

MODEL VAN HET BAKPROCES
VAN BOUWKERAMIEK
IN TUNNELOVENS

door
ING. 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. : 86-204

Dossier nr. : 8725-15957

Datum : 16 juni 1986

P

Trefwoorden:

- Bouwkeramiek
- Bakproces
- Rekenmodel

Bestemd voor:

De Nederlandse Grofkeramische
Industrie

„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.

INHOUDSOPGAVE	pag.
SAMENVATTING	4
1. INLEIDING	5
2. DE STRUCTUUR VAN HET MODEL	6
3. DE TEMPERATUURCURVE	8
3.1 Voorwarmperiode, sectie 1-2	8
3.2 Stookperiode, secties 2-5'	9
3.3 Koelperiode, secties 5'-9	10
3.4 De temperatuurcurve in de voorwarmtunnel	13
3.5 Verwerking en interpretatie van de gegevens	14
4. VOORBEELDEN VAN DE BEREKENING VAN DE TEMPERATUURCURVE	16
5. HET WARMTEVERLIES VAN HET OVENLICHAAM	17
6. DE OPWARMING VAN LEKLUCHT IN DE VOORWARMZONE	18
7. HET REACTIEWARMTESALDO	19
8. DE WARMTECONSUMPTIE EN WARMTEREGENERATIE VAN DE OVEN- WAGENS	20
8.1 Berekeningswijze	20
8.2 Voorbeelden	20
9. HET WARMTE- EN STOFTRANSPORT	22
9.1 Berekeningswijze	22
9.2 Warmte- en stoftransport in de voorwarmzone, sectie 1-2	23
9.3 Aardgasverbruik en rookgasstromen in de stookzone	24
9.4 Warmte- en stoftransport in de koelzone	26
9.5 Het warmte en luchttransport in de voorwarmtunnel	28

INHOUDSOPGAVE	pag.
10. HET SCHOORSTEEN- EN UITRIJVERLIES	29
10.1 Berekeningswijze	29
10.2 Keuze van rookgasafvoertemperatuur en uitrijtemperatuur van het produkt	29
11. HET ZUURSTOFGEHALTE OP DE STOOKZONEGRENS	31
12. GEBRUIKSWAARDE VAN HET MODEL	32
13. LITERATUUR	34

Bijlagen: bladen 01 tot en met 60, m.u.v. blad no. 50
(de bladen 04 en 06 komen in de versies a,
b en c voor).

SAMENVATTING

Het rapport behandelt de bouw en de gebruikswijze van een eenvoudig rekenmodel voor het optimaliseren van de ontwerp kwaliteit of de bedrijfsvoering van tunnelovens voor bouwkeramiek.

Allerlei vragen met betrekking tot het bakregime, de zone-indeling, het energieverbruik, het lucht- en rookgassentransport, de ovenatmosfeer en de procesbesturing kunnen met behulp van het model worden beantwoord.

Door een modelopzet op de grondslag van trapsgewijs gevarieerde hoofdparameters van het bakproces in tunnelovens, konden tal van rekengrootheden vooraf worden bepaald en in overzichtelijke rekenschema's worden opgenomen, hetgeen het gebruik van het model vereenvoudigt en de studieresultaten tot in details inzichtelijk maakt.

1. INLEIDING

Ter besparing op arbeids- en energiekosten werden in de afgelopen jaren in de Nederlandse baksteenindustrie een ruim aantal met aardgas gestookte wagentunnelovens met geautomatiseerde groepering en transport van het produkt geïnstalleerd.

Een optimale bedrijfsvoering van dit oventype met betrekking tot de kwaliteit van het gebakken produkt en het energiegebruik vraagt inzicht in de factoren, die daarbij een rol spelen en ofschoon ervaring, zoals het spreekwoord zegt, de beste leermeester is, wordt deze meestal pas ten koste van soms dure mislukkingen verworven.

Modelstudies kunnen die risico's beperken. Het model is daarbij een voor berekening toegankelijke vereenvoudigde voorstellingswijze van het werkelijke baksysteem.

Experimenten met zo'n rekenmodel maken het in principe mogelijk potentiële verbeteringen of besparingen in het bakproces, voorafgaand aan een daadwerkelijke wijziging van de bedrijfsvoering van de oven, te evalueren.

Modelstudies aan tunnelovens dragen voorts bij tot het ontwerpen van doeltreffende systemen voor automatische procesbesturing en lenen zich tevens voor onderzoek naar structurele verbeteringen in het bakproces. Zij stimuleren daarmee de verdere ontwikkeling van dit oventype.

Op grond van het vorenstaande werd door MT-TNO te Apeldoorn, met financiële steun van de Nederlandse baksteen- en kleidakpannenindustrie, de bouw van een tunnelovenmodel ter hand genomen.

In 1985 werd in dit kader reeds een rapport uitgebracht met basisgegevens over de relevante parameters bij het bakproces in tunnelovens [1] en werd dank zij financiële steun van het Projectbeheerbureau Energieonderzoek (PEO) een gebruikersvriendelijk computerprogramma ontwikkeld voor de berekening van het thermodynamisch gedrag van tunnelovenwagens [2] [3] [4] [5].

Bij de ontwikkeling van het model werd er naar gestreefd het een zo eenvoudig mogelijke en tot in details inzichtelijke structuur te geven, teneinde het industrieel gebruik ervan te bevorderen.

In dit rapport wordt het thans gebruiksgereede tunnelovenmodel gepresenteerd. Het is bestemd voor diegenen, die geconfronteerd worden met vragen betreffende de ontwerp kwaliteit of de optimale bedrijfsvoering van tunnelovens voor bouwkeramiek.

2. DE STRUCTUUR VAN HET MODEL

In het ontwikkelde model wordt de wagentunneloven beschouwd als een systeem, dat uit twee in serie geschakelde tegenstroomwarmtewisselaars bestaat (voorwarmzone en koelzone), die gescheiden zijn door een stookzone, waarin, aan de zich in tegengestelde richting continu bewegende media (de charge met ondersteuningsmateriaal, inclusief de ovenwagenbekleding en de uit de koelzone aanstromende lucht), warmte wordt gesuppleerd.

De warmteuitwisseling tussen het keramische produkt en de ovengassen wordt met de voor tegenstroomwarmtewisselaars geldende formules beschreven.

Hiervoor zij verwezen naar [1], hoofdstuk 6, blz. 15, 16 en 17 en de bijbehorende informatiebladen (opgemerkt wordt, dat de in bedoeld rapport gedefinieerde warmte-overdrachtsfactor K/c_w in dit rapport kortheidshalve ook wel aangeduid wordt met het symbool K met de dimensie [$10^{-6} \cdot s^{-1}$]).

De optimale temperatuurcurve wordt ontwikkeld op grond van experimenteel bepaalde specificaties van de opwarming, de rijping en de koeling van het produkt, alsmede aan de hand van de door berekening of proef-ondervindelijk vastgestelde warmtetechnische eigenschappen van de voor de tunneloven gekozen zetwijze van het produkt.

De exotherme en endotherme reacties, de warmteverliezen van het systeem, alsmede de niet stationaire warmtestroming in de wagenopbouw, worden in de betreffende ovenzones door middel van een correctie op de massastroom van het produkt in rekening gebracht. De warmteaccumulatie in de wagenbekleding in voorwarm- en stookzone en de warmteregeneratie in de koelzone worden daarbij ontleend aan een gebruikersvriendelijk computerprogram, dat onder meer voor gebruik in het tunnelovenmodel werd ontworpen [2] [3] [4] [5].

De uitvoeringsvorm van het model heeft in het bijzonder betrekking op bakprocessen van Nederlandse bakstenen in tunnelovens met een oxidierende atmosfeer, maar is in essentie ook van toepassing op tunnelovens waarin andere soorten bouwkeramiek worden gebakken.

De gehele warmtebehandeling van het produkt is, zoals bijlage 01 aangeeft, verdeeld in een aantal markante temperatuursecties. De temperatuurgrenzen van deze secties hebben steeds betrekking op de gemiddelde produkttemperatuur θ en op de rookgas- of luchttemperatuur δ ter plaatse.

Voor sommige sectiegrenzen zijn courante of optimale constante temperaturen gekozen.

Kenmerkend voor het model is voorts, dat ten aanzien van het temperatuurverschil tussen de gemiddelde produkttemperatuur en de gastemperatuur op de sectiegrenzen de keuzemogelijkheid steeds wordt beperkt tot in aanmerking komende getalwaarden uit de reeks $10^{\sqrt[10]{10}}$, overeenkomstig de ISO-aanbevelingen inzake voorkeurgetallen vervat in V3070 van het NNI.

Op deze wijze kon een eenvoudig en inzichtelijk rekenmodel van de tunneloven gebouwd worden, dat de gebruiker veel rekenarbeid bespaart en voor verreweg de meeste gebruiksdoelen voldoende informatie oplevert.

Overigens bieden de rekenschema's in de bijlagen, alsmede de basisgegevens over onder meer de enthalpieën van gassen en produkt in rapport [1] voldoende aanwijzingen, om door aanvullend rekenwerk af te wijken van de vorenstaand aanbevolen orde in de grote variabiliteit van de parameters.

3. DE TEMPERATUURCURVE

3.1 Voorwarmperiode, sectie 1-2

In de voorwarmperiode (sectie 1-2 op blad 01, 03, 04a, 04b, 04c en 05) wordt het halffabrikaat vanaf een constant veronderstelde begintemperatuur van 75°C, die rookgascondensatie op het produkt voorkomt en tevens de toepassing van relatief lage rookgasafvoertemperaturen mogelijk maakt, opgewarmd tot een standaard stookgrenstemperatuur van 675°C.

Voor het verschil tussen de rookgasafvoertemperatuur en de gemiddelde produkttemperatuur ter plaatse (Gas-Exit Module, GEM) kan gekozen worden uit 40, 50 of 63°C (bladen 03, 04a en 05).

De standaard-rookgasafvoertemperaturen variëren daarmee van 115°C tot 138°C.

Voor een rookgasafvoertemperatuur van 125°C zijn tevens reken-schema's opgesteld voor stookgrenstemperaturen van 600°C en 750°C (bladen 04b en 04c).

Voor het temperatuurverschil tussen rookgassen en produkt op de stookzonegrens (Heating-up Module, HM) kunnen acht getalwaarden, variërend van 40°C tot 200°C worden ingevoerd. De keuze hangt af van de in het bedoelde temperatuurgebied, voor een goede oxidatie van de scherf, nog juist toelaatbare opwarmsnelheid van de oven-charge.

Deze dient langs experimentele weg te worden vastgesteld; bijvoorbeeld in een proefoven volgens de aanwijzingen op blad 31.

Mede aan de hand van de gegevens en formules in de bladen 32 en 33 kan vervolgens de warmteoverdrachtsfactor K van de charge in de rookgaszone en de meest in aanmerking komende waarde van de "Heating-up Module" HM worden geschat.

Met dit gegeven kan met het informatieblad 03, 04a, 04b, 04c of 05, in de van toepassing zijnde kolom van HM, uit de waarde $\Delta t.K$, bij deling door K, de voorwarmperiode 1-2 worden berekend.

De vorm van de temperatuurcurve in de voorwarmzone (hol of bol ten opzichte van de tijd-as) wordt bepaald door de in de bladen 03 tot

en met 05 eveneens vermelde grootheid η . Dit is het quotiënt van de warmtecapaciteiten van de "gecorrigeerde" massastroom van het produkt (zie hoofdstuk 2) en de massastroom van het rookgas.

Indien η groter is dan één zal de temperatuurcurve een hol verloop ten opzichte van de tijd-as vertonen.

Het temperatuurverschil tussen produkt en gas neemt dan in de richting van de gasstroom gezien af. Een sterk hol verloop vindt men in de praktijk vaak bij bakprocessen van produkten in een massieve zetting. Er wordt dan bij een noodzakelijke hoge waarde van HM gestreefd naar een lage waarde van GEM (laag schoorsteenverlies!). Een rechtlijnig verloop ontstaat bij $\eta=1$ en een bol verloop indien η kleiner is dan één. De kromming van de curve, hol of bol, is des te sterker naarmate η sterker van één afwijkt.

3.2 Stookperiode, secties 2-5'

3.2.1 Voorvuurperiode, sectie 2-3

De sectie 2-3 strekt zich uit van de stookzonegrens van 600, 675 of 750°C tot de plaats waar de rookgastemperatuur het baktemperatuurniveau bereikt.

Verondersteld wordt dat de aanvaarde waarde van HM en daarmee ook die van K in het voorvuur worden gehandhaafd.

In de bladen 06a, 06b zijn voor een voor baksteen courante baktemperatuur van 1.075°C en stookgrenstemperaturen van respectievelijk 675, 750 en 600°C wederom de bij een gegeven grootte van HM behorende getalwaarden van $\Delta t.K$ vermeld. Deling door K levert de tijdsduur voor het passeren van het voorvuur op.

3.2.2 Hoofdvuurperiode, secties 3-5

De tijdsduur waarin de charge in het hoofdvuur dient te verblijven is afhankelijk van de eigenschappen van het te bakken produkt, van de groeiperingswijze van het produkt op de wagens en van de kwaliteitseisen, die aan het gebakken produkt worden gesteld [7].

Terwille van de vereiste eenvoud van het te ontwikkelen model werd afgezien van de bepaling van de optimale sintertijd volgens de procedures in [7], en werd volstaan met een specificatie van een minimum verblijftijd in het hoofdvuur aan de hand van een vuistregel ontleend aan [6].

Arbitrair werd de totale hoofdvuurperiode verdeeld in een sectie 3-4, waarin de nadering van de gemiddelde produkttemperatuur tot de toptemperatuur in hoofdzaak plaatsvindt en een sectie 4-5 waarin de gemiddelde produkttemperatuur op toptemperatuur verblijft.

De minimum tijdsduur is als functie van de halve dikte van het (gestapelde) produkt in de bladen 07 en 08 aangegeven. In het bijzonder indien hoge bakkrimpwaarden worden geëist, dient, voor de sectie 4-5, een langere verblijftijd dan uit de vuistregel blijkt te worden aangehouden, welke, hetzij op grond van ervaring, dan wel aan de hand van de procedures in [7], wordt geschat.

3.2.3 Achternvuurperiode, sectie 5-5'

Met betrekking tot het achternvuur wordt in het model in afwijking van de werkelijkheid eenvoudigheidshalve verondersteld, dat de opwarming van de uit de koelzone van de oven toestromende lucht tot de toptemperatuur geen tijd kost en dat de gemiddelde produkttemperatuur bovendien onveranderd op toptemperatuur blijft (zie blad 09).

Voor het temperatuurverschil tussen de gemiddelde produkttemperatuur en de luchttemperatuur op de sectiegrens 5', de "Fire Entry Module", FEM, worden bij voorkeur waarden tussen 40 en 125°C gekozen. De keuze hangt af van de warmte- en luchthuishouding van de oven in de voorkoelzone waarover later.

3.3 Koelperiode, secties 5'-9

3.3.1 Indeling van de koelzone

Het optimale temperatuurverloop van de koelzone van een tunneloven wordt bij het bakproces van bouwkeramiek uit Nederlandse holocene kleiën in sterke mate bepaald door de toelaatbare koelsnelheid in het temperatuurgebied rond de kwartsomzetting bij 575°C. Deze koelsnelheid kan langs experimentele weg, bijvoorbeeld in een proefoven volgens de aanwijzingen op blad 31, vastgesteld worden. Mede aan de hand van de gegevens en formules in de bladen 32 en 34 kunnen vervolgens de warmteoverdrachtsfactor K van de charge in de koelzone en de in aanmerking komende maximum waarde van het

temperatuurverschil tussen de gemiddelde produkttemperatuur en de luchttemperatuur in het kritieke temperatuurgebied worden geschat. Dit temperatuurverschil is in het model de zogenaamde "Cooling Module" CM, waarvoor in principe acht getalwaarden variërend van 40°C tot 200°C kunnen worden gekozen.

Indien de temperatuurcurve in het kritieke gebied een bol verloop ten opzichte van de tijd-as vertoont, geldt de aanvaarde waarde van CM bij een gemiddelde produkttemperatuur van 550°C. De grootheid η is in dat geval groter dan één. Het temperatuurverschil tussen produkt en lucht en daardoor ook de koelsnelheid worden in de richting van de luchtstroom gezien kleiner, waardoor koelschade bij temperaturen hoger dan 550°C wordt voorkomen.

Indien de temperatuurcurve in het kritieke gebied echter een rechtlijnig of hol verloop ten opzichte van de tijd-as bezit, geldt de aanvaarde waarde van CM voor een luchttemperatuur van 550°C. De oppervlaktetemperatuur van het produkt ligt dan met zekerheid boven 575°C, zodat een toename van het temperatuurverschil tussen produkt en lucht boven een luchttemperatuur van 550°C geen koelschade meer kan opleveren, terwijl zich beneden een luchttemperatuurniveau van 550°C temperatuurverschillen zullen voordoen die geringer zijn dan, of hoogstens gelijk zijn aan, CM.

Als gevolg van de vaak lage toelaatbare koelsnelheid in het kritieke temperatuurgebied is, ter beperking van de ovenlengte, een indeling van de koelzone in drie secties met een onderling verschillende ingesteld koelsnelheidsverloop gewenst.

In het model is voorzien in een snelle voorkoeling (sectie 5-6), een relatief langzame tussenkoeling, waarin de kwartsomzetting plaatsvindt (de secties 6-8) en een snelle eindkoeling (sectie 8-9).

Dit koelregime wordt bewerkstelligd door voor de eindkoeling een grotere koelluchtstroom te gebruiken dan voor de tussenkoeling en de overtollige intussen opgewarmde koellucht op de sectiegrens 8 af te voeren.

De snelle voorkoeling in de sectie 5'-6 komt tot stand door de in deze sectie op de stookzone toestromende lucht door straalvermenging met geïnjecteerde koude lucht te koelen tot een mengtemperatuur gelijk aan of hoger dan 550°C.

Eventueel overtollige hete lucht, waaraan in de stook- en voorwarmzone geen behoefte is, wordt op sectiegrens 6 afgevoerd. Blad 40 toont een schema van toe- en afgevoerde stofstromen.

In het ontwikkelde tunnelovenmodel werden voor de sectiegrens 8 tussen eindkoeling en tussenkoeling een gemiddelde produkttemperatuur van 250°C en een luchttemperatuur van 125°C gekozen. De factoren die bij deze keuze een rol speelden waren:

- de gewenste eenvoud van de modelstructuur;
- de gewenste bruikbaarheid van de overtollige lucht van de eindkoeling voor droogdoeleinden;
- de gewenste flexibiliteit in regime-instelling;
- de resultaten van iteratieve berekeningen van de kortste tijdsduur voor eind- en tussenkoeling samen.

Voor de sectiegrens 6 tussen voorkoeling en tussenkoeling werd, voor CM-waarden gelijk of kleiner dan 100°C, een gemiddelde produkttemperatuur van 650°C aangehouden en voor CM-waarden van 125°C en hoger een luchttemperatuur van 550°C. In beide omstandigheden is een schadevrije passage van het kwartsomzettingstraject zonder al te veel tijdverlies gewaarborgd.

3.3.2 Voorkoelperiode, sectie 5'-6

In de sectie 5'-6 daalt de gemiddelde produkttemperatuur van 1.075°C tot de in blad 10 aangegeven temperatuur θ_6 . Ter berekening van de tijdsduur wordt in het model in eerste aanleg verondersteld, dat de koeling plaatsvindt met een fictief constant temperatuurverschil tussen produkt en lucht RCM gelijk aan 2,5 CM tot een maximum van 200°C. Warmte-economische overwegingen kunnen in een meer gevorderd stadium van het modelonderzoek tot een correctie nopen.

Blad 10 geeft de getalwaarde van $\Delta t.K$ voor CM-waarden van 40°C tot 200°C.

Deling door de met behulp van de gegevens op blad 33 geschatte waarde van K levert de snelkoeltijdsduur in uren op.

3.3.3 Tussenkoelperiode, sectie 6-8

Met betrekking tot de tussenkoeling wordt onderscheid gemaakt tussen een koeling met CM-waarden tot 100°C , die een bol verloop van de temperatuurcurve ten opzichte van de tijd as opleveren (blad 11) en een koeling met hogere CM-waarden, waarbij het temperatuurverloop rechtlijnig is of concaaf (blad 12).

Gezien het vaak sterk gekromde temperatuurverloop in de sectie 6-8 is bij een gemiddelde produkttemperatuur van 550°C een sectiegrens 7 ingelast, die het gehele temperatuurtraject in de sub-secties 6-7 en 7-8 verdeeld. Er wordt op de sectiegrens 7 echter geen lucht toe- of afgevoerd, zodat de getalwaarde van η gelijk blijft. De bladen 10 en 11 geven gespecificeerd voor de secties 6-7 en 7-8 voor CM-waarden van 40 tot 200°C de grootte van $\Delta t.K$ aan.

Deling door de van toepassing zijnde waarde van K levert de verblijfstijden in de secties 6-7 en 7-8 op.

3.3.4 Eindkoelperiode, sectie 8-9

De eindkoeling voltrekt zich met lucht, die de tunnel aan de uitgang binnenstroomt met een temperatuur van 15°C en deze, althans ten dele, met een temperatuur van 125°C weer verlaat.

Voor het verschil tussen de gemiddelde produkttemperatuur aan de uitgang van de oven en de luchttemperatuur ter plaatse van 15°C kan gekozen worden uit een reeks van zeven getalwaarden lopend van 20° tot 80°C (blad 13). De keuze van deze "Ware Exit Module" WEM bepaalt mede de tijdsduur van de eindkoeling. De meest economische waarde hangt af van het massiek warmteuitwisselingsoppervlak van de charge. De tabel in blad 13 doet hiervoor voorlopige aanbevelingen en maakt overigens wederom de berekening van de verblijfstijd in de sectie 8-9 mogelijk.

3.4 De temperatuurcurve in de voorwarmtunnel

De met warme lucht gevoede voorwarmtunnel van een tunneloveninstallatie dient voor het voorwarmen en nadrogen van het produkt voorafgaand aan het bakproces.

Een voorwarming met schone lucht voorkomt schade door rookgascondensatie op het halffabrikaat, terwijl een nadroging tot restwatergehalten lager dan 2% een vlotte schadevrije opwarming van het produkt in de oven bevordert.

In blad 02 is voorzien van een voorwarming van het produkt van 15°C tot een gemiddelde produkttemperatuur van 75°C. Ter limitering van een nutteloze oververhitting van het produkt gedurende de doorgaans variërende verblijftijd in de voorwarmer is voor de inlaattemperatuur van de lucht in de tegenstroomtunnel een constante waarde van 95°C gekozen. Voor de uitlaattemperaturen zijn drie alternatieven voorzien. De waarde van de warmteoverdrachtsfactor K kan aan de gegevens op blad 33 worden ontleend, waarna, op dezelfde wijze als aangeduid in de vorige paragrafen, de gewenste verblijftijd kan worden geschat.

3.5 Verwerking en interpretatie van de gegevens

Aan de hand van de verkregen berekeningsresultaten kan de schematische temperatuurcurve van blad 01, althans voorlopig, naar tijdsduur worden gespecificeerd.

Het zal duidelijk zijn, dat van deze specificatie geen absolute nauwkeurigheid mag worden verwacht. Met name de berekeningswijze van de warmteoverdrachtsfactor K berust op een simplificatie van de werkelijkheid, die tot voorzichtigheid maant bij het gebruik. Verwacht mag worden, dat de toegepaste berekeningswijze eerder tot te lage dan tot te hoge K-waarden leidt. Er dient rekening mee gehouden te worden, dat zich naar schatting 0 tot 15% hogere K-waarden dan berekend kunnen voordoen. Toetsing van het model aan de hand van metingen aan bestaande tunnelovens voor de vaststelling van eventuele correctiefactoren verdient aanbeveling.

Op grond van voorhanden kennis en ervaring van bakprocessen in tunnelovens wordt overigens gemeend, dat de waarde van het model voor het in de inleiding aangestipte gebruik niet wezenlijk door de beperkte nauwkeurigheid ervan wordt aangetast.

De gegevens betreffende de temperatuurcurve kunnen worden gebruikt voor de dimensionering van een tunneloven. Hoofdstuk 4 geeft hiervan enkele voorbeelden.

De temperatuurcurve voorziet voorts in de basisgegevens nodig voor de vaststelling van het warmte- en stoftransport door de oven, de warmteverliezen van het systeem en het thermodynamisch gedrag van de ovenwagens.

4. VOORBEELDEN VAN DE BEREKENING VAN DE TEMPERATUURCURVE

De modelbouw in hoofdstuk 3 maakt het mogelijk de dimensies van een geplande oveninstallatie vast te stellen. Kennis van de ovenafmetingen is overigens een voorwaarde voor praktijkgericht modelonderzoek naar het warmte- en stoftransport in de oven.

Bij wijze van voorbeeld en als basis voor modelstudies werd verondersteld dat de modelbouw betrekking heeft op een tunneloven met een capaciteit van circa 1,16 mln waalformaat bakstenen per week.

Ten aanzien van de verwerkte grondstoffen en de hoofdbewerkingen zijn de in blad 36 vermelde gegevens van toepassing. Eenvoudigheidshalve wordt aangenomen, dat de toelaatbare opwarm- en koelsnelheden van de beschikbare massa's A en B gelijk zijn.

Voor de zetwijze van de bakstenen op de ovenwagens zijn in de bladen 42 tot en met 47 twee alternatieven aangevoerd, te weten een bladzetting en een open-carrézetting. De wagenafmetingen zijn voor beide zetwijzen gelijk gekozen.

Wat de constructie van de wagenbekleding betreft komen eveneens twee uitvoeringsvormen in aanmerking. Ze zijn in de bladen 48 en 49 aangegeven.

Verondersteld wordt voorts, dat, voor een bakproces tot 1.075°C, op grond van experimenteel onderzoek, de in blad 38 opgenomen getalwaarden van de warmteoverdrachtsfactoren K, de opwarmmodules HM en koelmodules CM gekozen dienen te worden.

Ook de voorlopige keuze van de rookgasafvoermodul GEM, de begintemperatuur van de stookzone θ_2 , de snelkoelmodul RCM en de uitrijmodul WEM is in blad 38 vermeld.

Raadpleging van de modelbladen 03 tot en met 13 leidt dan tot de in blad 38 opgenomen specificatie van de effectieve baktijden.

Raadpleging van blad 02 levert de in blad 37 geschatte verblijftijden in de voorwarmtunnel op.

Met behulp van deze informatie werd het in blad 41 gepresenteerde overzicht van voorlopige technische gegevens van de tunnelovens I en II met respectievelijk een bladzetting en een open carré-zetting samengesteld.

De aanduiding "voorlopig" heeft betrekking op mogelijke wijzigingen waartoe het modelonderzoek aanleiding zou kunnen geven.

5. HET WARMTEVERLIES VAN HET OVENLICHAAM

Blad 14 geeft een globaal berekeningsvoorschrift van het warmte-transport door de zijwanden en het plafond van de opeenvolgende secties van de tunneloven. Het betreft vuistregels.

Voor de warmtedoorgangscoefficienten van zijwanden en twee uitvoeringsvormen van plafonds worden globale getalwaarden gegeven, die, indien voorhanden, uiteraard door nauwkeuriger gegevens dienen te worden vervangen.

Informatie over de gemiddelde wandtemperaturen in de secties verschaffen de bladen 02 tot en met 13. Eenvoudigheidshalve is hiervoor, op een enkele uitzondering na, het rekenkundig gemiddelde van de begin- en eindwaarden van de gemiddelde produkttemperatuur in de betreffende secties gekozen.

Voor het warmteverlies ϕ_d van het loopdek van hangdekconstructies en de recuperabele warmtestroom ϕ_{rd} van het hangdek zijn eveneens vuistregels opgevoerd.

6. DE OPWARMING VAN LEKLUCHT IN DE VOORWARMZONE

De belangrijkste procesverstoring, die zich in de voorwarmzone van een tunneloven kan voordoen, is het binnenlekken van koude lucht. De warmtetechnische consequenties zijn in blad 15 voor de drie standaard rookgasafvoertemperaturen uitgewerkt.

Voor de berekening van de met rookgas aan te voeren warmte voor de opwarming van de leklucht en het daaraan gelijke directe leklucht-aandeel in het totale schoorsteenverlies dient de hoeveelheid binnenlekkende lucht per ton gebakken produkt bekend te zijn.

In bestaande tunnelovens kan deze hoeveelheid worden ontleend aan koolzuur- of zuurstofmetingen bij de stookzonegrens en in de rookgasafvoer. De diagrammen in de bladen 51 en 52 kunnen daarbij als hulpmiddel dienen.

Ten behoeve van meer algemeen modelonderzoek naar de invloed van leklucht op de warmtehuishouding van tunnelovens zijn in blad 15 voorbeelden uitgewerkt voor lekluchtstromen van 200, 400 en 800 m³ per ton gebakken produkt.

De verstoring, die leklucht in het temperatuurverloop teweeg brengt, onttrekt zich aan berekening omdat de plaatsen waar lekkage optreedt meestal niet bekend zijn. Opgemerkt wordt, dat de beïnvloeding van het temperatuurverloop in het algemeen beneden een produkttemperatuur van 350°C het sterkst zal zijn.

7. HET REACTIEWARMTESALDO

Het warmtesaldo van de exotherme en endotherme reacties in de voorwarmzone en het voorvuur worden in het model aan de hand van vuistregels ontleend aan enkele analysegegevens van de klei. Gebruik makend van de basisgegevens in [1] - geeft blad 18 een berekeningsvoorschrift voor de ovensecties 1-2 en 2-3.

Er zij op gewezen, dat de relatieve hoeveelheden restwater, chemisch gebonden water, organische stof en koolzuur uit carbonaat in de formules steeds zijn uitgedrukt in massaprocenten betrokken op de gebakken massa.

Blad 18 geeft bovendien voor drie rookgasafvoertemperaturen berekeningsvoorschriften voor het aandeel van de gasvormige reactieproducten in het totale schoorsteenverlies van de tunneloven.

8. DE WARMTECONSUMPTIE EN WARMTEREGENERATIE VAN DE OVENWAGENS

8.1 Berekeningswijze

Onontbeerlijk voor de bouw van een tunnelovenmodel is naar ovensectie gespecificeerde informatie over het thermodynamisch gedrag van de bekleding van de ovenwagens. Met name zijn van belang de per sectie aan de bovenzijde van de wagens instromende, respectievelijk uitstromende hoeveelheid warmte en de warmteafgifte aan de onderzijde van de wagenbekleding.

In 1985 werd voor de vaststelling van deze gegevens een gebruikersvriendelijk computerprogram ontwikkeld [2] [3] [4] [5]. Blad 19 toont een overzicht van de gewenste invoergegevens en de geleverde informatie.

De voor elke karakteristieke wagendoorsnede gevonden resultaten worden naar rato van hun oppervlaktebeslag geaggregeerd tot gegevens, die gemiddeld voor de gehele wagenbekleding gelden. De uitkomsten worden in blad 20 ten behoeve van een verdere verwerking, gespecificeerd naar sectie, verzameld.

Blad 20 geeft tevens vuistregels voor de raming van het warmteverlies in het fundament bij een wielstellingkoeling met lucht en bij een wielstellingkoeling door warmtestraling naar een waterbad van circa 40°C, waarin de trein met van lange schorten voorziene wagens zich voortbeweegt. Ook voor een schatting van de in beide gevallen recuperabele warmte worden aanwijzingen gegeven.

8.2 Voorbeelden

Ten behoeve van modelonderzoek naar de invloed van verschillende wagenbekledingen op het brandstofverbruik van tunnelovens, werd met het beschikbare rekenprogram het thermodynamisch gedrag vastgesteld van wagentype 0 (blad 48) met een oppervlaktebeslag van 13% voor doorsnede A en van 87% voor doorsnede B, alsmede van wagentype N (blad 49) met een oppervlaktebeslag van 10% voor doorsnede A, van 78% voor doorsnede B en van 12% voor doorsnede C.

Beide soorten wagens werden geacht te worden gebruikt in zowel oven I met een doorlooptijd van 100 uren als in oven II met een doorlooptijd van circa 60 uren.

Er werd daarbij uitgegaan van luchtkoeling van de wielstellen.

De berekeningsresultaten van elk van de vier gevallen zijn in de bladen 56, 57, 58 en 59 weergegeven:

Blad 56: wagentype 0, oven I, baktijd 100 uren.

Blad 57: wagentype N, oven I, baktijd 100 uren.

Blad 58: wagentype 0, oven II, baktijd 60 uren.

Blad 59: wagentype N, oven II, baktijd 60 uren.

Op elk blad zijn de uitkomsten van de doorsneden A, B en C in deze volgorde onder elkaar weergegeven.

Voorts werd van wagentype N, voor een bakproces in oven II met een doorlooptijd van 60 uren, nagegaan, welk effect zou mogen worden verwacht, indien de wagentrein zich door een waterbad met een maximum temperatuur van 50°C zou voortbewegen. De warmte-overdrachtscoëfficiënt aan de onderkant van de wagens werd daartoe op grond van oriënterende berekeningen anders ingeschat. Het resultaat is in blad 60 opgenomen.

Na aggregatie van de resultaten van de verschillende doorsneden naar rato van het oppervlaktebeslag staan de gegevens voor evaluatie in het tunnelmodel ter beschikking.

9. HET WARMTE- EN STOFTRANSPORT

9.1 Berekeningswijze

Blad 21 toont schematisch de warmte- en stofstromen, die men in elke tunnelovensectie aantreft. Het schema op blad 40 completeert dit beeld met een overzicht van de stofstromen in de gehele installatie.

Een aantal bouwstenen voor de specificatie van het warmte- en stoftransport in het model werd in de hoofdstukken 5, 6, 7 en 8 reeds aangedragen.

In dit hoofdstuk wordt de berekeningswijze aangegeven van de warmte- en stofstromen in de lengterichting van de tunnel en van de in de vorm van brandstof (Gronings aardgas) te suppleren hoeveelheden warmte.

Basis voor de berekening zijn de enthalpieën van de hierbij betrokken media op de sectiegrenzen. Ter besparing op rekenwerk zijn deze voor de in aanmerking komende temperatuurniveaus reeds in de tabellen op de bladen 02 tot en met 13 vermeld.

De gebruikte enthalpie-symbolen zijn:

- voor het halffabrikaat betrokken op de gebakken massa-eenheid
..... h_w' ;
- voor het gebakken produkt h_w ;
- voor de ondersteuningsmiddelen van de lading (de tarra)
..... h_t ;
- voor rookgassen en lucht h_g .

De enthalpieën zijn berekend ten opzichte van een temperatuurniveau van 15°C en uitgedrukt in MJ/t of kJ/kg, respectievelijk KJ/m³ (in normaal-toestand bij 0°C en 101,3 kN/m²).

Voor de rookgasenthalpieën op de verschillende sectiegrenzen zijn eenvoudigheidshalve de waarden geldend voor Gronings aardgas gekozen, waarbij de luchtfactor n ter plaatse werd geschat.

De hierdoor geïntroduceerde kleine bron van fouten mag, gezien het gebruiksdoel van het model, aanvaardbaar worden geacht.

Kenmerk van de berekening van de rookgasstroom, die aan de voorwarmzone wordt toegevoerd en van de berekening van de luchtstromen in de verschillende ovensecties is, dat posten als: de warmtebehoefte voor de opwarming van leklucht, de warmtebehoefte voor het opwarmen, respectievelijk koelen van de tarra, het reactiewarmtesaldo, de warmteconsumptie of warmteregeneratie van de wagenbekleding en het warmtetransport door de zijwanden en het plafond van de oven, in rekening worden gebracht door een correctie van de netto produktstroom P_n tot een equivalente bruto produktstroom P_b [kg/s].

De berekeningswijze van het aardgasverbruik en de gasstromen in de stookzone wordt in paragraaf 9.3.1 toegelicht.

9.2 Warmte- en stoftransport in de voorwarmzone, sectie 1-2

In het berekeningsvoorschrift op blad 22 treft men bovenaan, onder verwijzing naar de betreffende informatiebladen, een lijst aan van de grootheden, die voor de berekening nodig zijn.

De modelbouw is intussen zover gevorderd, dat alle gevraagde getalwaarden ter beschikking staan.

In de tabel daaronder is de berekeningswijze aangegeven van de totale hoeveelheid warmte, die, in de betreffende sectie, door de uit de stookzone bij sectiegrens 2 toestromende rookgassen moet worden geleverd.

Deling van deze hoeveelheid door de enthalpietoename van het bruto produkt (overeenkomend met die van het gebakken produkt en de tarra) levert de equivalente bruto produktstroom op.

Deling door de enthalpieafname van het rookgas geeft de rookgasstroom G_2 in m^3/s (in normaaltoestand), die op de sectiegrens 2 moet worden aangevoerd om de warmtebehoefte in de voorwarmzone te dekken.

In deze rookgasstroom is de stroom van de in deze sectie binnenlekkende lucht niet begrepen. Deze kan aan blad 15 worden ontleend.

Ook de stroom gasvormige reactieprodukten, die in sectie 1-2 ontstaat, alsmede het zuurstofverbruik voor de oxidatie van de organische stof blijven buiten beschouwing.

Informatie hierover vindt men in de bladen 51 en 52. Hierbij zij opgemerkt, dat in het model wordt verondersteld, dat de carbonaat-ontleding uitsluitend in het voorvuur (sectie 2-3) plaatsvindt. Meer gedetailleerde informatie over de reactieprodukten verschaft informatieblad 09 in het rapport met basisgegevens [1].

9.3 Aardgasverbruik en rookgasstromen in de stookzone

9.3.1 Berekeningsmethode

Het brandstofverbruik en de rookgasstromen in de opeenvolgende stooksecties worden afgeleid van de warmtebalansen van die secties.

Voor sectie 2-3 geldt bijvoorbeeld, dat de warmtestroom ϕ_2 , die de sectie benedenstrooms met de rookgassen verlaat, gelijk is aan de warmtestroom ϕ_3 , die bovenstrooms met de rookgassen de sectie binnenstroomt vermeerderd met de warmtestroom ϕ_B , die door het aardgas wordt geleverd en de warmtestroom ϕ_E , die door voorge-warmde externe verbrandingslucht wordt aangevoerd en verminderd met de som van de warmtestromen $\Sigma\phi$, die in de sectie zelf nodig is voor de opwarming van produkt en tarra, voor de warmteconsumptie van de wagens, voor het dekken van het warmtetransport door wanden en plafond en voor de ontleding van eventueel aanwezige carbonaten in het halffabrikaat.

In formulevorm wordt dit:

$$\phi_2 = \phi_3 + \phi_B + \phi_E - \Sigma\phi \quad (1)$$

Onder wijziging naar de nomenclatuur op blad 16 geldt:

$$G_2 \cdot hg_2 = G_3 \cdot hg_3 + B_2 \cdot V + B_2 \cdot E \cdot h' - \Sigma\phi \quad (2)$$

Voor G_3 geldt:

$$G_3 = G_2 - B_2 \cdot R \quad (3)$$

Voor het geval dat er sprake is van een aanmerkelijke koolzuur-
produktie uit carbonaat in het halffabrikaat wordt deze formule:

$$G_3 = G_2 - B_2 \cdot R - P_n \cdot D \quad (3a)$$

Hierin is P_n het produktietempo van het gebakken produkt in kg/s en D de aan blad 53 te ontlenen koolzuurproduktie in m^3/kg . Deze complicatie van de berekeningswijze blijft hier op grond van haar in het algemeen ondergeschikte betekenis verder buiten beschouwing. Eliminatie van G_3 in formule 2 leidt na uitwerking tot:

$$B_2 = \frac{\Sigma\phi - G_2 (hg_3 - hg_2)}{V + E.h' - R.hg_3} \quad (4)$$

Voor de overige stooksecties gelden overeenkomstige formules. Ze zijn in blad 16 weergegeven.

Uit deze formules blijkt, dat de stroom lucht, die uit de koelzone van de oven aan stook- en voorwarmzone kan worden toegevoerd in hoofdzaak door de condities in de stook- en opwarmzone wordt bepaald.

Met betrekking tot de hoeveelheid externe verbrandingslucht E, die per m^3 aardgas wordt gebruikt en de consequenties daarvan op het brandstofverbruik, zijn in blad 17 voor een verbrandingsluchttemperatuur van $125^\circ C$ drie alternatieven uitgewerkt, te weten lucht-suppleties met luchtfactoren $n = 1$ en $n = 0,5$ alsmede een aardgastoevoer zonder toediening van externe verbrandingslucht.

Het effect van andere keuzen van temperatuur en relatieve hoeveelheid kan aan de hand van de informatiebladen 10 en 13 van het rapport met basisgegevens [1] worden vastgesteld.

9.3.2 Brandstofverbruik in het voorvuur (sectie 2-3)

Het schema voor de berekening van het aardgasverbruik in de sectie en de berekening van de rookgasstroom, die de sectie bij grens 3 binnenstroomt, is in blad 23 weergegeven.

De werkwijze is gelijk aan die voor de voorwarmzone (paragraaf 9.2). Alle invoergegevens zijn bekend. De getalwaarden van x en y kunnen worden ontleend aan de van toepassing zijnde formules op blad 17.

9.3.3 Brandstofverbruik in het hoofdvuur (secties 3-4 en 4-5)

De rekenroutines in de bladen 24 en 25 zijn gelijk aan die voor het voorvuur. De post "reactiewarmte" vervalt hier.

9.3.4 Brandstofverbruik in het archtervuur (sectie 5-5')

Blad 26 geeft het berekeningsvoorschrift voor deze sectie. Het brandstofverbruik is een functie van het verschil tussen de gemiddelde produkttemperatuur en de luchttemperatuur op de grens van stookzone en koelzone, de "Fire Entry Module", FEM, en hangt verder af van de luchtfactor van de externe verbrandingslucht. Ten behoeve van optimaliseringsprocedures kieze men FEM in eerste aanleg bij voorkeur uit de in blad 01 aanbevolen reeks.

9.4 Warmte- en stoftransport in de koelzone

9.4.1 De eindkoeling, sectie 8-9

Het warmte- en stoftransport in de koelzone laat zich het beste specificeren door de koellucht op haar reis door de oven van de ovenuitgang af te volgen.

Wat de eindkoeling betreft zijn voor de luchttemperaturen aan de ovenuitgang en op sectiegrens 8 vaste waarden gekozen, namelijk respectievelijk 15 en 125°C. Ook de gemiddelde produkttemperatuur op sectiegrens 8 ligt vast, terwijl voor de uitrijtemperatuur aanbevelingen gelden. De betreffende enthalpieën zijn in blad 13 vermeld.

Blad 29 geeft het voorschrift voor de berekening van de aan de ovenuitgang toe te voeren hoeveelheid lucht en voor de bepaling van de equivalente bruto produktstroom. Alle invoergegevens hiervoor staan ter beschikking.

9.4.2 De tussenkoeling, secties 6-8

Voor de specificatie van de grootte van de luchtstroom, die nodig is voor een schadevrije tussenkoeling van het produkt en voor de vaststelling van de equivalente bruto produktstroom in deze secties, geldt eenzelfde procedure als voor de eindkoeling.

De rekenroutine is op blad 28 aangegeven.

9.4.3 De voorkoeling, sectie 5'-6

Het warmte- en stoftransport in de voorkoeling van het produkt vormt het sluitstuk van het warmte- en stoftransport in de gehele tunneloven.

Blad 27 geeft de rekenroutine voor het bepalen van de door koel- lucht af te voeren stroom warmte $\Sigma\phi$ in deze sectie.

Met betrekking tot het luchttransport geeft het blad geen informatie.

De stroom op grens 6 door de tussenkoeling aangeboden lucht zal in het algemeen niet gelijk zijn aan de hoeveelheid lucht, die het stook- en voorwarmproces vraagt. Bovendien wordt in de voorkoeling, ter besparing op de ovenlengte, vaak gestreefd naar een korte doorlooptijd van het produkt. De daarvoor nodige insputing van koude lucht in de voorkoelsectie zal daarom afhankelijk van de omstandigheden, gepaard kunnen gaan met een afvoer van overtollige lucht uit de luchtstroom, die door de tussenkoeling wordt aangeboden.

De specificatie van de luchthuishouding in de sectie kan aan de hand van de warmte en stofbalans uitgewerkt worden.

Indien verondersteld wordt, dat koude lucht van 15°C met een enthalpie gelijk aan nul geïnjecteerd wordt, geldt, onder verwijzing naar de nomenclatuur in de bladen 16 en 40 en de berekening van $\Sigma\phi$ op blad 27 voor de warmtebalans:

$$G_5' \cdot (hg_5 - \bar{C}_g \cdot [FEM]) = G_6 \cdot hg_6 + \Sigma\phi - G_T \cdot hg_6 \quad (1)$$

Voor de stofbalans geldt:

$$G_5' = G_6 + G_s - G_T \quad (2)$$

Voor G_5' geldt volgens blad 16:

$$G_5' = G_2 - R (B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \quad (3)$$

En voor:

$$B_5 = \frac{G_5 \cdot \bar{C}_g \cdot [FEM]}{V + E \cdot h' - R (hg_5 - \bar{C}_g \cdot [FEM])} \quad (4)$$

De uitwerking van de formules leent zich niet voor opname in een eenvoudig rekenvoorschrift. Bovendien moeten de opmerkingen in de paragrafen 3.3.1 en 3.3.2 met betrekking tot het temperatuurverloop in de sectie in de berekeningen worden betrokken.

9.5 Het warmte- en luchttransport in de voorwarmtunnel

De berekeningswijze is gelijk aan die voor de voorwarmzone in de oven. Blad 39 bevat het rekenvoorschrift. Blad 02 geeft informatie over de conditionering van de lucht.

10. HET SCHOORSTEEN- EN UITRIJVERLIES

10.1 Berekeningswijze

Het schoorsteenverlies is samengesteld uit de afgevoerde warmte in het uit de stookzone afkomstige rookgas, uit de met de leklucht afgevoerde warmte en uit de met de reactieprodukten afgevoerde warmte. Blad 30 geeft het berekeningsvoorschrift.

Wat de stroom rookgas en leklucht betreft geeft blad 30 eveneens voldoende informatie. Voor de bepaling van de stroom reactieprodukten zij verwezen naar de bladen 51 en 52.

Het uitrijverlies is samengesteld uit de warmteafvoer aan de uitgang van de oven, door het produkt, de tarra en de wagenbekleding. De berekeningswijze is in blad 30 vermeld.

10.2 Keuze van rookgasafvoertemperatuur en uitrijtemperatuur van het produkt

Schoorsteen- en uitrijverliezen zullen in het algemeen geringer zijn naarmate de temperatuur van de afgevoerde gassen en van het uitgereden produkt lager zijn.

Ter voorkoming van rookgascondensatie in het afvoersysteem van tunnelovens voor bouwkeramiek komen lagere rookgasafvoertemperaturen dan 115°C meestal niet in aanmerking.

Voorts geldt, dat de baktijdsduur en daarmee ook de ovenlengte langer wordt, indien, onder handhaving van dezelfde massastromen van bedoelde media, de afvoertemperaturen van rookgassen of produkt lager worden gekozen.

De besparing op energiekosten door een specificatie van de afvoertemperaturen op een lager temperatuurniveau dient daarom te worden afgewogen tegen de kosten, die de daarmee gepaard gaande verlenging van de oven met zich mee brengt.

In het model kunnen de afvoertemperaturen voor de rookgassen en het produkt trapsgewijs met getalwaarden uit de reeksen voor GEM en WEM worden verlaagd of verhoogd.

Voor gevallen waarin een precieze berekening van de terugverdiëntijd van een besparing op energiekosten niet in aanmerking komt, wordt het gebruik van de volgende vuistregel aanbevolen:

"Een verlaging van de waarde van GEM of WEM tot de naast lagere trap is slechts zinvol te achten, wanneer voor ieder uur daardoor ontstane baktijdverlenging een energiebesparing van tenminste 10 MJ per ton gebakken produkt wordt bereikt."

Een dergelijke maatstaf is in principe ook bruikbaar voor de specificatie van de voorkoeling in sectie 5'-6.

11. HET ZUURSTOFGEHALTE OP DE STOOKZONEGRENS

De meeste bakprocessen van bouwkeramiek vereisen tijdens de opwarming van het produkt een oxiderende ovenatmosfeer en een aangepaste opwarmsnelheid om ongewenste kleureffecten in de scherf te voorkomen.

De toelaatbare opwarmsnelheid wordt tijdens de modelbouw reeds gespecificeerd door de "Heating-up Module" HM.

Een controle op het zuurstofgehalte in de atmosfeer van het model kan echter gewoonlijk pas plaatsvinden als de modelbouw voor een gekozen bedrijfsvoering geheel is voltooid.

In het algemeen verdient de toepassing van zuurstofgehalten gelijk of hoger dan 7% (v/v) op de stookzonegrens aanbeveling.

De controle is mogelijk aan de hand van het diagram op blad 53, waarbij het rookgasdebiet wordt ontleend aan blad 22 en het brandstofverbruik aan de bladen 23, 24, 25 en 26.

Een verhoging van het zuurstofgehalte in de rookgassen wordt meestal verkregen door vergroting van het rookgasdebiet. Aan de hand van het diagram op blad 54 kunnen de mogelijkheden daartoe worden verkend.

12. GEBRUIKSWAARDE VAN HET MODEL

De in het voorgaande besproken modelberekeningen leveren voor elke gekozen bedrijfsvoering en inrichting van een tunneloven een bakcurve en gedetailleerde warmte- en stofbalansen op, die bijvoorbeeld in schema's als getekend in de bladen 01, 40 en 55 kunnen worden weergegeven.

De gevolgen van bepaalde maatregelen kunnen op deze wijze worden geanalyseerd en geëvalueerd voordat ze in praktijk worden gebracht, hetgeen de kans op mislukkingen aanzienlijk geringer maakt.

Het model is in het bijzonder voor de navolgende gebruiksdoelen ontworpen:

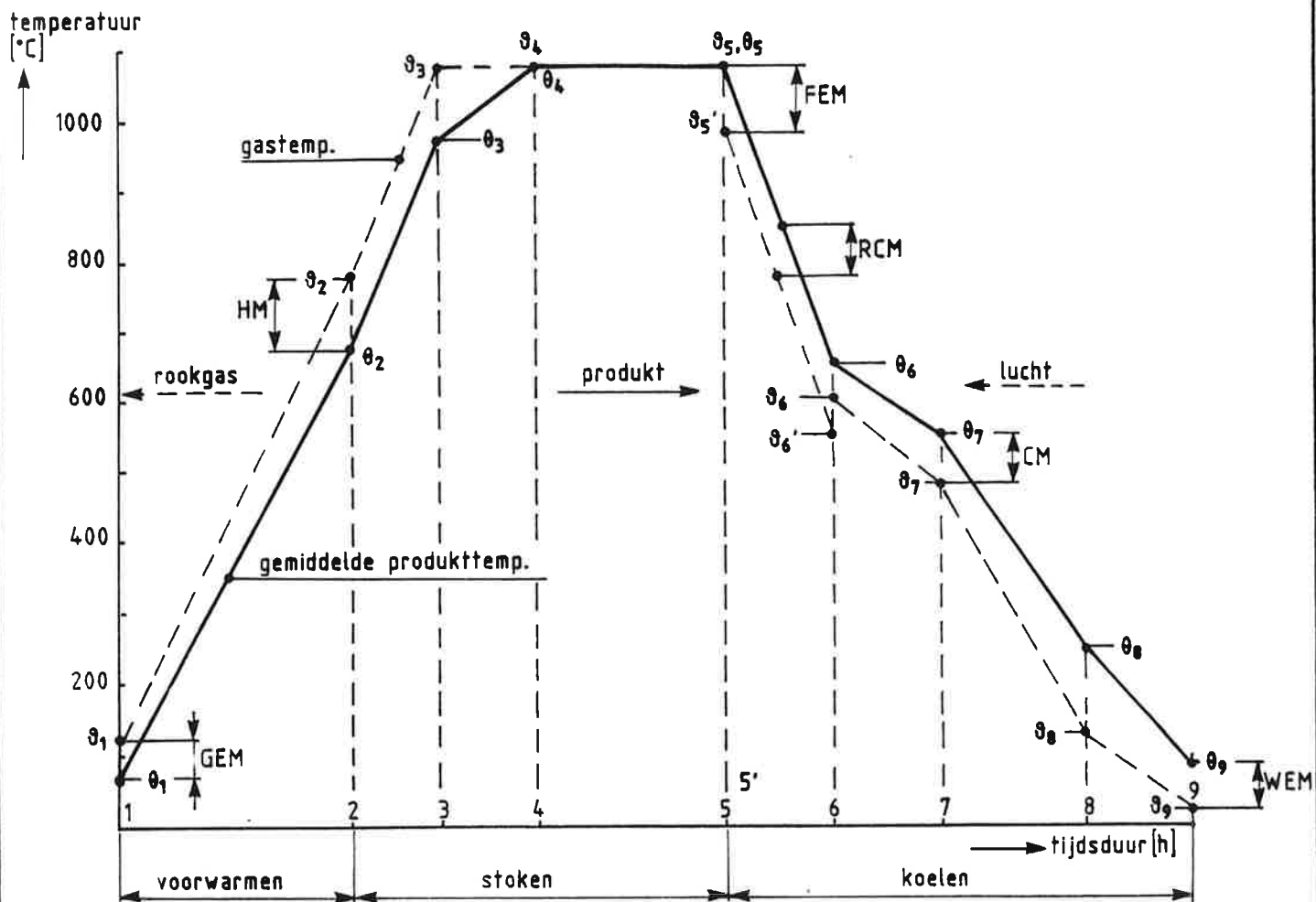
- a. Het specificeren van de temperatuurcurve en de baktijdsduur in afhankelijkheid van de zetwijze en de eigenschappen van het produkt.
- b. Het specificeren van het voorwarm- en nadroogproces in een met warme lucht gevoede tegenstroom voorwarmtunnel.
- c. Het berekenen van de warmteverliezen van het tunnelovenlichaam en de ter beschikking komende afvalwarmtestroom.
- d. Het vaststellen van de invloed van in de voorwarmzone van de oven binnenlekkende lucht op het energiegebruik van de oven.
- e. Het berekenen van de invloed van exotherme en endotherme reacties in het produkt op de energieuishouding van de oven.
- f. Het kwantificeren van de invloed van het thermodynamisch gedrag van verschillende ovenwagenbekledingen op het energiegebruik van een tunneloven en op de hoeveelheid ter beschikking komende afvalwarmte.

- g. Het evalueren van de invloed van gevarieerde hoeveelheden externe verbrandingslucht op het brandstofverbruik en op de rookgas- en luchtdebieten in de stookzone en de koelzone.
- h. Het berekenen van het brandstofgebruik van een tunneloven en van de warmte- en stofstromen in de oven onder gevarieerde bedrijfsomstandigheden.
- i. Het specificeren van de temperatuurgrens tussen voorwarm- en stookzone.
- j. Onderzoek naar de invloed van een snelkoelsysteem op het brandstofverbruik van een tunneloven en op de afvalwarmtestroom uit de koelzone.
- k. Het optimaliseren van de samenstelling van de ovenatmosfeer in de voorwarmzone ter beheersing van de produktkwaliteit.
- l. Het specificeren van de optimale temperatuur voor de rookgassen en het gebakken produkt bij het verlaten van de tunneloven.
- m. Het ontwerpen of evalueren van automatische systemen voor procesbeheersing.
- n. Het samenstellen van gedetailleerde warmte- en stofbalansen van tunnelovens.

De modelopzet op de grondslag van trapsgewijs gevarieerde hoofdparameters maakt het praktisch gebruik van het model aan de hand van vooraf uitgewerkte rekenschema's eenvoudig en de studieresultaten tot in details inzichtelijk.

13. LITERATUUR

- [1] Velden, J.H. van der, "Basisgegevens voor warmtetechnische berekeningen in de grofkeramische industrie"
Rapport MT-TNO nr. 85-07557
- [2] Velden, J.H. van der, "Het thermodynamisch gedrag van tien verschillende uitvoeringen van ovenwagens voor tunnelovens. Referentiedossier"
Rapport MT-TNO nr. 85-07056
- [3] Velden, J.H. van der, "Energiegebruik van ovenwagens in baksteen-tunnelovens"
Rapport MT-TNO nr. 85-07064
- [4] Brugh, J.H.A.M. van der, "Gebruikershandleiding Q-wand; een computerprogramma voor de temperatuurverdeling in een meervoudig gelaagde wand"
Rapport MT-TNO nr. 85-08047
- [5] Velden, H.H. van der, "Warmtetechnische beoordeling van bekledingen van tunnelovenwagens"
KleiGlasKeramik, nr. 1 (1986) p.6
- [6] Velden, J.H. van der, "Taxatie van het temperatuurverloop in de kern van een keramisch produkt tijdens het bakproces"
Rapport MT-TNO nr. 72-01718
- [7] Velden, J.H. van der "Some aspects of the specification of the vitrification process of products of the heavy-clay industry"
Transactions of the XIIIth International Ceramic Congress, Amsterdam 1974

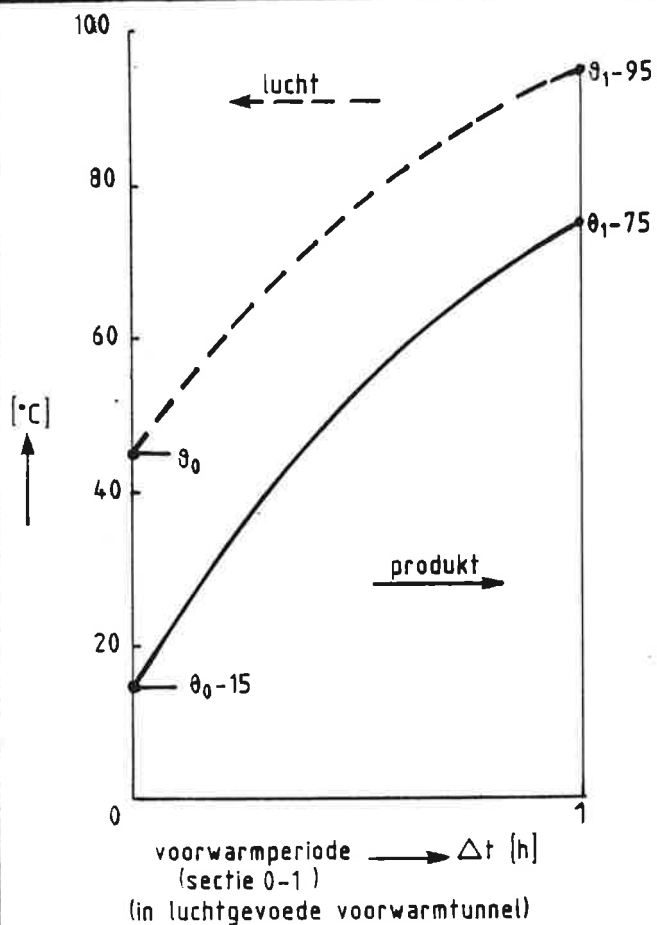


Vooronderstellingen m.b.t. temperatuurverloop.

vaste temperaturen $\left\{ \begin{array}{l} \text{produkt-gemiddelde: } \theta_1=75; \theta_4=\theta_5=1075; \theta_7=550; \theta_8=250^\circ\text{C} \\ \text{gassen: } \theta_3=\theta_4=\theta_5=1075; \theta_6'=550; \theta_8=125; \theta_9=15^\circ\text{C} \end{array} \right.$

Voorkeurreeks van temperatuurverschillen in °C \rightarrow		20	25	3 ^F	40	50	63	80	100	125	160	200
GEM	Gas-Exit Module				x	x	x					
HM	Heating-up module				x	x	x	x	x	x	x	x
FEM	Fire-Entry Module				x	x	x	x	x	x		
RCM	Raid-Cooling Module								x	x	x	x
CM	Cooling Module				x	x	x	x	x	x	x	x
WEM	Ware-Exit module	x	x	x	x	x	x	x				

De gemiddelde produkttemperatuur $\theta_1=75^\circ\text{C}$ aan de ovensingang wordt in een luchtgevoede voorwarmtunnel bewerkstelligd
Men raadplege hiervoor de bladen 02, 37, 39 en 41

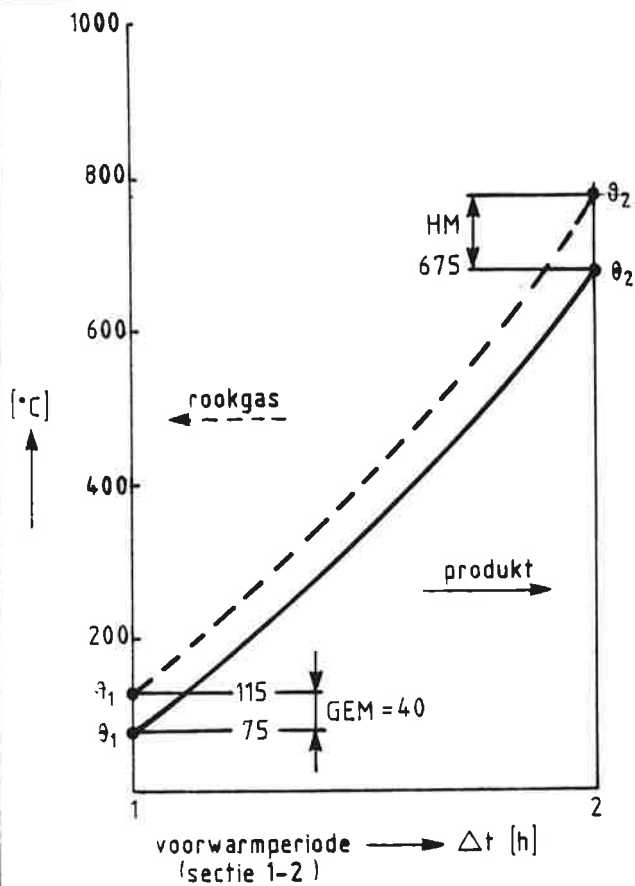


symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	10^{-6} s^{-1}	
$\bar{\theta}_w$	(naar luchttemp.)	$^{\circ}\text{C}$	70
hg bij θ_1	(95°C constant)	kJ/m^3	105
hw' bij θ_1	$49,6 + 0,5[9V] + 2,5[W_r]$	MJ/t	
hw' bij θ_0	—	MJ/t	0
$\Delta hw'$		MJ/t	

Vooronderstellingen

$\theta_1 = 75^{\circ}\text{C} = \text{constant}$ en voorkomt condensatie van rookgas op produkt
 $\theta_1 = 95^{\circ}\text{C} = \text{constant}$, limiteert voorwarming van produkt bij variërende verblijftijd in voorwarmtunnel
 $\theta_0 = \text{minimaal } 40^{\circ}\text{C}$ ter voorkoming van condensatieverschijnselen.

voorkeurwaarden van ($\theta_0 - \theta_0$)	$^{\circ}\text{C}$	25	31,5	40					
θ_0	$^{\circ}\text{C}$	40	46,5	55					
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} \text{ h}/\text{s}$	744	658	578					
Δt	h								
η	—	0,9167	0,8083	0,6667					
hg bij $\theta_0 \sim$	kJ/m^3	32,7	41,2	52,3					
$\Delta hg = (hg_1 - hg_0)$	kJ/m^3	72,3	63,8	52,7					
G_2/Pb	$\text{m}^3/\text{t} \cdot (\text{b})$								



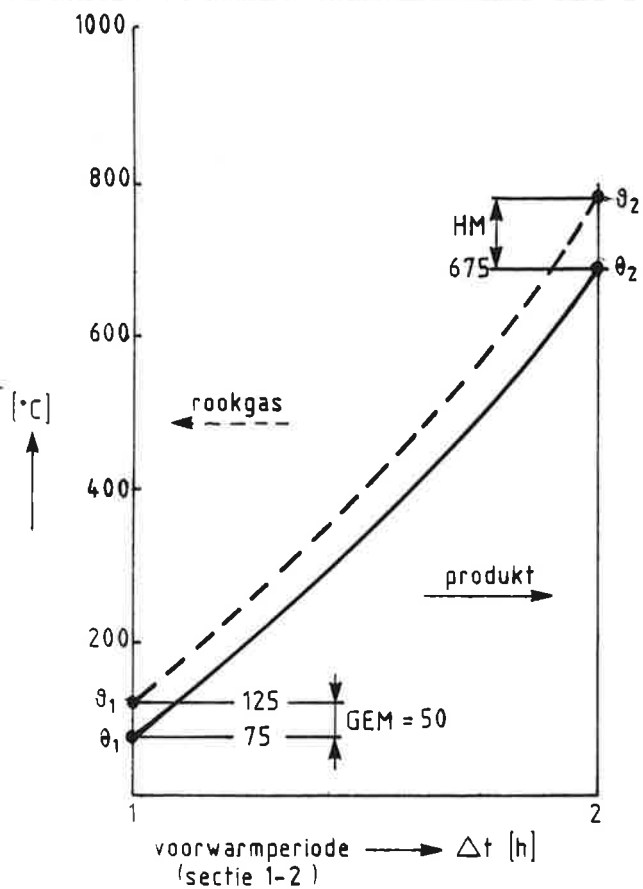
symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	$10^{-6} S^{-1}$	
$\bar{\theta}_w$	—	$^{\circ}C$	375
hg bij θ_1	($n \sim 1,7$)	kJ/m^3	135,9
h_f bij θ_2		MJ/t	659,7
h_f bij θ_1		MJ/t	49,6
Δh_f		MJ/t	610,1
h_w' bij θ_2	$659,7 + 2 \cdot [CO_2]$	MJ/t(n)	
h_w' bij θ_1	$49,6 + 0,5[GV] + 2,5[Wr]$	MJ/t(n)	
$\Delta h_w'$		MJ/t(n)	

voorkeurwaarden van HM	$^{\circ}C$	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_2	$^{\circ}C$	715	725	738	755	775	800	835	875
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$	4160	3719	3292	2889	2545	2234	1925	1676
Δt	h								
n	—	1,0000	1,0167	1,0383	1,0667	1,1000	1,1417	1,2000	1,2667
hg bij $\theta_2 (n \sim 1,7)$	kJ/m^3	1014	1029	1050	1076	1108	1147	1202	1266
$\Delta hg = (hg_2 - hg_1)$	kJ/m^3	878	893	914	940	972	1011	1066	1130
G_2/Pb	$m^3/t (b)$	694,9	683,2	667,5	649,0	627,7	603,5	572,3	539,9

$[CO_2]$: [GV] en [Wr] in massaprocenten van gebak

Conditie voor sectie 1 en 2
Gem. = $40^{\circ}C$ $\theta_2 = 675^{\circ}C$

MT-TNO
15961



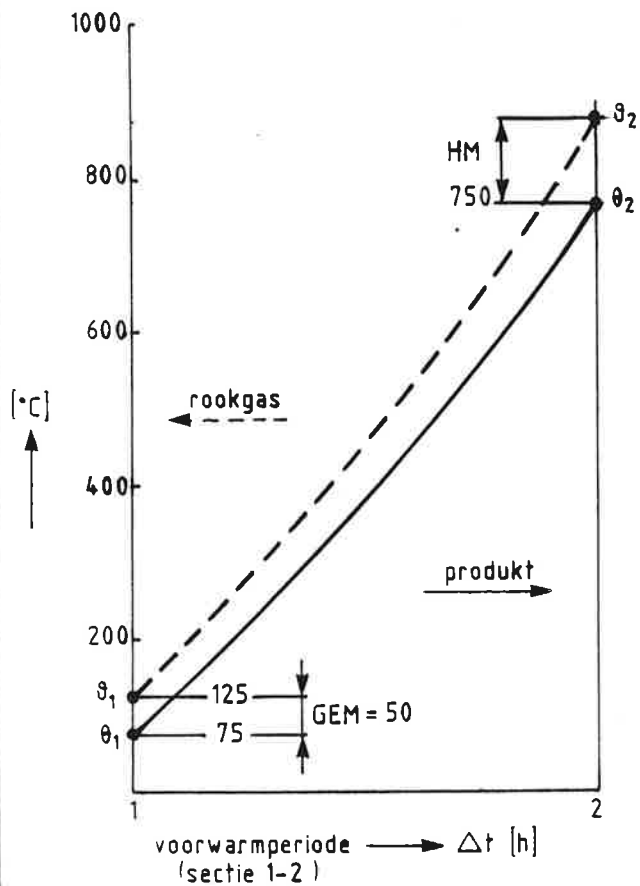
symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	$10^{-6} S^{-1}$	
$\bar{\theta}_w$	—	$^{\circ}C$	375
hg bij θ_1	($n \sim 1,7$)	kJ/m^3	149,7
h_f bij θ_2		MJ/t	659,7
h_f bij θ_1		MJ/t	49,6
Δh_f		MJ/t	610,1
h_w' bij θ_2	$659,7 + 2 [CO_2]$	MJ/t(n)	
h_w' bij θ_1	$49,6 + 0,5 [GV] + 2,5 [Wr]$	MJ/t(n)	
$\Delta h_w'$		MJ/t(n)	

voorkeurwaarden van HM →	$^{\circ}C$	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_2	$^{\circ}C$	715	725	738	755	775	800	835	875
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$	3719	3333	2963	2611	2311	2034	1762	1540
Δt	h								
η	—	0,9833	1,0000	1,0217	1,0500	1,0833	1,1250	1,1833	1,2500
hg bij θ_2 ($n \sim 1,7$)	kJ/m^3	1014	1029	1050	1076	1108	1147	1202	1266
$\Delta hg = (hg_2 - hg_1)$	kJ/m^3	864	879	900	926	958	997	1052	1116
G_7/Pb	m^3/t (b)	706,1	694,1	677,9	658,8	636,8	611,9	579,9	546,7

[CO₂] : [GV] en [Wr] in massaprocenten van gebak

Conditie voor sectie 1 en 2
 Gem. = 50°C $\theta_2 = 675^{\circ}C$

MT-TNO
 15961



symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	$10^{-6} S^{-1}$	
$\bar{\theta}_w$		$^{\circ}C$	413
hg bij ϑ_1	($n \sim 1,7$)	kJ/m^3	149,7
h_t bij θ_2		MJ/t	750,6
h_t bij θ_1		MJ/t	49,6
Δh_t		MJ/t	701,0
h_w' bij θ_2	$750,6 + 2 \cdot [CO_2]$	MJ/t(n)	
h_w' bij θ_1	$49,6 + 0,5 [GV] + 2,5 [Wr]$	MJ/t(n)	
$\Delta h_w'$		MJ/t(n)	

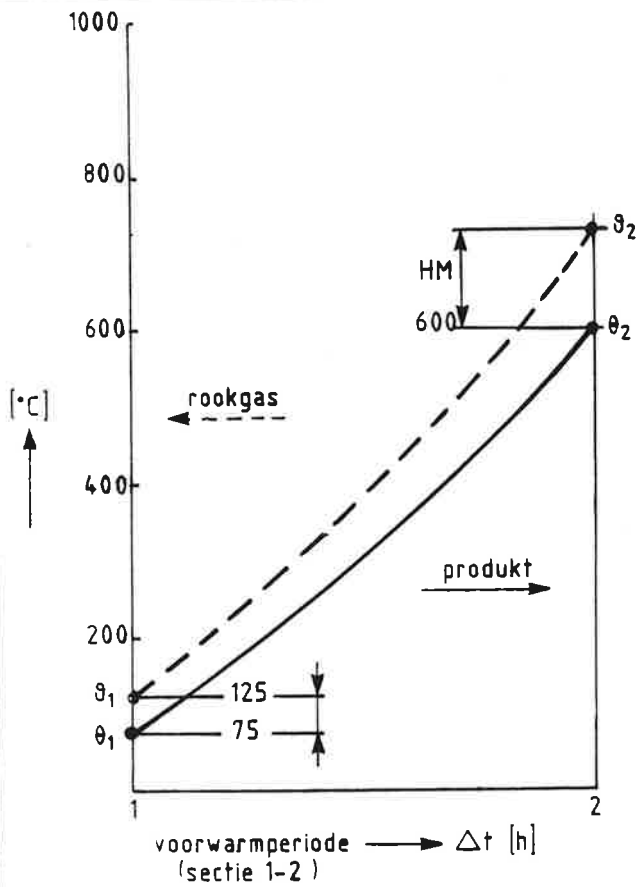
voorkeurwaarden van HM	$^{\circ}C$	40	50	63	80	100	125	160	200
ϑ_2	$^{\circ}C$					850	875	910	
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$					2599	2291	1983	
Δt	h								
η	—					1,0741	1,1111	1,1630	
hg bij ϑ_2 ($n \sim 1,7$)	kJ/m^3					1226	1266	1322	
$\Delta hg = (hg_2 - hg_1)$	kJ/m^3					1076	1116	1172	
G_2/Pb	m^3/t (b)								

$[CO_2]$: $[GV]$ en $[Wr]$ in massaprocenten van gebak

Conditie voor sectie 1 en 2
GEM. = $50^{\circ}C$ $\theta_2 = 750^{\circ}C$

MT-TNO
15961

04^b



symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	10^{-6} s^{-1}	
$\bar{\theta}_w$		$^{\circ}\text{C}$	338
hg bij θ_1	($n \sim 1,7$)	kJ/m^3	149,7
h_f bij θ_2		MJ/t	572,0
h_f bij θ_1		MJ/t	49,6
Δh_f		MJ/t	522,4
h_w' bij θ_2	$572,0 + 2[\text{CO}_2]$	$\text{MJ}/\text{t}(n)$	
h_w' bij θ_1	$49,6 + 0,5[\text{GV}] + 2,5[\text{w}_r]$	$\text{MJ}/\text{t}(n)$	
$\Delta h_w'$		$\text{MJ}/\text{t}(n)$	

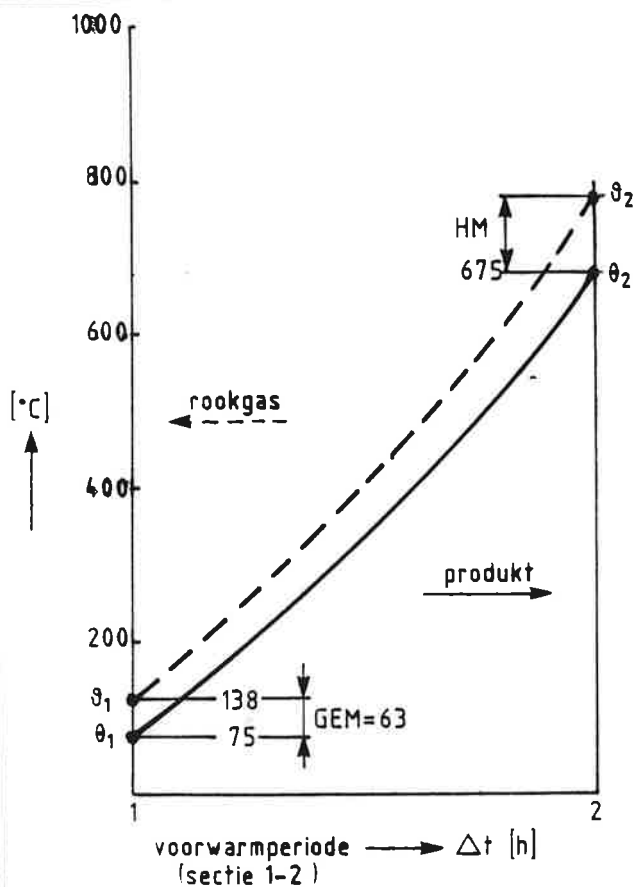
voorkeurwaarden van HM	$^{\circ}\text{C}$	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_2	$^{\circ}\text{C}$					700	725	760	
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} \text{ h}/\text{s}$					2022	1782	1542	
Δt	h								
η	—					1,0952	1,1429	1,2095	
hg bij θ_2 ($n \sim 1,7$)	kJ/m^3					990,6	1029,4	1084,0	
$\Delta \text{hg} = (\text{hg}_2 - \text{hg}_1)$	kJ/m^3					840,9	879,7	934,3	
G_2/Pb	$\text{m}^3/\text{t} \text{ (b)}$								

$[\text{CO}_2]$; $[\text{GV}]$ en $[\text{w}_r]$ in massaprocenten van gebak

Conditie voor sectie 1 en 2

GEM. = 50°C $\theta_2 = 600^{\circ}\text{C}$

MT-TNO
15961



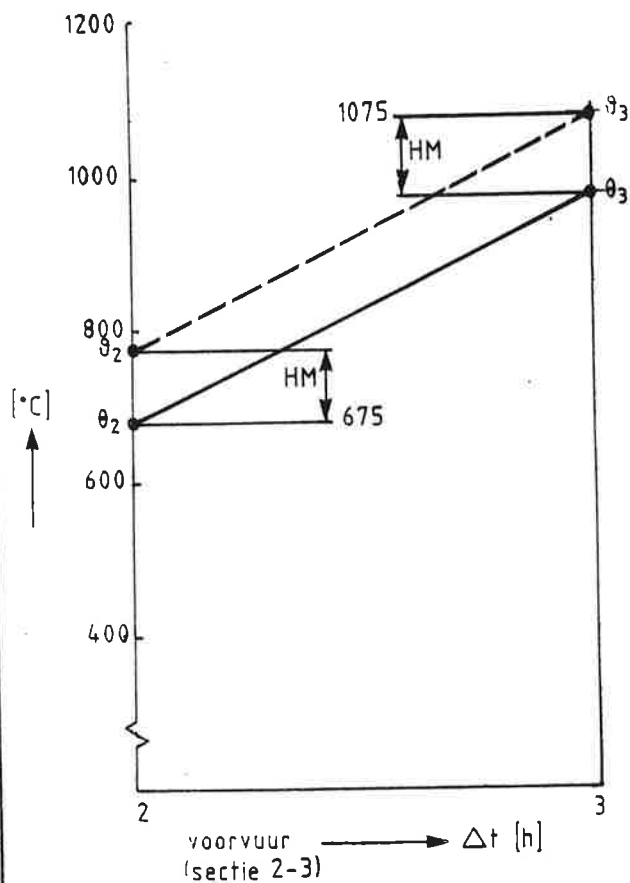
symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	$10^{-6} S^{-1}$	
$\bar{\theta}_w$		$^{\circ}C$	375
hg bij θ_1	$(n \sim 1,7)$	kJ/m^3	167,6
h_f bij θ_2		MJ/t	659,7
h_f bij θ_1		MJ/t	49,6
Δh_f		MJ/t	610,1
h_w' bij θ_2	$659,7 + 2 \cdot [CO_2]$	MJ/t(n)	
h_w' bij θ_1	$49,6 + 0,5[GV] + 2,5[Wr]$	MJ/t(n)	
$\Delta h_w'$		MJ/t(n)	

voorkeurwaarden van HM →	$^{\circ}C$	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_2	$^{\circ}C$	715	725	738	755	775	800	835	875
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$	3292	2962	2645	2342	2081	1842	1601	1405
Δt	h								
π	—	0,9617	0,9783	1,0000	1,0283	1,0617	1,1033	1,1617	1,2283
hg bij $\theta_2 (n \sim 1,7)$	kJ/m^3	1014	1029	1050	1076	1108	1147	1202	1266
$\Delta hg = (hg_2 - hg_1)$	kJ/m^3	846	861	882	908	940	979	1034	1098
G_2/Pb	$m^3/t (b)$	721,2	708,6	691,7	671,9	649,0	623,2	590,0	555,6

$[CO_2]$: [GV] en [Wr] in massaprocenten van gebak

Conditie voor sectie 1 en 2
GEM. = $63^{\circ}C$ $\theta_2 = 675^{\circ}C$.

MT-TNO
15961



symbol	formule	eenheid	waarde
K	—	$10^{-6} S^{-1}$	
h_g bij ϑ_3	$(n \sim 2,4)$	kJ/m^3	1570
h_f bij ϑ_2		MJ/t	659,7
h_w bij ϑ_2	$659,7 \cdot 2 [CO_2]$	MJ/t	

Vooronderstelling:

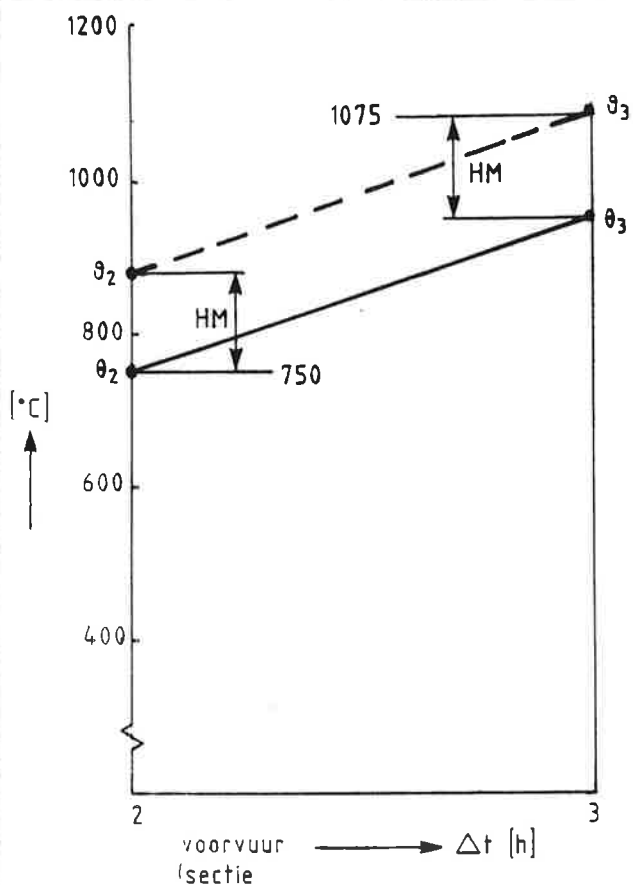
temperatuurverschil tussen ovengassen en produkt is in sectie 2-3 constant en gelijk aan HM.

voorkeurwaarden van HM	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
ϑ_2	°C	715	725	738	755	775	800	835	875
ϑ_3	°C	1035	1025	1012	995	975	950	915	875
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$	2500	1944	1486	1111	833	611	417	278
Δt	h								
ϑ_w	°C	855	850	844	835	825	813	795	775
$h_w = h_f$ bij ϑ_3	MJ/t	1126	1112	1094	1070	1043	1009	962	909
Δh_w	MJ/t								
Δh_f	MJ/t	466	452	434	410	383	349	302	249
h_g bij ϑ_2 ($n \sim 1,7$)	kJ/m^3	1014	1029	1050	1076	1108	1147	1202	1266
$\Delta h_g = (h_{g3} - h_{g2})$	kJ/m^3	556	541	520	494	462	423	368	304

$[CO_2]$ in massaprocenten van gebak

Conditioes voor sectie 2 en 3 (voorvuur)
 $\vartheta_3 = 1075^\circ C$; $\vartheta_2 = 675^\circ C$

MT-TNO
15961



symbool	formule	eenheid	waarde
K	—	10^{-6} s^{-1}	
h_g bij ϑ_3	$(n \sim 2,4)$	kJ/m^3	1570
h_f bij ϑ_2		MJ/t	750,6
h_w' bij ϑ_2	$750,6 \cdot 2[\text{CO}_2]$	MJ/t	

Vooronderstelling:

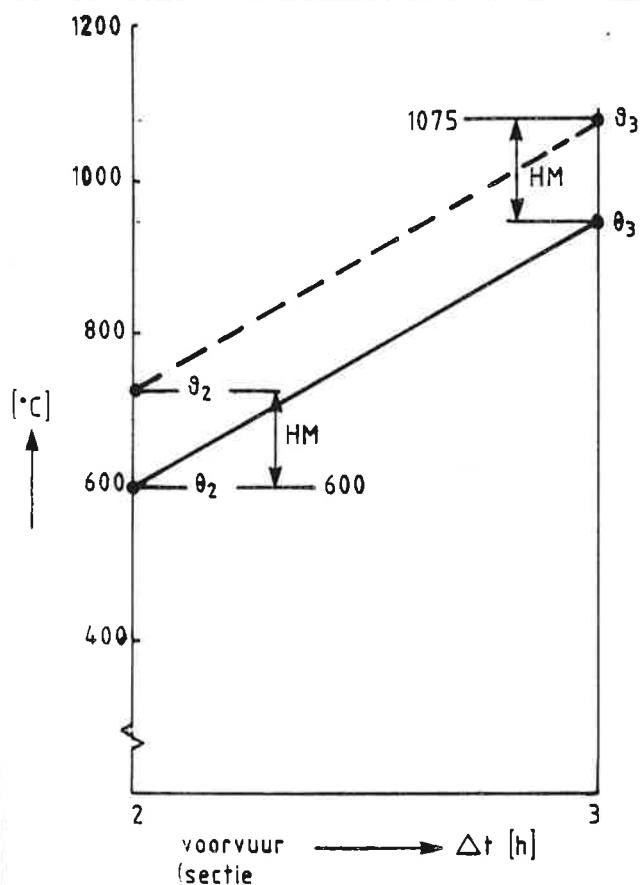
temperatuurverschil tussen ovengassen en produkt is in sectie 2-3 constant en gelijk aan HM.

voorkeurwaarden van HM →	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
ϑ_2	°C					850	875	910	
ϑ_3	°C					975	950	915	
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} \text{ h}/\text{s}$					625	444	286	
Δt	h								
ϑ_w	°C					863	850	833	
$h_w = h_f$ bij ϑ_3	MJ/t					1009	962	909	
Δh_w	MJ/t								
Δh_f	MJ/t					258	211	158	
h_g bij ϑ_2 ($n \sim 1,7$)	kJ/m^3					1226	1266	1322	
$\Delta h_g = (h_{g3} - h_{g2})$	kJ/m^3					344	304	248	

$[\text{CO}_2]$ in massaprocenten van gebak

Conditioes voor sectie 2 en 3 (voorvuur)
 $\vartheta_3 = 1075^\circ\text{C}$; $\vartheta_2 = 750^\circ\text{C}$

MT-TNO
15961



symbol	formule	eenheid	waarde
K	—	$10^{-6} S^{-1}$	
h_g bij θ_3	$(n \sim 2,4)$	kJ/m^3	1570
h_f bij θ_2		MJ/t	572
h_w' bij θ_2	$572 + 2[CO_2]$	MJ/t	

Vooronderstelling:

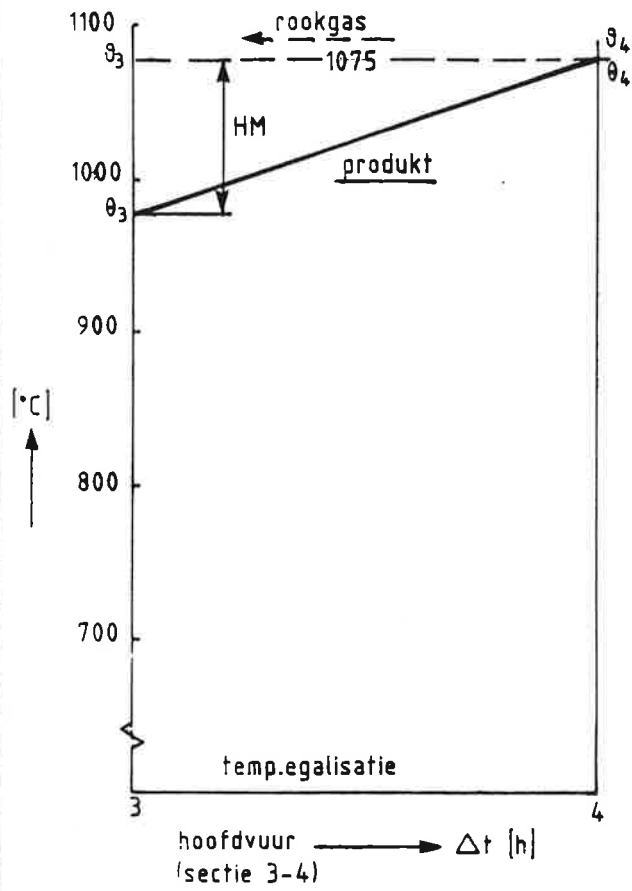
temperatuurverschil tussen ovengassen en produkt is in sectie 2-3 constant en gelijk aan HM.

voorkeurwaarden van HM →	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_2	°C					700	725	760	
θ_3	°C					975	950	915	
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$					1042	778	547	
Δt	h								
θ_w	°C					788	775	758	
$h_w = h_f$ bij θ_3	MJ/t					1043	1009	962	
Δh_w	MJ/t								
Δh_f	MJ/t					471	437	390	
h_g bij θ_2 ($n \sim 1,7$)	kJ/m^3					991	1029	1084	
$\Delta h_g = (h_{g3} - h_{g2})$	kJ/m^3					579	541	486	

$[CO_2]$ in massaprocenten van gebak

Conditioes voor sectie 2 en 3 (voorvuur)
 $\theta_3 = 1075^\circ C$; $\theta_2 = 600^\circ C$

MT-TNO
15961



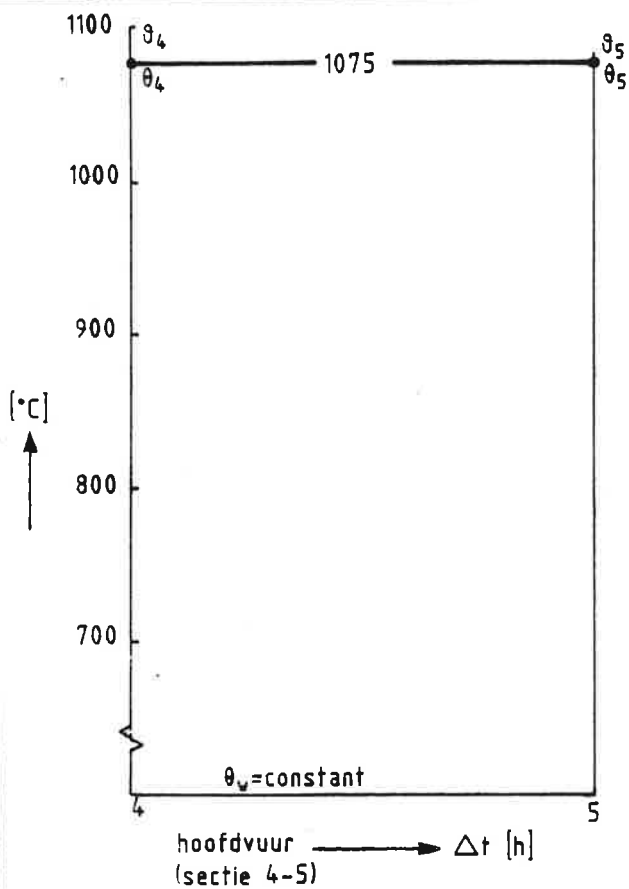
symbool	formule	eenheid	waarde
r		mm	
$\Delta t(\text{min.})$	$\frac{270 \cdot r}{9700 - 38 \cdot r}$	h	
$\Delta t(\text{keuze})$		h	
h_w bij θ_4		MJ/t	1182
h_t bij θ_4		MJ/t	1182
h_g bij θ_4	$n \sim 3,3$	kJ/m^3	1555
h_g bij θ_3	$n \sim 2,4$	kJ/m^3	1570
$\Delta h_g = h_{g_4} - h_{g_3}$		kJ/m^3	- 15

voorkeurwaarden van HM	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_3	°C	1035	1025	1012	995	975	950	915	875
$\bar{\theta}_w$	°C	1055	1050	1044	1035	1025	1013	995	975
$h_w = h_t$ bij θ_3	MJ/t	1126	1112	1094	1070	1043	1009	962	909
$\Delta h_w = \Delta h_t = (h_{t_4} - h_{t_3})$	MJ/t	56	70	88	112	139	173	220	273

r = halve dikte van het materiaal van het gezette produkt in mm

Conditie voor sectie 3 en 4
 $\theta_3 = \theta_4 = 1075^\circ\text{C}$

MT-TNO
 15961

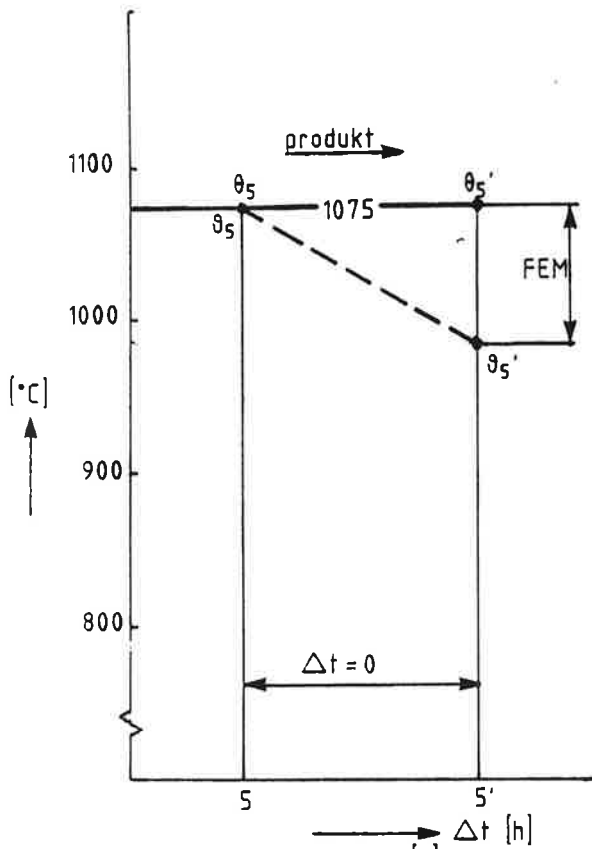


symbool	formule	eenheid	waarde
r		mm	
$\Delta t(\text{min.})$	$\frac{630 \cdot r}{9700 - 38 \cdot r}$	h	
$\Delta t(\text{keuze})$		h	
h_w bij θ_4		MJ/t	1182
h_w bij θ_5		MJ/t	1182
$\Delta h_w = \Delta h_t$		MJ/t	0
h_g bij θ_5	$n = \sim$	kJ/m^3	1516
h_g bij θ_4	$n = 3,3$	kJ/m^3	1555
$\Delta h_g = h_{g5} - h_{g4}$		kJ/m^3	-39
$\bar{\theta}_w$		$^{\circ}\text{C}$	1075

r = halve dikte van het materiaal van het gezette produkt in mm

Conditioes voor sectie 4 en 5
 $\theta_4 = \theta_5 = \theta_4 = \theta_5 = 1075^{\circ}\text{C}$

MT-TNO
 15961



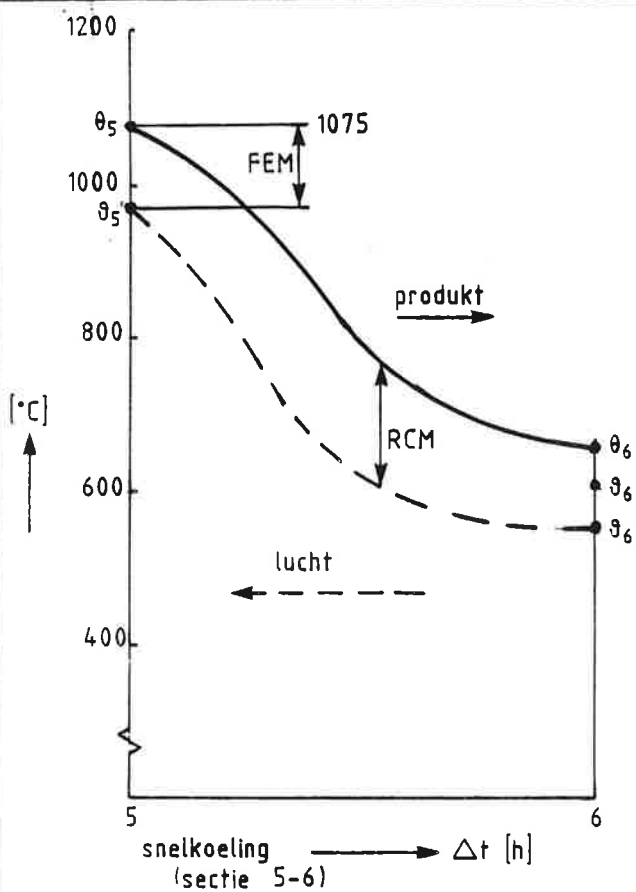
fictieve tijdsduur van 0[h]
voor verhitting van lucht uit
koelzone tot baktemperatuur

symbool	formule	eenheid	waarde
\bar{c}_g		$\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$	1,541
h_g bij ϑ_5	$(1075^\circ); n \sim$	kJ/m^3	1516
$h_{w5} = h_{w5'}$		MJ/t	1182

voorkeurwaarden van →	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
ϑ_5'	°C	1035	1025	1012	995	975	950		
$c_g \cdot [\text{FEM}]$	kJ/m^3	61,6	77,1	97,1	123,3	154,1	192,6		
$h_{g5'}$	kJ/m^3	1454	1439	1419	1393	1362	1323		

Conditie voor de fictieve sectie 5-5'
 $\vartheta_5 = \vartheta_5 = \vartheta_5' = 1075^\circ\text{C}$

MT-TNO
15961



symbool	formule	eenheid	waarde
K		$10^{-6} S^{-1}$	
$h_w = h_f$ bij θ_5		MJ/t	1182
θ_6'	(minimum waarde)	°C	550
θ_5		°C	1075
h_g bij θ_6'		kJ/m^3	731

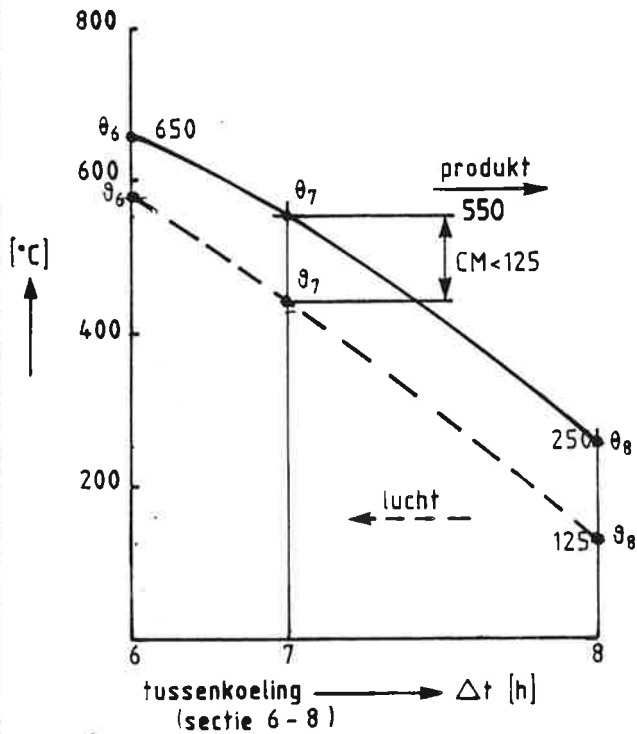
Vooronderstelling

De gemiddelde waarde van $(\theta - \theta')$ tijdens de snelkoeling \bar{RCM} in °C wordt ingesteld op 2,5 [CM]: met een maximum van 200°C.

voorkeurwaarden van CM	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_6	°C	650	650	650	650	650	675	710	750
θ_6'	°C	638	625	608	585	558	550	550	550
h_w bij θ_6	MJ/t	630,1	630,1	630,1	630,1	630,1	659,7	701,6	750,6
$\Delta h_w = (h_{w5} - h_{w6})$	MJ/t	551,9	551,9	551,9	551,9	551,9	522,3	480,4	431,4
h_g bij θ_6'	kJ/m^3	858	839	815	782	743	731	731	731
$\bar{\theta}_w$	°C	862	862	862	862	862	875	892	912
\bar{RCM}	°C	100	125	160	200	200	200	200	200
$\Delta t \cdot K$		1181	944	738	590	590	556	507	451

Conditie voor sectie 5-6
 $\theta_5 = 1075^\circ C$

MT-TNO
 15961

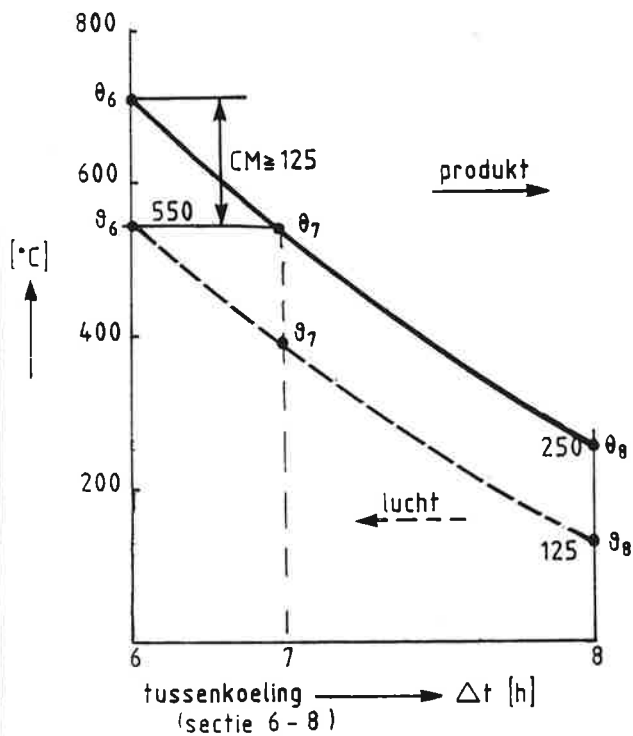


symbool	formule	eenheid	waarde
K		$10^{-6} \cdot s^{-1}$	
h_w bij θ_6	(650°C)	MJ/t	630,1
h_w bij θ_8	(250°C)	MJ/t	206,1
$\Delta t h_w (6-8)$		MJ/t	424,0
h_g bij θ_8	(125°C)	kJ/m^3	145

voorkeurwaarden van CM	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
θ_6	°C	638	625	608	585	558			
θ_7	°C	510	500	487	470	450			
$\bar{\theta}_w (6-8)$	°C	504	486	473	463	456			
$\Delta t \cdot K (6-7)$	$10^{-6} h/s$	1205	770	535	384	289			
$\Delta t \cdot K (7-8)$	$10^{-6} h/s$	1117	1018	921	826	744			
$\Delta t (6-7)$	h								
$\Delta t (7-8)$	h								
$\Delta t (6-8)$	h								
η	—	1,2833	1,2500	1,2067	1,1500	1,0833			
h_g bij θ_6	kJ/m^3	858	839	815	782	743			
$\Delta h_g = (h_{g6} - h_{g8})$	kJ/m^3	713	694	670	637	598			

Conditie voor de secties 6 - 8
 CM < 125°C

MT-TNO
 15961

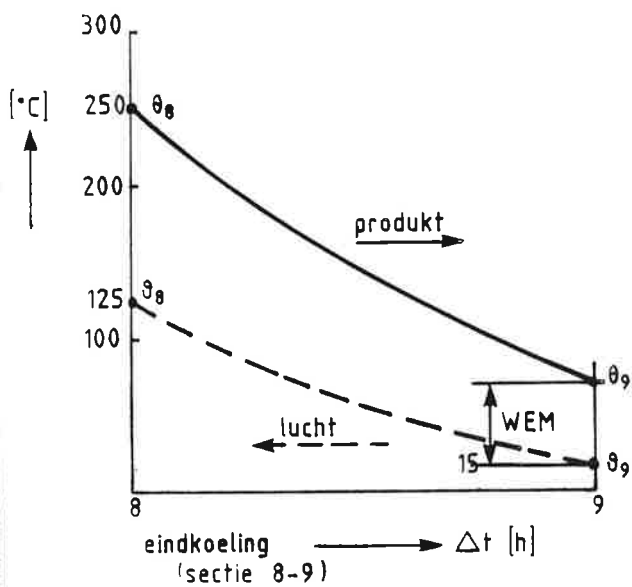


symbool	formule	eenheid	waarde
K		$10^{-6} \cdot s^{-1}$	
h_g bij ϑ_6	(550 °C)	kJ/m^3	731
h_g bij ϑ_8	(125 °C)	kJ/m^3	145
$\Delta h_g(6-8)$		kJ/m^3	586
h_w bij ϑ_8	(250 °C)	MJ/t	206,1

voorkeurwaarden van CM \rightarrow	°C	40	50	63	80	100	125	160	200
ϑ_6	°C						675	710	750
ϑ_7	°C						425	402	380
$\bar{\vartheta}_w(6-8)$	°C						463	474	486
$\Delta t \cdot K(6-7)$	$10^{-6} h/s$						278	290	301
$\Delta t \cdot K(7-8)$	$10^{-6} h/s$						666	611	569
$\Delta t(6-7)$	h								
$\Delta t(7-8)$	h								
$\Delta t(6-8)$	h								
η	—						1,0000	0,9239	0,8500
h_w bij ϑ_6	MJ/t						659,7	701,6	750,6
$\Delta h_w = (h_{w6} - h_{w8})$	MJ/t						453,6	495,5	544,5

Conditie voor de secties 6 - 8

MT-TNÖ
15961



symbool	formule	eenheid	waarde
K		$10^{-6} \cdot s^{-1}$	
h_g bij θ_8		kJ/m^3	145
$\Delta h_g(8-9)$		kJ/m^3	145
h_w bij θ_8		MJ/t	206,1

massiek warmteuitwisselings oppervlak S_s	$10^{-3} m^2/kg$	≥ 5	$\geq 6,3$	≥ 8	≥ 10	$\geq 12,5$	≥ 16	≥ 20
WEM ($\theta_9 - \theta_8$)	$^{\circ}C$	80	63	50	40	31,5	25	20
θ_9	$^{\circ}C$	95	78	65	55	46,5	40	35
$\Delta t \cdot K$	$10^{-6} h/s$	427	528	628	726	833	939	1042
Δt	h							
π	—	0,7097	0,6395	0,5946	0,5641	0,5405	0,5238	0,5116
$\bar{\theta}_w$	$^{\circ}C$	173	164	158	153	148	145	143
h_w bij θ_9	MJ/t	66,6	52,2	41,2	32,9	25,8	20,5	16,4
$\Delta h_w = (h_{w8} - h_{w9})$	MJ/t	139,5	153,9	164,9	173,2	180,3	185,6	189,7

Conditioes in de sectie 8-9 in afhankelijkheid van S_s

MT-TNO
15961

Technische gegevens van tunneloven	symbool	eenheid	waarde
baktijd, totaal, effectief	t_k	h	
lengte oven, effectief	l_k	m	
breedte oven, inwendig	W	m	
hoogte oven, inwendig	H	m	
warmtedoorgangscoefficiënt zijwanden	k_w	$10^{-3} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0,355
warmtedoorgangscoefficiënt plafond, massief	k_p	$10^{-3} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0,500
warmtedoorgangscoefficiënt hangdek	k_r	$10^{-3} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0,710

symbool	sectie \longrightarrow	nr.	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 8	8 - 9
Δt	verblijf in sectie	h							
$\bar{\theta}_w$	gemiddelde wandtemperatuur	$^{\circ}\text{C}$							
L	lengte van sectie $\frac{\Delta t}{t_k} \cdot l_k$	m							
A_w	zijwand-opp. $2 \cdot L \cdot (H + 0,60)$	m^2							
A_p	plafond-opp. $L \cdot (W + 0,60)$	m^2							
Φ_w	warmtestroom wanden $k_w \cdot A_w \cdot (\bar{\theta}_w - 15)$	kW							
Φ_p	warmtestroom plafond $k_p \cdot A_p \cdot (\bar{\theta}_w - 15)$	kW							
Σ	$\Phi_w + \Phi_p$	kW							
Φ_d	warmtestroom door loopdek bij hangdekconstructie $0,125 \Phi_p$	kW							
Φ_{rd}	warmterecuperatie in hangdek $0,875 \Phi_p$	kW							

Warmteverlies van ovenlichaam en warmte-recuperatie
uit hangdek
(referentie: blad 21)

MT-TNO
15961

Gegevens binnenlekkende lucht in voorwarmzone (sectie 1 - 2)	eenheid	waarde
- temperatuur van binnenlekkende lucht	°C	15
- lekluchtstroom per ton netto gebakken produkt	m ³ /t	Z

Te leveren warmte door rookgas uit de stookzone voor opwarming van de leklucht tot afvoertemperatuur, bij een produktietempo van Pn kg gebakken produkt per seconde.

afvoertemperatuur van lucht °C	warmtehoeveelheid per ton netto produkt kJ/t	warmtebehoefte \dot{Q}_L in KW BIJ Pn kg/s		
		Z = 200 m ³ /t	Z = 400 m ³ /t	Z = 800 m ³ /t
115	131,5.Z	26,3.Pn	52,6.Pn	105,2.Pn
125	144,8.Z	29,0.Pn	57,9.Pn	115,8.Pn
138	162,1.Z	32,4.Pn	64,8.Pn	129,7.Pn

Deze warmte behoefte is tevens het directe schoorsteenverlies als gevolg van leklucht, exclusief het schoorsteenverlies voortvloeiend uit de meerdere hoeveelheid rookgas die voor de leklucht-opwarming wordt aan-en afgevoerd.

-Warmtebehoefte voor opwarming van leklucht in sectie 1-2
 -Direct schoorsteenverlies door leklucht
 -Alternatieven.

MT-TNO
 15961

stookzone, sectie 2 - 3

(voorvuur)

$$B_2 = \frac{\Sigma \emptyset - G_2 (h_{g3} - h_{g2})}{(V + E \cdot h' - R \cdot h_{g3})}$$

$$G_3 = G_2 - B_2 \cdot R$$

stookzone, sectie 3 - 4

(hoofdvuur, temperatuuregalisatie)

$$B_3 = \frac{\Sigma \emptyset - G_3 (h_{g4} - h_{g3})}{(V + E \cdot h' - R \cdot h_{g4})}$$

$$G_4 = G_3 - B_3 \cdot R$$

stookzone, sectie 4 - 5

(hoofdvuur)

$$B_4 = \frac{\Sigma \emptyset - G_4 (h_{g5} - h_{g4})}{(V + E \cdot h' - R \cdot h_{g5})}$$

$$G_5 = G_4 - B_4 \cdot R$$

stookzone, sectie 5 - 5'

(achtervuur, fictieve tijdsduur $\Delta t=0$)

$$B_5 = \frac{G_5 \cdot \bar{c}_g \cdot [FEM]}{V + E \cdot h' - R \cdot (h_{g5} - \bar{c}_g \cdot [FEM])}$$

$$G_5' = G_5 - B_5 \cdot R$$

G_5' = stroomverbrandingslucht van koelzone naar stookzone

$$G_5' = G_2 - R (B_2 + B_3 + B_4 + B_5) \quad [m^3/s]$$

symbool	grootheid	eenheid
B_i	aardgasverbruik in sectie i tot (i + 1)	m^3/s
V	stookwaarde van aardgas: 31680	kJ/m^3
$\Sigma \emptyset$	totale warmtebehoefte in beschouwde sectie	kW
G_i	gasstroom op sectiegrens i	m^3/s
$(h_{g(i+1)} - h_{gi})$	enthalpietoename van gas in sectie	kJ/m^3
E	externe verbrandingsluchttoevoer in sectie per m^3 aardgas	m^3/m^3
R	extra rookgas uit aardgasverbranding met externe en interne verbrandingslucht, per m^3 aardgas	m^3/m^3
h'	enthalpie van externe verbrandingslucht, boven $15^\circ C$	kJ/m^3
h_{gi}	enthalpie van rookgas op sectiegrens i, boven $15^\circ C$	kJ/m^3
\bar{c}_g	gemiddelde soortelijke warmte van lucht: 1,541 ($1075 - 950^\circ C$)	$kJ/(m^3 \cdot K)$
FEM	Fire Entry Module	$^\circ C$

Formules voor de berekening van het brandstofgebruik en de gasstroom in de verschillende stooksecties

MT-TNO
15961

Alternatieve toevoer van externe verbrandingslucht per m³ aardgas.

grootheid	symbool	eenheid	luchtfactor (extern)		
			n = 1	n = 0,5	n = 0
externe verbrandingslucht	E	m ³ /m ³	8,49	4,245	0
extra rookgas produktie	R	m ³ /m ³	9,45	5,205	0,96
temperatuur van externe verbr.lucht	θ _l	°C	125	125	—
enthalpie externe verbrandingslucht	h'	kJ/m ³	144,8	144,8	—
warmtetoever met externe verbrandingslucht per m ³ aardgas	E.h'	kJ/m ³	1229,4	614,7	—
brandstofverbruik in sectie 2 → 3	B ₂	m ³ /s	$\frac{\Sigma \emptyset - G_2 \cdot \Delta h_g}{18073}$	$\frac{\Sigma \emptyset - G_2 \cdot \Delta h_g}{24123}$	$\frac{\Sigma \emptyset - G_2 \cdot \Delta h_g}{30173}$
rookgasstroom op sectiegrens 3	G ₃	m ³ /s	G ₂ - 9,45.B ₂	G ₂ - 5,205.B ₂	G ₂ - 0,96.B ₂
brandstofverbruik in sectie 3 → 4	B ₃	m ³ /s	$\frac{\Sigma \emptyset + 15 \cdot G_3}{18215}$	$\frac{\Sigma \emptyset + 15 \cdot G_3}{24201}$	$\frac{\Sigma \emptyset + 15 \cdot G_3}{30187}$
rookgasstroom op sectiegrens 4	G ₄	m ³ /s	G ₃ - 9,45.B ₃	G ₃ - 5,205.B ₃	G ₃ - 0,96.B ₃
brandstofverbruik in sectie 4 → 5	B ₄	m ³ /s	$\frac{\Sigma \emptyset + 39 \cdot G_4}{18583}$	$\frac{\Sigma \emptyset + 39 \cdot G_4}{24404}$	$\frac{\Sigma \emptyset + 39 \cdot G_4}{30225}$
rookgasstroom op sectiegrens 5	G ₅	m ³ /s	G ₄ - 9,45.B ₄	G ₄ - 5,205.B ₄	G ₄ - 0,96.B ₄
brandstofverbruik in sectie 5 → 5'	B ₅	m ³ /s	$\frac{1,54 \cdot G_5 \cdot [FEM]}{18583 + 14,6 \cdot [FEM]}$	$\frac{1,54 \cdot G_5 \cdot [FEM]}{24404 + 8,0 \cdot [FEM]}$	$\frac{1,54 \cdot G_5 \cdot [FEM]}{30225 + 1,5 \cdot [FEM]}$
luchtstroom op sectiegrens 5'	G ₅ '	m ³ /s	G ₅ - 9,45.B ₅	G ₅ - 5,205.B ₅	G ₅ - 0,96.B ₅

Formules voor de berekening van het brandstofverbruik in de stooksecties (baktemperatuur: 1075°C)
 Alternatieven in de externe verbrandingsluchttoevoer.

MT-TNO
 15961

Reactiewarmtesaldo in de sectie 1 → 2. in MJ/ton gebakken produkt
(onafhankelijk van afvoertemperatuur verondersteld. (θ₁ ~ 125°C))

$$\Delta H = 24,2 [\text{WR}] + 50,9 [\text{WC}] + 2,5 [\text{CO}_2] - 129,0 [\text{OM}] = \text{MJ/t}$$

Reactiewarmtesaldo in de sectie 2 → 3 in MJ/ton gebakken produkt

$$\Delta H = 38,4 [\text{CO}_2] = \text{MJ/t}$$

Schoorsteenverlies veroorzaakt door gasvormige reactieprodukten in MJ/ton gebakken produkt bij drie afvoertemperaturen

afvoertemperatuur	schoorsteenverlies in MJ/ton	waarde
115°C	$Q_r = 1,87 [\text{WR}] + 1,87 [\text{WC}] + 2,04 [\text{OM}] + 0,89 [\text{CO}_2]$	
125°C	$Q_r = 2,05 [\text{WR}] + 2,05 [\text{WC}] + 2,24 [\text{OM}] + 0,98 [\text{CO}_2]$	
138°C	$Q_r = 2,30 [\text{WR}] + 2,30 [\text{WC}] + 2,51 [\text{OM}] + 1,09 [\text{CO}_2]$	

De getalwaarde van [WR], [WC], [CO₂], [OM] zijn uitgedrukt in massaprocenten betrokken op de gebakken massa.

Reactieprodukten in massaprocenten betrokken op de droge massa (analyse gegevens)

Reactieprodukten in massaprocenten betrokken op de gebakken massa.

component	symbool	%(m/m _d)	formule	symbool	%(m/m _b)
restwater aan de ingang van de oven	[WR]		$\frac{100 \cdot [\text{WR}]}{100 - [\text{GV}]}$	[WR]	
gloeiverlies (1050°C)	[GV]		$\frac{100 \cdot [\text{GV}]}{100 - [\text{GV}]}$	[GV]	
organische stof [OM] = 1,724 · [C]	[OM]		$\frac{100 \cdot [\text{OM}]}{100 - [\text{GV}]}$	[OM]	
koolzuur uit carbonaat [CO ₂] = 0,7843 · [C ₃ O]	[CO ₂]		$\frac{100 \cdot [\text{CO}_2]}{100 - [\text{GV}]}$	[CO ₂]	
chemisch gebonden water [WC] = [GV] - [OM] - [CO ₂]	[WC]		$\frac{100 \cdot [\text{WC}]}{100 - [\text{GV}]}$	[WC]	

Reactiewarmtesaldo ΔH, alsmede schoorsteenverlies van reactieprodukten.

MT-TNO
15961

THERMODYNAMISCH GEDRAG VAN EEN MEERVOUDIG GELAAGDE WAND

Constructieonderdeel:							oppervlak: m ²			
THERMISCHE GEGEVENS VAN DE CONSTRUCTIEMATERIALEN							STATIONAIRE WARMTESTROOM			
laag:	laag-dikte	aantal elementen	dicht-heid	warmte-geleidings-coëfficiënt F=H+Z.T W/(m.K)		soortelijke warmte C=U+V.T J/(kg.K)		grens-vlak temp.	warmte inhoud boven 15°C	warmte stroom
-	m	-	kg/m ²	H	Z	U	V	°C	MJ/m ²	W/m ²
hete zijde:								/	-	-
A								/		
B								/		
C								/		
D								/		
E								/		
Som								/		

RANDVOORWAARDEN:
 maximum temp. hete zijde..... °C
 begintemp. materialen..... °C
 omgevingstemperatuur..... °C
 tijdstap..... s

warmteoverdrachtscoëfficiënt aan koele zijde van X °C
 $a=R+S.X$ [W/(m².K)]
 R= S=

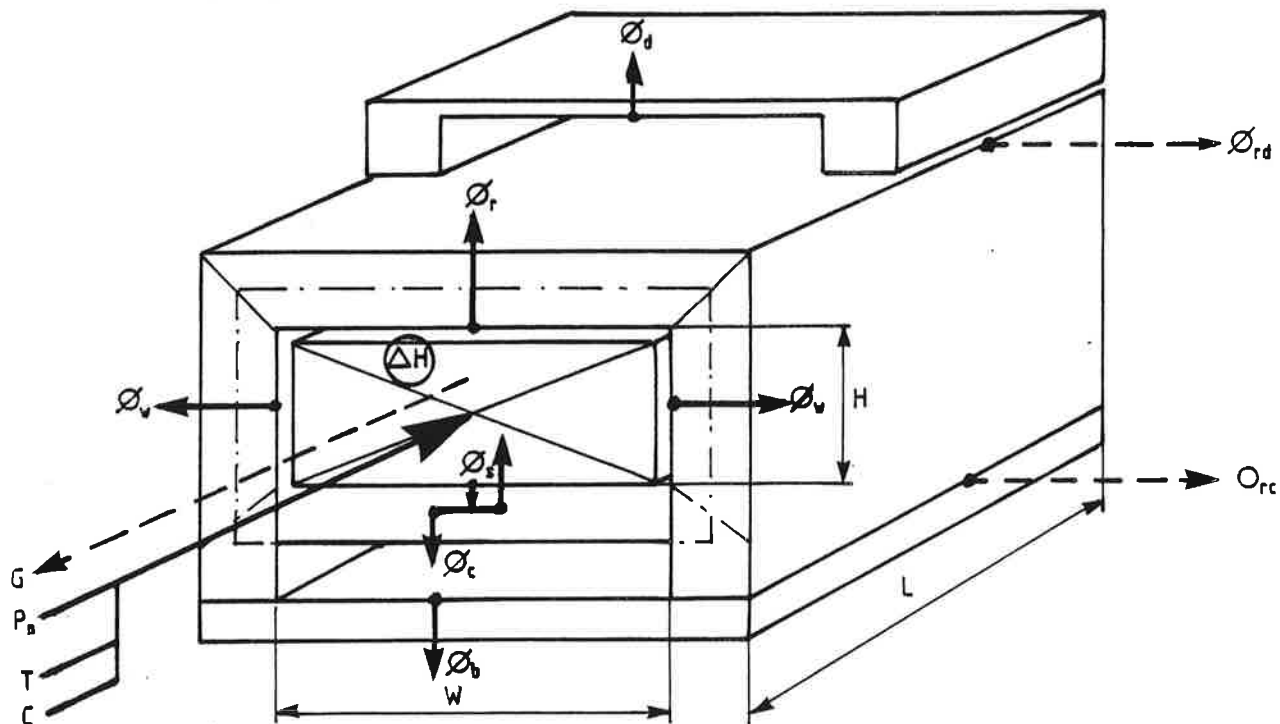
TEMPERATUURVERDELING EN THERMODYNAMISCH GEDRAG

temp. curve	tijd aan einde van sectie	temp. hete zijde aan einde sectie °C	grensvlaktemperaturen aan einde van secties tussen de lagen:					hoeveelheid warmte		warmte inhoud boven 15°C, einde sectie MJ/m ²
			A/B °C	B/C °C	C/D °C	D/E °C	E/- °C	IN hete zijde MJ/m ²	UIT koele zijde MJ/m ²	
start	0,00	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	-	-	0,00
0-1										
1-2										
2-3										
3-4										
4-5										
5-6										
6-7										
8-9										
9-10										
10-11										
11-12										

symbool	sectie →	nr	1__2	2__3	3__4	4__5	5__6	6__8	8__9
Δt	verblijf in sectie	h							
t_1	tijdstip grens 1	h		—	—	—	—	—	—
t_k	tijdstip einde sectie	h							
θ_w	produkt temperatuur aan einde sectie	°C							
h_{c1}	enthalpie op grens 1.	kJ/m^2							
ΔQ_s	instromende warmte in sectie per m^2 wagen	kJ/m^2							
ΔQ_c	uitstromend warmte aan onderkant wagen in sectie per m^2 wagen	kJ/m^2							
h_{c9}	enthalpie op grens 9	kJ/m^2							
C	tempo wagenoppervlak	m^2/s							
ϕ_c	warmteafgifte onderkant wagens. $\phi_c = C \cdot \Delta Q_c$	kW							
ϕ_{bc}	warmteverlies in fundament bij convectorie met lucht $\phi_b = 0,35 \cdot \phi_c$	kW							
ϕ_{rc}	warmterecuperatie wielstellenkoeling met lucht $\phi_{rc} = 0,65 \cdot \phi_c$	kW							
ϕ_{br}	warmteverlies in fundament bij waterbassin 40°C . $\phi_{br} = 0,07 \cdot L \cdot W$	kW							
L W	lengte sectie ovenbreedte	m m							
ϕ_{rc}	warmte recuperatie met waterbassin $\phi_{rc} = \phi_c - \phi_{br}$	kW							

Warmtetransport in ovenwagen-
bekleding. (referentie: blad 19 en 21)
Situatie No_____

MT-TNO
15961



symbool	omschrijving	eenheid
G	lucht- of gasstroom	m ³ /s
P _a	stroom produkt	kg/s
T	stroom van tarra van de charge	kg/s
C	voortbang van het oppervlak van de ovenwagens	m ² /s
W	breedte van de oven; inwendig	m
H	hoogte van de oven, inwendig	m
L	lengte van de beschouwde sectie	m
ΔH	reactiewarmtesalde per kg gebakken produkt	kJ/kg
∅....	warmtestromen in de sectie	kW
	∅ _w : door zijwanden	kW
	∅ _r : door plafond	kW
	∅ _d : door loopdek van hangdekconstructie	kW
	∅ _s : warmtepenetratie resp. warmte recuperatie in/uit wagenbekleding	kW
	∅ _c : warmte afgifte van onderkant wagens	kW
	∅ _b : warmte verlies in ovenfundament	kW
	∅ _{r,d} : warmte recuperatie uit dekconstuctie	kW
	∅ _{r,c} : warmte recuperatie uit wielstellenkoeling	kW

omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte, blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra van charge	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m ² /s		41
enthalpie toename van produkt ($h'_{w2} - h'_{w1}$)	$\Delta h'_w$	kJ/kg(n)		03-05
enthalpie toename van tarra ($h_{t2} - h_{t1}$)	Δh_t	kJ/kg		03-05
warmtetoever aan wagenplateau insectie 1- 2	ΔQ_s	kJ/m ²		20
warmtetoever aan leklucht	\emptyset_l	kW		15
warmtetransport door ovenzijwanden	\emptyset_w	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\emptyset_r	kW		14
reactiewarmtesaldo per kg produkt	ΔH	kJ/kg		18
enthalpieafname van rookgassen ($h_{g2} - h_{g1}$)	Δh_g	kJ/m ³		03-05

warmteafgifte van rookgassen in sectie 1- 2 in kW

omschrijving	formule	waarde
opwarmen van produkt	$\emptyset_p = P_n \cdot \Delta h'_w$	+
opwarmen van tarra	$\emptyset_T = T \cdot \Delta h_t$	+
reactiewarmte	$\emptyset_H = P_n \cdot \Delta H$	+
warmtetoever aan leklucht	$\emptyset_l =$	+
warmteconsumptie van de wagens	$\emptyset_S = C \cdot \Delta Q_s$	+
warmtetransport door zijwanden	\emptyset_w	+
warmtetransport door plafond	\emptyset_r	+
totale warmtebehoefte in sectie 1 - 2	$\Sigma \emptyset$	
equivalente bruto produktstroom	$P_B = \frac{\Sigma \emptyset}{\Delta h_r}$	[kg/s]
rookgasstroom bij sectiegrens 2	$G_2 = \frac{\Sigma \emptyset}{\Delta h_g}$	[m ³ /s]

Warmte- en stofstromen in sectie 1 - 2
Situatie No:

MT-TNO
15961

omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte, blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra van charge	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m^2/s		41
enthalpie toename van produkt ($h_{w3}-h_{w2}$)	Δh_w	$kJ/kg(n)$		06
enthalpie toename van tarra ($h_{t3}-h_{t2}$)	Δh_t	kJ/kg		06
warmtetoevoer aan wagenplateau insectie 2-3	ΔQ_s	kJ/m^2		20
warmtetransport door ovenzijwanden	\varnothing_w	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\varnothing_r	kW		14
reactiewarmtesaldo per kg produkt	ΔH	kW		18
gasstroom op sectiegrens 2	G_2	m^3/s		22
enthalpieafname van rookgassen ($h_{g3}-h_{g2}$)	Δh_g	kJ/m^3		06
noemer in formule brandstofverbruik B_2	x	-		17
factor in formule rookgasstroom G_3	y	-		17

warmteafgifte van rookgassen in sectie 2-3 in kW

omschrijving	formule	waarde
opwarmen van produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot \Delta h_w$ +	
opwarmen van tarra	$\varnothing_H = T \cdot \Delta h_t$ -	
reactiewarmte	$\varnothing_H = P_n \cdot \Delta H$ +	
warmteconsumptie	$\varnothing_s = C \cdot \Delta Q_s$ +	
warmtetransport door zijwanden	\varnothing_w +	
warmtetransport door plafond	\varnothing_r +	
totale warmtebehoefte in sectie 2-3	$\Sigma \varnothing$	
brandstofverbruik in sectie 2-3 [m^3/s]	$B_2 = \frac{\Sigma \varnothing - G_2 \cdot \Delta h_g}{x}$	
rookgasstroom bij sectiegrens 3 [m^3/s]	$G_3 = G_2 - y \cdot B_2$	

Brandstofverbruik en rookgasstroom in sectie 2 - 3
 Situatie No ___

MT-TNO
 15961

omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte, blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra van charge	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m ² /s		41
enthalpie toename van produkt ($h_{w4} - h_{w3}$)	Δh_w	kJ/kg(n)		07
enthalpie toename van tarra ($h_{t4} - h_{t3}$)	Δh_t	kJ/kg		07
warmtetoevoer aan wagenplateau insectie 3-4	ΔQ_s	kJ/m ²		20
warmtetransport door ovenzijwanden	\varnothing_w	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\varnothing_r	kW		14
gasstroom op sectiegrens 3	G_3	m ³ /s		23
noemer in formule brandstofverbruik B_3	x	-		17
factor in formule rookgasstroom G_4	y	-		17

warmteafgifte van rookgassen in sectie 3-4 in kW

omschrijving	formule	waarde
opwarmen van produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot \Delta h_w$ +	
opwarmen van tarra	$\varnothing_H = T \cdot \Delta h_t$ +	
warmteconsumptie van wagens	$\varnothing_S = C \cdot \Delta Q_s$ +	
warmtetransport door zijwanden	\varnothing_w +	
warmtetransport door plafond	\varnothing_r +	
totale warmtebehoefte in sectie 3-4	$\Sigma \varnothing$	
brandstofverbruik in sectie 3-4 [m ³ /s]	$B = \frac{\Sigma \varnothing + 15 \cdot \Delta h_g}{X}$	
rookgasstroom bij sectiegrens 4 [m ³ /s]	$G_4 = G_3 - y \cdot B_3$	

Brandstofverbruik en rookgasstroom in sectie 3-4
 Situatie No. _____

MT-TNO
 15961

omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte, blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra van charge	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m ² /s		41
warmtevoer aan wagenplateau insectie 4-5	ΔQ_s	kJ/m ²		20
warmtetransport door ovenzijwanden	\varnothing_w	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\varnothing_r	kW		14
gasstroom op sectiegrens 4	G_4	m ³ /s		24
noemer in formule brandstofverbruik B_4	x	-		17
factor in formule rookgasstroom G_5	y	-		17
temperatuurverloop in sectie 4-5	-	-		08

warmteafgifte van rookgassen in sectie 4-5 in kW

omschrijving	formule	waarde
warmteconsumptie van wagens	$\varnothing_s = C \cdot \Delta Q_s$	+
warmtetransport door zijwanden	\varnothing_w	+
warmtetransport door plafond	\varnothing_r	+
totale warmtebehoefte in sectie 4-5	$\Sigma \varnothing$	
brandstofverbruik in sectie 4-5 [m ³ /s]	$B_4 = \frac{\Sigma \varnothing + 39 \cdot G_4}{x}$	
rookgasstroom bij sectiegrens 5 [m ³ /s]	$G_5 = G_4 - y \cdot B_4$	

Brandstofverbruik en rookgasstroom in sectie 4-5
 Situatie No. _ _ _ .

MT-TNO
 15961

Vooronderstellingen

- Sectie 5 → 5' is fictief. Zowel de sectielengte, als de verblijftijd in de sectie zijn 0.
- Produkt, tarra en wagenbekleding behouden de enthalpie van sectiegrens 5.
- De brandstoftoevoer dient uitsluitend voor het verhitten van de uit de koelzone aanstromende lucht tot de baktemperatuur van 1075°C.

Omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte, blad No
temperatuurverschil. ($\theta_5 - \theta_{5'}$)	FEM	°C		09
- gasstroom op sectiegrens 5	G_5	m ³ /s		25
- noemer van formule brandstofverbruik B_5	x	-		17
- factor in formule luchtstroom op grens 5'	y	-		17

Brandstofverbruik en luchtstroom

Omschrijving	formule	waarde
brandstofverbruik in sectie 5 - 5' [m ³ /s]	$B_5 = \frac{1,54 \cdot G_5 \cdot [FEM]}{X}$	
luchtstroom bij sectiegrens 5' [m ³ /s]	$G_{5'} = G_5 - y \cdot B_5$	

Brandstofverbruik in sectie 5 - 5' en luchtstroom op de
sectiegrens 5'
Situatie No. ___

MT-TNO
15961

Omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte. blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m^2/s		41
enthalpie afname van produkt ($h_{w5}-h_{w6}$)	Δh_w	kJ/kg		10
enthalpie afname van tarra ($h_{t5}-h_{t6}$)	Δh_t	kJ/kg		10
warmteregeneratie wagenplateau in sectie 5 - 6	ΔQ_s	kJ/m ²		20
warmtetransport door ovenzijwanden	\varnothing_w	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\varnothing_r	kW		14

Warmteopname door koellucht in sectie 5 - 6 in kW

Omschrijving	formule	waarde
koelen van produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot \Delta h_w$ +	
koelen van tarra	$\varnothing_t = T \cdot \Delta h_t$ +	
warmteregeneratie van wagens	$\varnothing_s = C \cdot \Delta Q_s$ +	
subtotaal	\varnothing_A	
warmtetransport door wanden	$\varnothing_w =$ +	_____
warmtetransport door plafond	$\varnothing_r =$ +	_____
subtotaal	\varnothing_B	
totaal door koellucht af te voeren	$\Sigma \varnothing = \varnothing_A - \varnothing_B$	

Warmte- en stofstromen in sectie 5 - 6
 Situatie No. ___

MT-TNO
 15961

Omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte- blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m^2/s		41
enthalpie afname van produkt ($h_{v6}-h_{v8}$)	Δh_v	kJ/kg		11/12
enthalpie afname van tarra ($h_{t6}-h_{t8}$)	Δh_t	kJ/kg		11/12
warmteregeneratie wagenplateau in sectie 6-8	ΔQ_s	kJ/m ²		20
warmtetransport door ovenzijwanden	\varnothing_v	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\varnothing_r	kW		14
enthalpie toename van lucht ($h_{g6}-h_{g8}$)	Δh_g	kJ/m ³		11/12

Warmteopname door koellucht in sectie 6 - 8 in kW

Omschrijving	formule	waarde
koelen van produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot \Delta h_v$ +	
koelen van tarra	$\varnothing_t = T \cdot \Delta h_t$ +	
warmteregeneratie van wagens	$\varnothing_s = C \cdot \Delta Q_s$ +	
subtotaal	\varnothing_A	
warmtetransport door wanden	$\varnothing_v =$ +	_____
warmtetransport door plafond	$\varnothing_r =$ +	_____
subtotaal	\varnothing_B	
totaal door koellucht af te voeren	$\Sigma \varnothing = \varnothing_A - \varnothing_B$	
equivalente bruto-produktstroom	$P_B = \frac{\Sigma \varnothing}{\Delta h_t}$	[kg/s]
luchtstroom in sectie 6 - 8	$G_B = \frac{\Sigma \varnothing}{\Delta h_g}$	[m ³ /s]

Warmte- en stofstromen in sectie 6 - 8
 Situatie No. ___

MT-TNO
 15961

Omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte. blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m ² /s		41
enthalpie afname van produkt ($h_{v8} - h_{v9}$)	Δh_v	kJ/kg		13
enthalpie afname van tarra ($h_{t8} - h_{t9}$)	Δh_t	kJ/kg		13
warmteregeneratie wagenplateau in sectie 8 - 9	ΔQ_s	kJ/m ²		20
warmtetransport door ovenzijwanden	\varnothing_w	kW		14
warmtetransport door ovenplafond	\varnothing_r	kW		14
enthalpie toename van lucht ($h_{g8} - h_{g9}$)	Δh_g	kJ/m ³		13

Warmteopname door koellucht in sectie 8 - 9 in kW

Omschrijving	formule	waarde
koelen van produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot \Delta h_v$ +	
koelen van tarra	$\varnothing_T = T \cdot \Delta h_t$ +	
warmteregeneratie van wagens	$\varnothing_S = C \cdot \Delta Q_s$ +	
subtotaal	\varnothing_A	
warmtetransport door wanden	$\varnothing_w =$ +	_____
warmtetransport door plafond	$\varnothing_r =$ +	_____
subtotaal	\varnothing_B	
totaal door koellucht af te voeren	$\Sigma \varnothing = \varnothing_A - \varnothing_B$	
equivalente bruto-produktstroom	$P_B = \frac{\Sigma \varnothing}{\Delta h_t}$	[kg/s]
luchtstroom in sectie -	$G_g = \frac{\Sigma \varnothing}{\Delta h_g}$	[m ³ /s]

Warmte- en stofstromen in sectie 8 - 9
 Situatie No. ---

MT-TNO
 15961

Omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte. blad No
- produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
- rookgasstroom in sectie 1 -2, excl. leklucht	G_2	m^3/s		03-06
- afvoertemperatuur van rookgassen	θ_1	$^{\circ}C$		03-06
- lekluchtstroom per ton gebakken produkt	Z	m^3/t		15
- factor in formule lekluchtverlies	U	kJ/kg		15
- schoorsteenverlies reactieprodukten	Q_R	kJ/kg		18
- enthalpie rookgassen bij afvoertemperatuur θ_1	h_{g1}	kJ/m^3		03-06
- enthalpie van produkt aan uitgang oven	h_{w9}	kJ/kg		13
- enthalpie van tarra aan uitgang oven	h_{t9}	kJ/kg		13
- produktietempo van tarra	T	kg/s		47
- tempo wagenoppervlak	C	m^2/s		41
- enthalpie wagenplateau aan uitgang oven	h_{c9}	kJ/m^2		20
- temperatuur produkt aan uitgang oven	θ_9	$^{\circ}C$		13

Schoorsteenverliezen (S.V.) in kW

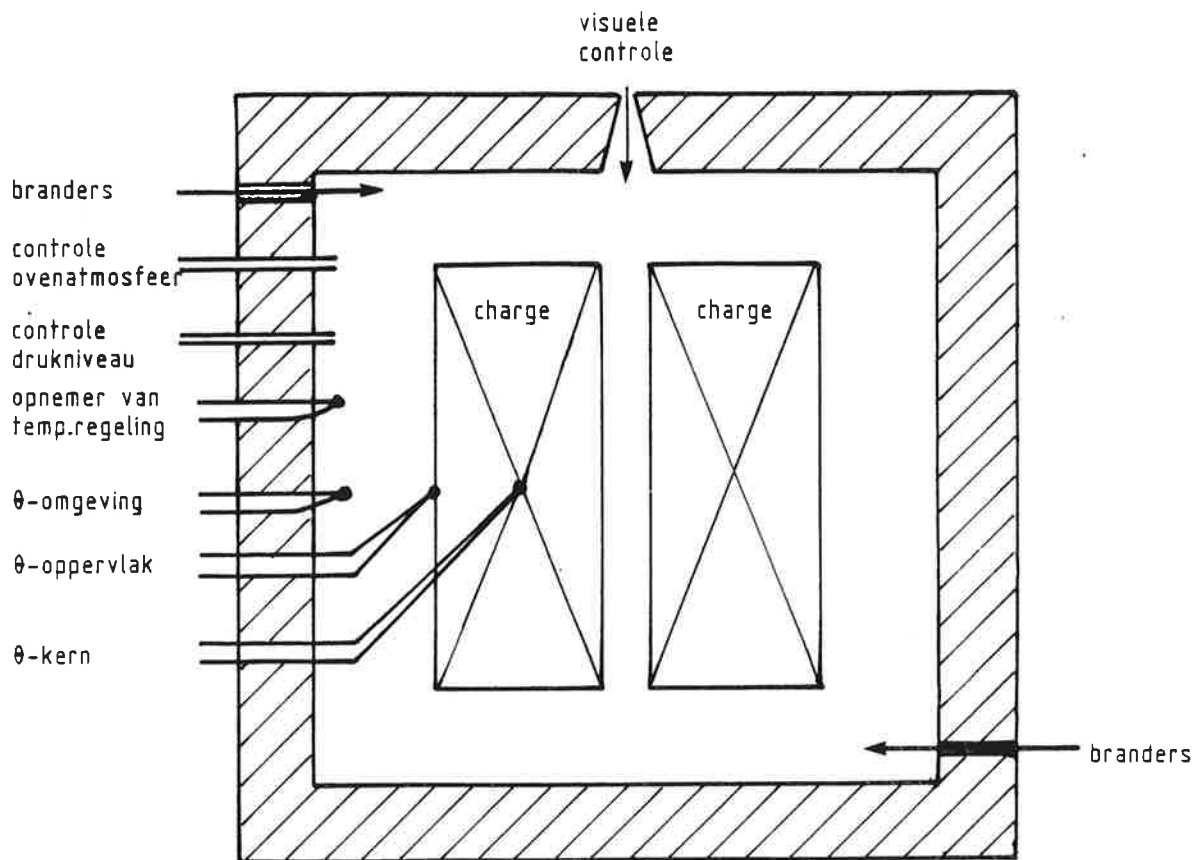
Omschrijving	formule	waarde
S.V. rookgas exclusief leklucht	$\varnothing_G = G_2 \cdot h_{g1}$	
S.V. leklucht	$\varnothing_L = P_n \cdot U$	
S.V. reactieprodukten	$\varnothing_R = P_n \cdot Q_R$	
Totaal schoorsteenverlies	$\Sigma \varnothing$	[kW]

Uitrijverliezen (UV) in kW

Omschrijving	formule	waarde
U.V. produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot h_{w9}$	
U.V. tarra	$\varnothing_T = T \cdot h_{t9}$	
U.V. wagenbekleding	$\varnothing_C = C \cdot h_{c9}$	
Totaal uitrijverlies	$\Sigma \varnothing$	[kW]

Schoorsteenverliezen/uitrijverliezen
 Situatie No. ---

MT-TNO
 15961

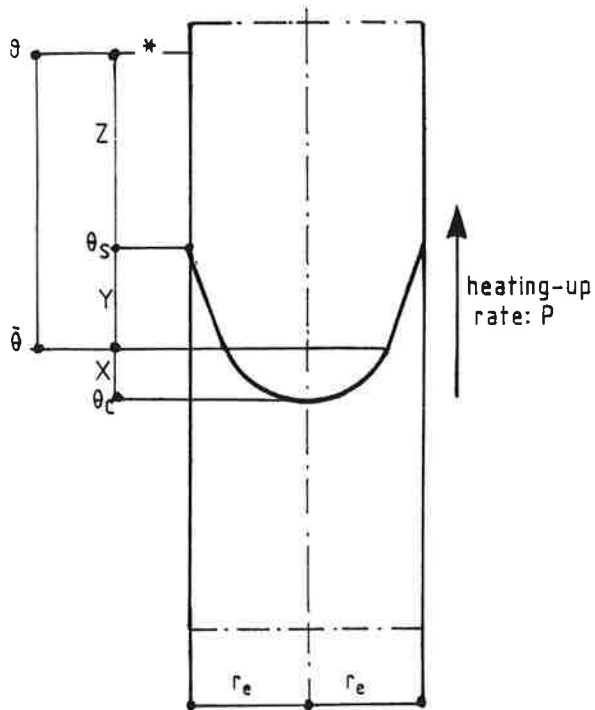


schema van een proefoven

In de geopteerde zetwijze van het produkt te bepalen:

- maximum toelaatbare opwarmingssnelheid ter specificatie van HM (zie blad 01)
- maximum toelaatbare koelsnelheid in het traject 700 — 450°C ter specificatie van CM
- optimale baktemperatuur en aanhoudtijd.
- bijzonderheden met betrekking tot de specificatie van het bakproces:
 - . atmosfeerkeuze
 - . voorkomen van sinterdeformatie
 - . restwatergehalte-specificatie
 - . bijzondere regime-specificaties ter waarborging van gewenste uiterlijke hoedanigheid en scherfstructuur
 - . voorkomen resp. beperken van uitslag of aanslag

Heating-up of slabs



$$S_s \cdot r_e = \frac{1}{f}$$

$$k/c_w = \frac{3 \cdot a \cdot \lambda \cdot f \cdot S_s^2}{(3 \cdot \lambda \cdot f \cdot S_s + a) \cdot c_w}$$

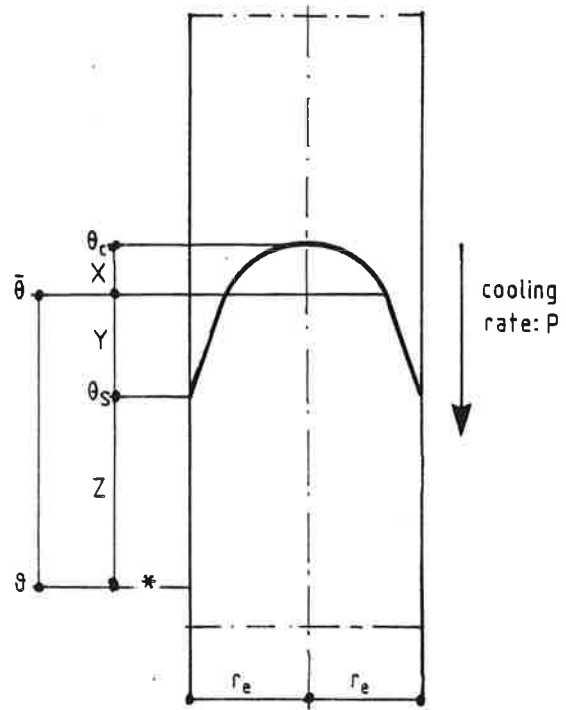
$$(\theta - \bar{\theta}) = \frac{P}{k/c_w}$$

$$(\theta_s - \bar{\theta}) = Y = \frac{P \cdot r_e^2}{3\alpha}$$

$$(\bar{\theta} - \theta_c) = X = \frac{1}{2} \cdot Y$$

$$(\theta - \theta_s) = Z = P \left(\frac{1}{k/c_w} - \frac{r_e^2}{3\alpha} \right)$$

Cooling of slabs



$$S_s \cdot r_e = \frac{1}{f}$$

$$k/c_w = \frac{3 \cdot a \cdot \lambda \cdot f \cdot S_s^2}{(3 \cdot \lambda \cdot f \cdot S_s + a) \cdot c_w}$$

$$(\bar{\theta} - \theta) = \frac{P}{k/c_w}$$

$$(\bar{\theta} - \theta_s) = Y = \frac{P \cdot r_e^2}{3\alpha}$$

$$(\theta_c - \bar{\theta}) = X = \frac{1}{2} \cdot Y$$

$$(\theta_s - \theta) = Z = P \left(\frac{1}{k/c_w} - \frac{r_e^2}{3\alpha} \right)$$

θ = gas temperature	[°C]
$\bar{\theta}$ = average temperature	[°C]
θ_s = surface temperature	[°C]
θ_c = centre temperature	[°C]
P = heating-up (cooling) rate	[K/s]
r_e = equivalent half thickness	[m]
a = heat transmission coefficient	[W/(m²K)]

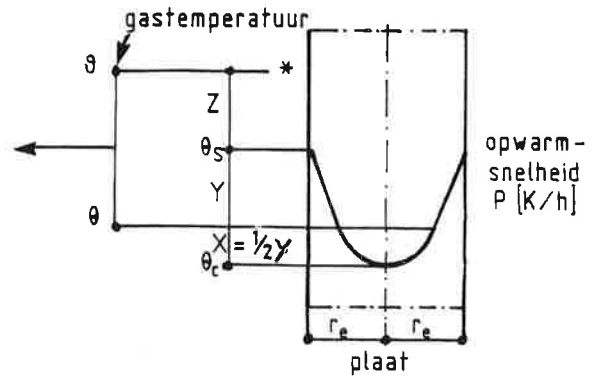
λ = thermal conductivity	[W/(m.K)]
f = density of slab	[kg/m³]
S_s = specific heat exchange surface	[m²/kg]
α = diffusivity	[m²/s]
c_w = specific heat of ware	[J/(kg.K)]
k = overall heat transfer coefficient	[W/kg.K]

massiek warmteuitwisselingsoppervlak, reeks, $r = \sqrt{10}$

equivalente halve dikte van materiaal

warmteoverdrachtsfactor

reeks, $r = \sqrt{10}$



S_s $10^{-3} \text{m}^2/\text{kg}$	r_e mm	$k/cw =$ K $10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$	$\theta - \bar{\theta}$		40	50	63	80	100	125	160	200
			Y °C	P K/h								
5	118	40	Y°C	21	26	33	42	52	65	83	104	
			P K/h	6	8	10	13	16	20	26	32	
6,3	93	56	Y°C	19	24	30	38	47	59	76	94	
			P K/h	9	12	15	19	23	29	37	47	
8	74	91	Y°C	16	20	26	33	41	51	66	82	
			P K/h	13	16	21	26	33	41	52	66	
10	59	122	Y°C	14	18	22	28	35	44	56	70	
			P K/h	18	22	28	35	44	55	70	88	
12,5	47	162	Y°C	12	15	19	24	30	37	48	60	
			P K/h	23	29	37	47	58	73	93	117	
16	37	221	Y°C	10	12	16	20	25	31	40	50	
			P K/h	32	40	50	64	80	99	127	159	
20	29	294	Y°C	8	11	13	17	21	26	34	42	
			P K/h	42	53	67	85	88	132	169	212	
25	24	382	Y°C	7	9	11	14	18	22	28	35	
			P K/h	55	69	87	110	138	172	220	275	

vuistregel: $K = k/cw = \frac{9700 - 38 \cdot r}{r} \cdot 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$ (voor: $5 \leq S_s \leq 25$)

$P = 3600 \cdot K \cdot (\theta - \bar{\theta}) [\text{K/h}]$

Matrix voor de schatting van $HM = (\theta - \bar{\theta})$ in de opwarmzone
 $\alpha = 400 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$; $\rho = 1700 \text{kg}/\text{m}^3$

MT-TNO
15961

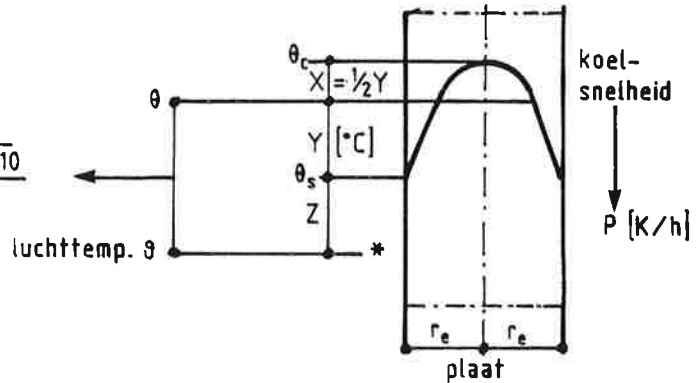
massiek warmteuitwisselingsoppervlak, reeks, $r = \sqrt[10]{10}$

equivalente halve dikte van materiaal

warmteoverdrachtsfactor

reeks, $r = \sqrt[10]{10}$

luchttemp. ϑ



S_s $10^{-3} \text{m}^2/\text{kg}$	r_e mm	$k/cw =$ K $10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{\theta} - \vartheta$		40	50	63	80	100	125	160	200
			Y °C	P K/h								
5	118	40	Y°C	18	23	29	37	46	58	74	92	
			P K/h	6	7	9	12	14	18	23	29	
6,3	93	56	Y°C	16	20	26	33	41	51	65	81	
			P K/h	8	10	13	16	20	25	32	40	
8	74	78,5	Y°C	14	18	22	28	35	44	57	71	
			P K/h	11	14	18	23	28	35	45	56	
10	59	104	Y°C	12	15	19	24	30	38	48	60	
			P K/h	15	19	24	30	37	47	60	75	
12,5	47	138	Y°C	10	13	16	20	26	32	41	51	
			P K/h	20	25	32	40	50	62	80	99	
16	37	187	Y°C	8	10	13	17	21	26	34	42	
			P K/h	27	34	42	54	67	84	108	135	
20	29	244	Y°C	7	9	11	14	18	22	28	35	
			P K/h	35	44	55	70	88	110	140	176	
25	24	320	Y°C	6	7	9	12	15	18	24	30	
			P K/h	46	58	73	92	115	144	184	230	

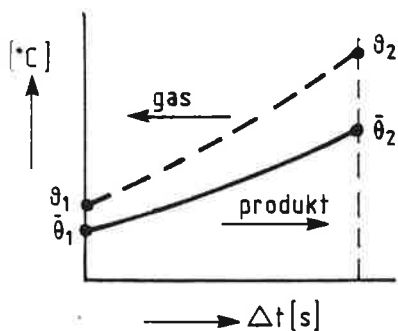
vuistregel: $K = k/cw = \frac{8000 - 28 \cdot r}{r} \cdot 10^{-6} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ (voor: $5 \leq S_s \leq 25$)

$P = 3600 \cdot K \cdot (\bar{\theta} - \vartheta) \text{ [K/h]}$

Matrix voor de schatting van $CM = (\bar{\theta} - \vartheta)$ in de koelzone
 $\alpha = 400 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$; $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$

MT-TNO
15961

oven No	zone	sectie	zetwijze	S_g [m ² /kg]	k/cw [S ⁻¹]
voorwarmzone			koelzone		
$(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2) = (\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1) \cdot e^{-\frac{(1-n) \cdot k/cw \cdot \Delta t}{Z}}$			$(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2) = (\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1) \cdot e^{\frac{(1-n) \cdot k/cw \cdot \Delta t}{Z}}$		
$\bar{\vartheta}_1$ ϑ_1 $(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)$	$\bar{\vartheta}_2$ ϑ_2 $(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)$	ϑ_2 ϑ_1 $\Delta \vartheta$	$\bar{\vartheta}_2$ $\bar{\vartheta}_1$ $\Delta \bar{\vartheta}$	$\eta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \bar{\vartheta}}$ (1-n)	
$\frac{(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)}{(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)} = e^Z =$		Z =	=	Δt	$\Delta t =$
$\bar{\vartheta}_1$ ϑ_1 $(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)$	$\bar{\vartheta}_2$ ϑ_2 $(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)$	ϑ_2 ϑ_1 $\Delta \vartheta$	$\bar{\vartheta}_2$ $\bar{\vartheta}_1$ $\Delta \bar{\vartheta}$	$\eta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \bar{\vartheta}}$ (1-n)	
$\frac{(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)}{(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)} = e^Z =$		Z =	=	Δt	$\Delta t =$
$\bar{\vartheta}_1$ ϑ_1 $(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)$	$\bar{\vartheta}_2$ ϑ_2 $(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)$	ϑ_2 ϑ_1 $\Delta \vartheta$	$\bar{\vartheta}_2$ $\bar{\vartheta}_1$ $\Delta \bar{\vartheta}$	$\eta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \bar{\vartheta}}$ (1-n)	
$\frac{(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)}{(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)} = e^Z =$		Z =	=	Δt	$\Delta t =$
$\bar{\vartheta}_1$ ϑ_1 $(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)$	$\bar{\vartheta}_2$ ϑ_2 $(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)$	ϑ_2 ϑ_1 $\Delta \vartheta$	$\bar{\vartheta}_2$ $\bar{\vartheta}_1$ $\Delta \bar{\vartheta}$	$\eta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \bar{\vartheta}}$ (1-n)	
$\frac{(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)}{(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)} = e^Z =$		Z =	=	Δt	$\Delta t =$
$\bar{\vartheta}_1$ ϑ_1 $(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)$	$\bar{\vartheta}_2$ ϑ_2 $(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)$	ϑ_2 ϑ_1 $\Delta \vartheta$	$\bar{\vartheta}_2$ $\bar{\vartheta}_1$ $\Delta \bar{\vartheta}$	$\eta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \bar{\vartheta}}$ (1-n)	
$\frac{(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)}{(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)} = e^Z =$		Z =	=	Δt	$\Delta t =$
$\bar{\vartheta}_1$ ϑ_1 $(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)$	$\bar{\vartheta}_2$ ϑ_2 $(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)$	ϑ_2 ϑ_1 $\Delta \vartheta$	$\bar{\vartheta}_2$ $\bar{\vartheta}_1$ $\Delta \bar{\vartheta}$	$\eta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \bar{\vartheta}}$ (1-n)	
$\frac{(\bar{\vartheta}_2 - \vartheta_2)}{(\bar{\vartheta}_1 - \vartheta_1)} = e^Z =$		Z =	=	Δt	$\Delta t =$



Berekening van het temperatuurverloop in de voorwarm- en koelzone van een tunneloven.

MT-TNO
15961

eigenschappen	eenheid	massa A	massa B
1 <u>grondstof</u>			
1.1 <u>partiële chemische analyse</u>	% (m/md)		
Al ₂ O ₃ _____		10,0	8,0
Fe ₂ O ₃ _____		3,7	2,5
CaO (uit carbonaat) _____		12,3	1,0
CO ₂ (uit carbonaat) _____		9,6	0,8
organische stof _____		1,0	0,5
gebonden water _____		2,8	2,1
gloeiverlies _____		13,4	3,4
1.2 <u>korrelgrootteverdeling</u>	% (m/md)		
fractie < 20 µm _____		50	36
fractie < 10 µm _____		38	23
fractie < 2 µm _____		18	13
1.3 <u>specifiek oppervlak (glycol-retentie)</u>	m ² /g	70	40
1.4 <u>determinanten</u>	_____		
Fe ₂ O ₃ /CaO _____		0,30	2,50
spec.oppervlak/fr.<10 µm _____		1,84	1,74
2 <u>vormgeving</u>			
vormmethode _____			
steentype _____			
oppervlaktegeaardheid _____			
vormgevingswatergehalte _____			
Pfefferkornresthoogte bij vormgeving _____			
	% (m/md) mm	vormbakprocédé. "waalformaat" vlak, bezand. 30±1 6±1	23±1 6±1
3 <u>droging</u>			
droge massa per steenvormeling _____	kg	2,02	1,81
volumieke massa van de droge scherf _____	kg/m ³	1960	1760
gemiddelde afmetingen van gedroogde steen _____	mm	212 x 101 x 50,5	
droogkrimp _____	%(L/L)	7,5	3,0
droogtijd _____	h	44±2	20±2
restwatergehalte _____	%(m/md)	3,5±1,5	3,5±1,5
4 <u>nadrogen + voorwarmen</u>			
restwatergehalte _____	%(m/md)	1,5±0,5	1,5±0,5
eindtemperatuur van halffabrikaat _____	°C	75	75
5 <u>bakken</u>			
massa van gebakken steen _____	kg	1,75	1,75
volumieke massa van gebakken steen _____	kg/m ³	1700	1700
gemiddelde afmetingen van gebakken steen _____	mm	210 x 100 x 50	
baktemperatuur _____		1075 ± 10°C	
bakkrimp _____	%(L/L)	1,0	1,0

Enkele basisgegevens van grondstoffen en bewerkingen.

MT-TNO
15961

gegevens	eenheid	oven No I (bladzetting)	oven No II (openzetting)
kritieke halve dikte van de zetting	mm	106	50,5
warmteoverdrachtsfactor K (ref. blad 34)	$10^{-6}S^{-1}$	47,5	130,4
voorkeurwaarde ($\vartheta_0 - \theta_0$)	$^{\circ}C$	31,5	31,5
voorwarmtijdsduur (ref. blad 02)	h	13,8	5,0
inlaattemperatuur van lucht	$^{\circ}C$	95	95
uitlaattemperatuur van lucht	$^{\circ}C$	46,5	46,5
begintemperatuur van produkt	$^{\circ}C$	15	15
eindtemperatuur van produkt	$^{\circ}C$	75	75

Specificatie van temperatuurverloop in de luchtgevoede voorwarmtunnel

MT-TNO
15961

gegevens	eenheid	oven No I (bladzetting)	oven No II (open zetting)
<u>voorwarm-en stookzone</u>			
kritieke halve dikte van de zetting	mm	106	50,5
warmteoverdrachtsfactor K (ref.blad 33)	$10^{-6}S^{-1}$	53,5	154,1
rookgasafvoer-model GEM	$^{\circ}C$	50	40
begintemperatuur stookzone θ_2	$^{\circ}C$	675	675
opwarmmodul, HM	$^{\circ}C$	160	80
voorwarmtijdsduur Δt in srctie 1 - 2	h	32,9	18,7
voorvuurtijdsduur Δt in sectie 2 - 3	h	7,8	7,2
hoofdvuurtijdsduur Δt in sectie 3 - 4	h	5,0	1,7
hoofdvuurtijdsduur Δt in sectie 4 - 5	h	<u>11,8</u>	<u>4,1 + 1,8* = 5,9</u>
tijdsduur voorwarmen + stoken	h	57,5	33,5
<u>koelzone</u>			
kritieke halve dikte van zetting	mm	105	50
warmteoverdrachtsfactor K (ref.blad 34)	$10^{-6}S^{-1}$	48,2	132
vuurintrede-modul FEM	$^{\circ}C$	nader te bepalen	
snelkoel-modul RCM	$^{\circ}C$	200	125
koelmodul CM	$^{\circ}C$	100	50
uitrijmodul WEM	$^{\circ}C$	80	40
snelkoelheidsduur Δt in sectie 5 - 6	h	12,2	7,2
tijdsduur tussenkoeling Δt in sectie 6 - 7	h	6,0	5,8
tijdsduur tussenkoeling Δt in sectie 7 - 8	h	15,4	7,7
tijdsduur eindkeeling Δt in sectie 8 - 9	h	<u>8,9</u>	<u>5,5</u>
tijdsduur koelen	h	42,5	26,2
effectieve baktijd	h	100,0	59,7

* extra tijd gekozen ter afstemming van de ovenproducties

omschrijving	symbool	eenheid	getal- waarde	referte, blad No
produktietempo van gebakken produkt	P_n	kg/s		41
produktietempo van tarra van charge	T	kg/s		47
tempo van wagenoppervlak	C	m ² /s		41
enthalpie toename van produkt	$\Delta h'_p$	kJ/kg(n)		02
enthalpie toename van tarra	Δh_T	kJ/kg		02
warmtevoevoer aan wagenplateau in sectie 0 - 1	ΔQ_S	kJ/m ²		19
warmtetransport door tunnelzijwanden	\varnothing_w	kW		14,41
warmtetransport door tunnelplafond	\varnothing_r	kW		14,41
reactiewarmtesaldo per kg produkt	ΔH	kJ/kg		18
enthalpieafname van lucht	Δh_g	kJ/m ³		02

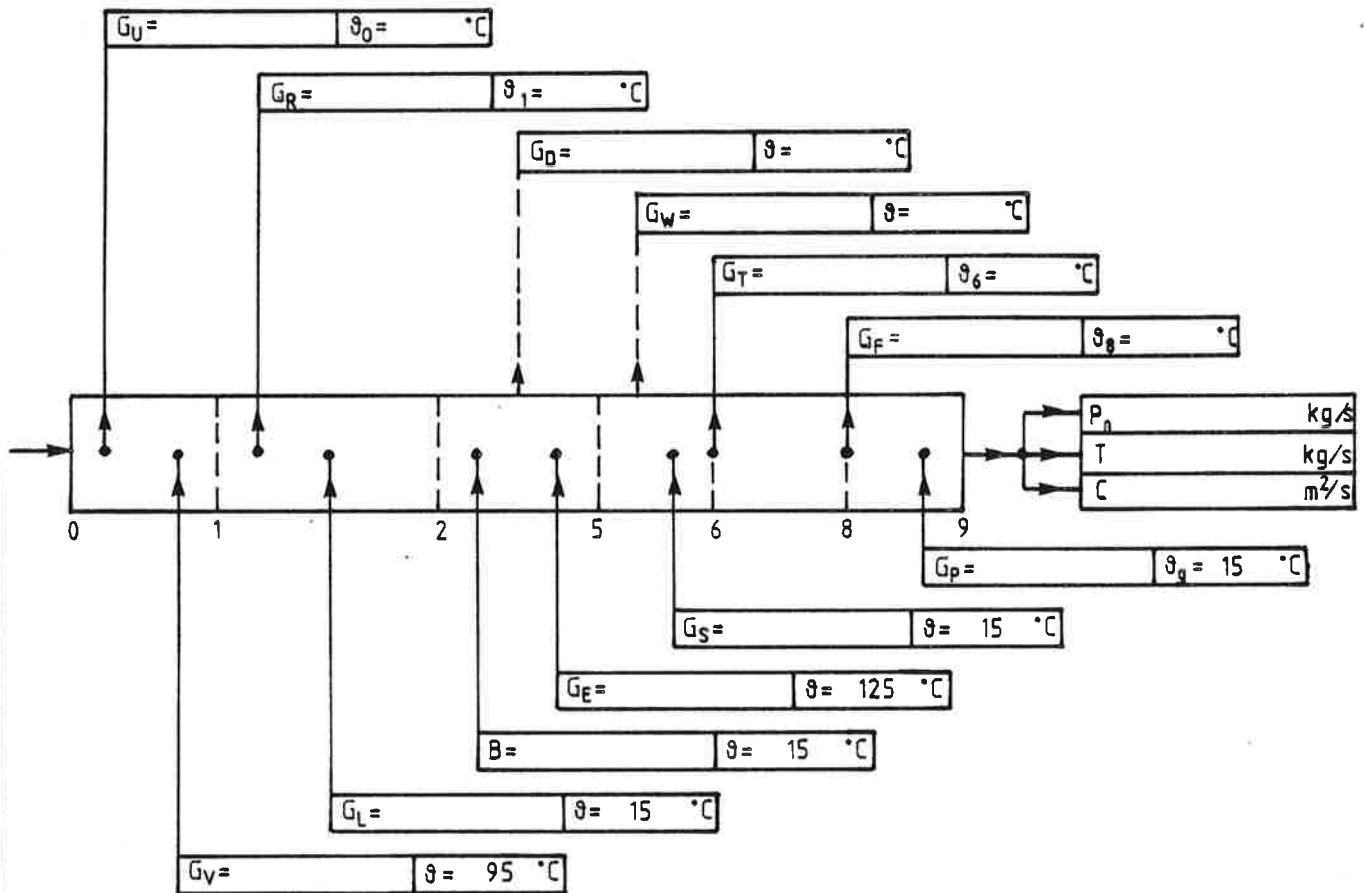
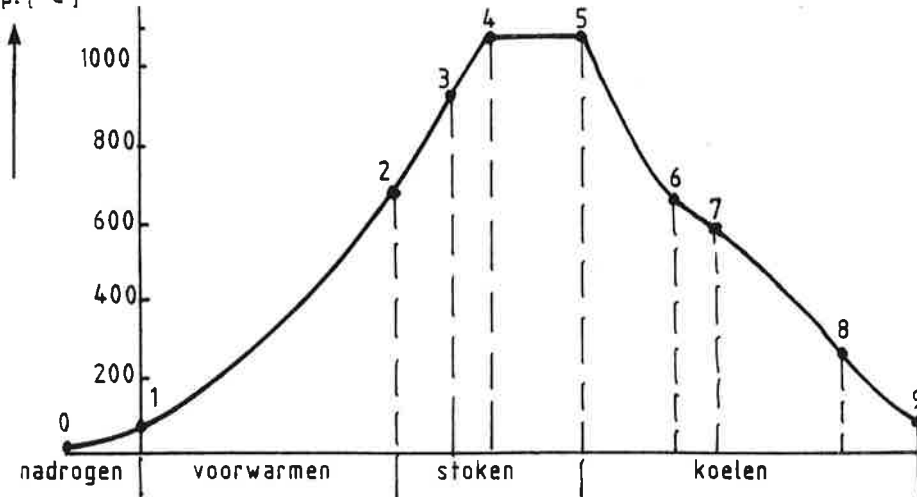
warmteafgifte van lucht in sectie 0 - 1 in kW

omschrijving	formule	waarde
opwarmen van produkt	$\varnothing_p = P_n \cdot \Delta h'_p$	+
opwarmen van tarra	$\varnothing_T = T \cdot \Delta h_T$	+
reactiewarmte	$\varnothing_H = P_n \cdot \Delta H$	+
warmteconsumptie van de wagens	$\varnothing_S = C \cdot \Delta Q_S$	+
warmtetransport door zijwanden	\varnothing_w	+
warmtetransport door plafond	\varnothing_r	+
totale warmtebehoefte in sectie 0 - 1	$\Sigma \varnothing$	
equivalente bruto produktstroom	$P_B = \frac{\Sigma \varnothing}{\Delta h_T}$	[kg/s]
luchtstroom	$G_L = \frac{\Sigma \varnothing}{\Delta h_g}$	[m ³ /s]

Warmte- en stofstromen in de voorwamtunnel (sectie 0 - 1)
Situatie No:

MT-TNO
15961

produkt-
temp. [°C]



toegevoerd m ³ /s (i.n.)		afgevoerd m ³ /s (i.n.)	
Gv	voorwarmlucht	Gu	afgewerkte voorwarmlucht
Gl	leklucht voorwarmzone	GR	schoorsteengas
B	aardgasverbruik	Go	koellucht van hangdek
Ge	externe verbrandingslucht	Gw	koellucht van wielstellen
Gs	snelkoellucht	Gt	overschot koellucht tussenkoeling
Gp	verse koellucht	Gf	overschot koellucht, eindkoeling
Pn	produktstroom in kg/s		
T	tarrastroom in kg/s		
C	voortgang wagenoppervlak m ² /s		

Toe- en afgevoerde stofstromen
situatie No. _____

MT-TNO
15961

1	<u>Uittreksel van bedrijfsplan</u>					
1.1	soort te bakken stenen		vormbakstenen			
1.2	steenafmetingen		"Waalformaat" 210×100×50mm			
1.3	massa per steen, gebakken		1,75 kg			
1.4	grondstofsoort		massa A of massa B (ref.blad 36)			
1.5	te installeren oventype		wagentunneloven, verticale stookspieten			
1.6	brandstofsoort		Gronings aardgas			
1.7	geplande ovenproduktie per 168h		ca. 1,16 mln bakstenen per week.			
2	Tunneloven		No I bladzetting		No II open carré zetting	
	technische gegevens	eenheid	waarde	ref.blad	waarde	ref.blad
2.1	zetpatroon	-	bladen	45,46	pakketten	43-45
2.2	initiële hoogte van charge	mm	960	45	1414	42,43
2.3	hoogte lading-ondersteuning	mm	105	47	afwezig	-
2.4	ruimte boven ladingtop	mm	85	-	86	-
2.5	hoogte van oven, inwendig	mm	1150	-	1500	-
2.6	hoogte wagenplateau boven rail	mm	900	-	900	-
2.7	breedte van oven, inwendig	mm	8900	46	8900	44
2.8	lengte wagenchassis	mm	6480	46	6480	44
2.9	aantal bakeenheden per wagen	-	4	46	6	44
2.10	steek van bakeenheden	mm	1620	46	1080	44
2.11	aantal stenen per wagen	-	26496	46	24192	44
2.12	massa gebakken produkt per wagen	t	46,37	46	42,34	44
2.13	effectief aantal wagens in oven	-	26	-	17	-
2.14	effectieve ovenlengte	m	168,5	-	110	-
2.15	effectieve baktijd	h	100,-	38	59,7	38
2.16	produktie in wagens per week	w/w	43,7	-	47,8	-
2.17	produktie stenen per week	10 ⁶ st/w	1,157	-	1,157	-
2.18	produktie in tonnen per week	t/w	2025,3	-	2025,3	-
2.19	produktie in m ² wagen/seconde	kg/s	3,35	-	3,35	-
2.20	produktie in m ² wagen/seconde	10 ⁻³ m ² /s	4,165	-	4,562	-
3	Luchtgevoede voorwarmtunnel		No I		No II	
	technische gegevens	eenheid	waarde	ref.blad	waarde	ref.blad
3.1	voorwarmtijd, gemiddeld	h	13,8	37	5,0	37
3.2	equivalent aantal wagens	st	3,59	-	1,42	-
3.3	max. aantal wagens in tunnel	st	4	-	2	-
3.4	lengte voorwarmer, ca	m	26	-	13	-
Technische gegevens van twee wagentunnelovens					MT-TNO 15961	
41						

type of bricks: "Waalformaat"

dimensions, dried: 212 x 101 x 50,5 mm

firing shrinkage $\leq 1\%$

mass, fired: 1,75 kg

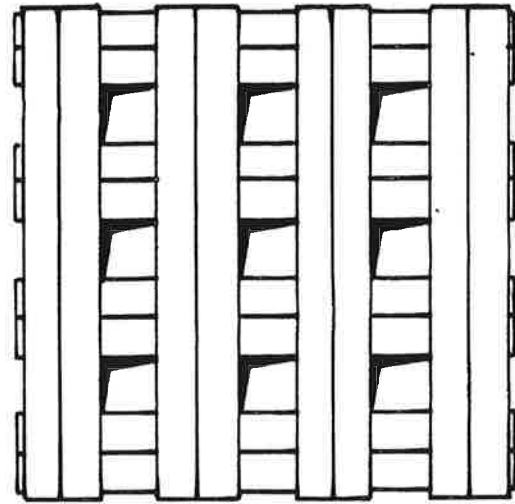
number per packet: 336 bricks

mass per packet, fired: 588,0 kg

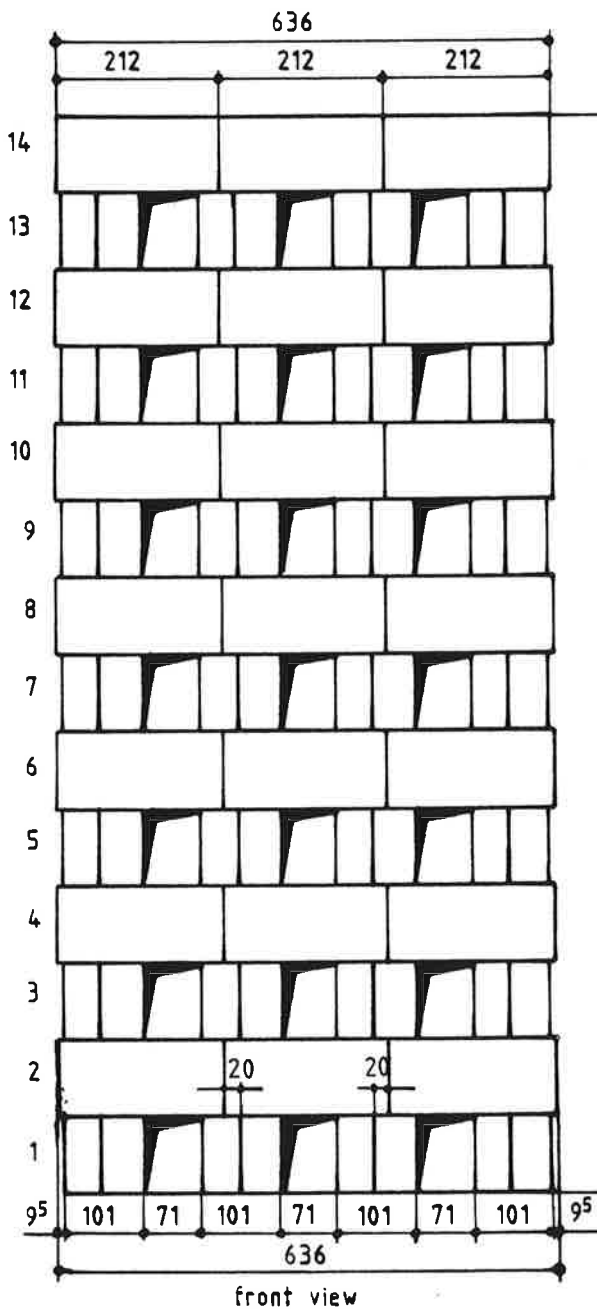
first layer load, fired: 0,033 N/mm²

initial heat exchange surface: 11,03 m²

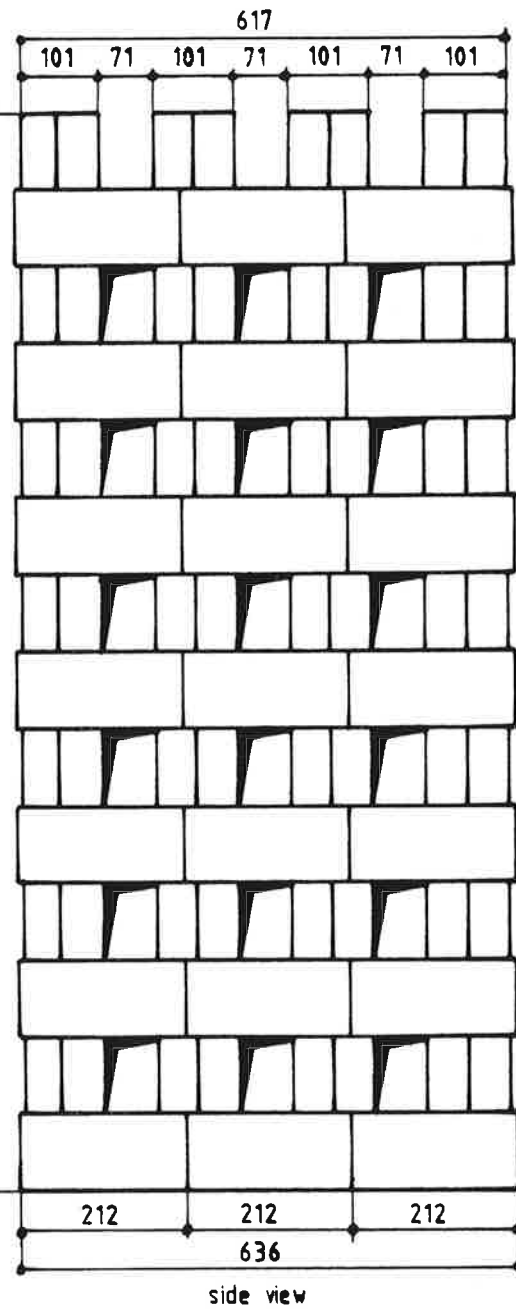
packet to be rearranged for shipment after firing.



top view



1414



forwarding direction in kiln. →

(dimensions in mm)

Open setting of "Waalformaat" facing bricks 4 x (3 x 2)

MT-TNO
15961

type of bricks: "Waalformaat"

dimensions, dried: 212 x 101 x 50,5 mm

firing shrinkage $\leq 1\%$

mass, fired: 1,75 kg

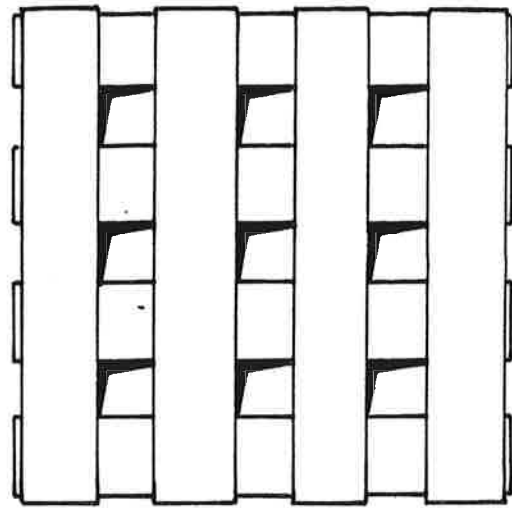
number per packet: 336 bricks

mass per packet, fired: 588,0 kg

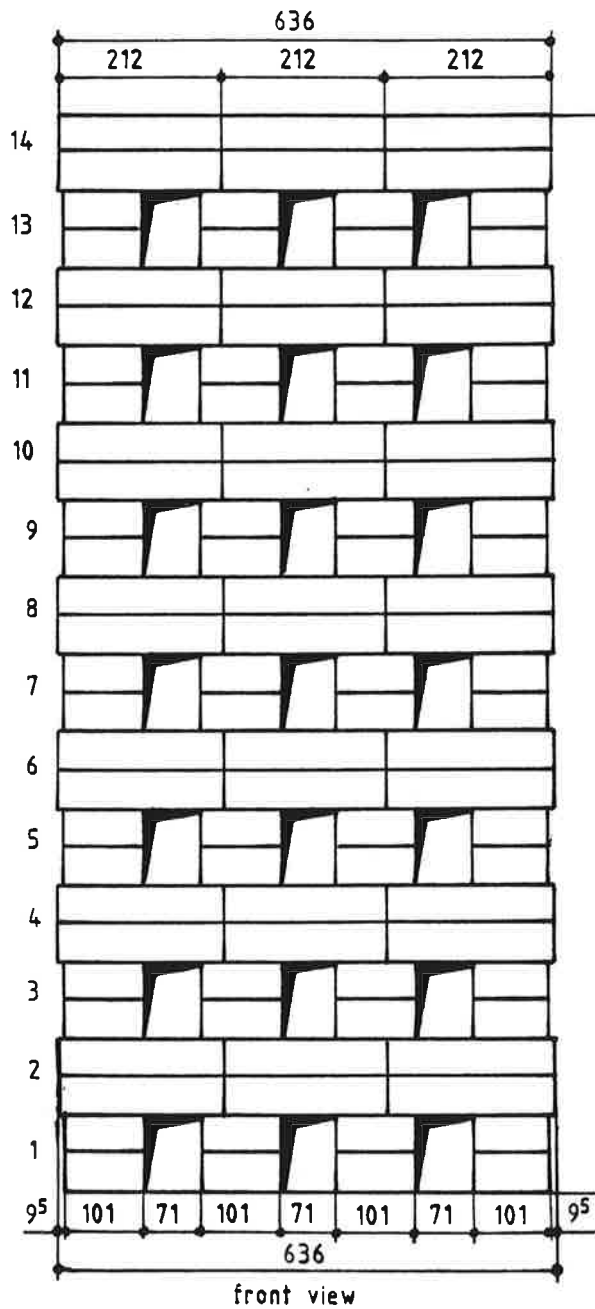
first layer load, fired: 0,033 N/mm²

initial heat exchange surface: 11,03 m²

packet to be rearranged for shipment after firing.

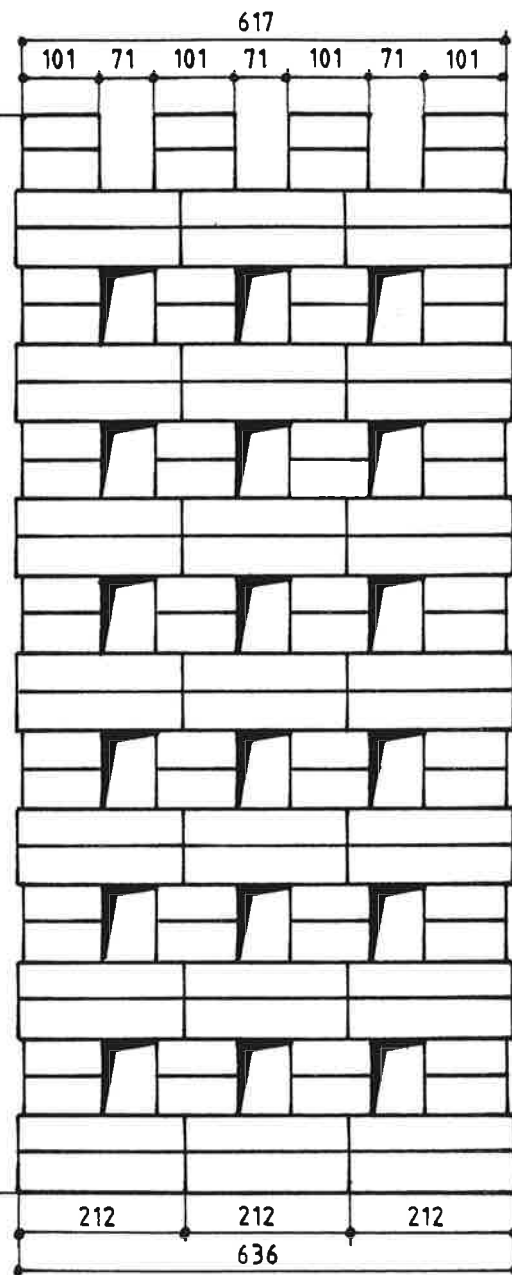


top view



front view

1414



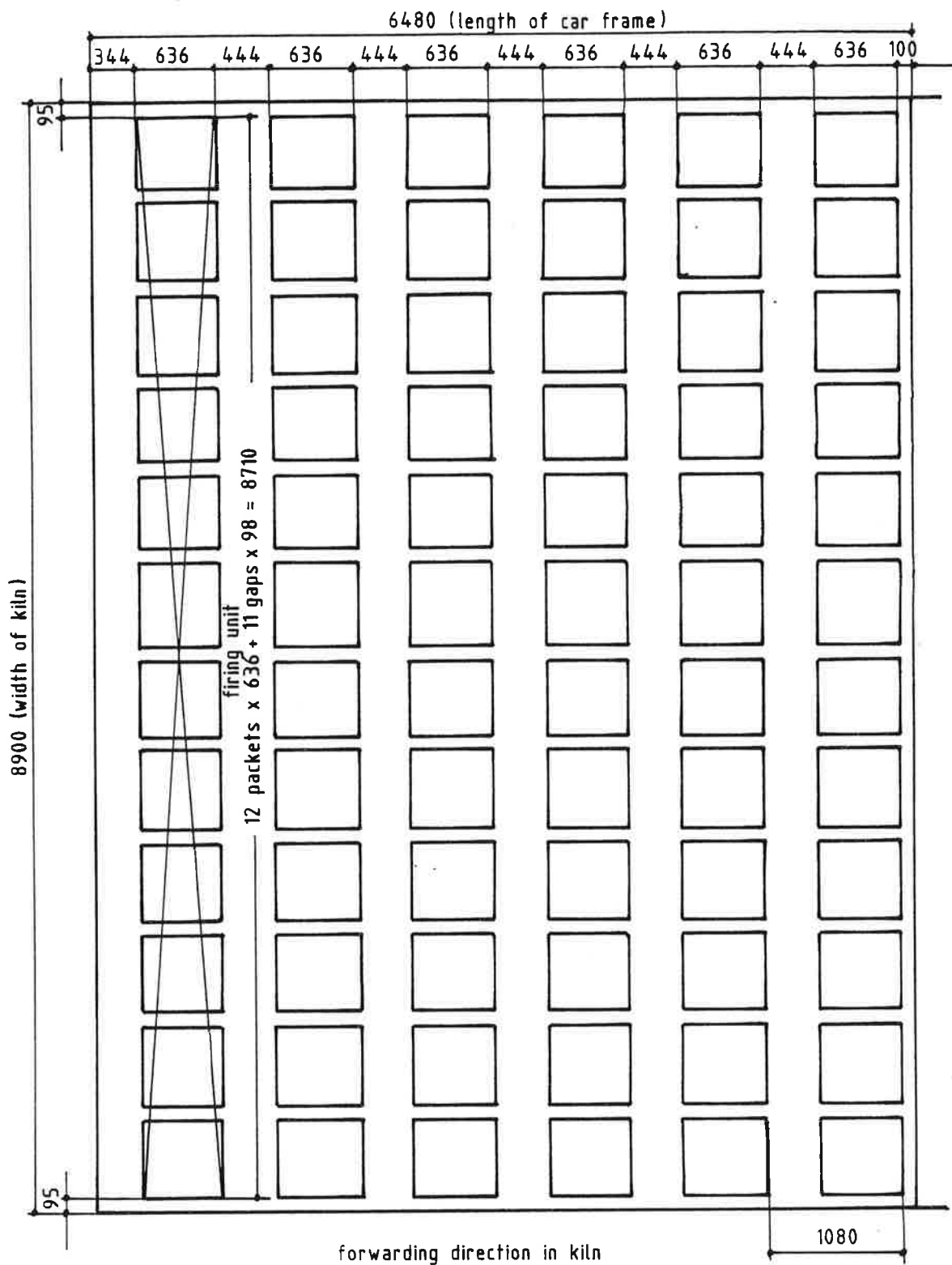
side view

(dimensions in mm)

forwarding direction in kiln. →

Open setting of "Waalformaat" facing bricks 4 x (3 x 2)

MT-TNO
15961



number of firing units per car: 6

number of packets per car: 72 packets

number of bricks per car: 24192 bricks

car load, fired: 42,34 t

gross floor area per car: 57,67 m²

mass of fired products per m²: 0,7342 t/m²

(dimensions in mm)

Positioning of car load for open setting of Waalformaat bricks in packets.

MT-TNO
15961

type of bricks: "Waalformaat"

dimensions, dried: 212 x 101 x 50,5 mm

firing shrinkage: $\pm 1\%$

mass fired: 1,75 kg.

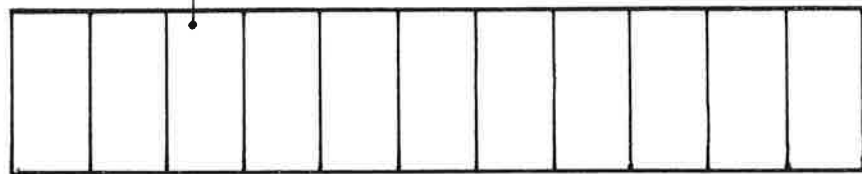
number per blade: 207

mass per blade: fired: 362,2 kg

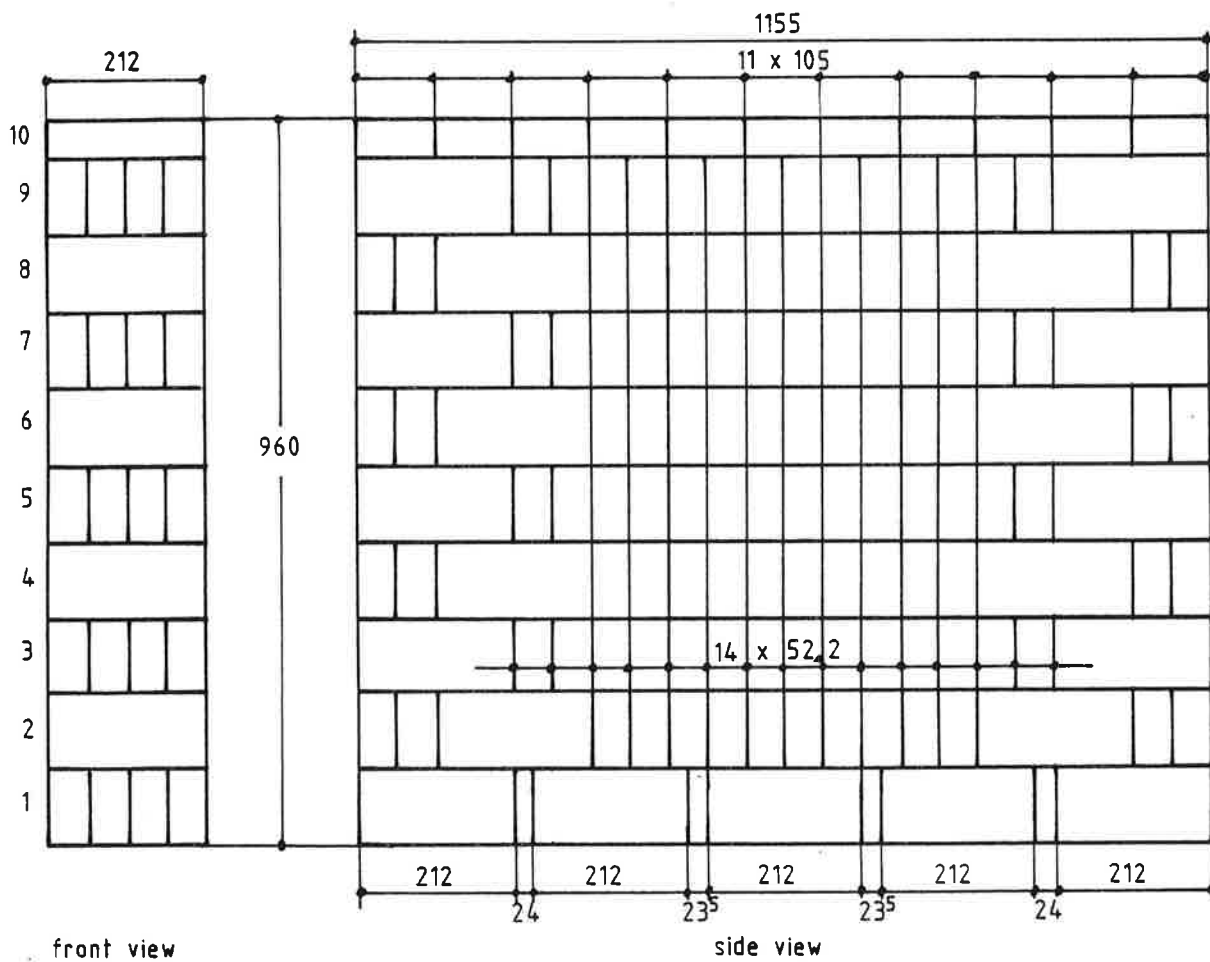
first layer-load, fired: 0,015 N/mm²

initial heat exchange surface: 3,08 m²

top layer to be rearranged after firing
-in case of HULO-shipment



top view



front view

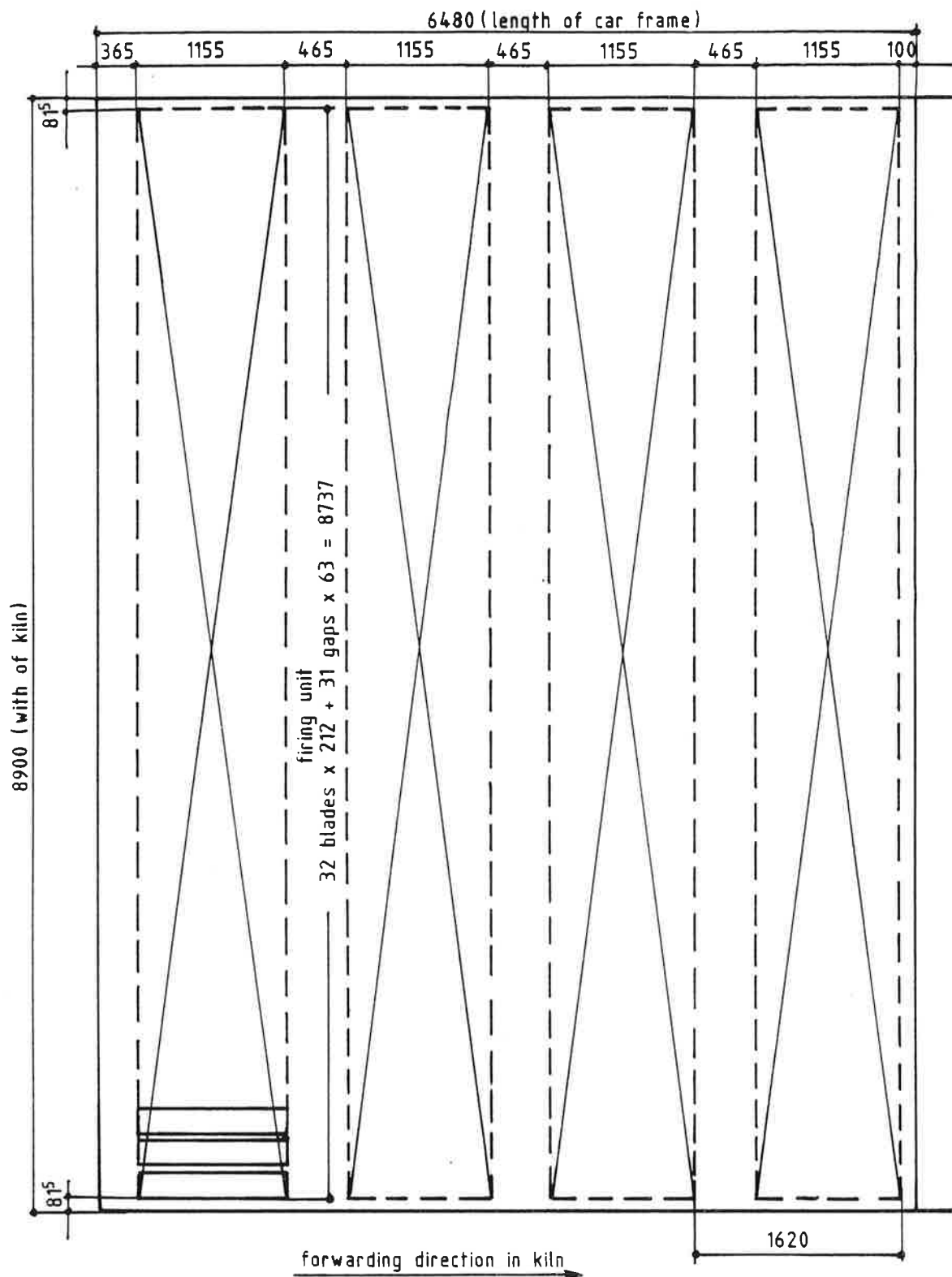
side view

forwarding direction in kiln

(dimensions in mm)

Dense blade setting of "Waalformaat" facing bricks.

MT-TNO
15961



number of firing units per car: 4

number of blades per car: 128 blades

number of bricks per car: 26496 bricks

car load, fired: 46,37 t.

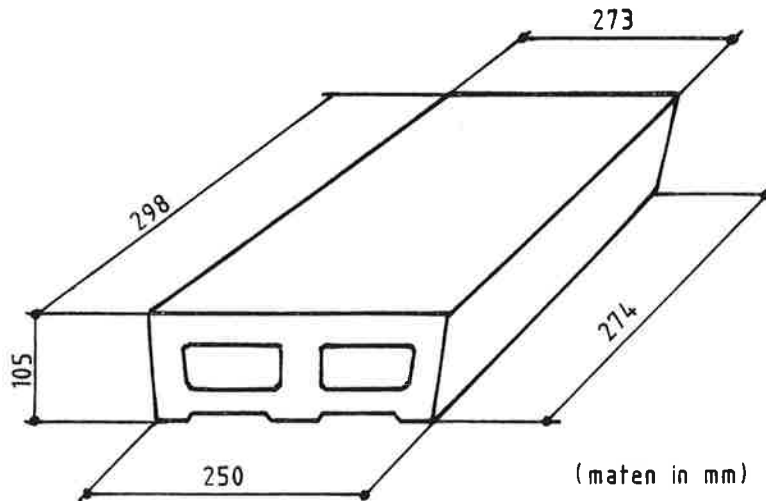
gross floor area per car: 57,67 m²

mass of fired products per m²: 0,8041 t/m²

(dimensions in mm)

Positioning of car load for blade setting of "Waalformaat" bricks

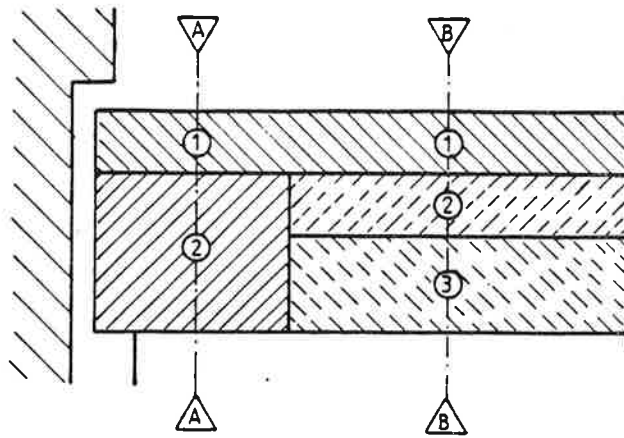
MT-TNO
15961.



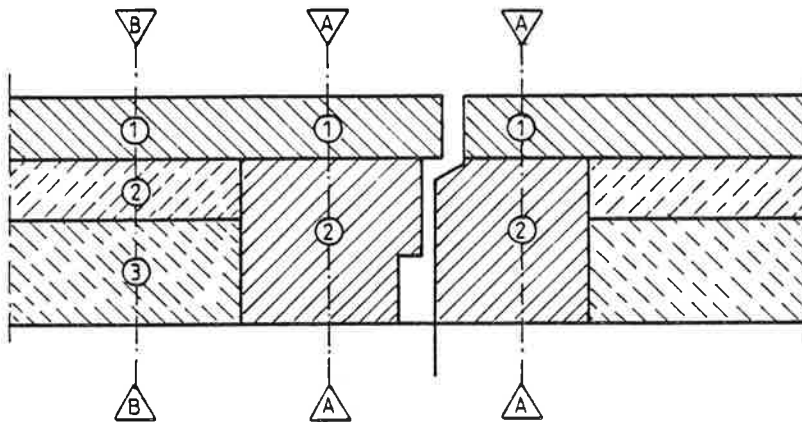
voetsteen, massa per stuk: 10,9 kg

Voetstenen voor bladzetting op ovenwagens 8,90 x 6,48 m

aantal in breedte van ovenwagen	32 st
aantal in lengte van ovenwagen (4 x 4)	16 st
aantal per wagen totaal	512 st
tarra per wagen	5580 st
vrij bovenzvlak van voetstenen per wagen	11 m ²
overig vrij oppervlak van voetstenen per wagen ~	118 m ²
vrij bovenzvlak per wagen naast de voetstenen ~	15 m ²
warmteuitwisselingsoppervlak	~ 394 m ²
charge per wagen	~ 46370 kg
tarragetal	0,12
wagentempo: in wagens per seconde	72,2 · 10 ⁻⁶ w/s
produktietempo van tarra	0,40 kg/s

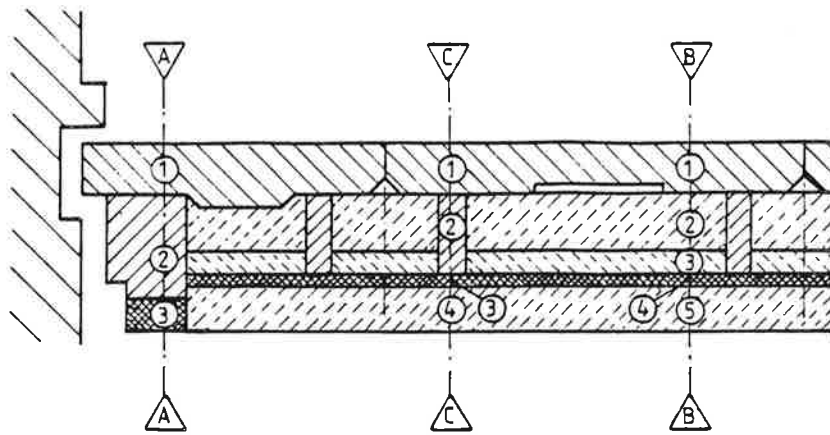


Dwarsdoorsnede

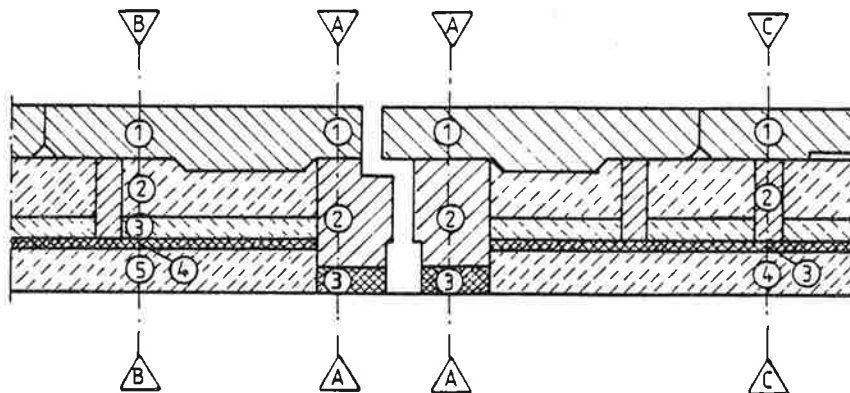


← Rijrichting
Langsdoorsnede

Wagen 0			L: 6,48 m	B: 8,90 m	0: 57,67 m ²	D: 350 mm
door-snede	oppervlak %	laag No	dikte mm	soort		dichtheid kg/m ³
A	13	1	100	dekplaat randsteen		2100
		2	250			2000
B	87	1	100	dekplaat iso-massa iso-massa		2100
		2	100			1100
		3	150			600

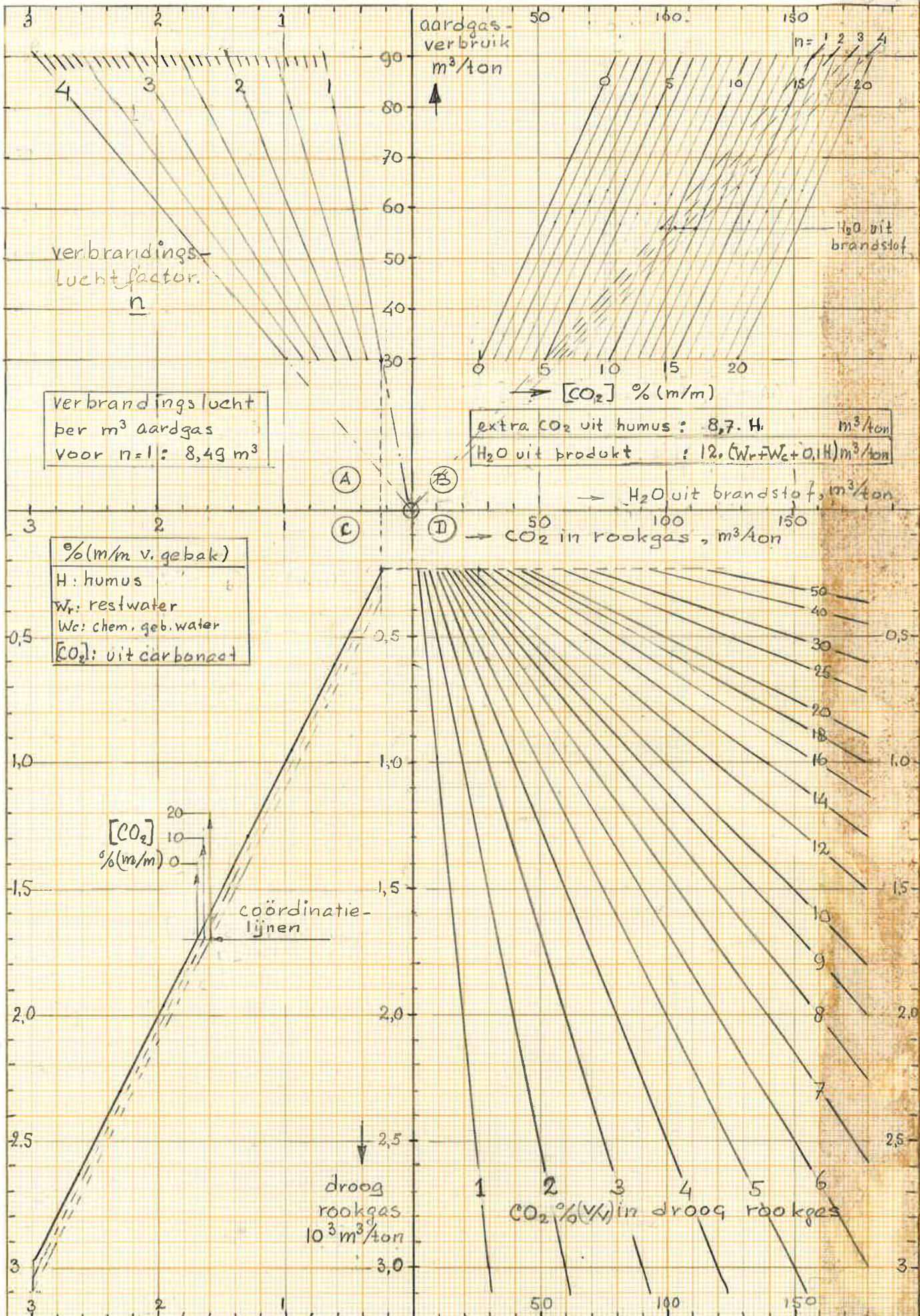


Dwarsdoorsnede

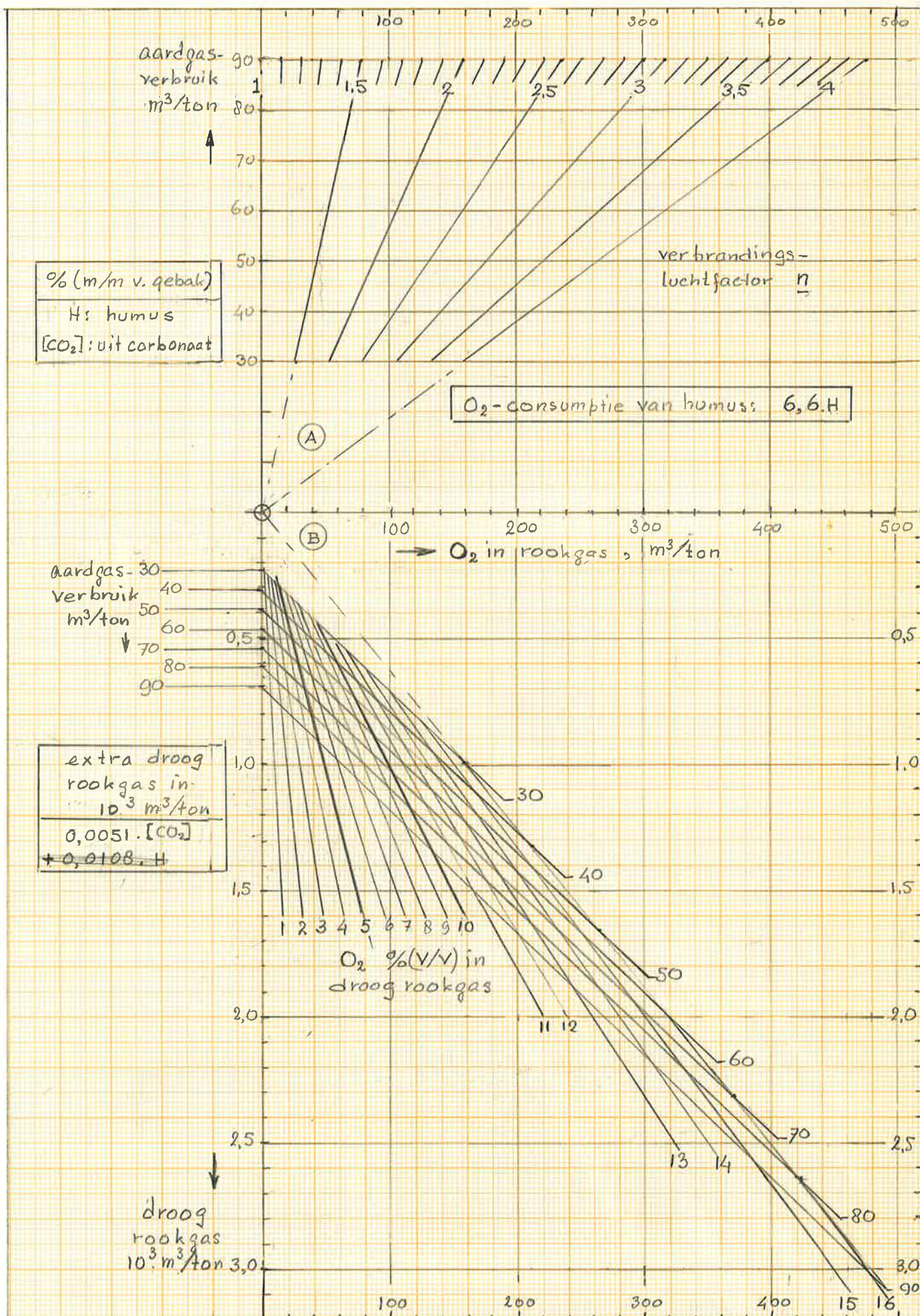


→ Rijrichting
Langsdoorsnede

Wagen <u>N</u>			L: 6,48m	B: 8,90 m	O: 57,67 m ²	D: 300 mm
door-snede	oppervlak %	laag No	dikte mm	soort		dichtheid kg/m ³
A	10	1	80	dekplaat randsteen microtherm	1700 1500 240	
		2	170			
		3	50			
B	78	1	80	dekplaat iso-massa iso-massa microtherm iso-plaat iso-massa	1700 600 260 240 800	
		2	90			
		3	30			
		4	25			
		5	75			
C	12	1	80	dekplaat steunblok microtherm iso-plaat iso-massa	1700 1000 240 800	
		2	120			
		3	25			
		4	75			

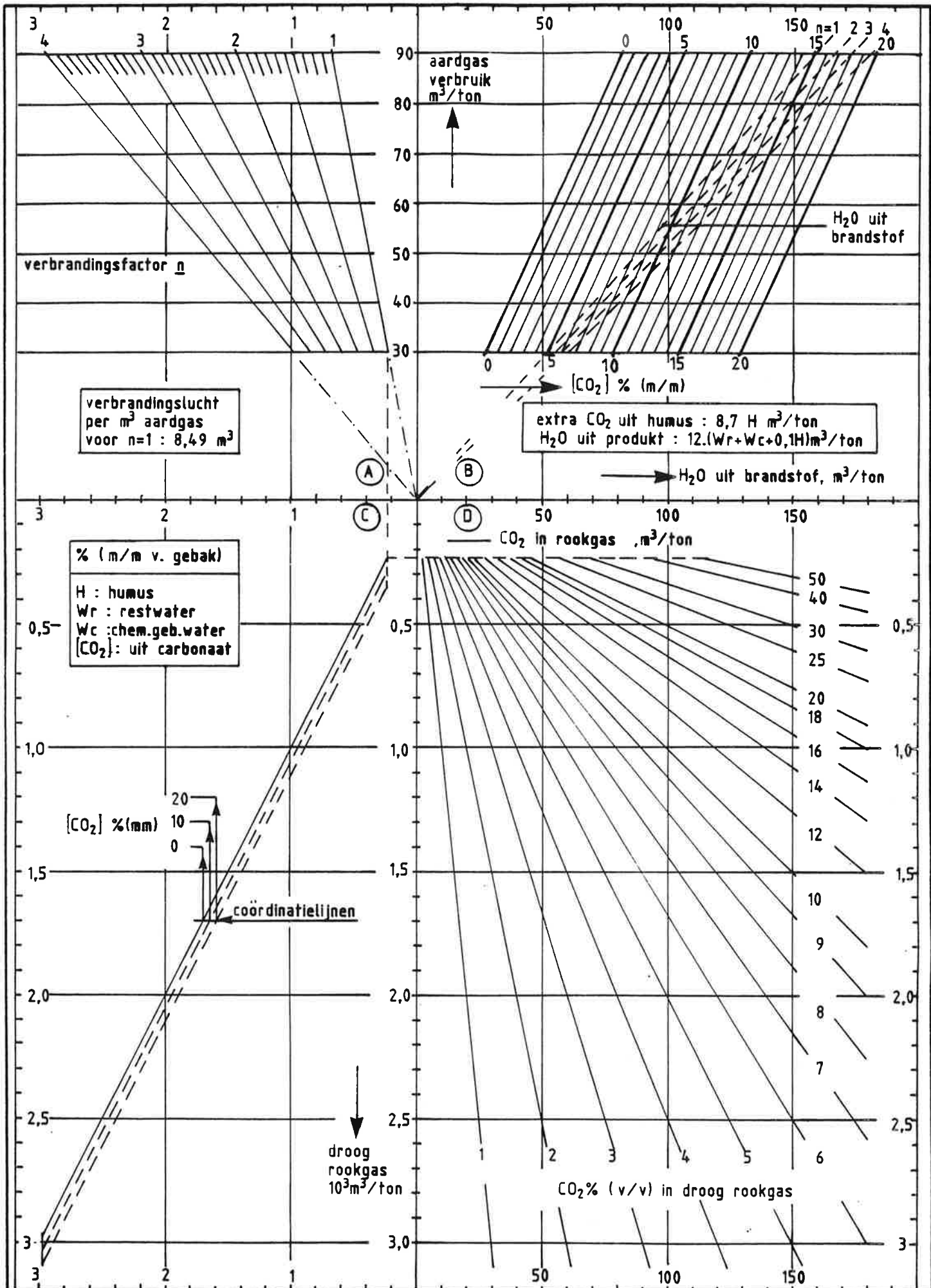


MT-TNO, Apeldoorn
 project No 15961.
 datum: 860403



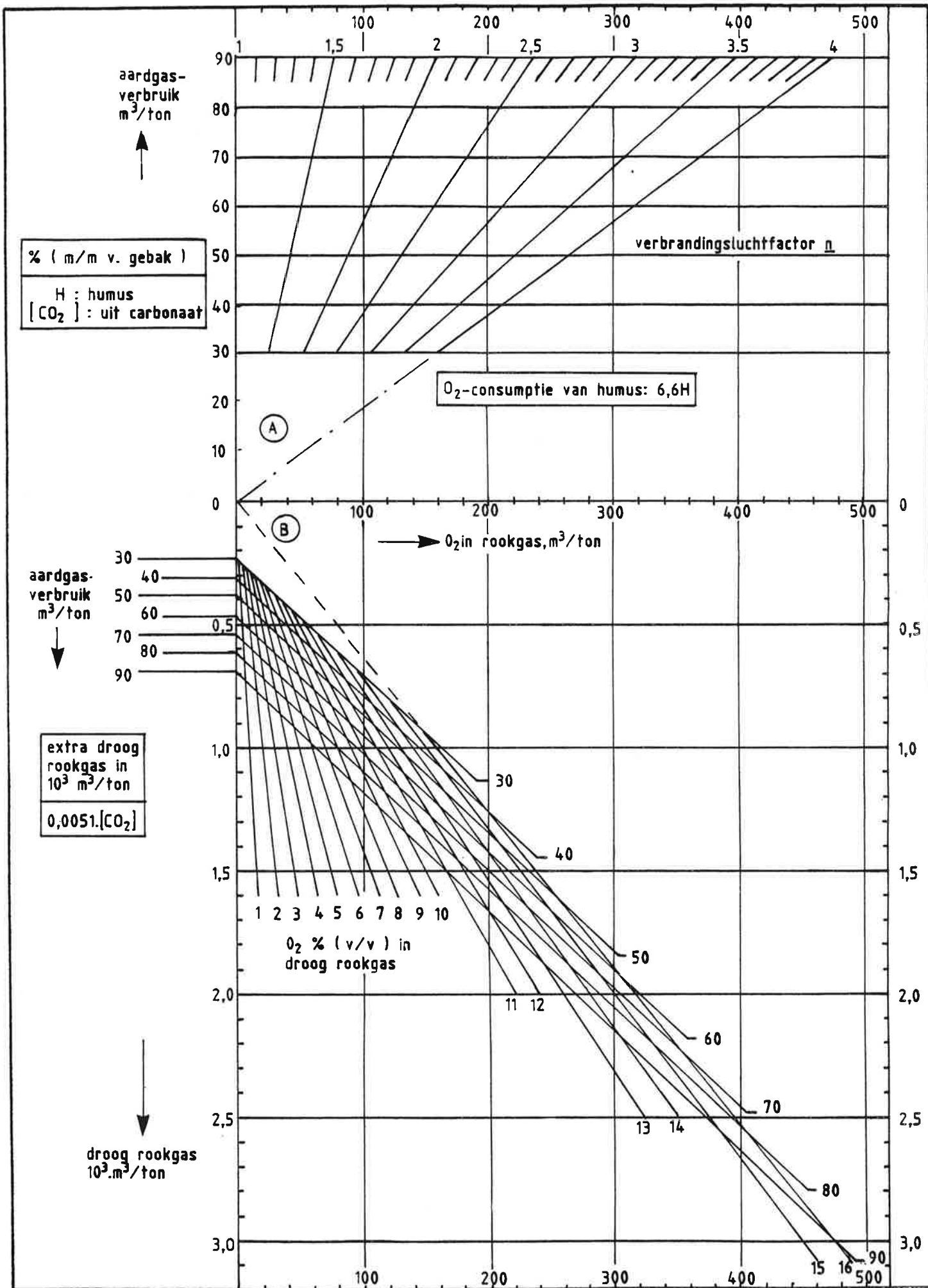
hoeveelheid rookgasen per ton gebakken produkt en luchtovermaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit O₂-metingen in de rookgaszone

MT-TNO Apeldoorn
 project No 1596 I.
 datum 860404



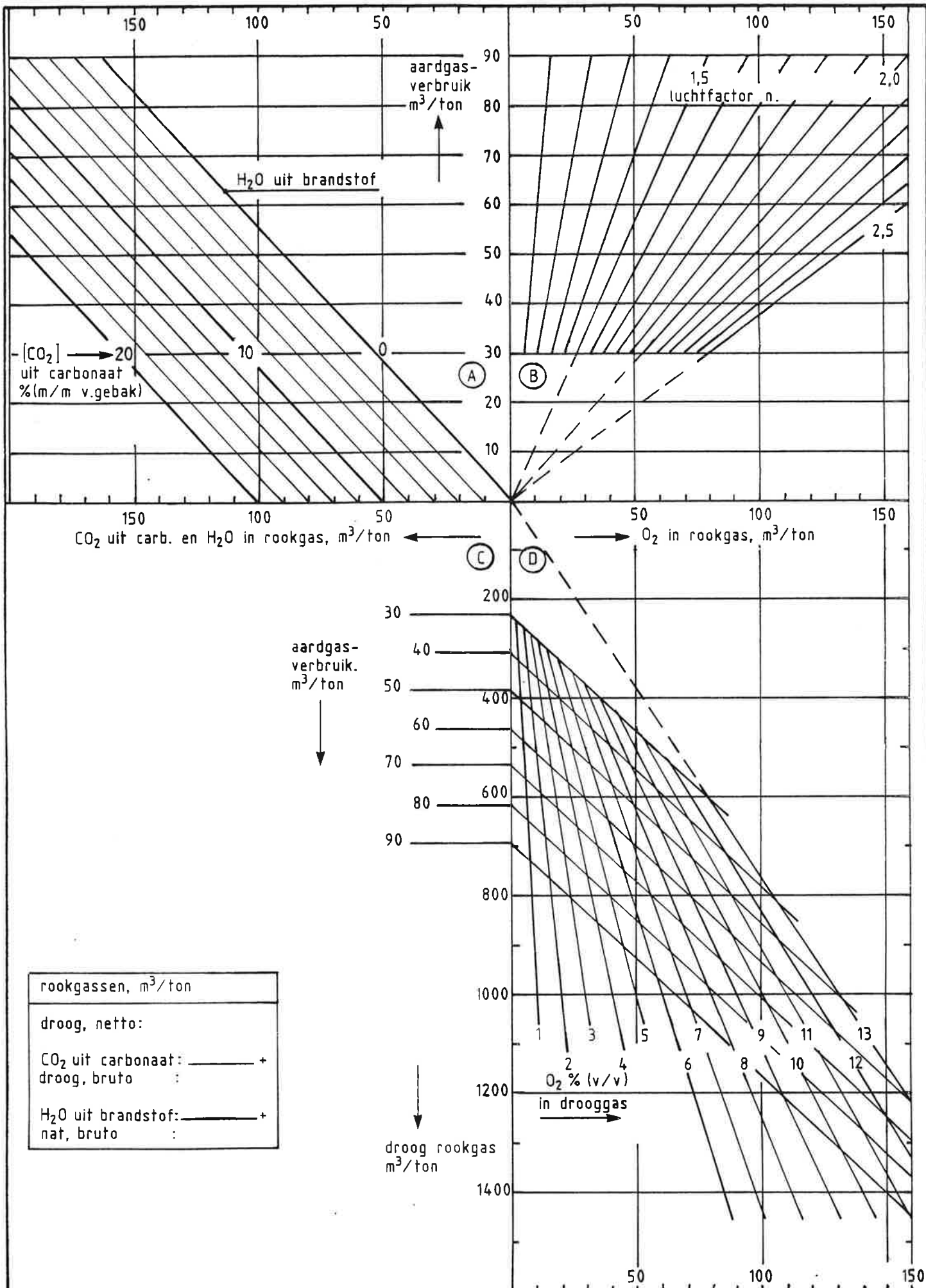
Hoeveelheid rookgassen per ton gebakken produkt en luchtvermaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit CO₂ - metingen in de rookgaszone.

MT-TNO
15961



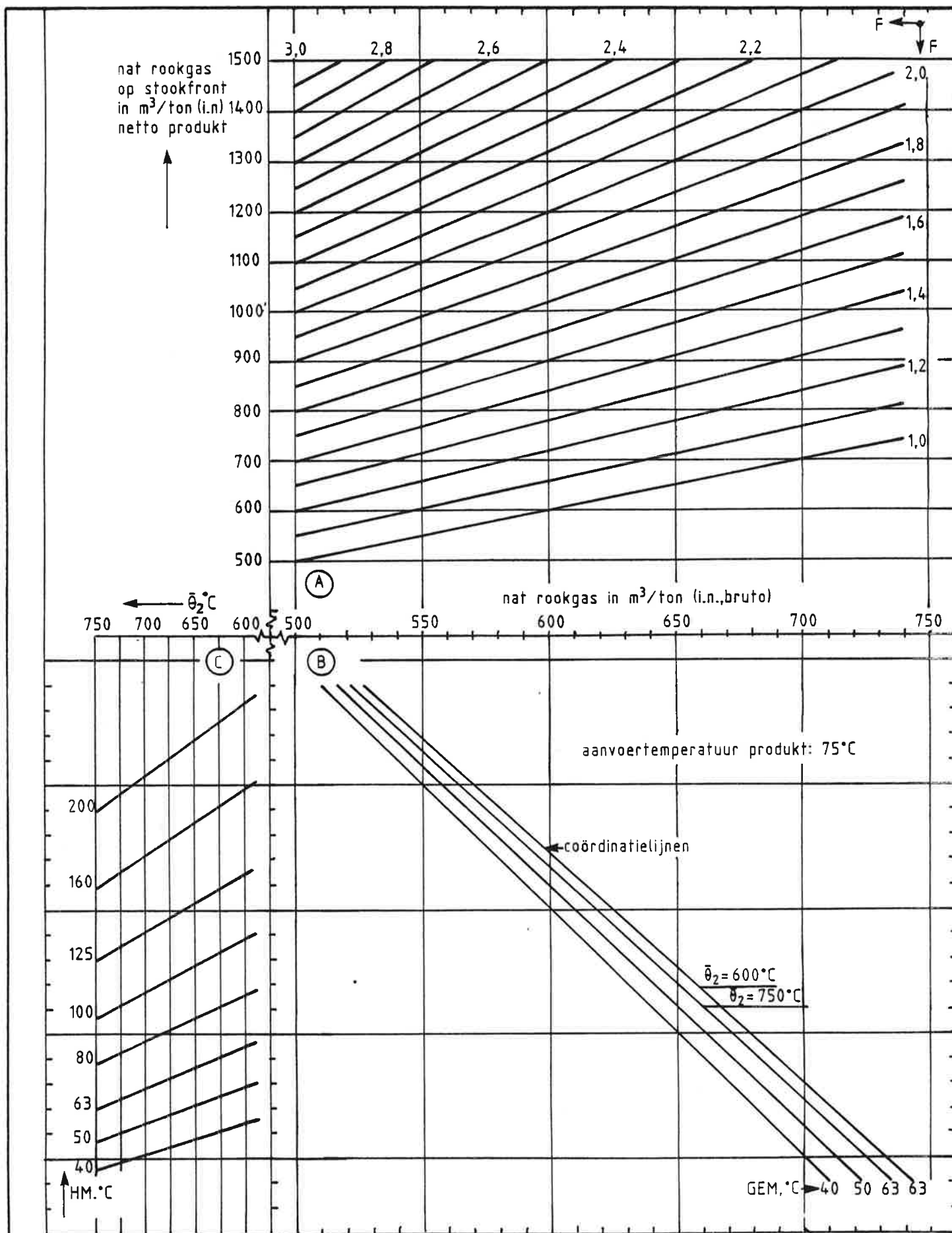
Hoeveelheid rookgassen per ton gebakken produkt en lucht-overmaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit O_2 -metingen in de rookgaszone.

MT-TNO
15961



Hoeveelheid rookgassen per ton gebakken produkt en luchtvermaat in met aardgas gestookte continue ovens, uit O₂-metingen op de grens van voorwarm- en stookzone.

MT-TNO
15961



$\bar{\theta}_2$: gemiddelde produkttemperatuur op stookfront

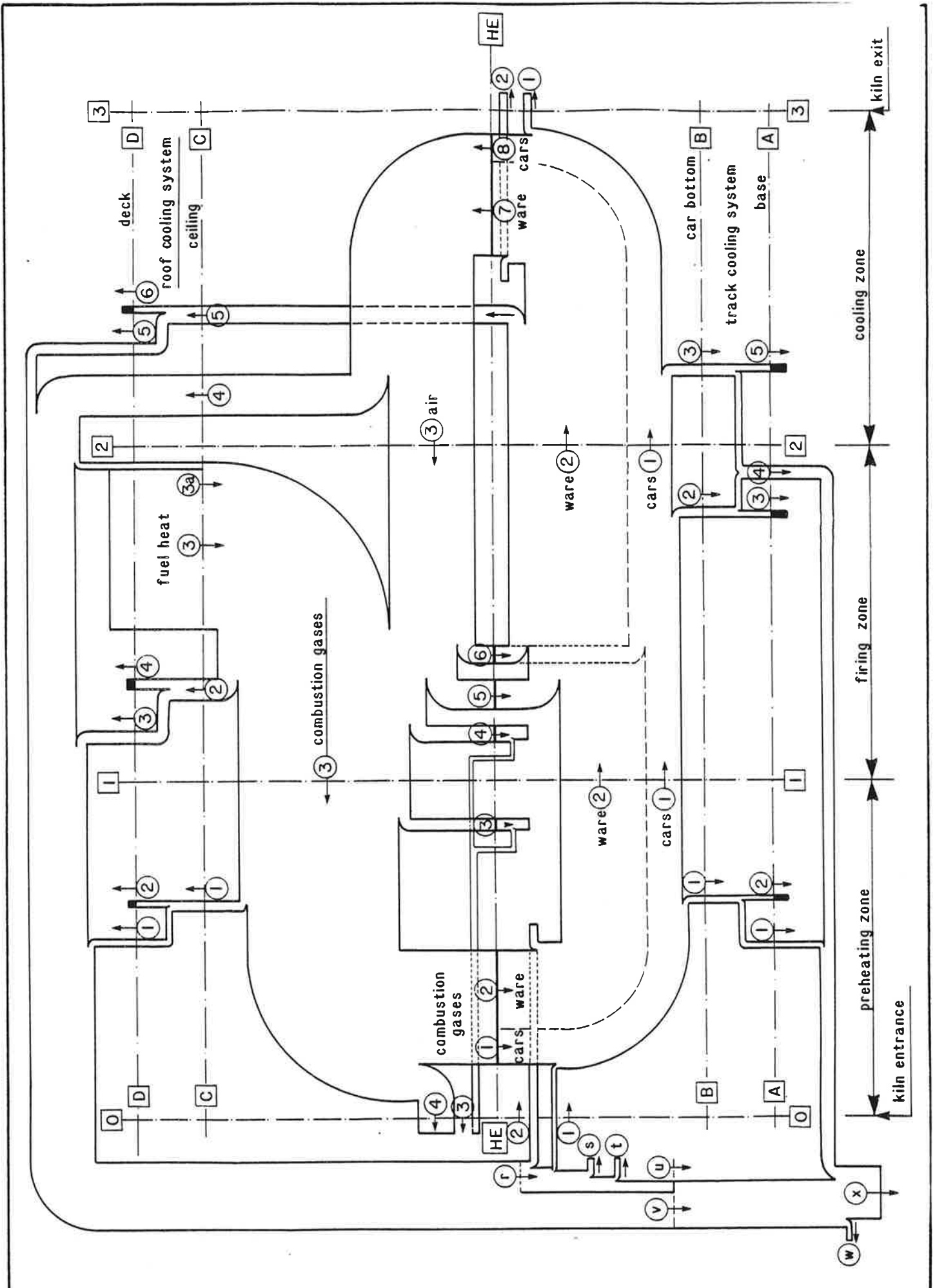
F: massaverhouding bruto/netto

HM: opwarmmodul ($\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1$)

GEM: afvoermodule ($\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2$)

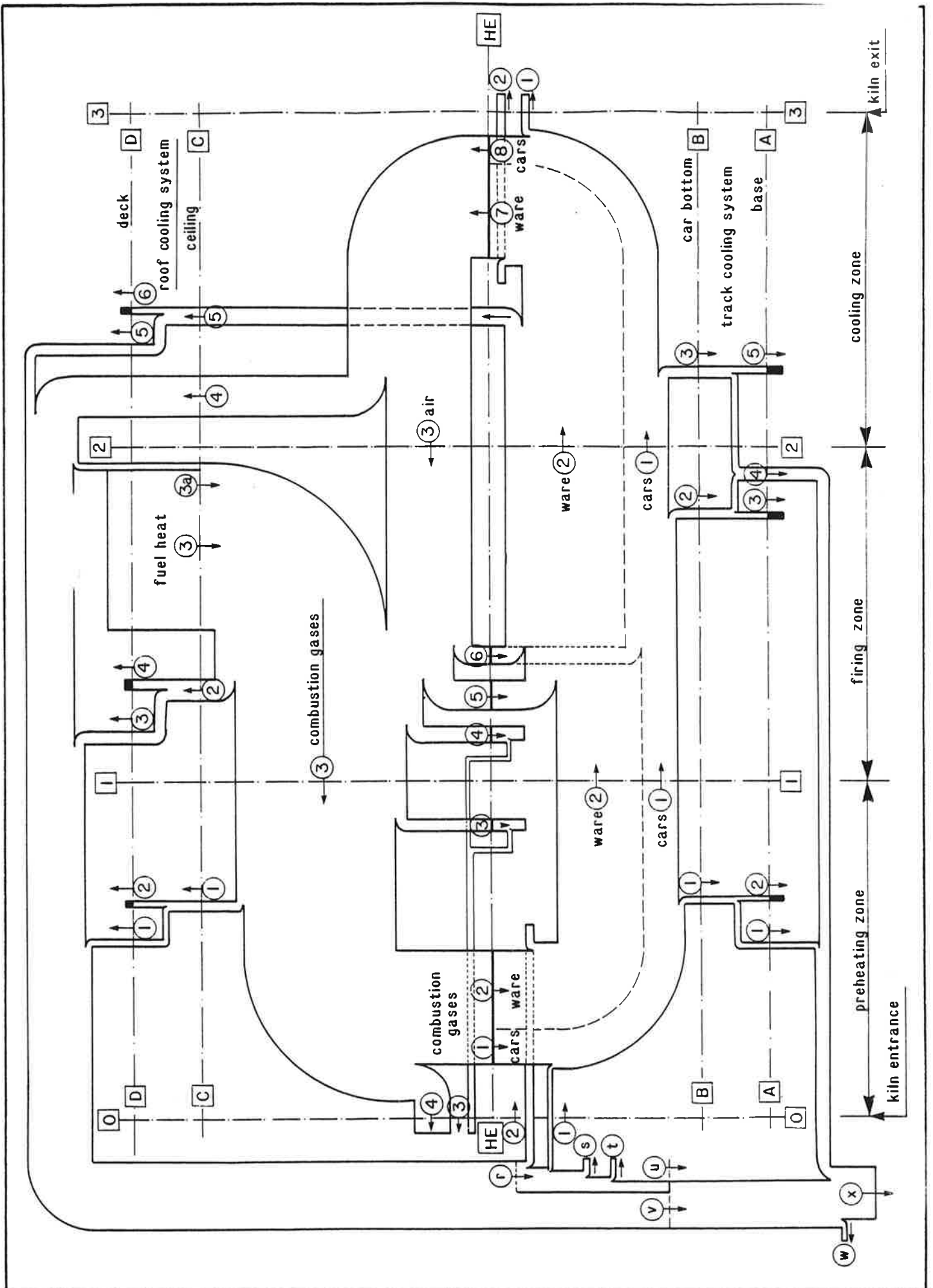
Keuze van de temperatuur van het stookfront in continue ovens voor de keramische industrie

MT-TNO
15961



Heat flow diagram of a tunnel kila

MT-TNO
15961



Heat flow diagram of a tunnel kila

MT-TNO
15961

stationary and non-stationary TEMPERATURE-DISTRIBUTION / HEAT-FLUX in a compound layer

Reference : 10A

Boundary conditions : temperature heattransfer-function (a0+a1.dT)
 [°C] a0 a1
 hot-face ----->1075.0 [W/(m2.K)] (not applicable =)
 cold-face (surroundings)---> 15.0-----> 4.0 .015 (-1 , 0)

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 13%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above [MJ/m2]	heat flow [W/m2]		
1	.100	7	2100.	1.060	.000283	300.	.578	1075.	885.	220.8			
2	.250	10	2000.	.950	.000270	800.	.578	885.	314.	293.5			

										.350	25	514.2	2539.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into out of hot face cold face [MJ/m2] [MJ/m2]		resulting enthalpy [MJ/m2]	interface temperatures of the layers [°C]		
start	0.00			0.0	15.	15.	15.
1	13.80	13.46	.25	13.2	75.	46.	20.
2	46.70	249.41	33.72	228.9	675.	462.	145.
3	54.50	118.28	26.20	321.0	915.	613.	185.
4	59.50	95.67	22.43	394.2	1075.	729.	214.
5	71.30	158.98	75.25	477.9	1075.	846.	279.
6	83.50	-.06	98.42	379.5	650.	677.	288.
7	89.50	-18.18	45.05	316.2	550.	567.	265.
8	104.90	-59.89	84.66	171.7	250.	321.	188.
9	113.80	-42.98	29.98	98.8	95.	185.	140.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 87%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above [MJ/m2]	heat flow [W/m2]		
1	.100	7	2100.	1.060	.000283	300.	.578	1075.	1010.	238.6			
2	.100	7	1100.	.280	.000190	800.	.578	1010.	815.	105.7			
3	.150	11	600.	.120	.000168	800.	.578	815.	159.	43.9			

										.350	25	388.2	883.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into out of hot face cold face [MJ/m2] [MJ/m2]		resulting enthalpy [MJ/m2]	interface temperatures of the layers [°C]			
start	0.00			0.0	15.	15.	15.	15.
1	13.80	11.45	.05	11.4	75.	56.	33.	18.
2	46.70	181.05	10.23	182.2	675.	554.	371.	68.
3	54.50	83.81	8.38	257.7	915.	732.	489.	86.
4	59.50	67.58	7.27	318.0	1075.	867.	584.	101.
5	71.30	80.07	25.37	372.7	1075.	986.	756.	140.
6	83.50	-68.21	34.64	269.8	650.	755.	705.	146.
7	89.50	-36.70	15.87	217.2	550.	620.	601.	132.
8	104.90	-82.49	28.66	106.1	250.	331.	361.	88.
9	113.80	-43.27	9.73	53.1	95.	173.	230.	65.

stationary and non-stationary TEMPERATURE-DISTRIBUTION / HEAT-FLUX in a compound layer

Reference : INA

Boundary conditions : temperature heattransfer-function (a0+a1.dT)
 [°C] a0 a1
 hot-face ----->1075.0 [W/(m2.K)] (not applicable =)
 cold-face (surroundings)---> 15.0-----> 4.0 .015 (-1, 0)

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 10%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above 15.0 °C [MJ/m2]	heat flow [W/m2]
1	.080	7	1700.	.645	.000238	800.	.578	1075.	1031.	156.6	
2	.170	14	1500.	.487	.000219	800.	.578	1031.	913.	263.1	
3	.050	4	240.	.020	.000020	800.	.578	913.	106.	6.3	
-----										428.0	487.
.300 25											

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into hot face out of cold face [MJ/m2]		resulting enthalpy [MJ/m2]	interface temperatures of the layers [°C]				
start	0.00			0.0	15.	15.	15.	15.	
1	13.30	9.18	.04	9.1	75.	50.	26.	16.	
2	46.70	162.44	5.37	166.2	675.	514.	321.	43.	
3	54.50	74.73	4.18	236.8	915.	687.	434.	54.	
4	59.50	80.26	3.60	293.4	1075.	917.	522.	63.	
5	71.30	85.97	12.27	367.1	1075.	950.	726.	84.	
6	83.50	-40.23	16.94	310.0	650.	776.	779.	92.	
7	89.50	-34.23	8.31	267.4	550.	668.	703.	87.	
8	104.90	-93.24	17.00	157.2	250.	403.	517.	66.	
9	113.80	-52.99	6.64	97.6	95.	248.	381.	52.	

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 78%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above 15.0 °C [MJ/m2]	heat flow [W/m2]
1	.080	7	1700.	.645	.000238	800.	.578	1075.	1026.	156.0	
2	.090	8	600.	.120	.000168	800.	.578	1026.	846.	53.6	
3	.030	2	260.	.058	.000164	800.	.578	846.	759.	6.4	
4	.025	2	240.	.020	.000020	800.	.578	759.	308.	3.1	
5	.075	6	800.	.178	.000174	800.	.578	308.	115.	10.4	
-----										229.5	553.
.300 25											

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into hot face out of cold face [MJ/m2]		resulting enthalpy [MJ/m2]	interface temperatures of the layers [°C]				
start	0.00			0.0	15.	15.	15.	15.	
1	13.30	7.38	.04	7.3	75.	50.	36.	18.	
2	46.70	113.07	7.16	113.2	675.	584.	414.	352.	126.
3	54.50	53.56	5.78	161.0	915.	774.	548.	473.	170.
4	59.50	43.21	5.03	199.2	1075.	917.	661.	576.	208.
5	71.30	44.48	17.58	226.1	1075.	1017.	774.	735.	239.
6	83.50	-52.46	22.66	151.0	650.	738.	695.	627.	271.
7	89.50	-22.73	9.60	118.6	550.	598.	563.	507.	225.
8	104.90	-48.10	16.20	54.3	250.	306.	314.	279.	129.
9	113.80	-24.61	5.20	24.5	95.	149.	185.	166.	84.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 12%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above 15.0 °C [MJ/m2]	heat flow [W/m2]
1	.080	7	1700.	.645	.000238	800.	.578	1075.	1019.	155.4	
2	.120	10	1000.	.240	.000184	800.	.578	1019.	835.	117.7	
3	.025	2	240.	.020	.000020	800.	.578	835.	341.	3.4	
4	.075	6	800.	.178	.000174	800.	.578	341.	126.	11.7	
-----										288.1	628.
.300 25											

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into hot face out of cold face [MJ/m2]		resulting enthalpy [MJ/m2]	interface temperatures of the layers [°C]				
start	0.00			0.0	15.	15.	15.	15.	
1	13.30	8.17	.04	8.1	75.	56.	32.	19.	
2	46.70	132.77	7.69	133.2	675.	557.	371.	132.	54.
3	54.50	61.77	6.16	180.8	915.	740.	492.	178.	69.
4	59.50	49.97	5.30	233.5	1075.	877.	591.	215.	81.
5	71.30	60.48	18.27	275.7	1075.	993.	774.	302.	111.
6	83.50	-49.26	24.70	201.7	650.	756.	703.	306.	116.
7	89.50	-27.66	11.35	162.7	550.	624.	615.	267.	105.
8	104.90	-62.21	20.75	79.8	250.	333.	367.	185.	71.
9	113.80	-32.20	7.15	40.4	95.	175.	233.	112.	53.

stationary and non-stationary TEMPERATURE-DISTRIBUTION / HEAT-FLUX in a compound layer

Reference : 110A

Boundary conditions : temperature heattransfer-function (a0+a1.dT)
 [°C] a0 a1
 hot-face -----> 1075.0 [U/(m2.K)] (not applicable =)
 cold-face (surroundings)---> 15.0-----> 4.0 .015 (-) , 0

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 13%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements [-]	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above [MJ/m2]	heat flow [W/m2]
1	.100	7	2100.	1.060	.000283	300.	.578	1075.	385.	220.8	
2	.250	10	2000.	.950	.000270	800.	.578	385.	314.	293.5	
	-----	-----								-----	
	.350	25								514.2	2539.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into out of hot face cold face [MJ/m^2]		resulting enthalpy [MJ/m^2]	interface temperatures of the layers [°C]		
start	0.00			0.0	15.	15.	15.
1	5.00	8.18	.00	8.2	75.	34.	15.
2	23.70	131.56	9.35	190.4	675.	404.	109.
3	30.90	142.90	16.90	316.4	995.	614.	159.
4	32.60	41.03	5.30	351.6	1075.	670.	174.
5	38.50	101.18	26.83	426.0	1075.	788.	227.
6	45.70	-5.73	46.25	374.0	650.	699.	268.
7	51.50	-20.06	40.74	313.2	550.	566.	259.
8	59.20	-35.22	46.79	211.2	250.	387.	131.
9	64.70	-52.98	25.84	132.4	55.	235.	186.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 87%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements [-]	density [kg/m3]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]		specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]		interface temperatures [°C]		enthalpy above [MJ/m2]	heat flow [W/m2]
1	.100	7	2100.	1.060	.000283	300.	.578	1075.	1010.	238.6	
2	.100	7	1100.	.280	.000190	800.	.578	1010.	815.	105.7	
3	.150	11	600.	.120	.000168	800.	.578	815.	159.	43.9	
	-----	-----								-----	
	.350	25								388.2	883.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into out of hot face cold face [MJ/m^2]		resulting enthalpy [MJ/m^2]	interface temperatures of the layers [°C]		
start	0.00			0.0	15.	15.	15.
1	5.00	7.96	.00	7.9	75.	41.	15.
2	23.70	155.03	2.49	160.4	675.	501.	263.
3	30.90	109.74	5.14	264.0	995.	748.	452.
4	32.60	30.93	1.82	293.1	1075.	813.	498.
5	38.50	60.75	8.65	345.2	1075.	940.	650.
6	45.70	-32.76	15.83	276.6	650.	790.	700.
7	51.50	-42.52	14.54	219.5	550.	627.	59.
8	59.20	-70.69	16.51	132.3	250.	402.	464.
9	64.70	-53.67	8.91	69.6	55.	214.	332.

stationary and non-stationary TEMPERATURE-DISTRIBUTION / HEAT-FLUX in a compound layer

Reference : IINA

Boundary conditions : temperature heattransfer-function (a0+a1.dT)
 [°C] a0 a1
 hot-face -----> 1075.0 -----> 0.0 (not applicable =)
 cold-face (surroundings)----> 15.0-----> 4.0 .015 (-1, 0)

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 10%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m ³]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]	specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]	interface temperatures [°C]	enthalpy above 15.0 °C [MJ/m ²]	heat flow [W/m ²]
1	.080	7	1700.	.645 .000238	800. .578	1075. 1031.	156.6	
2	.170	14	1500.	.487 .000219	800. .578	1031. 913.	265.1	
3	.050	4	240.	.020 .000020	800. .578	913. 106.	6.3	
-----							428.0	487.
.300 25								

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into hot face [MJ/m ²]	out of cold face [MJ/m ²]	resulting enthalpy [MJ/m ²]	interface temperatures of the layers [°C]
start	0.00			0.0	15. 15. 15. 15.
1	5.00	5.71	.00	5.7	75. 37. 16. 15.
2	23.70	130.63	1.44	134.9	675. 449. 209. 31.
3	30.90	96.01	2.59	228.3	995. 686. 359. 45.
4	32.60	27.44	.89	254.9	1075. 748. 401. 49.
5	38.50	63.14	4.13	313.9	1075. 873. 552. 65.
6	45.70	-20.40	7.33	286.1	650. 761. 673. 79.
7	51.50	-29.07	6.83	250.2	550. 644. 423. 80.
8	59.20	-60.46	8.47	181.3	250. 480. 333. 73.
9	64.70	-51.73	5.09	124.5	55. 300. 488. 64.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 78%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m ³]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]	specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]	interface temperatures [°C]	enthalpy above 15.0 °C [MJ/m ²]	heat flow [W/m ²]
1	.080	7	1700.	.645 .000238	800. .578	1075. 1026.	156.0	
2	.090	8	600.	.120 .000168	800. .578	1026. 846.	53.6	
3	.030	2	260.	.059 .000164	800. .578	846. 759.	6.4	
4	.025	2	240.	.020 .000020	800. .578	759. 308.	3.1	
5	.075	6	800.	.178 .000174	800. .578	308. 115.	10.4	
-----							229.5	553.
.300 25								

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into hot face [MJ/m ²]	out of cold face [MJ/m ²]	resulting enthalpy [MJ/m ²]	interface temperatures of the layers [°C]
start	0.00			0.0	15. 15. 15. 15.
1	5.00	5.36	.00	5.4	75. 46. 20. 15.
2	23.70	99.62	1.87	103.1	675. 542. 336. 276.
3	30.90	69.90	3.30	169.2	995. 305. 534. 454.
4	32.60	19.93	1.34	187.8	1075. 374. 539. 504.
5	38.50	34.72	6.36	216.2	1075. 989. 73. 661.
6	45.70	-44.77	11.27	160.1	650. 766. 40. 600.
7	51.50	-29.94	9.55	121.6	550. 609. 588. 531.
8	59.20	-44.95	9.90	66.8	250. 366. 410. 371.
9	64.70	-32.11	4.96	29.7	55. 171. 263. 242.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 12%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m ³]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]	specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]	interface temperatures [°C]	enthalpy above 15.0 °C [MJ/m ²]	heat flow [W/m ²]
1	.080	7	1700.	.645 .000238	800. .578	1075. 1019.	155.4	
2	.120	10	1000.	.240 .000184	800. .578	1019. 835.	117.7	
3	.025	2	240.	.020 .000020	800. .578	835. 341.	3.4	
4	.075	6	800.	.178 .000174	800. .578	341. 126.	11.7	
-----							288.1	628.
.300 25								

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	--amount of heat-- into hot face [MJ/m ²]	out of cold face [MJ/m ²]	resulting enthalpy [MJ/m ²]	interface temperatures of the layers [°C]
start	0.00			0.0	15. 15. 15. 15.
1	5.00	5.52	.00	5.5	75. 42. 18. 15.
2	23.70	112.71	1.93	116.3	675. 505. 278. 39.
3	30.90	80.29	3.83	192.8	995. 758. 453. 152.
4	32.60	22.91	1.34	214.3	1075. 825. 501. 170.
5	38.50	45.84	6.32	253.0	1075. 946. 662. 237.
6	45.70	-36.45	11.39	206.0	650. 785. 720. 107.
7	51.50	-30.99	10.40	164.6	550. 631. 625. 288.
8	59.20	-52.37	11.91	100.3	250. 404. 475. 213.
9	64.70	-39.60	6.49	54.3	55. 218. 341. 164.

stationary and non-stationary TEMPERATURE-DISTRIBUTION / HEAT-FLUX in a compound layer

Reference : IINAW

Boundary conditions : temperature heattransfer-function (a+b+1.dT)
 °C a0 a1
 hot-face -----> 1075.0 [W/(m².K)] (not applicable =)
 cold-face (surroundings)----> 15.0-----> 4.0 .040 (-1 , 0)

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 10%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m ³]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]	specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]	interface temperatures [°C]	enthalpy above 15.0 °C [MJ/m ²]	heat flow [W/m ²]
1	.080	7	1700.	.645 .000238	300. .578	1075. 1031.	156.5	
2	.170	14	1500.	.487 .000219	800. .578	1031. 911.	264.7	
3	.050	4	240.	.020 .000020	800. .578	911. 87.	8.2	
	-----	-----					-----	
	.300	25					427.3	494.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	amount of heat into hot face [MJ/m ²]	amount of heat out of cold face [MJ/m ²]	resulting enthalpy [MJ/m ²]	interface temperatures of the layers [°C]
start	0.00			0.0	15. 15. 15. 15.
1	5.00	5.71	.00	5.7	75. 37. 16. 15.
2	23.70	130.63	1.45	134.9	675. 449. 209. 30.
3	30.90	96.01	2.62	228.3	995. 686. 759. 42.
4	32.60	27.44	.90	254.8	1075. 748. 400. 45.
5	38.50	63.15	4.19	313.8	1075. 873. 552. 57.
6	45.70	-20.38	7.44	286.0	650. 761. 673. 68.
7	51.50	-29.04	6.93	256.0	550. 643. 52. 69.
8	59.20	-60.39	8.57	181.0	250. 460. 502. 63.
9	64.70	-91.67	5.14	124.2	55. 300. 487. 56.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 78%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m ³]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]	specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]	interface temperatures [°C]	enthalpy above 15.0 °C [MJ/m ²]	heat flow [W/m ²]
1	.080	7	1700.	.645 .000238	300. .578	1075. 1025.	155.9	
2	.090	8	800.	.120 .000168	800. .578	1025. 842.	53.4	
3	.030	2	260.	.059 .000164	800. .578	842. 753	6.3	
4	.025	2	240.	.020 .000020	800. .578	753. 293.	3.0	
5	.075	6	800.	.178 .000174	800. .578	293. 84.	9.4	
	-----	-----					-----	
	.300	25					228.1	561.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	amount of heat into hot face [MJ/m ²]	amount of heat out of cold face [MJ/m ²]	resulting enthalpy [MJ/m ²]	interface temperatures of the layers [°C]
start	0.00			0.0	15. 15. 15. 15.
1	5.00	5.36	.00	5.4	75. 46. 20. 15.
2	23.70	99.62	1.93	103.0	675. 548. 336. 276.
3	30.90	69.90	3.97	169.0	995. 305. 534. 454.
4	32.60	19.93	1.40	187.5	1075. 874. 588. 503.
5	38.50	34.74	6.88	215.6	1075. 357. 71. 660.
6	45.70	-44.70	11.73	159.1	650. 736. 136. 563.
7	51.50	-29.84	9.72	120.6	550. 609. 534. 526.
8	59.20	-44.79	9.84	66.0	250. 365. 407. 386.
9	64.70	-31.99	4.86	29.1	55. 170. 260. 239.

THERMAL DATA OF CONSTRUCTION MATERIALS 12%

STEADY-STATE BEHAVIOUR

layer nr.	layer thickness [m]	number elements	density [kg/m ³]	heat-conduction function (b0+b1.T) [W/(m.K)]	specific-heat function (c0+c1.T) [J/(kg.K)]	interface temperatures [°C]	enthalpy above 15.0 °C [MJ/m ²]	heat flow [W/m ²]
1	.080	7	1700.	.645 .000238	300. .578	1075. 1018.	155.3	
2	.120	10	1000.	.240 .000184	800. .578	1018. 831.	117.2	
3	.025	2	240.	.020 .000020	800. .578	831. 324.	3.4	
4	.075	6	800.	.178 .000174	800. .578	324. 101.	10.5	
	-----	-----					-----	
	.300	25					286.4	639.

THERMODYNAMIC BEHAVIOUR : time-step 30 [s]

section-nr.	time [h]	amount of heat into hot face [MJ/m ²]	amount of heat out of cold face [MJ/m ²]	resulting enthalpy [MJ/m ²]	interface temperatures of the layers [°C]
start	0.00			0.0	15. 15. 15. 15.
1	5.00	5.52	.00	5.5	75. 42. 18. 15.
2	23.70	112.71	1.98	116.2	675. 505. 278. 88.
3	30.90	80.30	4.01	192.5	995. 258. 452. 149.
4	32.60	22.91	1.41	214.0	1075. 825. 500. 166.
5	38.50	45.86	6.64	253.3	1075. 946. 661. 230.
6	45.70	-36.39	11.88	205.0	650. 785. 18. 276.
7	51.50	-30.89	10.67	163.4	550. 630. 622. 255.
8	59.20	-52.18	11.99	99.3	250. 403. 471. 201.
9	64.70	-39.45	6.44	53.4	55. 217. 338. 155.