

CONCEPT PUBLIKATIE

WARMTECHNISCHE BEOORDELING VAN
BEKLEDINGEN VAN TUNNELOVENWAGENS

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. : 85-014773

Dossiernr. : 8725-13483

Datum : 1 november 1985

P

Trefwoorden:

- Warmtetechniek
- Keramiek
- Tunnelovens

Bestemd voor:

- De redactie van Klei Glaskeramiek

p.a. Pressfoto B.V.

Postbus 2093

1960 GB HEEMSKERK

- Ir. P.H. Kemme

Kwelkade 27

4001 RK TIEL

„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.

© 1985, TNO, 's-Gravenhage

INHOUDSOPGAVE	<u>blz.</u>
SAMENVATTING	3
1. INLEIDING	4
2. BEREKENINGSMETHODE	5
3. GEBRUIKSWIJZE VAN HET REKENPROGRAMMA	8
4. REKENVOORBEELDEN	12
5. CONCLUSIES	17
TABELLEN 1 en 2	
FIGUREN 1 tot en met 4	

WARMTE-TECHNISCHE BEOORDELING VAN
BEKLEDINGEN VAN TUNNELOVENWAGENS

door

Jan H. van der Velden

MT-TNO, Postbus 342, 7300 AH APELDOORN

SAMENVATTING

Het artikel heeft betrekking op een door MT-TNO ontwikkeld gebruikersvriendelijk rekenprogramma voor de vaststelling van het thermodynamisch gedrag van de gelaagde bekledingen van tunnelovenwagens in de keramische industrie.

Opzet en gebruikswijze van het rekenmodel worden besproken, waarna de gebruikswaarde voor het evalueren en optimaliseren van ovenwagenbekledingen met betrekking tot hun energiegebruik aan de hand van enkele praktische voorbeelden wordt aangetoond.

SUMMARY

The paper refers to a users-friendly computer program for the determination of the thermodynamic behaviour of the layered tops of tunnelkiln cars in the ceramic industry, which has been developed by MT-TNO.

Framework and directions for use of the program are discussed.

With the help of some practical examples, it is demonstrated, that the program is capable to evaluate and optimize kiln car constructions with regard to their energy consumption.

1. INLEIDING

De bekleding van tunnelovenwagens in de keramische industrie beschermt het stalen chassis en de wielstellen van de ovenwagens tegen oververhitting door haar warmte-isolerend vermogen en een toereikende traagheid van doorwarming (figuur 1).

Ter vermijding van hoge onderhoudskosten is de duurzaamheid van de bekleding zowel in mechanisch als in thermisch opzicht van groot belang. De belasting van de constructie door de wagencharge, alsmede de manipulaties bij het beladen, het ontladen en het transport, moeten zonder beschadiging of vervorming van de bekleding verdragen kunnen worden. De gebruikte materialen dienen voorts bestand te zijn tegen de plaatselijk te verwachten temperaturen en de cyclische verhitte en afkoeling, terwijl herhaalde thermische dilatatie en contractie van de bekledingsmaterialen ook bij verontreiniging van de constructie door bijvoorbeeld vormzand of scherven niet tot een ontvricting van het wagenlichaam mag leiden.

De in bestaande tunnelovens in gebruik zijnde meervoudig gelaagde wagenbekledingen zijn, rekening houdende met het vorenstaande, voornamelijk op grond van ervaring ontwikkeld. Aan de energetische consequenties van de uitvoeringsvorm werd daarbij aanvankelijk meestal relatief weinig aandacht besteed. Thans is de ontwikkeling van energiebesparende ovenwagenbekledingen door verbetering van de warmte-isolatie en vermindering van het warmte-accumulerend vermogen echter in volle gang.

Kwantitatieve informatie over het thermodynamisch gedrag van ovenwagens gedurende de gehele reis door een tunneloven is daarbij, zowel voor het evalueren, als voor het optimaliseren van de ontwerp-kwaliteit van een wagenbekleding, van groot belang.

Ter bevordering van een rationeel energiegebruik in de Nederlandse grofkeramische industrie heeft MT-TNO te Apeldoorn in het kader van het collectief speurwerk ten behoeve van deze bedrijfsgroep een gebruikersvriendelijk computerprogramma ontwikkeld, waarmee de bedoelde informatie op efficiënte wijze kan worden verkregen.

Het werk werd gefinancierd door de Stichting Projectbeheerbureau Energieonderzoek (PEO), de brancheverenigingen van de Nederlandse Baksteen- en Dakpannenindustrie en door TNO.

2. BEREKENINGSMETHODE

Figuur 2 laat schematisch een voorbeeld van de gelaagde opbouw van een tunnelovenwagen zien. De materiaalkeuze en de dikte van de opeenvolgende lagen A, B, C, enz. zijn zoals ook tabel 1 aangeeft, langs de randen van de wagen (doorsneden X-X) anders dan in het midden (doorsneden Y-Y).

TABEL 1 Voorbeeld van de materiaalkeuze in een willekeurig gekozen tunnelovenwagen.

wagenlengte: 7,00 m, wagenoppervlak: 47,11 m ²			wagenbreedte: 6,73 m		
doorsnede	oppervlak [%]	laag	dikte [mm]	soort	dichtheid [kg/m ³]
X	18,8	A	120	dekplaat	2050
		B	305	randsteen	1700
		C	25	isolerende plaat	250
			+ 450		
Y	81,2	A	65	dekplaat	2050
		B	127	isolerende stenen	750
		C	148	isolerende massa	600
		D	25	isolerende plaat	250
		E	85	isolerende massa	600
			+ 450		

Vaak zijn in een ovenwagen nog meer verticale doorsneden van onderling verschillende constructie aan te wijzen.

Ter vereenvoudiging van de problematiek werd het ontwikkelde programma gemodelleerd voor het berekenen van een één-dimensionale warmtestroming in elk van de doorsneden X, Y, enz. van een ovenwagen

of ovenwand onder zowel stationaire als niet-stationaire omstandigheden. De begrenzingsvlakken van de afzonderlijke constructiedelen evenwijdig aan de hoofdrichting van de warmtestroom werden daarbij warmtedicht verondersteld.

Gemeend wordt, dat deze in principe aanvechtbare benaderingswijze van het probleem, ten behoeve van een globale beoordeling van de energetische merites van een wagen- of wandconstructie met een eenvoudig gebruikersvriendelijk rekenprogramma, aanvaardbaar is. Overigens zijn drie-dimensionale warmtestroomberekeningen, althans ten aanzien van enkele vaak voorkomende constructiedetails zeker zinvol.

Voor lichamen die samengesteld zijn uit lagen, die verschillende eigenschappen hebben, komen slechts numerieke berekeningsmethoden in aanmerking. Gekozen werd voor de eindige elementenmethode. Hierbij wordt het fysisch model van de gelaagde constructie naar plaats onderverdeeld in een groot aantal stukjes, elementen genaamd, die elk homogene eigenschappen hebben. Elk element heeft een warmtegeleidingsverbinding met een aangrenzend element, met uitzondering van de buitenste elementen, die een randconditie krijgen opgelegd. De elementen moeten kleiner worden gekozen op plaatsen waar relatief grote waarden kunnen worden verwacht voor de tweede en/of hogere afgeleiden van de temperatuur naar de tijd. Voorts moet de grootte worden aangepast aan de maat van de verschillende lagen. De nauwkeurigheid van de berekening hangt in sterke mate af van het aantal en daarmee van de grootte van de elementen.

Naar tijd wordt de tijdsspanne waarin het warmtetransport in de wagenbekleding plaatsvindt opgedeeld in kleine tijdstappen, waarvoor een niet-stationaire situatie wordt doorberekend.

De grondslagen voor de berekening van het thermodynamisch gedrag van een constructie zijn de eerste hoofdwet van de thermodynamica (energiebalans) en de wet van Fourier voor de warmtegeleiding.

De berekeningswijze is uiteraard niet alleen van toepassing op tunnelovenwagenbekledingen. Ze is bijvoorbeeld ook geschikt voor het karakteriseren van het warmtetechnisch gedrag van de wanden van continue of periodieke ovens.

3. GEBRUIKSWIJZE VAN HET REKENPROGRAMMA

Voor het karakteriseren van het thermodynamisch gedrag van ovenwagenbekledingen met het gebruikersvriendelijke rekenprogramma zijn nodig:

a: Maatschetsen van de langs- en dwarsdoorsnede van de wagenbekleding in kwestie.

De gebruikte materiaalsoorten worden aangeduid. De in warmte-technisch opzicht kenmerkende, wezenlijk van elkaar verschillende verticale doorsneden worden onder vermelding van laagdikten en oppervlaktebeslag gemarkeerd.

Het programma biedt ruimte aan uit ten hoogste vijf lagen samengestelde constructies, onderverdeeld in totaal ten hoogste 25 elementen. Voor verreweg de meeste toepassingen zijn deze beperkingen alleszins aanvaardbaar.

Wat het metalen chassis van de wagens betreft wordt verondersteld, dat het de lektheid van de bekleding waarborgt, doch verder in warmtetechnisch opzicht geen rol speelt.

b: Enkele eigenschappen van de toegepaste materialen, zoals:

b.1 de dichtheid in kg/m^3 ;

b.2 de warmtegeleidingscoëfficiënt F in $\text{W}/(\text{m.K})$ als eerste-gradsfunctie van de materiaaltemperatuur T in $^{\circ}\text{C}$

$$F = H + Z.T$$

Gezien de beperkte nauwkeurigheid waarmee de warmtegeleidingscoëfficiënt van de meeste ovenbouwmaterialen in situ gewoonlijk bekend is, mag in het relevante temperatuurgebied doorgaans wel een rechtlijnig verloop met de temperatuur gekozen worden;

b.3 de soortelijke warmte C in $\text{J}/(\text{kg.K})$ als eerste-gradsfunctie van de materiaaltemperatuur T in $^{\circ}\text{C}$.

$$C = U + V.T$$

Ook hier geldt, dat voor de meeste ovenbouwmaterialen in het temperatuurgebied tot 1200 °C eenvoudigheidshalve wel verondersteld mag worden, dat het verloop van de soortelijke warmte met de temperatuur rechtlijnig is.

In bijzondere gevallen kunnen uiteraard verfijnde formules voor de temperatuursafhankelijkheid van warmtegeleidingscoëfficiënt en soortelijke warmte gekozen worden;

b.4 aanvullende gegevens van de materialen bijvoorbeeld, maximum gebruikstemperatuur, nakrimp bij deze temperatuur, uitzettingscoëfficiënt en mechanische eigenschappen.

c: Gegevens over de omstandigheden, waaronder verhitting en afkoeling van de wagens op de reis door de tunneloven plaatsvinden.

In het rekenprogramma wordt ten aanzien van het bovenvlak van de ovenwagens eenvoudigheidshalve het verloop, van de oppervlakte-temperatuur met de tijd, beginnend bij een wagentemperatuur van 15 °C als invoergegeven gekozen. Verondersteld wordt, dat dit verloop overeenkomt met het geplande of gerealiseerde verloop van de gemiddelde chargetemperatuur met de tijd. De betreffende temperatuurcurve wordt in markante rechtlijnig verlopende temperatuurstrajecten (secties) verdeeld, waarvan de begin- respectievelijk eindpunten naar temperatuur en tijdstip in het rekenprogramma worden opgenomen.

Het programma biedt ruimte voor een curveopdeling in ten hoogste 12 secties.

Voor de warmteoverdracht aan de koele zijde van een wagen of wand naar een omgeving met een veronderstelde temperatuur van 15 °C wordt een warmteoverdrachtscoëfficiënt α in W/(m².K) ingevoerd, die voortvloeit uit

$$\alpha = R + S.T.$$

Hierin zijn:

T : de tijdens het beschouwde proces aan verandering onderhevige temperatuur van de koele zijde in °C.

R en S: passende getalwaarden.

Na ampele bestudering van de wisselende, vaak moeilijk te specificeren, omstandigheden, waaronder de warmteoverdracht aan de onderzijde van ovenwagens in de praktijk plaatsvindt door straling, natuurlijke convectie en gedwongen convectie naar de wielstellen, de koellucht en het ovenfundament, wordt als gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt aanbevolen:

$$\alpha = 4,00 + 0,015.T$$

Met betrekking tot de keuze van de gewenste tijdstap geeft de computer passende aanwijzingen.

Na invoer van de terzake dienende gegevens, verschaft het rekenprogramma op commando de navolgende informatie over het thermodynamisch gedrag van een ovenwagenbekleding op haar reis door de tunneloven:

- 1e de grensvlaktemperaturen in °C van de lagen waaruit de wagenbekleding is samengesteld op alle tijdstippen, waarop de oppervlaktetemperatuur een sectiegrens passeert;
- 2e de enthalpie boven 15 °C van het beschouwde wagenlichaam per m² wagenoppervlak in MJ/m² op alle sectiegrenzen;
- 3e de hoeveelheid warmte, die gedurende de verblijftijd van de beschouwde vierkantemeter bekleding in elke ovensectie het bovenvlak van de wagen in totaal is binnengestroomd, alsmede de hoeveelheid warmte die de wagen per m² in deze periode in totaal aan de onderzijde heeft verlaten (beide warmtehoeveelheden in MJ/m²);
- 4e de grensvlaktemperaturen van de bekledingslagen in °C in geval van een oneindig lange verblijftijd op de toptemperatuur van het beschouwde bakproces, de enthalpie van 1 m² van de bekleding onder deze omstandigheden in MJ/m², alsmede het warmteverlies van de wagen aan de onderzijde in de hier bedoelde stationaire toestand bij de toptemperatuur in W/m².

Figuur 3 toont een overzicht van de voor de computerberekening gevraagde invoergegevens en de geleverde informatie.

De in energetisch opzicht van belang zijnde berekeningsresultaten van de afzonderlijke doorsneden van een gegeven wagenbekleding kunnen naar rato van hun oppervlaktebeslag tot informatie over het thermodynamisch gedrag van de wagenopbouw als geheel worden geaggregeerd. Naar behoefte kan zulks per ovensectie of groep van ovensecties geschieden, bijvoorbeeld voor voorwarmzone, stookzone en koelzone van een tunneloven. Deling van een gevonden warmtehoeveelheid in MJ per m² wagenoppervlak door de massa van de charge in ton per m² wagenoppervlak levert de betrokken warmtehoeveelheid in MJ per ton produkt.

Vermenigvuldiging van in- of uitgestroomde hoeveelheden warmte in MJ/m² met de wagenvoortgang uitgedrukt in m²/s geeft de betreffende warmtestroom in MW.

4. REKENVOORBEELDEN

Ter demonstratie van enkele gebruiksmogelijkheden van het rekenprogramma volgen hier een paar voorbeelden. Het eerste heeft betrekking op het verschil in thermodynamisch gedrag tussen de meestal robuuste randen van een tunnelovenwagen en de lichter uitgevoerde kern van een wagenbekleding.

Verondersteld is, dat de in figuur 2 en tabel 1 bedoelde ovenwagens in 12 uren een voorwarmer/nadroger doorlopen en aansluitend in 96 uren door een tunneloven worden gevoerd, waarin een bakproces tot 1080 °C plaatsvindt overeenkomstig het in figuur 4a getekende temperatuurverloop.

Voor elk van de twee markante doorsneden x-x en y-y zijn in de figuren 4b en 4c de berekeningsresultaten weergegeven van het verloop van de temperatuur aan de onderzijde van de wagens (4b) en van de enthalpie van de wagenbekleding (4c).

De verschillen in gedrag tussen de randen en de kern komen duidelijk tot uiting.

De temperatuurcurven bevestigen de praktijkervaring, dat vooral in de koelzone van de oven gezorgd dient te worden voor een adequate wielstellenkoeling.

Uit figuur 4c blijkt dat de accumulatie van warmte in de randen van de wagen veel groter is dan in de kern. De enthalpie op de grens tussen stookzone en koelzone blijkt respectievelijk 559 en 303 MJ/per vierkantemeter bekledingsoppervlak te zijn. Deze warmte moet door de ovenbrandstof en door een deel van de in de koelzone uit de wagencharge en de wagenbekleding geregenereerde warmte worden geleverd. De enthalpie van de wagenbekleding aan de uitgang van de oven, hier 202 respectievelijk 64 MJ/m² bepaalt mede het uitrijverlies van de oven.

Uit de figuur valt af te leiden, dat vooral kleine ovenwagens, die nu eenmaal een relatief groot randaandeel bezitten in energetisch opzicht minder gunstig zijn.

Aangezien het rekenprogramma behalve de vorenstaande gegevens onder meer ook informatie levert over de transmissieverliezen van een bekleding en de hoogste temperatuur, die de verschillende constructiematerialen onder stationaire en niet-stationaire omstandigheden

kunnen bereiken, is het rekenprogramma een uitstekend hulpmiddel voor een optimale specificatie en dimensionering van wagenbekledingen.

Een tweede voorbeeld van de gebruiksmogelijkheden van het rekenprogramma betreft een vergelijking van de energieconsumptie van een achttal verschillende uitvoeringsvormen van bekledingen van tunnelovenwagens onder overigens gelijke omstandigheden.

Zonder uitzondering zijn eigentijdse bekledingen gekozen die in 1985 door Europese ovenwagenconstructeurs voor relatief grote wagens met een oppervlak van 47 m² werden ontworpen.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor bakprocessen van uiteenlopende tijdsduur.

In tabel 2 zijn de berekeningsresultaten weergegeven voor een bakcurve als getekend in figuur 4a op een tijdsbasis van 108 uren, waarvan 12 uren in een nadroger/voorwarmer en 96 uren in een tunneloven, alsmede voor eenzelfde curve op een tijdsbasis van 72 uren, waarvan 8 uren in een nadroger/voorwarmer en 64 uren in een tunneloven.

De getalwaarden hebben betrekking op de gehele wagenbekleding. De resultaten van de onderling verschillend samengestelde doorsneden van elke ovenwagen zijn derhalve naar rato van hun oppervlaktebeslag tot gemiddelde warmtehoeveelheden in MJ/per vierkantemeter wagenoppervlak verwerkt.

Voor elk van de warmteposten 1 tot 10 is zowel de hoogste als de laagste getalwaarde aangegeven, die in de verzameling van acht wagens werd gevonden.

Post 1 betreft de in het voorgaande reeds besproken enthalpie op de grens van stookzone en koelzone. De getallen tussen haakjes geven aan, tot welk percentage deze enthalpie de enthalpie van de wagenbekleding in de stationaire toestand bij een oventemperatuur van 1080 °C benadert.

Post 2 betreft de hoeveelheid warmte die in de koelzone van de oven uit de wagenbekleding terugvloeit naar de op de stookzone toestromende koellucht.

TABEL 2 Warmteconsumptiepatroon van acht verschillende bekledingen van tunnelovenwagens van 7,00 m lang en 6,73 m breed in MJ/m².

post nr	omschrijving	warmtehoeveelheid [MJ/m ²]			
		baktijd 96 [h]		baktijd 64 [h]	
		hoogste waarde	laagste waarde	hoogste waarde	laagste waarde
1	enthalpie op grens van stook- zone en koelzone	351 (91%)	251 (97%)	324 (84%)	244 (94%)
2	warmteregeneratie in koelzone	197	161	177	152
3	warmteafgifte aan onderzijde van de wagens	123	72	75	39
4	warmterecuperatie uit wiel- stellenkoeling	80	47	49	25
5	warmteverlies via ovenfundament	43	25	26	14
6	uitrijverlies van de ovenwagens	93	38	112	48
7	minimum schoorsteenverlies veroorzaakt door ovenwagens	33	20	28	17
8	minimum totaal verlies veroorzaakt door ovenwagens (posten 5, 6 en 7)	157	84	152	82
9	minimaal nodige brandstofwarmte voor de ovenwagens	220	132	185	112
10	met post 9 vergelijkbare hoe- veelheid aardgas in m ³ per m ² wagenoppervlak	6,94 m ³ /m ²	4,17 m ³ /m ²	5,84 m ³ /m ²	3,54 m ³ /m ²

Post 3 is de warmteafgifte van de wagens aan de onderzijde. Een deel hiervan (post 4) is in principe recuperabel en kan bijvoorbeeld voor droogdoeleinden worden gebruikt; de rest (post 5) dringt in het ovenfundament en gaat verloren.

Post 6 geeft het uitrijverlies van de ovenwagens weer. In tegenstelling tot de overige posten neemt dit verlies, om overigens begrijpelijke redenen, toe bij verkorting van de baktijd van 96 tot 64 uren.

Het in post 7 vermelde, aan de ovenwagens toe te schrijven, schoorsteenverlies is voorzichtigheidshalve laag geschat op 15% van de in post 9 aangegeven, met brandstof aan te voeren, warmte voor de ovenwagens.

Laatstbedoelde verbruiken zijn minimumwaarden, aangezien bij de berekening hiervan eenvoudigheidshalve is verondersteld, dat alle in post 2 opgevoerde regeneratiewarmte ten goede komt aan de opwarming van de wagens in voorwarm- en stookzone.

In werkelijkheid gaat een deel van deze geregenereerde warmte weer als transmissiewarmte via het ovenlichaam verloren, terwijl in het algemeen ook een deel als afvalwarmte voor droogdoeleinden ter beschikking komt. Het deel van de in de koelzone geregenereerde warmte, dat in de praktijk niet opnieuw voor opwarming van de wagens wordt gebruikt, dient door de ovenbrandstof te worden geleverd en zal het brandstofverbruik en daarmee ook het schoorsteenverlies ten behoeve van de ovenwagens in soms aanzienlijke mate verhogen.

Door de hier gekozen voorstellingswijze worden de in de praktijk nu eenmaal sterk variërende invloeden van constructie, inrichting en bedrijfsvoering van een tunneloven met drogerij op de energiebehoefte van de wagens geëlimineerd. Die invloeden vallen buiten het bestek van dit artikel, doch dienen in rekenmodellen voor de gehele tunneloven uiteraard wel degelijk in aanmerking genomen te worden.

Het valt op, dat de in post 8 vermelde som van de verliezen uit de posten 5, 6 en 7, zowel ten aanzien van de geconstateerde hoogste waarde, als wat betreft de laagste waarde, nauwelijks door de baktijd wordt beïnvloed. Het in principe recuperabele deel van de warmteafgifte aan de onderzijde van de wagens (post 4) is wel sterk van de verblijftijd van de wagens in de tunnel afhankelijk.

De met post 9 vergelijkbare minimum hoeveelheden aardgas, die per vierkantemeter wagenoppervlak voor de ovenwagens worden verbruikt zijn in post 10 aangegeven. In het geval dat de wagencharge bijvoorbeeld 0,85 ton per m² wagenoppervlak bedraagt, kan uit deze cijfers worden afgeleid, dat het minimale brandstofverbruik voor de acht onderzochte wagenbekledingen bij een baktijd van 96 uren varieert tussen 8,16 en 4,91 m³ Gronings aardgas in normaaltoestand per ton gebakken produkt.

De spreiding bedraagt 3,25 m³ per ton of 5,69 m³ aardgas per 1000 bakstenen à 1,75 kg per stuk.

Een deel van dit aardgasverbruik is, zoals uit een vergelijking van de posten 9 en 8 blijkt, in principe recuperabel. Het betreft in dit geval echter de terugwinning van warmte in lucht met een relatief laag temperatuurniveau.

Baktijdverkorting van 96 tot 64 uren blijkt, onder overigens vergelijkbare omstandigheden, het minimum aardgasverbruik van de wagens met ongeveer 15% te verminderen.

Het vorenstaande heeft betrekking op een vergelijking van wagens van eenzelfde grootte. Een vergelijking van kleine wagens met grote wagens zou op grond van het gestelde bij de bespreking van figuur 4c aanzienlijk grotere verschillen te zien hebben gegeven. Hetzelfde geldt indien in de vergelijking ook wagens van oudere datum, met een vaak relatief zware bekleding, waren betrokken.

5. CONCLUSIES

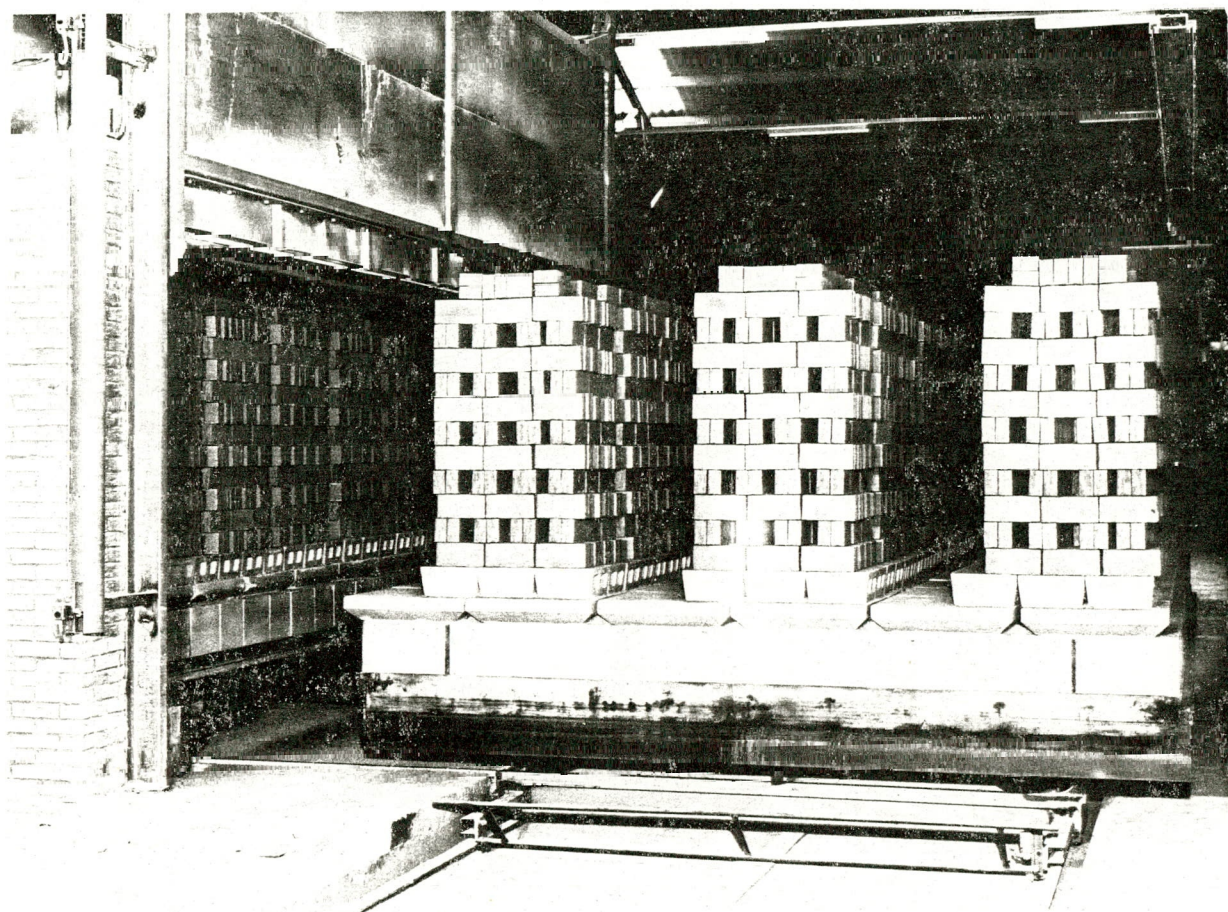
Uit de behandelde rekenvoorbeelden moge blijken, dat met het ontwikkelde eenvoudige rekenmodel op efficiënte wijze het thermodynamisch gedrag vastgesteld kan worden van bekledingen van tunnelovenwagens of van periodiek verhitte en gekoelde ovenwanden.

Het gebruikersvriendelijke rekenprogramma, dat thans ter beschikking staat, biedt daarmee de mogelijkheid reeds aanwezige of nieuw aan te schaffen ovenwagens op energiegebruik te evalueren.

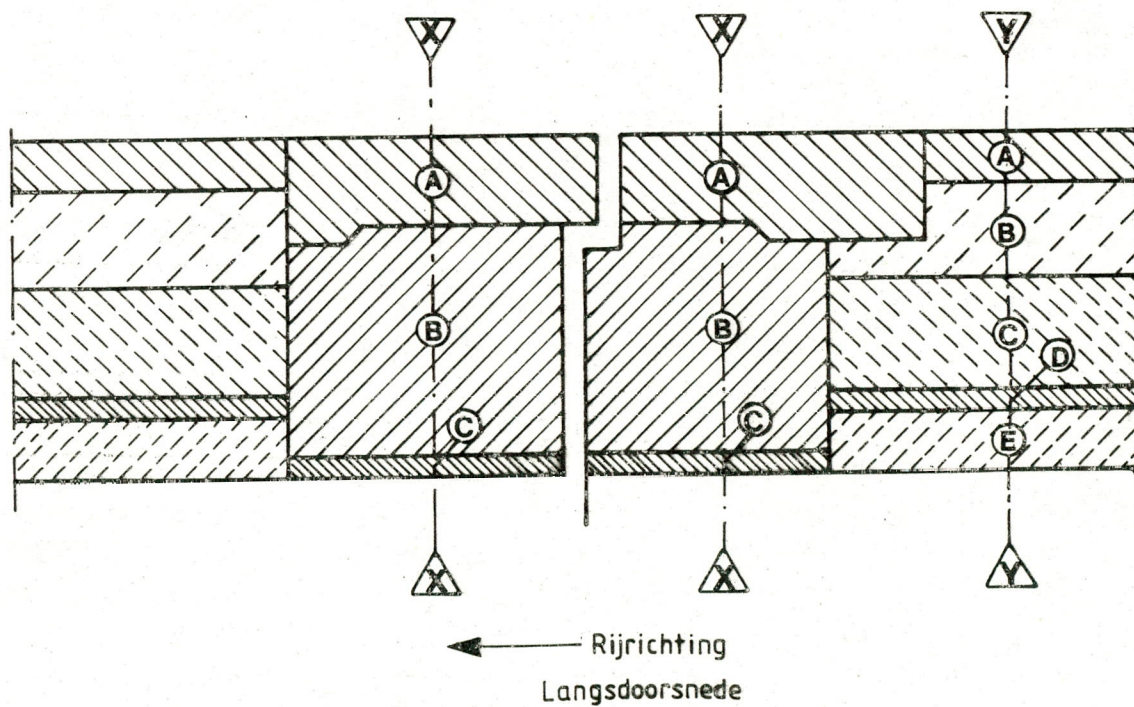
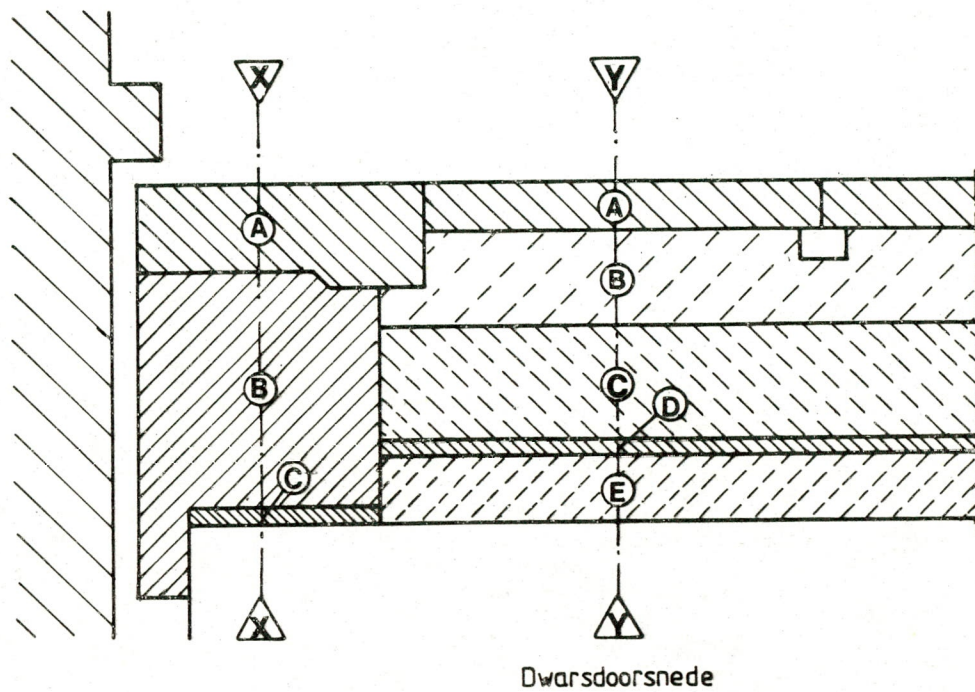
Voor ovenconstructeurs is het voorts een efficiënt hulpmiddel voor het optimaliseren van de ontwerpqualiteit van bekledingen van ovenwagens en ovenwanden.

Het rekenprogramma is bovendien een onmisbaar element in modelberekeningen met betrekking tot het optimaliseren van inrichting en bedrijfsvoering van tunnelovens en het opstellen van warmtebalansen. De tot nu toe gewoonlijk voor deze doeleinden toegepaste rekenmethoden schoten door een beperktere nauwkeurigheid, een gebrek aan per ovenzone gespecificeerde informatie of door een minder algemene gebruikersvriendelijke beschikbaarheid meestal te kort.

[Faint handwritten notes and markings across the bottom of the page.]



figuur 1 Tunnelovenwagen



figuur 2 Voorbeeld van de gelaagde bekleding van een tunnelovenwagen

[illegible]

THERMODYNAMISCH GEDRAG VAN EEN MEERVOUDIG GELAAGDE WAND										
Constructieonderdeel:								oppervlak: m ²		
THERMISCHE GEGEVENS VAN DE CONSTRUCTIEMATERIALEN								STATIONAIRE WARMTESTROOM		
laag:	laag-dikte	aantal ele- menten	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						warmteoverdrachtscoëfficiënt				
begintemp. materialen....., °C						aan koele zijde van X °C				
omgevingstemperatuur....., °C						a=R+S.X [W/(m ² .K)]				
tijdstap....., s						R= S=				
TEMPERATUURVERDELING EN THERMODYNAMISCH GEDRAG										
temp. curve	tijd aan	temp. hete	grensvlaktemperaturen aan einde van secties tussen de lagen:					hoeveelheid warmte		warmte inhoud
sectie	einde	zijde								boven
Nr.	van	aan	A/B	B/C	C/D	D/E	E/-	IN	UIT	15°C,
-	h	sectie	°C	°C	°C	°C	°C	hete zijde MJ/m ²	koele zijde MJ/m ²	einde sectie 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										

figuur 3 Overzicht van invoergegevens en geleverde informatie inzake het thermodynamisch gedrag van een meervoudig geslaagde wand.

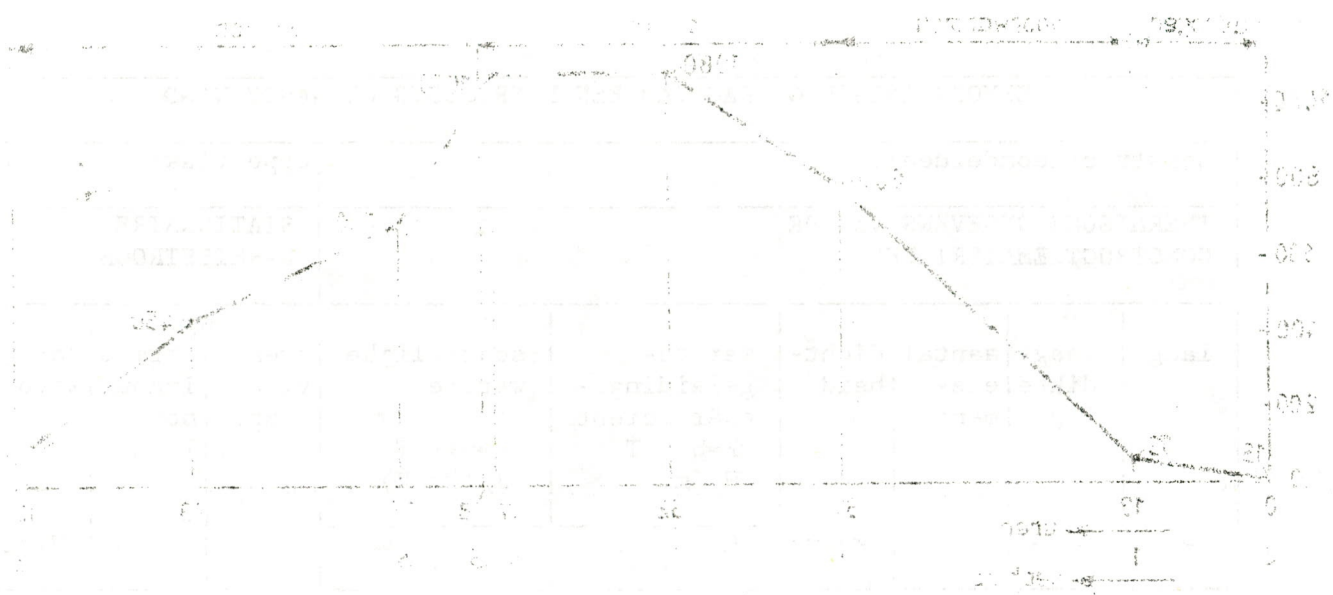


Figure 2

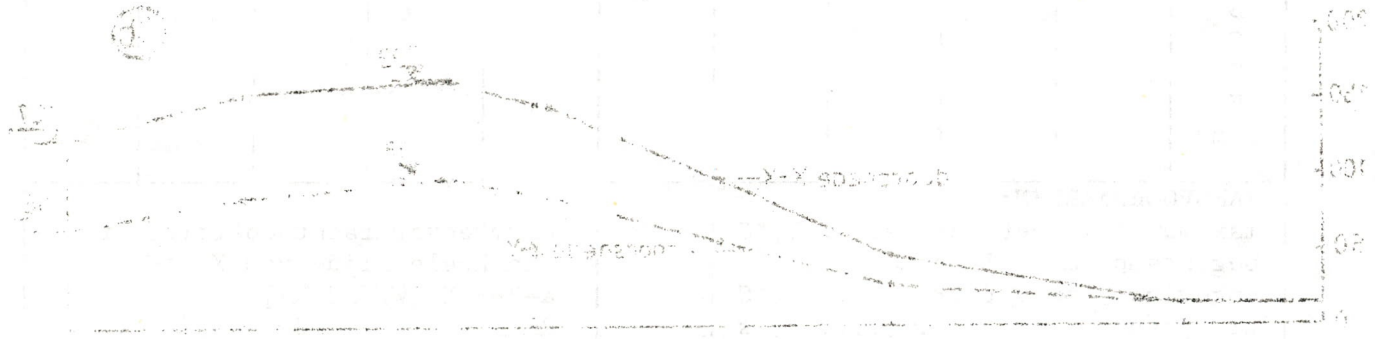


Figure 3

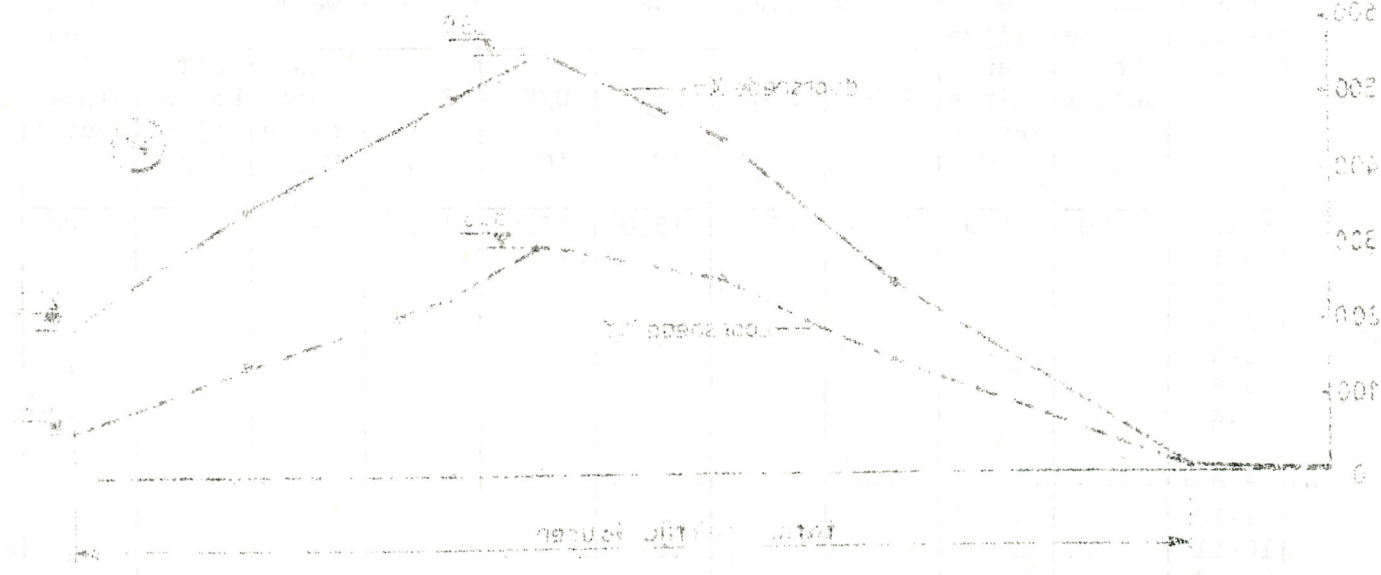
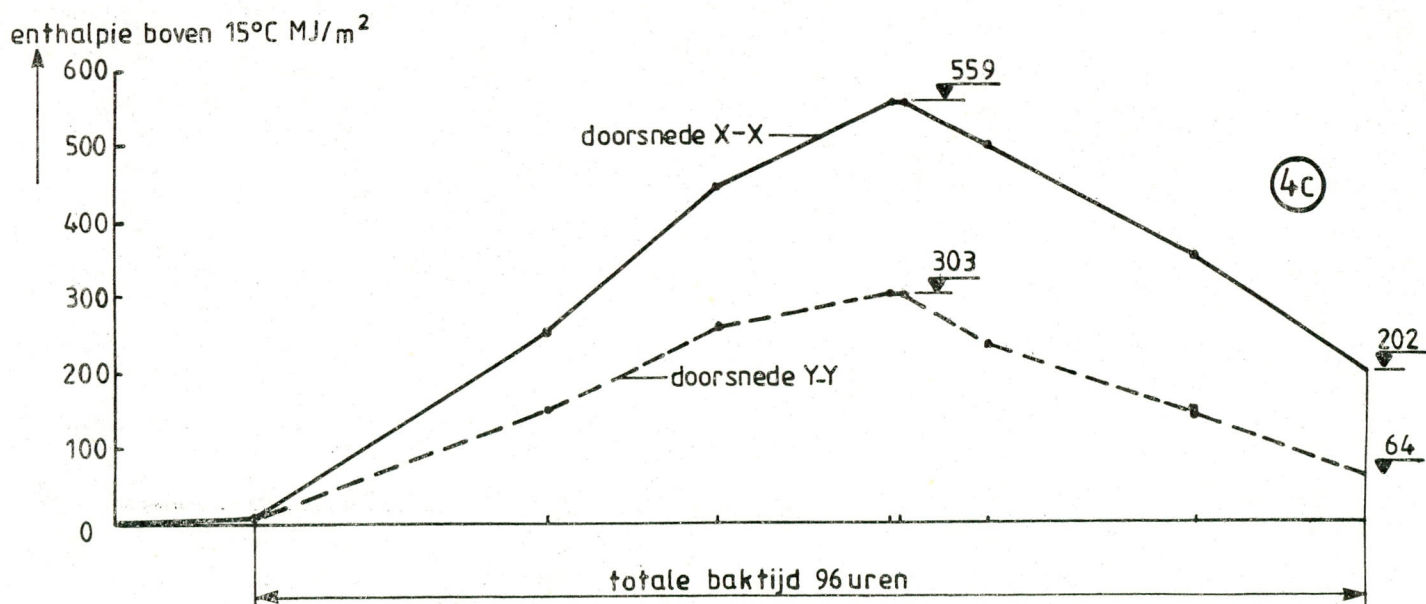
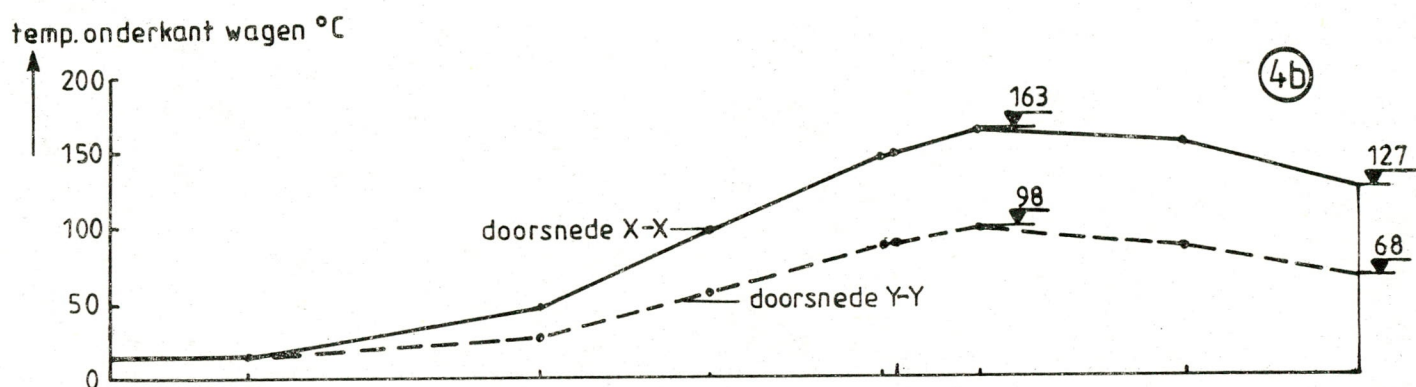
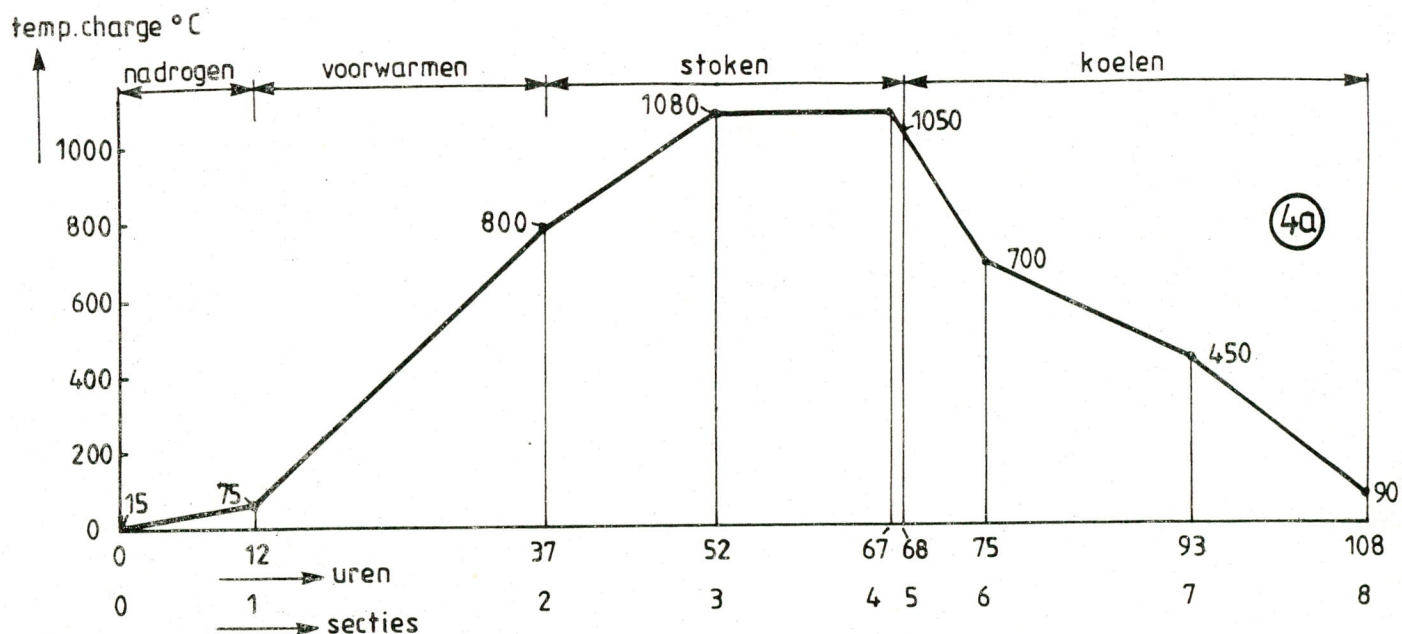


Figure 1 shows the relationship between the variables X and Y. The horizontal axis represents X, ranging from 1 to 10, and the vertical axis represents Y, ranging from 0 to 1000. The solid line represents the function Y = 1000 - 100X, and the dashed line represents the function Y = 100X. The two lines intersect at X = 5, Y = 500.

Figure 2 shows the relationship between the variables X and Y. The horizontal axis represents X, ranging from 1 to 10, and the vertical axis represents Y, ranging from 0 to 1000. The solid line represents the function Y = 1000 - 100X, and the dashed line represents the function Y = 100X. The two lines intersect at X = 5, Y = 500.

Figure 3 shows the relationship between the variables X and Y. The horizontal axis represents X, ranging from 1 to 10, and the vertical axis represents Y, ranging from 0 to 1000. The solid line represents the function Y = 1000 - 100X, and the dashed line represents the function Y = 100X. The two lines intersect at X = 5, Y = 500.



figuur 4 Voorbeelden van het temperatuurverloop aan de hete en de koude zijde van een ovenwagen en van het enthalpieverloop van ovenwagenbekledingen in twee markante verticale doorsneden (wagenrand en wagenkern).