Hoeveelheid rookgassen per ton gebakken produkt en luchtvermaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit CO₂ - metingen in de rookgaszone.

MT-TNO
15961