

INTERN VERSLAG

INLEIDING TOT DE BAKTECHNIEK IN DE
KERAMISCHE INDUSTRIE

door

J.H. van der Velden

nijverheidsorganisatie



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 49095 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Afschrift aan: De Stichting Opleiding
Keramici
De Programmacommissie
Grofkeramiek

Ref. no. : 75-01441
Doss.no. : 02-6-40040
Datum : 1 april 1975

„Voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever met betrekking tot de inhoud van dit rapport wordt verwezen naar de Algemene Voorwaarden van TNO".

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO. TNO aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid met betrekking tot de inhoud en/of de vorm van deze uitgave.

SAMENVATTING

Het verslag bevat een beknopt overzicht van de baktechniek in de grofkeramische en fijnkeramische industrie, in de industrie van vuurvaste materialen en in de elektrokeramische industrie.

Er wordt eerst ingegaan op de belangrijkste warmtetechnische en keramische aspecten van het bakproces, waarna de verschillende oventypen zoals de periodieke ovens, de continue kamerovens, de tunnelovens en de ovens voor massagoederen worden behandeld. Het verslag besluit met een summiere bespreking van de controle op het verloop van het bakproces.

VOORWOORD

Dit verslag is op verzoek van de Stichting Opleiding Keramici, secretariaat, Haagweg 139, Postbus 1057, Rijswijk (Z.H.) opgesteld. Het zal dienen voor de samenstelling van een dictaat voor de applicatiecursus Keramiek van de H.T.S. te Dordrecht, die door de S.O.K. wordt verzorgd.

Het verslag bevat de voorlopige tekst van het hoofdstuk 2.2 "Bakken" van deel 2 "Drogen en Bakken" van dit dictaat.

Het is de eerste herziene versie van een met de hand geschreven tekstontwerp van de heer J.H. van der Velden.

Dit oorspronkelijke manuscript werd herzien door een commissie bestaande uit de heren:

Ir. P.J. Tichelaar, voorzitter.

J.P. Tichelaar, secretaris, Postbus 11, Makkum.

Ir. L.L. van Breukelen

Ir. D.J. Perduyn

Ir. H.J. Timmers

J.H. van der Velden

C. van Zeumeren.

De nummering van de paragrafen in dit verslag is aangepast aan die van bedoelde cursus.

INHOUDSOPGAVE

	<u>blz.</u>
SAMENVATTING	2
VOORWOORD	3
2.2.1 Inleiding	5
2.2.2 Warmtetransport in ovens	8
2.2.2.1 Warmteoverdracht door straling	8
2.2.2.2 Warmteoverdracht door convectie	9
2.2.2.3 Warmtetransport door geleiding	11
2.2.2.4 Naijlingen van de temperatuur bij warmtegeleiding	12
2.2.2.5 Naijlingen van de temperatuur bij het warmtetrans- port door straling en convectie	14
2.2.2.6 Tegenstroomwarmteuitwisseling in continue ovens	14
2.2.2.7 Endotherme en exotherme reacties	16
2.2.2.8 Warmtebalans en warmteverbruik	17
2.2.3 Warmtebehandeling	19
2.2.3.1 Inleiding	19
2.2.3.2 De bakcurve	19
2.2.3.3 Het verloop van het bakproces	20
2.2.3.4 De ovenatmosfeer	22
2.2.3.5 De zetwijze	23
2.2.4 Warmteopwekking	27
2.2.4.1 Inleiding	27
2.2.4.2 Het gebruik van brandstoffen	28
2.2.4.3 Verbrandingstechnische berekeningen	29
2.2.4.4 Het gebruik van electriciteit	31
2.2.5 Periodieke ovens	34
2.2.5.1 Inleiding	34
2.2.5.2 Periodieke kamerovens	36
2.2.5.3 Periodieke wagenovens	37
2.2.5.4 Huifovens	38
2.2.5.5 Klokovens	38

	<u>blz.</u>
2.2.6 Continue kamerovens	40
2.2.6.1 Inleiding	40
2.2.6.2 Ringovens	40
2.2.6.3 Zig-zag ovens	43
2.2.6.4 Kamerringovens met overslaande vlam	43
2.2.7 Tunnelovens	45
2.2.7.1 Inleiding	45
2.2.7.2 Wagentunnelovens	46
2.2.7.3 Ringtunnelovens	47
2.2.7.4 Doorschuifovens	48
2.2.7.5 Rollenbaanovens	48
2.2.7.6 Bandovens	49
2.2.7.7 Tunnelovens met andere transportsystemen	49
2.2.8 Ovens voor keramische massagoederen	50
2.2.8.1 Inleiding	50
2.2.8.2 Schachtovens	50
2.2.8.3 Draaiende buisovens	50
2.2.8.4 Ovens met fluïde bed	51
2.2.9 Controle van het bakproces	53
2.2.9.1 Inleiding	53
2.2.9.2 Meting van de oventemperatuur	53
2.2.9.3 Indicatoren voor de warmtebehandeling in de rijpingsperiode	56
2.2.9.4 Contrôle op de mate van sintèring	57
2.2.9.5 Bewaking van de ovenatmosfeer	58
2.2.9.6 Meting van de statische druk	59
2.2.9.7 Regeling van de oventemperatuur	60

Literatuur 62

Figuren: 2.2.a t/m 2.2.y (25 stuks)

2.2.1 Inleiding

De baktechniek heeft betrekking op de uitvoering van een warmtebehandeling van keramische halffabrikaten, waarbij zodanige fysische en chemische toestandsveranderingen worden bewerkstelligd, dat het produkt de gewenste eigenschappen verkrijgt (zie 1.3).

De permanente inrichtingen, waarin deze warmtebehandeling (het bakproces) plaatsvindt, noemt men ovens.

Voor halffabrikaten van de grofkeramische industrie, de industrie van vuurvaste materialen en de elektrokeramische industrie is één bakproces meestal voldoende voor het verkrijgen van het gewenste produkt. Voor de fabricage van fijnkeramische produkten zijn dikwijls twee of drie warmtebehandelingen noodzakelijk (biscuitbrand, glazuurbrand of gladbrand, decorbrand), waarbij de halffabrikaten tussentijds nog een oppervlaktebehandeling ondergaan.

Het bakproces omvat in principe een opwarmproces waarbij het half-fabrikaat tot een bepaalde temperatuur (de baktemperatuur) wordt verhit, een rijpingsproces bij deze temperatuur en een koelproces.

De warmtebehandeling is ten aanzien van de keuze van opwarmnelheden, baktemperatuur i.d.v. rijpingsperiode en koelsnelheden, kortom van het temperatuurverloop (de bakcurve), alsmede voor wat betreft de samenstelling van het gasvormige medium dat het produkt omringt (de ovenatmosfeer), gebonden aan bepaalde voorwaarden. Wanneer hieraan niet wordt voldaan, wordt afbreuk gedaan aan de kwaliteit van het produkt. Variaties in de warmtebehandeling van tegelijkertijd of achtereenvolgens gebakken keramische artikelen, al dan niet gepaard gaande met fluctuaties in de grondstofsamenstelling van de halffabrikaten, kunnen de constantheid van de kwaliteit zodanig aantasten, dat de artikelen na het bakproces gesorteerd moeten worden. Het is daarom van belang dat men het bakproces zo goed mogelijk beheerst.

Ter beperking van de bouw- en exploitatiekosten van een oven voor een gegeven produktiecapaciteit moet het bakproces met behoud van de kwaliteit van het gebakken produkt zo mogelijk in een korte tijdsduur en

met een laag energieverbruik in een eenvoudige installatie gerealiseerd worden.

Onderscheiden worden periodieke en continue ovens.

Periodieke ovens leveren periodiek een hoeveelheid produkt, gelijk aan de totale ovencharge. Bovendien blijft het produkt gedurende de gehele warmtebehandeling op een vaste plaats. Zodra een oven is gevuld wordt deze opgestookt tot de baktemperatuur. Na een doorwarmperiode volgt de koeling, waarna de oven wordt geleegd.

Continue ovens produceren een continue stroom gebakken produkt, of leveren telkens na gelijke tussenpozen een hoeveelheid produkt, gelijk aan een deel van de ladinginhoud van de gehele oven.

Er zijn continue ovens, waarin het produkt tijdens het bakproces op een vaste plaats blijft (continue kamerovens) en andere, waarin het produkt wordt voortbewogen (tunnelovens).

Continue kamerovens bestaan uit een reeks aan elkaar gekoppelde ovenruimten, kamers genaamd. In de bedrijfstoestand van de oven bevindt elke kamer zich in een andere fase van de warmtebehandeling.

Figuur 2.2.a geeft deze toestand schematisch weer. De temperatuurverdeling over de kamers heeft de gedaante van een golf. Telkens na gelijke tussenpozen (van bijvoorbeeld 8 uren), is er een kamer met gebakken produkt zover afgekoeld, dat deze kan worden geleegd, terwijl in een andere kamer uit de reeks de warmtebehandeling juist begint. De temperatuurcurve heeft zich dan een kamer verplaatst (figuur 2.2.a'). De door een bepaalde kamer gevoerde gassen (rookgassen of lucht), worden gebruikt voor de opwarming respectievelijk koeling van de naastliggende kamer, die zich nog in een voorgaande fase van het bakproces bevindt. Daardoor krijgt de temperatuurcurve een vloeiend verloop en plant de temperatuurcurve zich regelmatig voort. Geeft men de temperatuurcurve een vaste positie in een assenstelsel, dan schuiven als het ware zowel het ovenlichaam als de ovencharge met een regelmatige beweging langs de lengteas.

De kamers zijn in het algemeen in een keten om een gemeenschappelijk rookgasafvoerkanaal gegroepeerd (figuur 2.2.a").

In tunnelovens wordt het produkt door een of meer parallel lopende kanalen gevoerd, die van plaats tot plaats zodanig zijn geconditioneerd, dat het produkt op zijn reis de gewenste warmtebehandeling ondergaat (figuur 2.2.b). Afhankelijk van het toegepaste transportsysteem leveren deze ovens een volledig continue of een intermitterende stroom gebakken produkt.

Elke soort oven komt voor in talrijke uitvoeringsvormen.

De grote variëteit vloeit voort uit verschillen in:

- soort, vorm en afmetingen van het te bakken produkt,
- rangschikking van de produkten in de ovenruimte,
- vereiste warmtebehandeling,
- produktiecapaciteit van de oven,
- techniek bij het vullen en legen,
- energiedrager (vaste, vloeibare of gasvormige brandstoffen, dan wel elektriciteit),
- methode van opwarmen en koelen (direct of indirect),
- positie van de warmtebronnen ten opzichte van de charge,
- stromingsrichting van de ovengassen.

De keuze wordt mede bepaald door eisen met betrekking tot de flexibiliteit, de veiligheid, de zorg voor het milieu en de opstellingsplaats.

2.2.2 Warmtetransport in ovens

2.2.2.1 Warmteoverdracht door straling

De aan- en afvoer van warmte naar respectievelijk uit een ovencharge vindt plaats door straling, convectie en geleiding. Warmteuitwisseling door straling tussen vaste lichamen treft men in ovens aan tussen de wanden en delen van de charge, tussen delen van de charge onderling en tussen roetdeeltjes in lichtgevende vlammen en hun omgeving. Een voorwaarde voor de warmteuitwisseling door straling tussen lichamen is, dat deze niet wordt onderschept.

Indien een lichaam met een oppervlak A_1 en een temperatuur T_1 geheel door een ander lichaam met een groter oppervlak A_2 en een temperatuur T_2 wordt omsloten, bedraagt de warmtestroom:

$$\phi_s = A_1 \cdot C_r \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (01)$$

$$C_r = \frac{C_z}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (02)$$

Hierin is:

- ϕ_s , warmtestroom in J/s
- A_1 , effectief stralingsoppervlak van het kleinste lichaam, ongeacht de richting van de warmtestroom in m^2
- A_2 , effectief stralingsoppervlak van het grootste lichaam in m^2
- C_r , resulterende stralingscoëfficiënt in $J/(m^2 \cdot s \cdot K^4)$
- T_1 , absolute temperatuur van A_1 in K
- T_2 , absolute temperatuur van A_2 in K
- C_z , stralingsconstante van een zwart lichaam in $J/(m^2 \cdot s \cdot K^4)$. $C_z = 5,77$
- ϵ_1 , emissiequotiënt van A_1
- ϵ_2 , emissiequotiënt van A_2

Uit formule 01 valt af te leiden, dat de warmteoverdracht door straling sterk toeneemt met de temperatuur. De emissiequotiënten zijn afhankelijk van de materiaal soort, de oppervlaktegeaardheid en de temperatuur van de lichamen. Voor oppervlakten van vuurvaste, grofkeramische en fijnkeramische materialen met een temperatuur van $\theta^{\circ}\text{C}$ is de getalwaarde van ϵ bij ruwe benadering

$$\epsilon = 0,95 - f.\theta \quad (f = 0,3.10^{-3} + \text{of} - 15\%) \quad (03)$$

Wanneer de straling via de open ruimten tussen de produkten grotendeels in een charge kan doordringen mag de charge als een zwart lichaam worden opgevat ($\epsilon=1$).

De formules 01 en 02 zijn ook bruikbaar voor gelijke recht tegenover elkaar liggende parallelle oppervlakken. In dat geval wordt $\frac{A_1}{A_2} = 1$. Wanneer A_2 zeer groot is ten opzichte van A_1 mag $\frac{A_1}{A_2}$ op nul worden gesteld en blijven de formules ook van toepassing. Voor andere geometrische verhoudingen gelden enigszins andere formules, die hier verder buiten beschouwing blijven.

Gassen zoals waterstof, zuurstof, stikstof en lucht laten de straling zonder absorptie van betekenis door; zij zijn diathermaan. Een aantal andere gassen echter, waaronder koolmonoxyde, koolwaterstoffen, waterdamp, koolzuur en zwaveldioxyde absorberen straling in bepaalde beperkte golflengtegebieden en emitteren bij verhitting straling in deze karakteristieke trajecten. Het zijn selectieve stralers. In met brandstof gestookte ovens is vooral de selectieve straling van de waterdamp en het koolzuur in de verbrandingsgassen van belang. Bij toenemende temperatuur, dikte van de gasstroom en partiële druk van CO_2 en H_2O wordt de straling sterker. Op de berekeningswijze wordt hier niet ingegaan.

2.2.2.2 Warmteoverdracht door convectie

Warmteuitwisseling door convectie treedt op tussen de ovencharge en ovenwanden enerzijds en het gasvormige medium anderzijds. Naarmate de ovengassen ten opzichte van het oppervlak van charge en wanden sterker

in beweging zijn, is de hoeveelheid overgedragen warmte groter. Wanneer de bewegingstoestand kunstmatig in stand wordt gehouden spreekt men van gedwongen convectie en wanneer ze toegeschreven moet worden aan inwendige oorzaken (bijvoorbeeld aan dichtheidsverschillen), van natuurlijke convectie. Beide typen convectieve warmteoverdracht treft men in ovens aan.

De warmtestroom ϕ_c (J/s), die door een gas met een temperatuur θ_g ($^{\circ}\text{C}$) door convectie wordt overgedragen aan een oppervlak A (m^2) met een temperatuur θ_0 ($^{\circ}\text{C}$), is:

$$\phi_c = \alpha_c \cdot A \cdot (\theta_g - \theta_0) \quad (04)$$

Hierin is α_c in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie.

Zowel de getalwaarde van α_c als van A zijn, voor de grote verscheidenheid in vormen, afmetingen en rangschikkingen van keramische producten, meestal moeilijk te bepalen.

Het functioneel verband tussen α_c en de relevante parameters, zoals de gassnelheid, de geometrische verhoudingen, de dichtheid, viscositeit en warmtegeleidingscoëfficiënt van het gas, kan met behulp van dimensieloze kengetallen aan de hand van experimenten worden vastgesteld. Vaak moeten α_c en A echter worden geschat.

Het aandeel van de gasstraling van H_2O en CO_2 in de warmteoverdracht, wordt eenvoudigheidshalve in een analoge formule tot uitdrukking gebracht.

$$\phi_s = \alpha_s \cdot A \cdot (\theta_g - \theta_0) \quad (05)$$

Hierin is α_s in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de gasstraling, die in sterke mate temperatuurafhankelijk is.

Voor de warmteoverdracht door convectie en gasstraling samen geldt:

$$\phi_{c+s} = (\alpha_c + \alpha_s) A (\theta_g - \theta_0) \quad (06)$$

De waarde van α_c blijkt in ovens voor de keramische industrie meestal te liggen tussen 12,5 à 20 J/(m².s.K) bij 200°C en 20 à 30 J/(m².s.K) bij 1400°C.

α_s varieert in het algemeen tussen 0,5 à 1,0 J/(m².s.K) bij 200°C en 16 à 25 J/(m².s.K) bij 1400°C.

2.2.2.3 Warmtetransport door geleiding

In de ovenwanden en in de produkten vindt het warmtetransport plaats door geleiding.

De meest eenvoudige vorm van warmtegeleiding treft men aan in de wanden van tunnelovens. Hierin is de temperatuur namelijk op elke plaats constant. De warmtestroming is stationair. Voor een mono-dimensionaal stationair warmtetransport in de meestal uit lagen van verschillende vuurvastheid en warmteisolerend vermogen opgebouwde wanden van dit oventype geldt:

$$\Phi_g = A \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (07)$$

Hierin is:

Φ_g , warmtestroom door geleiding in J/s

A , beschouwd oppervlak in m²

θ_1 , binnenwandtemperatuur in °C

θ_2 , buitenwandtemperatuur in °C

d_i , dikte van laag i in m

λ_i , warmtegeleidingscoëfficiënt van laag i in J/(m.s.K)

n , aantal lagen

De wanden van periodieke ovens en continue kamerovens worden in tegenstelling tot die van tunnelovens periodiek opgewarmd en gekoeld. De warmtestroming is niet stationair.

Tijdens de opwarming hoort een deel van de aan het binnenoppervlak van de wand toegevoerde warmte zich in de wand op (geaccumuleerde warmte), de rest vloeit naar buiten af (transmissieverlies).

Gedurende de koeling blijft warmte naar buiten afvloeien, doch een deel van de tijdens de opwarming geaccumuleerde warmte stroomt naar de ovenruimte terug (geregenereerde warmte).

De grootte van de warmtestromingen is sterk afhankelijk van de bakcurve en van dikte en samenstelling van de wanden. De berekeningswijze blijft hier buiten beschouwing.

Ook in de scherf van de produkten is de warmtestroming tijdens de opwarming en koeling instationair en bovendien vaak meerdimensionaal. Een belangrijk aspect daarbij is de naijling van het temperatuurverloop op verschillende diepten in de scherf.

2.2.2.4 Naijlingen van de temperatuur bij warmtegeleiding

Bij bestudering van het monodimensionale warmtetransport in een planparallele plaat met een halve dikte gelijk aan r (m), die aan beide zijden wordt verwarmd of gekoeld met een constante opwarm- respectievelijk koelsnelheid p (K/s) blijkt, dat zich na een aanlooperperiode een parabolisch temperatuurprofiel in de dwarsdoorsnede ontwikkelt (figuur 2.2.c).

Voor het temperatuurverschil $\Delta\theta$ (K), tussen het oppervlak en de kern van de plaat geldt zowel tijdens de opwarming als tijdens de koeling:

$$\Delta\theta = p \cdot s \quad (08)$$

Hierin is s , de naijling in s . van de kern ten opzichte van het oppervlak (figuur 2.2.c).

Deze naijling s blijkt rechtevenredig te zijn met het kwadraat van de halve plaatdikte en onafhankelijk van de opwarm- of koelsnelheid p .

$$s = \frac{r^2}{2a} \quad (09)$$

a is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt in m^2/s . De orde van grootte van a varieert voor uit klei vervaardigde produkten voornamelijk afhankelijk van de volumieke massa ρ tussen $350 \cdot 10^{-9} m^2/s$ bij $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ en $600 \cdot 10^{-9} m^2/s$ bij $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$.

Wanneer een opwarm- of koelsnelheid p_1 tijdens de warmtebehandeling met een waarde Δp (K/s) wordt vergroot of verkleind tot p_2 , zal zich een ander temperatuurprofiel in de plaat ontwikkelen met een nieuwe evenwichtswaarde van $\Delta\theta_2$ gelijk aan $p_2 \cdot s$ (figuur 2.2.d). Theoretisch wordt die nieuwe evenwichtswaarde eerst na oneindig lange tijd bereikt. Stelt men als eis, dat de waarde van $\Delta\theta$ nog ϑ (K) mag afwijken van de uiteindelijke nieuwe evenwichtswaarde $p_2 \cdot s$, dan blijkt de hiervoor nodige aanpassingstijd t (s) gerekend van het tijdstip dat p_1 werd gewijzigd, met voldoende nauwkeurigheid berekend te kunnen worden met:

$$t = -1,9 \text{ s} \cdot 10^9 \log \left[\frac{\vartheta}{\Delta p \cdot s} \right] \quad (10)$$

Rekenvoorbeelden:

- 1) Voor een dichtgezet blad stenen, ter dikte van bijvoorbeeld 210 mm met een a van $400 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, blijkt de naijling bij opwarming of koeling bij berekening met formule 09, 3,8 uren te bedragen.
Bij een constante opwarmsnelheid van bijvoorbeeld $20^\circ\text{C}/\text{uur}$, zal het temperatuurverschil tussen het oppervlak en de kern van het blad op grond van formule 08: 76°C bedragen.
- 2) Het blad wordt bijvoorbeeld met 20°C per uur opgewarmd, tot het oppervlak de verder constant blijvende baktemperatuur heeft bereikt. Gewenst wordt, dat deze temperatuur door de kern van het blad tot op 5°C wordt genaderd. Bij berekening met formule 10, blijkt, dat hiervoor gerekend van het tijdstip, dat het oppervlak de baktemperatuur bereikte, circa 8,5 uren nodig zijn.
- 3) Een blad stenen, ter dikte van 210 mm en met een a van $400 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, wordt bijvoorbeeld van 1100°C af tot een oppervlaktetemperatuur van 725°C gekoeld met een snelheid van $40^\circ\text{C}/\text{uur}$, waarna de koelsnelheid aan het oppervlak wordt teruggebracht tot $20^\circ\text{C}/\text{uur}$. Gewenst wordt, dat de bij de nieuwe snelheid behorende evenwichtswaarde van

$\Delta\theta$ (76°C), met een afwijking van ten hoogste 10% wordt benaderd ($\theta < 7,6^{\circ}\text{C}$). Bij berekening met formule 10, zal dat pas het geval zijn, bij een oppervlaktetemperatuur lager dan 581°C .

De kennis van deze uit de warmtegeleiding voortvloeiende naijlingen is vooral van belang voor de specificatie van bakprocessen van relatief grote massieve produkten en compacte produktenstapelingen.

2.2.2.5 Naijlingen van de temperatuur bij het warmtetransport door straling en convectie

In een groep produkten (bijvoorbeeld de charge van een periodieke oven) ontstaan in de richting waarin het warmtetransport door convectie en straling plaatsvindt temperatuurverschillen, die zich manifesteren als naijlingen in het temperatuurverloop van de verschillende delen van de charge.

Ook dit soort naijlingen speelt een belangrijke rol bij de specificatie van de warmtebehandeling.

Men beperkt ze door de charge goed doorstroombaar te maken, een voldoende grote stroom ovengassen door de charge te leiden en door de afmeting in de hoofdrichting van het warmtetransport zo klein mogelijk te kiezen. Ten aanzien van de straling dient men bedacht te zijn op mogelijke schaduweffecten.

2.2.2.6 Tegenstroomwarmteuitwisseling in continue ovens

In een periodieke oven bezit men in principe een grote mate van vrijheid in de keuze van zowel het temperatuurverloop met de tijd als de ovenatmosfeer in de opeenvolgende processtadia. In tunnelovens is dit in het algemeen in mindere mate het geval. In met brandstof gestookte tunnelovens bijvoorbeeld (fig. 2.2.e), wordt het produkt in tegenstroom met de rookgassen opgewarmd en later dikwijls weer in tegenstroom met lucht gekoeld. Deze omstandigheden beperken de conditioneringsmogelijkheden in de betreffende zones. Ook continue kamerovens zijn op grond van de in hoofdstuk 2.2.2 gegeven voorstellingswijze als twee in serie geschakelde tegenstroomwarmtewisselaars op te vatten, waarbij dan niet alleen het produkt doch ook de wanden van de ovenkamers achtereenvolgens worden opgewarmd en gekoeld.

In een tegenstroomwarmtewisselaar wordt het temperatuurverloop in sterke mate bepaald door het quotiënt E van de warmtecapaciteit van de twee massastromen.

Bij een warmteuitwisseling tussen een massastroom W van het produkt in kg/s en een stroom ovengassen q_g , uitgedrukt als volumestroom in m^3/s in normaaltoestand ($0^\circ C - 101,3 \text{ kN/m}^2$) geldt voor dit quotiënt onder ideale omstandigheden:

$$E = \frac{c_g \cdot q_g}{c_w \cdot W} \quad (11)$$

Hierin is:

c_g , gemiddelde soortelijke warmte bij constante druk van het ovengas in het beschouwde temperatuurgebied in $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
 c_w , gemiddelde soortelijke warmte van het produkt in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

In werkelijkheid wordt het temperatuurverloop in een als tegenstroomwarmtewisselaar functionerend ovengedeelte mede beïnvloed door bijvoorbeeld:

- exotherme en endotherme reacties in het produkt
- transmissieverliezen van het ovenlichaam
- additionele opwarming respectievelijk koeling van ovenwanden, ondersteuningsmiddelen voor de ovencharge enzovoorts.

Het effect hiervan op het temperatuurverloop kan men globaal in rekening brengen, door de produktstroom W in formule 11 te vervangen door een equivalente massastroom W_e , waarbij:

$$W_e = f \cdot W \quad (12)$$

Formule 11 wordt dan:

$$E = \frac{c_g \cdot q_g}{f \cdot c_w \cdot W} \quad (13)$$

In een ideale tegenstroomwarmtewisselaar is $f = 1$. In ovens is f onder meer afhankelijk van het type en de uitvoeringsvorm, in een tunneloven bijvoorbeeld $f = 1,25$ en in een continue kameroven bijvoorbeeld $f = 2,5$. (in voorwarmzone)

Wanneer de getalwaarde van E in koel- of voorwarmzone gelijk is aan 1, is het temperatuurverloop in de betreffende zone rechtlijnig. Het verschil tussen de gemiddelde produkttemperatuur en de gemiddelde ovengastemperatuur blijft in dat geval van plaats tot plaats constant. Is E groter of kleiner dan 1, dan blijken de temperatuurcurven voor het ovengas en het produkt exponentieel te verlopen. In figuur 2.2.e zijn de gevolgen van een bepaalde keuze van E schematisch weergegeven. De praktijkwaarden van E liggen meestal tussen 0,85 en 1,15. Formule 13 kan ook geschreven worden als:

$$E = \frac{c_g}{f \cdot c_w} \cdot G \quad (14)$$

Hierin is G de volume-massaverhouding in m^3/kg (in normaaltoestand)

$$G = \frac{q_g}{W} \quad (15)$$

Door toevoer of afvoer van ovengassen in de verschillende ovenzones wordt de volume-massaverhouding G benedenstrooms gewijzigd, waardoor ook E verandert. Op deze wijze kan men het temperatuurverloop in de oven optimaliseren.

2.2.2.7 Endotherme en exotherme reacties

Het reactiewarmtesaldo van de endotherme en exotherme reacties, die tijdens de warmtebehandeling in de grondstof plaatsvinden, blijkt in het algemeen betrekkelijk klein te zijn ten opzichte van de

totale hoeveelheid warmte die per massa-eenheid gebakken produkt wordt toegevoerd. Meestal kan daarom met een globale berekening van deze warmte-effecten worden volstaan.

De belangrijkste endotherme processen zijn voor zover van toepassing:

- de verdamping van het resterende poriënwater à 2,40 MJ per kg gevormde waterdamp tussen 15 en 100°C (gemiddeld bij 50°C)
- het verdrijven van het chemisch gebonden water à 4,10 MJ per kg gevormde waterdamp tussen 450 en 650°C (gemiddeld bij 575°C)
- het ontleden van calciumcarbonaat à 3,77 MJ per kg gevormd koolzuur tussen 650 en 900°C (gemiddeld bij 850°C).

De belangrijkste exotherme reactie is meestal de verbranding van eventueel aanwezige humus à 18,45 MJ per kg humus tussen 200 en 500°C (gemiddeld bij 350°C).

2.2.2.8 Warmtebalans en warmteverbruik

Warmtebalansen:

Warmtebalansen kunnen betrekking hebben op het gehele bakproces of op een deel daarvan (bijvoorbeeld de koeling). Het is daarbij noodzakelijk, de grenzen van het systeem dat wordt onderzocht, nauwkeurig vast te leggen.

De balans is een hulpmiddel bij het ontwerpen van ovens. Voor in bedrijf zijnde ovens geeft de balans een inzicht in mogelijke energiebesparingen of verbeteringen van het bakproces. Figuur 2.2.f toont een eenvoudige warmtebalans van een tunneloven.

Enthalpie:

De soortelijke enthalpie in kJ/kg van uit klei vervaardigde produkten, alsmede die van rookgassen en lucht in kJ/m³ (in normaaltoestand) zijn ten opzichte van een temperatuurniveau van 0°C voor temperaturen tot 1400°C weergegeven in de tabel van figuur 2.2.g. De condensatiewarmte van de in de rookgassen aanwezige waterdamp is niet in de enthalpie begrepen, aangezien de rookgassen boven het dauwpunt daarvan worden

afgevoerd. Om dezelfde reden wordt bij de berekening van de met brandstof ingevoerde warmte de stookwaarde van de brandstof gebruikt.

De weergegeven getalwaarden van de soortelijke enthalpie van rookgassen gelden met voldoende grote nauwkeurigheid voor de rookgassen van steenkool, stookolie, cokesovengas, generatorgas, Nederlands aardgas, propaan en butaan.

Specifiek warmteverbruik:

Onder het netto-specifiek warmteverbruik van een oven verstaat men de hoeveelheid warmte, die boven het temperatuurniveau van de omgeving (bijvoorbeeld 15°C) door middel van brandstof of elektriciteit aan de oven wordt toegevoerd voor het verkrijgen van 1 kg gebakken produkt.

Positieve of negatieve reactiewarmtesaldi blijven buiten beschouwing. Onder het bruto-specifiek warmteverbruik verstaat men het warmteverbruik betrokken op 1 kg van een gebakken ovencharge, inclusief de hulpmaterialen, die voor de ondersteuning en bescherming van de produkten zijn gebruikt (zie 2.2.3.5).

2.2.3 Warmtebehandeling

2.2.3.1 Inleiding

Het te bakken halffabrikaat bevat in het algemeen minder dan 5% Vocht. Sommige halffabrikaten, voornamelijk uit de grofkeramische industrie en de industrie voor vuurvaste produkten, worden vóór het bakproces nagedroogd en tot 80 à 125°C voorgewarmd in een afzonderlijke goed conditioneerbare ruimte. Dit is nodig wanneer het halffabrikaat een snelle opwarming in het in een oven meestal moeilijk te beheersen opwarmtraject tot 125°C niet verdraagt, of wanneer oppervlakteverkleuring door condensatie van zwavelhoudende rookgassen vermeden moet worden.

Indien het halffabrikaat op de weg naar de oven door vocht opneming uit de omringende lucht schade kan lijden (zie 1.2.5.4) geschieden het transport en de opslag in verwarmde lucht van 25 tot 50°C:

2.2.3.2 De bakcurve

De bakprocessen van de diverse keramische produkten onderscheiden zich in de eerste plaats van elkaar door een sterk verschillend temperatuurverloop met de tijd. De opwarm- en koelsnelheden variëren tussen enkele en verscheidene honderden graden Celsius per uur. Ook de baktemperaturen lopen sterk uiteen zoals uit de tabel van figuur 2.2.h blijkt.

In figuur 2.2.i is schematisch een bakcurve weergegeven voor een fictief keramisch produkt. De curve is verdeeld in trajecten waarin het temperatuurverloop met de tijd lineair is. In werkelijkheid zal de curve vloeiend verlopen. Het aantal trajecten en de grenzen daarvan worden in de eerste plaats bepaald door eisen met betrekking tot de kwaliteit van het produkt. De specificatie vindt plaats op grond van theoretische overwegingen en experimenteel onderzoek, waarbij voor wat betreft de keuze van de temperatuurgrenzen rekening gehouden wordt met naijlingen in het temperatuurverloop in de scherf van de afzonderlijke produkten en in de ovencharge als geheel bezien (zie 2.2.2.4 en 2.2.2.5).

Ook de technisch economische realiseerbaarheid van een gedifferentieerde bakcurve speelt een belangrijke rol bij de specificatie daarvan. De bakcurve die in een concreet geval niet alleen de kwaliteit van de produkten waarborgt, maar tevens op de in economisch opzicht meest gunstige wijze technisch realiseerbaar is noemt men de optimale bakcurve.

2.2.3.3 Het verloop van het bakproces

- Opwarmperiode

Het verloop van de opwarmsnelheid wordt zodanig gekozen, dat de toestandsveranderingen die het produkt ondergaat en de spanningen die ontstaan bij de thermische uitzetting van het produkt geen aanleiding geven tot schade (bijvoorbeeld scheuren, verkleuringen, ongewenste poriënstructuur). Kort voor het begin van de sintering wordt de opwarmsnelheid meestal zover verminderd, dat de door nauwlijken ontstane temperatuurverschillen tot op dat moment aanvaardbare waarden worden teruggebracht (egalisatieperiode).

- Rijpingsperiode

Gedurende de rijpingsperiode wordt de temperatuur in het algemeen geleidelijk opgevoerd tot een bepaalde waarde, die vervolgens enige tijd wordt aangehouden.

De mate van sintering, die een produkt ondergaat is een functie van de temperatuur en de verblijftijd op die temperatuur en is bovendien sterk afhankelijk van de ovenatmosfeer en de grondstofsamenstelling. De relatie kan bijvoorbeeld dilatometrisch worden vastgesteld. Met de uit dit onderzoek verkregen gegevens en op grond van de kennis van het verloop van de tijdafhankelijke temperatuurverschillen in de charge (zie 2.2.2.4 en 2.2.2.5), kunnen het temperatuurverloop en de totale tijdsduur van de rijpingsperiode zodanig worden gekozen, dat de mate van sintering in alle delen van de charge aan de gestelde eisen voldoet.

Tijdens de sintering kunnen keramische produkten onder invloed van hun eigen gewicht of van een uitwendige belasting plastisch deformeren. De deformatie is in het algemeen groter naarmate het produkt sterker wordt gesinterd en naarmate de belasting groter is.

Deze deformatie bedreigt de vormjuistheid van het produkt.

Bij gestapelde produkten betekent zij tevens een gevaar voor de stabiliteit van de stapels. Ofschoon de belasting kan worden verminderd door de produkten plaatselijk te ondersteunen en de hoogte van stapelingen niet te groot te kiezen, beperkt de pyroplastische deformatie de toe te passen mate van sintering en beïnvloedt zij de specificatie van de warmtebehandeling in de rijpingsperiode.

Geheel afhankelijk van het type produkt spelen soms nog enkele, hier buiten beschouwing blijvende, additionele kwaliteitseisen een rol bij de specificatie van het rijpingsproces.

- Koelperiode

De voor een veilige en snelle afkoeling toe te passen koelsnelheden zijn afhankelijk van kristallisatieprocessen en kristalomzettingen in de scherf en van de thermische contractie van het produkt.

Het materiaal is bij het begin van de koeling in het algemeen nog enigszins plastisch. Het kan in die fase meestal vrij snel worden gekoeld, omdat de thermische contractie de spanningen niet hoog doet oplopen. De koelsnelheid is in het eerste stadium wel van invloed op eventuele kristallisatieprocessen in de scherf, hetgeen bijvoorbeeld van betekenis kan zijn voor de glans van geglazuurde produkten.

Beneden een bepaalde temperatuur verdwijnen de plastische eigenschappen. In normale fijnkeramische en grofkeramische materialen is dit bijvoorbeeld in een temperatuurgebied tussen 800°C en 600°C het geval. In dit traject kan een hoge koelsnelheid gepaard gaande met een grote temperatuurgradient blijvende spanningen in de scherf doen ontstaan, die de stootvastheid van deze produkten nadelig beïnvloeden.

In temperatuurtrajecten, waarin kristalomzettingen plaatsvinden, die met volumeveranderingen gepaard gaan, kunnen door een te hoog gekozen koelsnelheid koelscheuren ontstaan. Vooral bij gebruik van kwartsrijke grondstoffen, met een kwartsomzetting bij 575°C en bovendien soms met een kristobalietomzetting tussen 275 en 200°C , vereist de specificatie van het koelsnelheidsverloop dan ook bijzondere zorg.

De temperatuur waarbij het koelproces in de oven kan worden beëindigd verschilt van geval tot geval. Dikwijls is het mogelijk het koelproces in de oven reeds bij circa 300°C af te breken en daarbuiten voort te zetten.

Op grond van warmteeconomische overwegingen, ter waarborging van gunstige werkomstandigheden, dan wel ter besparing op de tijdsduur, die een voortgezette natuurlijke koeling buiten de oven zou vergen, wordt de koeling in de oven meestal pas bij lagere temperatuur afgebroken. In continue ovens waarin de koellucht zich in tegenstroom met het koelende produkt door de oven beweegt, draagt een verdere afkoeling in de oven bovendien bij tot de conditionering van de koellucht in de hogere temperatuurtrajecten.

2.2.3.4 De ovenatmosfeer

Zeer veel keramische produkten ondergaan het gehele bakproces in een oxyderend milieu. In met brandstof gestookte ovens wordt deze atmosfeer verkregen door zorg te dragen voor een volkomen verbranding in een overmaat verbrandingslucht. In elektrische ovens kan men volstaan met de afvoer van de ontwikkende reactieprodukten door een aangepaste verversing van de lucht in de ovenruimte. Sommige produkten vereisen in een of meer fasen van het bakproces een reducerende atmosfeer.

Bij de gladbrand van porselein is bijvoorbeeld, in het laatste deel van de rijpingsperiode en gedurende de koeling tot 1000°C, een reducerende atmosfeer gewenst, teneinde sporen Fe_2O_3 , die de witte kleur nadelig zouden beïnvloeden, te reduceren.

In de grofkeramische industrie wordt reductie in het algemeen ook tijdens of vlak na de sintering gebruikt voor een beïnvloeding van de kleur of kleurnuancering van het produkt. Bij het stookproces van ijzerhoudende massa's in een reducerende atmosfeer, dient men er rekening mee te houden, dat de sintering dan bij een lagere temperatuur begint dan in een oxyderend milieu.

Een reducerende atmosfeer bevordert de ontleding van calciumsulfaat, dat soms in grofkeramische grondstoffen voorkomt en dat in het eindprodukt tot oppervlakte verkleuringen (witte uitslag) aanleiding kan geven.

Een reducerende atmosfeer wordt in met brandstof gestookte ovens verkregen door een onderdosering van verbrandingslucht. In elektrische ovens voert men een reducerend gasmengsel aan de ovenruimte toe.

Behalve de vorenstaande methoden ter beïnvloeding van de atmosfeer kent men het gebruik van verschillende schutgassen en reactieve gassen.

Enkele voorbeelden zijn:

- de toepassing van stikstof-luchtmengsels aan het einde van de doorwarmperiode en gedurende de koeling van mangaanzinkferroferrieten (zie). in temperatuurafhankelijke mengverhoudingen
- het gebruik van waterdamp aan het einde van een reducerend stookproces en gedurende de daaropvolgende koeling van sommige keramische produkten. De werkwijze wordt voornamelijk toegepast bij het blauwstoken (smoren) van dakpannen in periodieke ovens.
De waterdamp, die door waterdosering in de hete oven wordt gevormd, ondersteunt het reductieproces en verhindert tijdens de koeling de reoxydatie van donkergetinte ijzeroxyden Fe_3O_4 en FeO in de scherf.
- de toepassing van $NaCl$ -damp aan het einde van een rijpingsperiode bij circa $1200^{\circ}C$ voor het aanbrengen van een zoutglazuur. De $NaCl$ -damp wordt gevormd, door in de oven keukenzout te doseren dat bij de hoge temperatuur verdampt. De partiële evenwichts-dampspanning van $NaCl$ in lucht bedraagt bij $1000^{\circ}C$: 1,0, bij $1100^{\circ}C$: 3,3, bij $1200^{\circ}C$: 12,0 en bij $1300^{\circ}C$: 33,4 kN/m^2 .

Bij gebruik van elektrische ovens kan het voorkomen, dat de voorwaarden die aan de atmosfeer worden gesteld mede of uitsluitend betrekking hebben op de duurzaamheid van de toegepaste verhittings-elementen (zie 2.2.4.4).

2.2.3.5 De zetwijze

Vroeger werden de ovens uitsluitend met de hand gevuld en werd dit werk in de ovenruimte zelf uitgevoerd. Thans worden de halffabrikaten

meestal in de bedrijfsruimte buiten de oven en waar mogelijk mechanisch in het gewenste ruimtelijke patroon gerangschikt en vervolgens met een transportmiddel in de oven gebracht.

In veel gevallen wordt vuurvast hulpmateriaal gebruikt om het produkt te steunen en te beschermen. Dit stapelmateriaal ondergaat bij herhaling dezelfde warmtebehandeling als het produkt.

Ter beperking van het warmteverbruik wordt er naar gestreefd de massa van het stapelmateriaal ten opzichte van de massa van het gebakken produkt zo klein mogelijk te houden.

Het quotiënt van beide massa's is het tarragetal s .

$$s = \frac{\text{massa stapelmateriaal}}{\text{massa gebakken produkt}} \quad (16)$$

Het tarragetal varieert afhankelijk van de soort te bakken producten en het toegepaste oventype zeer sterk. In ovens voor metselbaksteen ligt het tarragetal meestal tussen 0 en 0,1. In ovens waarin fijnkeramische artikelen worden gebakken, die in vuurvaste kapsels beschermd worden tegen schadelijke stoffen in de ovenatmosfeer, kan het tarragetal bijvoorbeeld 5 zijn.

Een ovenruimte is meestal nooit geheel met produkten gevuld. Onder de vullingsgraad μ verstaat men het quotient van het volume binnen de begrenzingsvlakken van de lading in ongebakken toestand (de zetruimte) en het totale volume van de beschouwde ovenruimte.

De niet voor de lading gereserveerde ruimte dient voornamelijk voor de opwekking en verdeling van de warmte.

Afhankelijk van het oventype bevinden de stookruimten zich onder, naast, tussen of boven de lading. De stookruimtedimensies zijn onder meer afhankelijk van de soort en capaciteit van de warmtebron en van de afmetingen van de lading.

De vullingsgraad μ ligt meestal tussen 0,5 en 0,9. Een hoge vullingsgraad is gewenst.

In de zetruimte worden de halffabrikaten in één laag naast elkaar gezet, op of in elkaar gestapeld, dan wel op verschillende etages ondergebracht. Meestal fungeert de vaste of bewegende bodem van de ovenruimte als basis voor de ladingopbouw; een enkele maal echter worden de produkten hangend gebakken (steengaasrollen, grote wandplaten, dunne extrusieprodukten).

Onder de netto-zettingsdichtheid d_n van een ovenlading verstaat men het quotient van de massa van het gebakken produkt (exclusief stapelmateriaal) in een ovenruimte en het volume van de zetruijnte in kg/m^3 .

$$d_n = \frac{\text{massa gebakken produkt}}{\text{zetruijntevolume}} \quad (17)$$

De netto-zettingsdichtheid van een ovencharge mag niet verward worden met de zettingsdichtheid van bijvoorbeeld een enkel pakket uit die charge. De zettingsdichtheid van het pakket kan aanzienlijk hoger zijn.

De orde van grootte van de netto-zettingsdichtheid van een charge metselbakstenen is 1000 kg/m^3 . Voor holle, dunwandige produkten is deze uiteraard veel geringer.

De bruto-zettingsdichtheid d_b heeft betrekking op de massa van het gebakken produkt inclusief stapelmateriaal. Bij een tarragetäl s geldt:

$$d_b = d_n (1+s) \quad (18)$$

Wanneer in een ovenruimte met een volume V (m^3) de vullingsgraad μ en de nettozettingsdichtheid d_n kg/m^3 is, dan bedraagt de netto-ovenlading m (kg).

$$m = \mu \cdot d_n \cdot V \quad (19)$$

Door toepassing van een open zetwijze en een beperking van de afmeting van de ovencharge in de hoofdrioting van het warmtetransport tot bijvoorbeeld 0,5 à 1 meter worden de naijlingen in het temperatuurverloop binnen de charge als geheel beperkt. (zie 2.2.2.5). Een open zetwijze leidt eveneens tot een groter voor warmteoverdracht toegankelijk oppervlak van de produkten afzonderlijk. Ook naijlingen van het temperatuurverloop binnen de scherf worden daardoor beperkt hetgeen kortere baktijden mogelijk maakt (zie 2.2.2.4).

De zetwijze wordt evenwel niet uitsluitend bepaald door de zorg voor voldoende kleine naijlingen. Andere factoren die een rol spelen zijn bijvoorbeeld:

- de vorm en de afmetingen van de produkten
- het gebruik van stapelmateriaal
- het streven naar een grote zettingsdichtheid van de charge (zie formule 19) teneinde de omvang van de installatie en daarmee de investering te beperken.
- allerlei zettechnische en transporttechnische overwegingen.

De hoogte van ovencharges wordt meestal niet groter gekozen dan 2 meter, tenzij zoals bijvoorbeeld bij grote gresbuizen, de afmetingen van het produkt zelf dit noodzakelijk maken. Vaak worden belangrijk lagere charges dan 2 meter toegepast, bijvoorbeeld wanneer de produkten in één laag worden gebakken.

De temperatuurbeheersing is in de hoogterichting meestal moeilijk. Er dient met ruimtelijke temperatuurverschillen van tenminste 10°C per meter hoogte rekening gehouden te worden.

Andere factoren die in het bijzonder bij de keuze van de zethoogte een rol spelen zijn:

- het door de oven in beslag te nemen vloeroppervlak
- de investeringen, die meestal lager zullen zijn naarmate de charge hoger wordt gekozen
- de stabiliteit van stapelingen
- deformaties van gestapelde produkten tijdens de sintering (zie 2.2.3.3)
- breuk door mechanische oorzaken
- naijlingen in het temperatuurverloop binnen de charge, indien de hoogterichting tevens de hoofdrichting is van het warmtetransport door de charge.

2.2.4 Warmteopwekking

2.2.4.1 Inleiding

Lange tijd was men voor het bakken van keramische produkten geheel aangewezen op vaste brandstoffen als steenkool, bruinkool, turf en hout. In de europese keramische industrie vindt de warmteopwekking in ovens tegenwoordig echter voornamelijk met stookolie, gas of electriciteit plaats. In Nederland wordt het in eigen land gewonnen aardgas op grote schaal in alle takken van de keramische industrie toegepast.

De keuze van de energiedrager wordt bepaald door de beschikbaarheid, de prijs per geleverde warmteeenheid, de verwachte prijsontwikkelingen en door de bijzondere eigenschappen van de beschikbare soorten.

Vloeibare en gasvormige brandstoffen bezitten ten opzichte van vaste brandstoffen verschillende voordelen:

- de distributie over de verbruikspunten is eenvoudig en veroorzaakt geen stof.
- de calorische waarde is constant.
- de brandstof verbrandt geheel of nagenoeg asvrij.
- de dosering is goed en eenvoudig regelbaar.
- de vlamgedaante kan beter aangepast worden aan de eisen die voortvloeien uit de positie en afmetingen van de ovencharge, waardoor in het bijzonder bij het stoken met gas, een goede ruimtelijke temperatuurgelijkmatigheid bereikbaar is.

Door de afwezigheid van rookgassen zijn elektrische ovens in het bijzonder geschikt voor bakprocessen, waarbij aan de ovenatmosfeer bijzondere eisen worden gesteld. Andere voordelen zijn onder meer de goede automatische regelbaarheid van de oventemperatuur alsmede de eenvoud van bediening en energievoorziening.

De relatief hoge energieprijzen van electriciteit beperkt de toepassing ervan, al wordt deze ten dele gecompenseerd door het ten opzichte van met brandstofgestookte ovens meestal lagere warmteverbruik van elektrische ovens. In laatstgenoemde ovens gaat namelijk geen warmte met de rookgassen via de schoorsteen verloren. Waar mogelijk stookt men op nachtstroom.

2.2.4.2 Het gebruik van brandstoffen

Vaste brandstoffen.

Het gebruik van een vaste brandstof vereist de aanwezigheid van roosters waarop de verbranding plaatsvindt, tenzij de brandstof als poeder wordt verstoekt (zwevende verbranding).

De brandstof kan met de hand, dan wel mechanisch of pneumatisch gedoseerd worden.

Soms wordt brandstof aan de fabricagegrondstof toegevoegd (bijvoorbeeld bij de fabricage van sommige soorten isolatiestenen).

Men gebruikt hiervoor meestal brandbare afvalstoffen zoals mijnsteen en zaagsel.

De beheersing van de verbrandingssnelheid en van de hoeveelheid ontwikkelde warmte vereist bij deze wijze van warmteopwekking bijzondere zorg.

Stookoliën

In de grofkeramische industrie en in de industrie van vuurvaste producten wordt vooral buiten Nederland vaak met olie gestookt. De viscositeit van de verschillende stookoliën varieert van 350 tot 6000 seconden Redwood I bij 100°F. Het zwavelgehalte varieert tussen 1 en 4%.

Voor een goede werking van de branders moeten zowel de lichtere als de zwaardere soorten op gebruikstemperaturen tussen 70 en 115°C worden gebracht. De stookolie wordt uit een ringleiding, waarin zij op gebruikstemperatuur circuleert naar de branders gevoerd.

In branders met een horizontaal gerichte vlam wordt vaak luchtverstuiving toegepast. In branders met een vertikaal naar beneden gerichte vlam wordt de olie dikwijls intermitterend via een spuitstuk in de oven gespoten. De voor de verbranding nodige zuurstof wordt daarbij geleverd door de ovenatmosfeer. Er worden ook branders gebruikt, waarin de olie met lucht bij hoge temperatuur wordt vergast.

In enkele typen continue kamerovens wordt de olie door stookschachten in het gewelf van de oven in de ovenruimte gedruppeld. De druppels verbranden tijdens de vrije val in ruime verticale stookspleten.

Gasvormige brandstoffen

Tal van keramische produkten worden met gas gestookt.

Enkele in aanmerking komende gassoorten zijn:

- Cokesovengas, verkregen door ontgassing van vetkool bij de cokesfabricage. Te betrekken uit een regionaal distributienet.
- Generatorgas, verkregen door vergassing van cokes, anthraciet of stookolie met lucht.
Te vervaardigen op het keramisch bedrijf zelf.
- Aardgas, te betrekken uit een regionaal distributienet.
- Gassen zoals, butaan en propaan, verkregen bij raffinage van aardolie.
Eigen opslag in drukvaten (voornamelijk voor bijzondere toepassingen in kleine ovens).

De brandertypen onderscheiden zich vooral door de plaats en de wijze waarop de menging van het gas en de voor de verbranding nodige zuurstof tot stand komt. Dikwijls wordt voor die menging ten dele omgevingslucht gebruikt terwijl de rest van de zuurstof door de ovengassen wordt geleverd. Belangrijke keuzecriteria zijn onder meer de capaciteit, het regelbereik en de vlamgedaante van de branders.

Een met olie of gas gestookte oven is in het algemeen met verscheidene branders uitgerust die in groepen zijn verdeeld. Elk van deze groepen verzorgt de warmtetoevoer aan een bepaalde ovenzone:

2.2.4.3 Verbrandingstechnische berekeningen

Voor enkele brandstoffen zijn in de tabel van figuur 2.2.j een aantal verbrandingstechnische gegevens samengevat. De hierin vermelde hoeveelheden verbrandingslucht, rookgas, enzovoorts, zijn theoretische minima bij een veronderstelde volledige verbranding van

1 kg vaste of vloeibare brandstof of van 1 m³ gas. Ze worden aan de hand van de chemische samenstelling berekend. Alle gashoeveelheden zijn weergegeven in m³ in de normaaltoestand (i.n.), dat wil zeggen bij 0°C en 101,325 kN/m². Voorts is verondersteld, dat de verbrandingslucht geheel droog is en bestaat uit 79 volumedelen stikstof en 21 volumedelen zuurstof. Aangezien de omgevingslucht gemiddeld 0,01 m³ waterdamp per m³ droge lucht bevat is de hierdoor geïntroduceerde fout circa 1%.

Meestal wordt in ovens meer lucht per kg(m³) brandstof toegevoerd dan de theoretische minimum hoeveelheid.

De redenen hiervoor kunnen zijn:

- de zorg voor een volkomen verbranding van de brandstof
- de functie van de rookgassen als warmteoverdragend en temperatuurregulerend medium tijdens de opwarming (2.2.2.5 en 2.2.2.6)
- de zorg voor een oxyderend milieu in sommige fasen van het opwarmproces.
- de functie van de rookgassen als transportmiddel voor de reactieproducten uit de grondstof (bijvoorbeeld de afvoer van waterdamp in periodieke ovens).

Men geeft de luchtvermaat in het algemeen aan met de luchtfactor n.

$$n = \frac{V_a}{V_{at}} \quad (20)$$

Hierin is:

V_a , werkelijke hoeveelheid verbrandingslucht in m³ (i.n.) per kg (m³) brandstof.

V_{at} , theoretische minimum hoeveelheid verbrandingslucht in m³ (i.n.) per kg(m³) brandstof.

De hoeveelheid rookgas, die ontstaat kan worden berekend met de formule:

$$V_{g.v.} = V_{gt.v} + (n - 1) V_{at} \quad (21)$$

Hierin is:

$V_{g.v}$, werkelijke hoeveelheid vochtige rookgas in m^3 (i.n.v.)
per $kg(m^3)$ brandstof

$V_{gt.v}$, theoretische hoeveelheid vochtig rookgas in m^3 (i.n.v.)
per $kg(m^3)$ brandstof

n, V_{at} , zie formule 20.

Bij een brandstofverbruik van B kg/s (m^3/s) bedraagt de af te voeren hoeveelheid rookgassen $q_{g.v}$ in m^3/s (i.n.v.) exclusief eventuele leklucht:

$$q_{g.v} = B \left[V_{gt.v} + (n - 1)V_{at} \right] \quad (22)$$

Ter beperking van de warmteverliezen via de schoorsteen wordt n met inachtneming van het vorenstaande in het algemeen zo klein mogelijk gehouden.

2.2.4.4 Het gebruik van electriciteit

Meestal wordt in elektrische ovens weerstandsverhitting van al dan niet metallische verhittingselementen toegepast.

De elektrische weerstand R_e (Ω) van een enkelvoudig verhittingselement met een effectieve lengte l (m) en een constant veronderstelde doorsnede 0 (m^2) bedraagt:

$$R_e = \frac{\rho \cdot l}{0} \quad (23)$$

Hierin is ρ ($\Omega \cdot m$) de temperatuurafhankelijke soortelijke weerstand van het elementmateriaal. Men gebruikt zo mogelijk elementmaterialen met een hoge soortelijke weerstand en een kleine temperatuurcoëfficiënt.

Metalen verhittingselementen bestaan meestal uit gespiraliseerd draad of zig-zaggewijs gebogen band, niet metallische zijn vaak staafvormig. De elementen zijn in het algemeen langs de ovenwanden aangebracht. Ze zijn in serie of parallel geschakeld. Voor groepen van onderling gelijke vervangingsweerstand wordt zowel de ster- als de driehoekschakeling toegepast.

De ovenruimte is vaak verdeeld in afzonderlijk regelbare zônes. De warmteontwikkeling in een op een spanningsbron aangesloten groep verhittingselementen bedraagt volgens de wet van Joule:

$$q = I^2 \cdot R \quad (24) \quad \text{of}$$

$$q = \frac{U^2}{R} \quad (25)$$

Hierin is:

q, de warmtestroom	(W)
U, de aangelegde spanning	(V)
I, de aan de groep toegevoerde stroom	(A)
R, de vervangingsweerstand van de groep	(Ω)

Onder de oppervlaktebelasting van een verhittingselement verstaat men de warmtestroom (kW) per m² warmteafgevend buitenoppervlak van het element. Naarmate de oppervlaktebelasting bij een gegeven oventemperatuur groter wordt gekozen, zal de elementtemperatuur hoger zijn. De levensduur bij een gegeven oventemperatuur hangt daarom vooral af van de hittebestandheid en de oppervlaktebelasting van het element.

Ook de constructie en montage van het element, de constantheid van de oventemperatuur en de bestandheid van het materiaal tegen de ovenatmosfeer zijn van invloed op de levensduur. De eventueel in de oven aanwezige andere gassen dan lucht zoals zwaveldioxyde, koolmonoxyde of looddamp kunnen de levensduur van sommige soorten ten opzichte van die in zuivere lucht aanzienlijk bekorten.

De belangrijkste in lucht toegepaste elementmaterialen zijn:

- nikkelchroomlegeringen, bruikbaar tot circa 1100°C.
- chroom-aluminium-ijzerlegeringen, bruikbaar tot circa 1250°C.
- siliciumcarbide (SiC), bruikbaar tot circa 1500°C
- molybdeendisilicide (MoSi₂), bruikbaar tot circa 1600°C.

Elementmaterialen die uitsluitend in een schutgas of in vacuüm gebruikt worden zijn:

- molybdeen, in waterstof tot 1800°C
- wolfram , in vacuum tot 2600°C
- wolfram , in helium tot 3000°C
- grafiet , in een neutrale atmosfeer tot 3000°C

2.2.5 Periodieke ovens

2.2.5.1 Inleiding

De eerste permanente inrichtingen voor het bakken van keramische produkten waren periodieke ovens (zie 2.2.1). Een zeer oud type is de veldoven, die zij het niet meer in Nederland, nog wel gebruikt wordt voor het bakken van metselbakstenen. Vroeger werd deze oven ten behoeve van een groot bouwwerk ter plaatse opgericht. De veldoven bestaat uit een rechthoekig grondvlak van bijvoorbeeld 10 x 20 meter, dat aan twee of drie tijden door muren wordt begrensd (figuur 2.2.k). Binnen dit grondvlak wordt een drie à vier meter hoge klamp gedroogde vormlingen opgebouwd. Bij het stapelen worden in de voet van de klamp gangen uitgespaard, die corresponderen met gaten in de zijmuren. De niet door muren ingesloten zijden van de klamp worden dichtgesmeerd met klei. De bovenkant wordt afgedekt met aarde en zand. In de uitgespaarde gangen wordt (bijvoorbeeld met turf) gestookt. De rookgassen trekken door spleten in de klamp omhoog, verhitten de stenen en verlaten de klamp via openingen in de afdeklaag.

Het stoken duurt drie à vier weken. Het brandstofverbruik is hoog. De kwaliteit van de stenen varieert sterk als gevolg van plaatselijke verschillen in afstooktemperatuur. De veldoven is ontstaan uit de in onontwikkelde gebieden nog wel gebruikte meiler. Dit is een niet permanente inrichting, die bestaat uit een soortgelijke doch niet ommuurde klamp stenen, die geheel wordt afgesmeerd en afgedekt.

De alzijdige afsluiting van de ovenruimte met vuurvaste isolerende wanden en een gewelf betekende een belangrijke vooruitgang in de mogelijkheden tot beheersing van het bakproces. Een in dit opzicht eveneens belangrijke verbetering was het gebruik van olie, gas en electriciteit in plaats van vaste brandstoffen.

De uitvoeringsvormen van de periodieke ovens verschillen in stookstelsel en in de methode van het vullen en legen, die zo weinig mogelijk tijd moet vergen.

De tijd tussen de begintijdstippen van twee opeenvolgende bakprocessen in eenzelfde oven noemt men de cyclusduur. Deze varieert van enkele uren tot enkele weken. Wanneer een bedrijf over meer periodieke ovens beschikt worden deze na ongeveer gelijke tussenpozen in werking gesteld. De afzonderlijke ovens blijven daarbij onafhankelijk van elkaar functioneren.

De periodieke oven leent zich uitstekend voor een geleidelijke produktievergroting, door het aantal ovens uit te breiden. De oven biedt verder de mogelijkheid achtereenvolgens verschillende bakregiems te realiseren terwijl meestal ook de ovenatmosfeer goed kan worden beheerst. Hierdoor kan met dergelijke ovens een gevarieerd produktieprogramma worden uitgevoerd.

Het warmteverbruik is ten opzichte van dat van continue ovens aanzienlijk (twee- tot viermaal zo hoog).

In met brandstof gestookte ovens wordt dikwijls meer dan 50% van de ingevoerde warmte met de hete rookgassen afgevoerd. In elektrische ovens is de hoeveelheid met ovengassen afgevoerde warmte in het algemeen gering. Daardoor bedraagt het bruto specifiek warmteverbruik (zie 2.2.2.8) in elektrische ovens bij een baktemperatuur van 1100°C ; 2000 - 6300 kJ/kg tegenover 4000 - 8000 kJ/kg in met brandstof gestookte ovens.

Door een beperking van de dikte van de wanden van periodieke ovens en door de keuze van wandmaterialen met een geringe soortelijke massa en een lage warmtegeleidingscoëfficiënt wordt de som van het transmissieverlies van het ovenlichaam en de hierin geaccumuleerde warmte zo klein mogelijk gehouden (zie 2.2.2.3). De openingen voor de afvoer van de ovengassen dienen ter vermindering van de stralingsverliezen van een stralingslabrynth voorzien te zijn.

Tijdens de koelperiode kan een deel van de in het produkt, het stapelmateriaal en in het ovenlichaam geaccumuleerde warmte voor gebruik elders worden teruggewonnen. Hetzelfde geldt tijdens de stookperiode ten aanzien van de met rookgassen afgevoerde warmte (bijvoorbeeld door gebruik te maken van warmtewisselaars). Een nadeel is dat deze warmte periodiek ter beschikking komt hetgeen het nuttig gebruik ervan kan bemoeilijken.

Periodieke ovens worden ingedeeld in kamerovens, wagenovens, huifovens en klokovens. De benamingen zijn ontleend aan de vorm van een markant onderdeel van de oven.

2.2.5.2 Periodieke kamerovens

Deze ovens worden met de hand, met een hefwagen of met een vorktruck gevuld. De kleinste zijn vaak kuipvormig en van een deksel voorzien (kuipovens). De wat grotere zijn met één of twee deuren uitgerust en hebben rechthoekige zetruimten tussen 0,1 en 3 m³. Ze bestaan meestal uit een op poten rustend stalen frame met een vuurvaste isolerende voering.

Deze voornamelijk elektrisch, doch ook wel met gas gestookte ovens worden vooral in de fijnkeramische en electrokeramische industrie toegepast. In de electrokeramische industrie bestaan uitvoeringen, waarin de gasatmosfeer volledig kan worden beheerst.

Door hun constructie en betrekkelijk geringe afmetingen zijn ze gemakkelijk verplaatsbaar.

Bij breedten tot ten hoogste 1 meter kan een goede ruimtelijke temperatuurgleichmatigheid worden verkregen, vooral wanneer de oven verdeeld is in zones, waarin de energietoevoer afzonderlijk wordt geregeld.

Een bijzondere uitvoering is de met brandstof gestookte moffeloven. De produkten staan in een gesloten kast van vuurvast materiaal (moffel) die door de ovengassen alzijdig wordt omspoeld. De moffel dient ter bescherming van geglazuurde en gedecoreerde voorwerpen tegen aantasting door zwavel-, vlieg-, of stofhoudende verbrandingsgassen. Als gevolg van de indirecte verhitting is het warmteverbruik van moffelovens groot. Dunne moffelwanden uit materiaal met een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt bevorderen de warmtetransmissie.

Een andere veel toegepaste beschermingsmethode is die, waarbij de artikelen in kapsels worden geplaatst. Dit zijn ronde of rechthoekige bakken van vuurvast materiaal, die met een deksel worden afgesloten.

De meest verbreide met brandstof gestookte periodieke kameroven is het type met de overslaande vlam. In figuur 2.2.1 is een met gas gestookte rechthoekige uitvoeringsvorm met een tweezijdig overslaande vlam geschetst. Er zijn ook ovens met een eenzijdig overslaande vlam, alsmede uitvoeringen met een cirkelvormig grondvlak. (Stoke on Trent, Engeland).

De ovengassen trekken in neerwaartse richting door de inzet en worden via een geperforeerde vloer afgezogen naar ondergrondse kanalen, die uitmonden in een rookgasverzamelkanaal, dat naar de schoorsteen leidt.

De oven werd vroeger in vuurhaarden aan de lange zijwanden met turf, steenkool of cokes gestookt, later met stookolie of gas.

De oven is geschikt voor allerlei keramische artikelen. De grootste uitvoeringsvormen treft men in de grofkeramische industrie aan voor het bakken van dakpannen en gresbuizen. Courante afmetingen zijn dan bijvoorbeeld een inwendige lengte van 12 meter, een breedte tussen de vlamuren van 4 meter en een hoogte tot de kruin van het gewelf van 3 meter. In de oven kan zowel oxyderend als reducerend worden gestookt. Hij kan ook gebruikt worden voor het aanbrengen van een zoutglazuur. De tijdsduur van het bakproces varieert in het algemeen tussen 1 week en 3 weken.

2.2.5.3 Periodieke wagenovens

Als bodem van de ovenruimte van een periodieke wagenoven fungeert de vuurvaste warmteisolerende bekleding van één of meer railgebonden wagens, die in en uit de oven gereden kunnen worden en daardoor snel verwisselbaar zijn.

De wagens worden buiten de oven beladen, in de oven gereden en na het bakken weer gelost. Daar de oven voor het vullen en legen niet betreden wordt, behoeft de charge slechts zover afgekoeld te worden, dat het gebakken produkt een verdere natuurlijke koeling buiten de oven zonder schade kan verdragen en dat de nieuwe charge geen schade oploopt, wanneer deze in de nog warme ovenruimte komt. De cyclusduur kan hierdoor worden beperkt.

De ovens worden met gas of olie, dan wel electrisch gestookt.

De positie van de charge ten opzichte van de warmtebron, alsmede de hoofdstromingsrichting van de ovengassen zijn in de talrijke uitvoeringsvormen sterk verschillend.

Figuur 2.2.m toont een willekeurig gekozen type. Het is een met gas gestookte oven waarin de branders onder de charge uitmonden en de ovengassen de oven aan de bovenzijde verlaten.

De periodieke wagenovens hebben een breed toepassingsgebied waarbij de ovenafmetingen tussen wijde grenzen variëren. Ze worden gebouwd in lengten van 2 - 20 meter hoogten van 1 - 3 meter en breedten van 0,8 tot 8 meter.

De fundatie van de oven is meestal eenvoudig. Soms zijn de ovens verplaatsbaar en kunnen zij door het tussenschakelen van ovensecties ter lengte van een wagen, worden vergroot.

2.2.5.4 Huifovens

- - - - -

Een variant van de periodieke wagenoven is de huifoven. Deze bestaat uit twee in elkaars verlengde liggende rechthoekige vaste plateau's en een railgebonden huifvormig ovenlichaam, dat boven het ene of het andere plateau gereden kan worden.

Om dit horizontale transport mogelijk te maken is de oven aan voor- en achterzijde van deuren voorzien. Op deze wijze kan alternerend worden gewerkt.

Huifovens worden meestal met gas gestookt, waarbij de branders in de huif zijn gemonteerd. De rookgassen worden in het algemeen via spleten in het laadplateau naar een ondergronds verzamelkanaal afgevoerd.

Voor het bakken van bijvoorbeeld metselbakstenen worden plateau's gebruikt van 2,5 à 3 meter breed en 16 à 20 meter lang.

De mogelijkheden van de oven komen ongeveer overeen met die van de periodieke wagenoven.

2.2.5.5 Klokovens

- - - - -

In de gebruikelijke uitvoering bestaat de klokooven uit een beweegbaar ovenlichaam, dat als een klok(stolp), afwisselend over één van enkele naast elkaar liggende, vaste en van alle zijden toegankelijke laadplateau's kan worden geplaatst. Ook met deze oven kan alternerend worden gewerkt.

Klokovens worden electrisch of met gas gestookt.

De electrisch gestookte oven komt het meeste voor. De verhittings-elementen zijn daarbij rondom de charge aangebracht, dus zowel in de klok als in het plateau. De oven wordt voornamelijk in de fijnkeramische en in de electrokeramische industrie toegepast. Een courante inhoudsmaat (zetvolume) van een klokooven voor het bakken van aardewerk is 2 m^3 .

Het hier beschreven type kent een aantal varianten (zie figuur 2.2.n). De ovenconstructie maakt een hermetische afsluiting van de ovenruimte mogelijk, waardoor dit oventype uitmuntend geschikt is voor bakprocessen in een beheerste bijzondere atmosfeer.

2.2.6 Continue kamerovens

2.2.6.1 Inleiding

Ter besparing van energie kunnen met brandstof gestookte periodieke ovens zodanig worden gekoppeld, dat de voelbare warmte in de gassen die uit een bepaalde oven worden afgevoerd, nuttig gebruikt wordt in een oven waarvan de lading zich nog in een voorgaande fase van het bakproces bevindt. Bij volledige koppeling is een aantal ovens in serie geschakeld. Men bouwt ze bij voorkeur tegen elkaar aan. De warmteverliezen worden dan nog verder beperkt; men verkrijgt korte verbindingen voor het transport van de gassen en er wordt plaatsruimte bespaard. Een groot aantal van op een dergelijke wijze gekoppelde ovens noemt men een continue kameroven (zie 2.2.1). Door de koppeling van de ovens, kamers genaamd, is de bedrijfsvoering minder flexibel dan van afzonderlijk functionerende periodieke ovens.

Continue kamerovens worden in de grofkeramische industrie toegepast, voor het bakken van relatief grote tonnages produkt per tijdseenheid (25 tot 250 t/etmaal).

Het vullen en legen van de kamers geschiedt tegenwoordig met vorkheftrucks. De vormlingen worden daartoe buiten de oven in pakketten gestapeld en vervolgens ingereden.

Vroeger werden deze ovens met turf of steenkool gestookt, thans wordt in Nederland stookolie of aardgas gebruikt.

Bij een baktemperatuur van 1100°C bedraagt het bruto specifiek warmteverbruik 1600 à 3500 kJ/kg, wat aanmerkelijk lager is dan dat van periodieke ovens.

De meest bekende typen zijn de ringoven, de zig-zagoven en de kamer-ringoven met overslaande vlam. De bedrijfsvoering is van alle drie genoemde typen ongeveer gelijk.

2.2.6.2 Ringovens

Beschrijving:

De ringoven werd in 1858 in Duitsland uitgevonden door Friedrich Hoffmann en wordt daarom ook wel Hoffmannoven genoemd.

Het prototype bestond uit een cirkelvormig brandkanaal met een schoorsteen in het middelpunt. De latere ringovens werden gebouwd in de vorm van twee aan de uiteinden met elkaar verbonden parallelle kanalen (figuur 2.2.0).

Het doorlopende brandkanaal heeft een gewelf, dat zowel in de lengte als in de breedte voorzien is van in rijen gerangschikte, met deksels afgesloten stookschachten (150 mm \emptyset). De onderlinge afstand van de stookschachten bedraagt meestal circa 1 meter. De rijen loodrecht op de as van het brandkanaal worden stookrijen genoemd.

De meeste ovens hebben een brandkanaallengte van 60 tot 120 meter. Het brandkanaal is 3 tot 5 meter breed en 2,25 à 2,75 meter hoog. Het kan op regelmatige afstanden van 4 tot 6 meter in verbinding gebracht worden met een rookgasverzamelkanaal, dat al dan niet via een ventilator naar de schoorsteen leidt. De aansluiting komt tot stand via onder in de oven in trekpaten uitmondende trekkanalen, die afsluitbaar zijn met een vuurvast kegelvormig ventiel.

Het brandkanaal is opgedeeld in kamers, elk met één trekpat en meestal met een poort. In sommige ringovens is het gewelf vervangen door een horizontaal plafond (hangdek), waardoor de vertikale dwarsdoorsnede van het brandkanaal beter is aangepast aan de meestal rechthoekige pakketvorm van mechanisch in de oven gezette produkten. Er wordt dan meestal tevens met minder, doch wel ruimere poorten volstaan, dan in de traditionele uitvoering.

De vormlingen worden zodanig gestapeld, dat de oveninzet goed doorstroombaar is voor de ovengassen. De stookschachten monden uit in stookruimten tussen de lading.

Bedrijfsvoering:

De oven is op een werkzone na, waarin de aanvoer en afvoer van het produkt plaats vindt, steeds geheel gevuld.

Zodra in de werkzone een kamer vol is, wordt de betreffende toegangspoort afgesloten en wordt de kamer door middel van een papierscherf in de dwarsdoorsnede van het brandkanaal afgescheiden van de werkzone en toegevoegd aan een bufferzone. Deze is nodig voor het opvangen van het verschil tussen de vijfdaagse werkweek en de zevendaagse stookweek.

In de bufferzone zijn de papierschermen nog intact. In de rest van de oven zijn ze weggebrand en verkeren de kamers op een willekeurig gekozen moment en gerekend van de bufferzone af opeenvolgend in een verder gevorderd stadium van het bakproces. Men onderscheidt een voorwarmzone, een stookzone, waar brandstof wordt gedoseerd en een koelzone. In de voorwarmzone zijn nabij de bufferzone van enkele kamers de ventielen naar het schoorsteenkanaal geopend, waardoor ter plaatse in de oven een onderdruk ontstaat. Hierdoor stroomt bij de werkzone lucht de oven binnen. Op zijn weg koelt deze lucht de produkten af, komt hoog voorgewarmd in de stookzone en dient daar als verbrandingslucht.

De in de stookzone gevormde hete rookgassen stromen door naar de voorwarmzone, waar zij hun voelbare warmte voor een belangrijk deel afstaan aan de inzet om daarna vermengd met leklucht, die langs het papierscherm in de oven is gepenetreerd met een mengtemperatuur van 100 à 200°C te worden afgevoerd naar het rookgasverzamelkanaal en de schoorsteen.

Zodra in de voorwarmzone de wanden en de inzet onder de rij stookschachten grenzend aan de stookzone voldoende (tot 700 à 900°C) zijn voorgewarmd, wordt de stookzone één stookrij in de richting van de rookgasstroom verplaatst. Telkens na gelijke tussenpozen wordt deze handeling herhaald.

Zodra de stookzone over een kamerlengte is opgeschoven wordt door het verplaatsen van de rookgasafzuiging een kamer uit de bufferzone bij de voorwarmzone getrokken. Het papierscherm verbrandt dan. Door het openen van een poort in de koelzone wordt er voor gezorgd dat het aantal in het bakproces opgenomen kamers gelijk blijft.

In het koeltraject onder 200°C worden de stookschachten meestal geopend. Door het verschil in dichtheid van de lucht in en buiten de oven stroomt dan een extra hoeveelheid lucht de koelzone binnen, die de koeling bevordert en als warme lucht door de stookschachten ontwijkt. De op deze wijze afgevoerde warmte wordt het open pottenverlies genoemd. Eveneens ter versnelling van het proces wordt in de koelzone gewoonlijk ook nog met een ventilator, via een aantal stookschachten lucht afgezogen.

Bijzonderheden:

De vuurvoortgang varieert afhankelijk van de grootte van de oven, de soort produkt, de verlangde kwaliteit en de zetwijze tussen 6 en 30 stookrijen per etmaal.

Ovens met een brandkanaallengte groter dan 120 meter, werken meestal met twee afzonderlijke stookzones (vuren), die achter elkaar aan lopen. De ruimtelijke temperatuurverschillen in doorsneden over het brandkanaal zijn meestal tamelijk groot (50 - 150°C).

2.2.6.3 Zig-zag ovens

De zig-zag oven is een variant van de ringoven. Het ovenlichaam bestaat uit een dubbele rij kamers naast elkaar, die zodanig zijn gekoppeld dat een zig-zagvormig doorgaand brandkanaal ontstaat (figuur 2.2.p). De oven is daardoor minder langgerekt van vorm dan de ringoven. De kamers hebben een gewelf of een hangdek en zijn inwendig 2 à 3 meter breed, 6 à 10 meter lang en circa 2,5 meter hoog. Het aantal kamers varieert van 16 tot 32 stuks. De inrichting en werkwijze komen overeen met die van de ringoven. De kamers zijn beter toegankelijk voor het aan- en afvoeren van het produkt dan die van de ringoven. Er kunnen bijvoorbeeld ongehinderd meerdere kamers tegelijkertijd worden gevuld en gelegegd. De inzet dient in de lengterichting van de kamers goed doorstroombaar te zijn. Er zijn ook zig-zag ovens bestaande uit een enkele rij kamers naast elkaar. De beide eindkamers zijn dan door een omloopkanaal met elkaar verbonden. Elke kamer heeft in dat geval vaak twee toegangspoorten, hetgeen het mogelijk maakt de aanvoer- en afvoerwegen van het produkt te scheiden.

2.2.6.4 Kamerringovens met overslaande vlam

De Nederlandse uitvoeringsvorm van dit oventype, kortweg "vlamoven" genoemd, bestaat uit 20 tot 60 tegen elkaar aangebouwde en gekoppelde kamers met een eenzijdig overslaande vlam (zie figuur 2.2.q). De verbinding tussen de kamers komt tot stand via verticale sleuven onder in de tussenmuren van de kamers. De kamers zijn 8 tot 16 meter diep en 3 à 3,3 meter breed. Het gewelf heeft een inwendige kruinhoogte van circa 2,75 meter. De in het gewelf van elke kamer in één rij, aangebrachte stookschachten monden uit in een stookruimte die zich naast een van beide tussenmuren over de gehele ovendiepte uitstrekt. In tegenstelling tot de ringoven en de zig-zagoven telt de vlamoven dus slechts één stookrij per kamer. De stookruimte behoort van de zetruimte gescheiden te worden door een lage vlammuur in de diepterichting van de kamer.

Per kamer is in het gewelf of onder in de achterwand een trek gat gemaakt dat aangesloten kan worden op het rookgasverzamelkanaal in het midden van de oven. Elke kamer heeft een ruime toegangspoort.

De oven wordt vooral in de metselbaksteenindustrie en in de straatsteenindustrie toegepast. De inzet bestaat in dat geval uit circa 2 meter hoge steensdikke bladen vormlingen, die buiten de oven worden samengesteld en met een vorktruck in dwarsdoorsneden over de kamer worden opgesteld met een onderlinge afstand van circa 50 mm.

De bedrijfsvoering komt ongeveer overeen met die van de ringoven en de zig-zagoven.

Als gevolg van de thermiek in de vuurhaard bewegen de ovengassen zich golvend en loodrecht op de diepteas van de kamers door de oven, terwijl tevens een circulatiestroming in de kamers ontstaat (figuur 2.2.q).

De vuurvoortgang bedraagt 2 tot 4 kamers per etmaal.

In ovens met meer dan 40 kamers worden bij voorkeur twee in eenzelfde tempo rondgaande vuren toegepast.

2.2.7 Tunnelovens

2.2.7.1 Inleiding

Lang geleden werden er in Korea tegen hellingen in het landschap reeds tunnelovens voor het bakken van stenen gebouwd, waarbij men voor de voortbeweging van de ovencharge gebruik maakte van de zwaartekracht. In een dergelijke glijoven worden de vormlingen in een of twee lagen dik in rijen achter elkaar boven in een hellend kanaal geplaatst (hellingshoek 30°). Wanneer onderaan een rij stenen wordt weggenomen, schuift de gehele charge een rij omlaag. Ongeveer halverwege wordt gestookt. Het hellende kanaal werkt als schoorsteen zodat het gebakken produkt in tegenstroom met aangezogen lucht wordt gekoeld en het halffabrikaat in tegenstroom met rookgas wordt voorgewarmd.

Ofschoon eigentijdse ontwerpen van deze glijbaanoven zijn uitgewerkt, wordt hij in Europa niet toegepast.

Eerst in de tweede helft van de 19^e eeuw verschijnen er tunnelovens in Europa. De ovens bestaan uit een langwerpig horizontaal kanaal waar een trein wagens beladen met het te bakken produkt doorheen loopt. Van circa 1900 af vond deze wagentunneloven aanvankelijk vooral toepassing in de fijnkeramische industrie, later ook in de andere industrietakken.

Sedert 1950 worden - voornamelijk in de fijnkeramische en de elektrokeramische industrie - ook andere voortbewegingstechnieken in tunnelovens toegepast. Voorbeelden zijn: de doorschuifoven, de rollenbaanoven en de bandoven.

De tunneloven leent zich voor een ver gaande automatisering van het bakproces. Het laden en lossen van het produkt vindt buiten de oven plaats.

Bij een baktemperatuur van 1100°C varieert het bruto specifiek warmteverbruik in met brandstof gestookte ovens tussen 1250 en 2500 kJ/kg en in elektrische tunnelovens tussen 900 kJ/kg en 2500 kJ/kg.

2.2.7.2 Wagentunnelovens

Wagentunnelovens treft men in alle takken van de keramische industrie aan. De lengte varieert tussen 20 en 200 meter, de inwendige breedte tussen 0,8 en 8 meter, de inwendige hoogte tussen 0,3 en 3 meter.

De ovens hebben een gewelfd of een vlak plafond. De railgebonden wagens bezitten een vuurvast warmteisolerend dek. De spleten tussen de zijkanten van de wagens en het ovenlichaam zijn aan weerszijden van de wagens afgedicht door stalen platen (schorten), die door zandgoten lopen (Zie figuur 2.2.F).

Van pakking voorziene sponningen zorgen voor de afdichting tussen de wagens onderling.

De voortbeweging van de wagentrein in de oven geschiedt met een hydraulisch duwmechanisme en is meestal geautomatiseerd. De voortbeweging is continu of intermitterend. In dit laatste geval schuift de wagentrein periodiek een gehele wagenlengte of een deel daarvan op. De wagens worden op vaste plaatsen in de bedrijfsruimte beladen en geleegd, waarbij in toenemende mate wordt gemechaniseerd. Het laden en lossen vindt hoofdzakelijk in dagdienst plaats. Doordat de oven continu werkt, is voor de overbrugging van de nacht en het weekeinde een aantal extra wagens nodig. Wanneer bijvoorbeeld bij een oven, die 40 wagens bevat, 12 wagens per etmaal in- en uitgereden worden, moeten er voor een nacht van 14 uren: $\frac{14}{24} \times 12 = 7$ wagens en voor een weekeinde van 64 uren: $\frac{64}{24} \times 12 = 32$ wagens klaar staan. Dit aspect vraagt bij de bedrijfsinrichting bijzondere aandacht.

De met gas of olie gestookte wagentunneloven waarin de verbrandingsgassen in direct contact komen met de lading (de open vlam tunneloven) is de meest gangbare (figuur 2.2.r). De posities van de branders ten opzichte van de charge kunnen sterk verschillen.

De lengte van de verschillende zones ten opzichte van de totale ovenlengte varieert ook:

Voorwarmzone 20 - 50%, stookzone 20 - 30% en
koelzone 30 - 50%.

Het produkt doorloopt de oven in tegenstroom met de ovengassen, die nabij de oveningang worden afgezogen naar de schoorsteen.

In de koelzone wordt een direct koelsysteem, een indirect koelsysteem of een combinatie van beide toegepast.

Bij een directe koeling stroomt de koellucht in tegenstroom met het produkt door de tunnel. Bij een indirect koelsysteem koelt men de wanden van de oven en daardoor indirect het produkt.

Recirculatie van ovengassen in rookgaszone en koelzone kan de temperatuur gelijkmatigheid in dwarsdoorsnede over de tunnel bevorderen. Soms zijn de ovens zowel aan de ingang als aan de uitgang met sluizen uitgerust.

Een bijzondere uitvoering van de wagentunneloven is die, waarbij het ovenlichaam als een moffel is uitgevoerd (Figuur 2.2.s).

De warmteoverdracht vindt plaats door straling en natuurlijke convectorie. De inwendige breedte kiest men vooral hierom niet veel groter dan 1 meter. De inwendige hoogte is meestal gelijk of kleiner dan 1,3 meter. Een open zetwijze in de stralingsrichting is gewenst. Er wordt meestal indirect gekoeld.

De oven wordt gebruikt voor de glazuurbrand en decorbrand van fijnkeramische artikelen. Zowel de investeringen als het brandstofverbruik zijn hoger dan van een open vlam tunneloven.

Electrisch gestookte wagentunnelovens hebben verwarmingselementen langs de wanden en worden toegepast voor de warmtebehandeling van fijnkeramische en electrokeramische artikelen.

De inwendige afmetingen komen overeen met die van de moffeltunneloven.

Er zijn ook uitvoeringen met twee sporen per tunnel, waarin de treinen in tegengestelde richting bewegen. In de stookzone bevinden zich dan ook tussen de beide ladingen verhittingselementen. De warmteuitwisseling tussen de charges op beide sporen, komt tot stand door straling en natuurlijke convectorie.

2.2.7.3 Ringtunnelovens

Bij deze soms in de fijnkeramische industrie aangetroffen ovens staan de produkten op een langzaam ronddraaiend ringvormig platform ter breedte van 0,5 à 1 meter en met een diameter van 8 tot 16 meter.

Het ovenlichaam heeft de vorm van een niet geheel gesloten ring. In de open sector wordt beladen en afgenomen.

2.2.7.4 Doorschuifovens -----

In doorschuifovens worden de produkten op platen van maximaal 600 x 600 mm over een slijtvaste baan door het brandkanaal geschoven.

In meerbaans doorschuifovens, ook wel passageovens genoemd zijn 4 tot 48 schuifbanen naast en boven elkaar gerangschikt. Elk brandkanaal heeft dan een doorsnede van bijvoorbeeld 400 x 200 mm. Dit type dat in het bijzonder voor het bakken van tegels en vlak serviesgoed wordt gebruikt, wordt meestal elektrisch gestookt. Doordat de schuifrichting op opeenvolgende etages aan elkaar tegengesteld is vindt een goede warmteuitwisseling plaats tussen het koelende en het in opwarming verkerende produkt. De lengte van dergelijke ovens varieert meestal tussen 16 en 24 meter. (fig.2.2.t). Elektrische doorschuifovens met kleine doorsnede zijn vaak ingericht voor bakprocessen in een speciale atmosfeer, bijvoorbeeld voor elektrokeramiek.

2.2.7.5 Rollenbaanovens -----

Dit zijn elektrisch- of met gas gestookte tunnelovens, waarin het transport van het produkt op een rollenbaan plaats vindt. De oven wordt voornamelijk in de fijnkeramische industrie gebruikt. De produkten worden meestal in één laag en al dan niet op ondersteuningsplaten op de rollenbaan gezet. De rollen worden buiten de oven door een ketting aangedreven. Deze uitwendige aandrijving ontbreekt, wanneer het produkt op een aaneengesloten rij ondersteuningsplaten door de oven wordt voortgeduwd.

De materiaalkeuze van de rollen is afhankelijk van de temperatuur waarbij en de atmosfeer waarin zij dienst doen. Op plaatsen waar roestvrij staal niet toereikend is worden keramische rollen (bijvoorbeeld uit mulliet) toegepast.

Behalve ovens met één rollenbaan zijn er uitvoeringen met meer banen boven elkaar. Evenals bij doorschuifovens wisselt de bewegingsrichting van het produkt dan van étage tot étage. In figuur 2.2.u is schematisch een elektrisch gestookte vierbaansoven weergegeven. Voor produkten met een geringe scherfdikte zijn baktijden tussen 0,5 en 5. uren bereikbaar.

2.2.7.6 Bandovens

In bandovens vindt het transport door de tunnel plaats op een band van hittebestand staaldraad. De elektrisch of met gas gestookte ovens worden gebruikt voor warmtebehandelingen bij relatief lage temperaturen, bijvoorbeeld voor de decorbrand tussen 700 en 800°C. Een bijzondere uitvoering is de met een platina lint uitgeruste elektrische oven voor electrokeramiek (1200 - 1300°C).

2.2.7.7 Tunnelovens met andere transportsystemen

Genoemd kunnen worden:

- de hefbalkoven (walking beam kiln), incidenteel toegepast voor fijnkeramische artikelen.

De produkten worden in deze oven door een beweegbare ondersteuning periodiek even opgetild en over een kleine afstand verplaatst.

- ovens, waarin de produkten hangend aan een boven de oven lopende kettingtransporteur door de tunnel worden gevoerd, toegepast voor steengaas en in de emailindustrie.
- ovens, waarin losse rollende porseleinen kogels voor het transport van het produkt worden gebruikt, incidenteel toegepast in de fijnkeramische industrie.

2.2.8 Ovens voor keramische massagoederen

2.2.8.1 Inleiding

De tot nu toe besproken oventypen voor het bakken van keramische voorwerpen zijn in het algemeen minder geschikt voor de warmtebehandeling van keramische massagoederen, behalve wanneer het kleine hoeveelheden betreft die in kapsels kunnen worden gebakken. Voor de warmtebehandeling van ongevormd materiaal worden meestal andere oventypen toegepast, zoals bijvoorbeeld schachtovens, draaiende buisovens en ovens met fluïde bed.

2.2.8.2 Schachtovens (figuur 2.2.v)

De schachtoven bestaat uit een verticale meestal cilindrische of licht conische stalen mantel met een vuurvaste, slijtvaste en warmte-isulerende voering.

Boven in de schacht is de vulopening voor de te branden massa. Aan de onderzijde vindt de afvoerplaats. Van beneden af gerekend bevindt de stookzone zich op ongeveer een derde van de vulhoogte. De vuurhaarden zijn verdeeld over de omtrek aangebracht. De oven wordt met olie of gas gestookt. Soms wordt vaste brandstof gebruikt, die in dat geval met de charge wordt vermengd. Het materiaal zakt in tegen stroom met de ovengassen omlaag.

De oven wordt in het bijzonder gebruikt voor materialen met een stukgrootte van 80 tot 200 mm. Bij verwerking van fijner materiaal neemt de stromingsweerstand, die de ovengassen ondervinden sterk toe. De oven wordt vooral toegepast voor de vervaardiging van vuurvaste en fijnkeramische grondstoffen als chamotte, kwartsiet en beenderas. De gebruikelijke schachtdiameter bedraagt 2 à 2,5 meter, de normale vulhoogte is 10 à 15 meter.

2.2.8.3 Draaiende buisovens

Dit oventype bestaat uit een onder een lichte helling opgestelde draaiende buis met een vuur- en slijtvaste, tevens warmteisulerende voering.

Het te behandelen materiaal wordt bij voorkeur in gegranuleerde toestand aan het bovineinde toegevoerd, doorloopt de oven in tegenstroom

met de ovengassen en verlaat deze aan het lage einde waar zich de gas- of oliebrander bevindt.

Na de warmtebehandeling passeert het materiaal soms een aparte hellende draaiende cylinder, waarin het wordt afgekoeld.

De ovendiameter varieert tussen 0,5 en 5 meter, de ovenlengte tussen 10 en 100 meter, de helling van de oven tussen 1 : 50 en 1 : 10 en de omtreksnelheid tussen 0,02 en 0,2 meter per seconde. De vullingsgraad bedraagt gemiddeld 7 volumepercenten. Het aan de oven toegevoerde materiaal dient ongeveer gelijk van stukgrootte te zijn. Verschillen in stukgrootte leiden vooral bij lage omtreksnelheid tot segregatie en een ongelijkmatige warmtebehandeling van de verschillende grootteklassen. Draaiende buisovens worden gebruikt voor het branden van vuurvaste grondstoffen tot 1600°C, voor de vervaardiging van glazuurgrondstoffen en geëxpandeerde klei, alsmede voor de warmtebehandeling van grondstoffen voor de electrokeramische industrie.

Bij de metselbaksteenfabricage wordt een draaiende buisoven gebruikt voor het drogen van vormzand,

2.2.8.4 Ovens met fluïde bed

In ovens met fluïde bed wordt gebruik gemaakt van het verschijnsel, dat een omhoog gerichte gasstroom een aanvankelijk gepakt korrelbed kan doen overgaan in een stabiel geëxpandeerd bed, waarin de korrels in beweging zijn en dat de eigenschappen van een vloeistof in turbulentie bezit.

Afhankelijk van de gasstroom kan het volume van een stabiel fluïde bed maximaal circa 60% groter zijn dan het oorspronkelijke volume.

De ovenruimte heeft de vorm van een verticale cylinder.

Onderaan wordt draaggas toegevoerd, dat door een rooster regelmatig over de cylinderdoorsnede wordt verdeeld en de korrelmassa boven het rooster fluïdiseert.

Fluïdisatie kan worden toegepast op keramische granulaten uit een zeer wijd korrelgroottegebied, bij voorbeeld van 50 µm tot 32 mm.

Om te voorkomen, dat een belangrijk deel van een granulaat door de gasstroom uit het bed wordt afgevoerd, mogen de korrels niet te veel in diameter en volumieke massa van elkaar verschillen.

De orde van grootte van het aantal m³ draaggas, dat bij een temperatuur van 1000°C per m² bedoppervlak en per seconde voor fluïdisatie

nodig is, varieert voor korrels van 50 μm tot 32 mm, met volumieke massa's van 1000 tot 2500 kg/m^3 , tussen 0,02 en 20 m^3/s .

Er worden zowel periodieke als continue ovens met fluïde bed toegepast.

De periodieke oven met fluïde bed wordt in de elektrokeramische industrie gebruikt voor de warmtebehandeling van fijnkorrelige granulaten (Figuur 2.2.w). De oven wordt elektrisch gestookt. Na elke warmtebehandeling (van 5 à 10 minuten) wordt de draaggasstroom onderbroken en wordt de charge door het kantelen van het rooster gelost.

Figuur 2.2.x toont een principeschets van een continue oven, waarin de warmtebehandeling bovendien in trappen plaats vindt. Via standpijpen wordt het continu op de bovenste etage toegevoerde produkt (bijvoorbeeld granulaat voor de vervaardiging van geëxpandeerde klei) van het ene naar het andere compartiment getransporteerd. Het verlaat de installatie via een overloop. De warmtetoevoer aan het systeem wordt onderhouden door de dosering van vloeibare of gasvormige brandstof aan het bed van het heetste compartiment.

De warmteoverdracht van het gas naar de bewegende individuele korrels in een fluïde bed, alsmede de temperatuurgelijkmatigheid van het bed zijn bijzonder goed. Dit resulteert in een korte procesduur en een goede constantheid van de produktkwaliteit.

2.2.9 Controle van het bakproces

2.2.9.1 Inleiding

De controle van het bakproces richt zich op de omstandigheden waaronder de warmtebehandeling plaats vindt en is een onderdeel van het toezicht op de bedrijfsvoering van ovens, dat mede betrekking heeft op het produktietempo en het energieverbruik, op de werking, onderhoudstoestand en veiligheid van onderdelen van de installatie, alsmede op de kwaliteit van het halffabrikaat en het gebakken produkt.

De procescontrole steunt voor een belangrijk deel op metingen die kunnen dienen voor:

direct toezicht op het verloop van de procesvariabelen, opdat tijdig corrigerend kan worden ingegrepen.

automatische regeling van het proces.

automatische signalering van procesverstoringen.

beveiliging van installaties, personeel en milieu.

registratie van het verloop van het proces.

Voor het bewaken en regelen van het bakproces zijn vooral de volgende grootheden van belang:

de oventemperatuur in de verschillende ovenzones

de mate van sintering van het produkt tijdens de rijpingsperiode

de concentratie van een of meer componenten van het ovengas

de statische druk van de stromende media op verschillende plaatsen in de installatie.

2.2.9.2 Meting van de oventemperatuur

Bij de keuze van de meetplaats en de meetmethode van de oventemperatuur in een bepaalde ovenzone en bij de interpretatie van de gemeten waarden, dient men zich bewust te zijn van de altijd aanwezige temperatuurverschillen in de ovenruimte. Meetplaats en meetmethode

dienen zodanig te worden gekozen, dat de gemeten waarden gecorreleerd zijn aan de oppervlaktetemperaturen van de charge in die zone, terwijl temperatuurveranderingen zo getrouw mogelijk en met weinig vertraging moeten worden weergegeven.

De meting wordt meestal met thermokoppels en in bijzondere gevallen met stralingspyrometers uitgevoerd.

- Thermokoppels.

Thermokoppels voor industrieel gebruik bestaan in het algemeen uit twee ongelijksoortige metaaldraden, die aan een der uiteinden zijn gekoppeld (de warme las) en in een van een aansluitkop voorziene gasdichte beschermhuis zijn gevat. De meting berust op de temperatuurafhankelijkheid van de contactpotentialaal tussen twee met elkaar in contact gebrachte ongelijksoortige elektrische geleiders (meestal metalen).

Benaming en samenstelling van enkele thermokoppels:

<u>positieve pool</u>	<u>negatieve pool</u>	<u>bruikbaar tot</u>
chromel P (90% Ni + 10% Cr)	alumel (95% Ni + 5% Al met sporen Si en Mn)	1050°C
platina (100% Pt)	platinarhodium (90% Pt + 10% Rh)	1500°C
wolfram (100% W)	molybdeen (100% Mo)	1600°C
platinarhenium (90% Pt + 10% Re)	platinarhodium (60% Pt + 40% Rh)	1800°C
koolstof (100% C)	siliciumcarbide (100% SiC)	2000°C
iridium (100% Ir)	iridiumrhodium (50% Ir + 50% Rh)	2000°C

Het meest toegepast worden het chromel P-alumelkoppel met bij 1000°C een thermospanning van circa 40 mV ten opzichte van 0°C en het platina platinarhodium koppel met een thermospanning van circa 10 mV bij 1000°C.

De koppels steken met de warme las in de oven en zijn met kabels van bijzondere samenstelling, compensatiekabels genaamd met het meetelement verbonden.

Afhankelijk van de gebruikstemperatuur en het milieu waarin het koppel zich bevindt kunnen de thermospanningen tengevolge van veranderingen in de materiaalsamenstelling op de contactplaats op de duur gaan afwijken van de oorspronkelijke temperatuurgebonden waarden. Thermokoppels moeten daarom regelmatig worden gecontroleerd en tijdig door nieuwe worden vervangen.

- Stralingspyrometers

De temperatuurmeting met stralingspyrometers berust op de sterke temperatuurafhankelijkheid van de hoeveelheid en de spectrale verdeling van de electromagnetische straling die door een verhit lichaam wordt uitgezonden.

Men onderscheidt totaalstralingspyrometers, gloeidraadpyrometers en kleurpyrometers.

Bij de totaalstralingspyrometers wordt de totale stralingsenergie die door het meetobject in de richting van het meetinstrument wordt uitgezonden meestal via een lens geconcentreerd op een zwart plaatje dat daardoor in temperatuur stijgt. De bijvoorbeeld met een thermoelement gemeten temperatuurverhoging is een maat voor de temperatuur van het meetobject.

In gloeidraadpyrometers wordt het stralend oppervlak optisch afgebeeld in een vlak waarin zich ook een elektrisch verhitte gloeidraad bevindt.

Door regeling van de stroom maakt men de gloeidraad zo helder dat deze niet meer afsteekt tegen de achtergrond. Doordat in het oculair een rood kleurfilter is aangebracht wordt de helderheid bij één golflengte ($0,65 \mu\text{m}$) vergeleken.

De draagbare en aanwijzende uitvoeringsvormen van stralingspyrometers worden het meest toegepast. Voor de controle op bakprocessen bij temperaturen hoger dan 1400°C gebruikt men soms registrerende instrumenten of fungeren stralingspyrometers als meetorganen van automatische regelkringen.

In kleurpyrometers (in de keramische industrie weinig toegepast), wordt de relatieve stralingsintensiteit bij twee golflengten bijvoorbeeld rood en groen gemeten.

De meting berust op het verschijnsel, dat een vast lichaam bij verhitting afhankelijk van de temperatuur verschillende gloeikleuren aanneemt (verschuivingswet van Wien). Geoefende stokers kunnen op grond van dit verschijnsel de oventemperatuur met het ongewapende oog met goede benadering bepalen. Het oog fungeert dan als kleurpyrometer.

gloeikleuren	temperatuur in °C
donkerbruin	circa 550°C
donkerrood	circa 700°C
lichtrood	circa 800°C
geelrood	circa 900°C
geel	circa 1000°C
lichtgeel	circa 1100°C
geelwit	circa 1200°C
wit	circa 1300°C

2.2.9.3 Indicatoren voor de warmtebehandeling in de rijpingsperiode

Voor het volgen van de warmtebehandeling tijdens de rijpingsperiode, dan wel voor het retrospectief beoordelen daarvan, worden soms uit keramisch materiaal vervaardigde indicatoren gebruikt.

De indicatie berust op het verschijnsel dat keramisch materiaal bij verhitting boven een bepaalde temperatuur afhankelijk van het temperatuurverloop met de tijd krimpt en tenslotte verweekt.

Bekende indicatoren zijn Segerkegels, waarbij de verweking en Bullerringen waarbij de krimp als beoordelingsmaatstaf fungeert.

Segerkegels

Segerkegels zijn slanke uit keramische grondstoffen vervaardigde driezijdige pyramides met een hoogte van 60 mm (normale kegels) of 25 mm (laboratoriumkegels). De kegels zijn verkrijgbaar in 60 verschillende gestandaardiseerde grondstofsamenstellingen, die elk met een nummer worden aangeduid.

Wanneer een kegel uit deze reeks iets hellend ($80 \text{ à } 85^\circ$) op een horizontaal grondvlak wordt vastgekit en door verhitting tot verweking wordt gebracht, zal de top ombuigen. De vervormingstoestand waarbij de top het horizontale grondvlak juist bereikt noemt men het valpunt van de betreffende kegel.

Wanneer een kegel uit de beschikbare reeks op een bepaalde plaats in een oven tijdens de rijpingsperiode juist tot het valpunt wordt gebracht, wordt de warmtebehandeling ter plaatse met het betreffende kegelnummer gekarakteriseerd.

In de tabel van figuur 3.3.y is de reeks Segerkegels weergegeven. De in deze tabel vermelde temperaturen zijn de valpunttemperaturen bij een opwarming van de kegels met een constante snelheid van 150°C in lucht. Voor lagere opwarmingssnelheden gelden lagere valpunttemperaturen.

Bullersringen.

Bullersringen zijn drooggeperste ongebakken keramische ringen met een buitendiameter van 63,5 mm en een dikte van 8 mm.

De bakkrimp van de tussen de produkten in de oven gezette ringen is een maatstaf voor de warmtebehandeling ter plaatse.

De ringen zijn bruikbaar in het temperatuurgebied tussen 960 en 1440°C , waartoe vier verschillende grondstofcomposities zijn ontwikkeld en gestandaardiseerd.

Bij het gebruik van Segerkegels en Bullersringen, dient men zich bewust te zijn van de invloed van temperatuur en tijd en soms ook van de ovenatmosfeer op het meetresultaat.

2.2.9.4 Contrôle op de mate van sintering

Een directe contrôle op de mate van sintering van de produkten gedurende de rijpingsperiode, is alleen in bijzondere gevallen mogelijk.

Een voorbeeld hiervan is de zakmeting aan relatief hoge charges gestapelde produkten, die in een continue kamer oven of in een periodieke oven een grote bakkrimp moeten ondergaan (straatstenen).

De hiervoor gebruikte zakmeter is een peiltoestel, waarmee gedurende de rijpingsperiode, de door de bakkrimp en de pyroplastische deformatie veroorzaakte zak van een charge gestapelde produkten kan worden gevolgd. De niveauverlaging wordt gemeten met behulp van een vuurvaste zakdraad, die aan de onderzijde is verzaard met een peilblokje, dat op de charge rust.

De meter wordt aan het begin van het sinterproces gejusteerd. Het meetresultaat wordt beïnvloed door thermische lengteveranderingen van de zakdraad en bewegingen van het ovenlichaam.

De meting verschaft uiteraard geen informatie over de verschillen in bakkrimp en deformatie in de hoogterichting van de charge.

2.2.9.5 Bewaking van de ovenatmosfeer

In met brandstof gestookte ovens zijn met name de hoeveelheden per tijdseenheid toegevoerde brandstof en lucht, alsmede de bij de verbranding ontstane gasvormige reactieprodukten bepalend voor de samenstelling van het ovengas. Bovendien en dit geldt ook voor elektrische ovens, dient rekening gehouden te worden met reacties in het produkt waarbij zuurstof wordt verbruikt en/of gasvormige reactieprodukten ontstaan.

Voor de bewaking van de ovenatmosfeer in met brandstof gestookte ovens kan vaak worden volstaan met een visuele inspectie van de schoorsteengassen en de helderheid van het vuur. In sommige gevallen wordt gebruik gemaakt van de klassieke chemische analyse of van later ontwikkelde fysische meetmethoden.

Het gehalte aan CO_2 en CO wordt meestal bepaald aan de hand van een meting van de selectieve absorptie van infrarode straling, terwijl de bepaling van het O_2 -gehalte in rookgassen berust op de paramagnetische eigenschappen van dit gas.

Voor een incidentele globale controle op het CO_2 -gehalte wordt de gasvolumetrische bepaling, berustend op de absorptie van CO_2 in een KOH -oplossing, nog wel toegepast. De bepaling wordt uitgevoerd met gemakkelijk draagbare compacte meetapparaten en kost weinig tijd.

Voor orienterend onderzoek naar componenten van ovengassen, die van invloed zijn op de kwaliteit van het produkt, corrosie kunnen veroorzaken, of schadelijk zijn voor het milieu, zoals CO, SO₂, NO_x, Cl, HF en dergelijke, worden vaak op kleurverandering gebaseerde indicatoren gebruikt (Drägerbuisjes).

2.2.9.6 Meting van de statische druk

De drukmetingen worden bij het bakproces in het algemeen verricht in een stromend medium en gebruikt voor de controle op:

- de brandstof- en verbrandingsluchttoevoer,
- de gasstroom door de oven,
- het luchttransport door koelsystemen,
- lekkages van de oven.

Het betreft meestal de meting van de statische druk als overdruk of onderdruk (trek) ten opzichte van de atmosferische druk, dan wel ten opzichte van de statische druk op een andere plaats in de installatie. De drukken c.q. drukverschillen worden weergegeven in N/m² of kN/m². 1 N/m² = 1 Pa (Pascal)

Herleidingstabel:

<u>naam</u>	<u>symbool</u>	<u>N/m²</u>
1 millimeter waterkolom	1 mm WK	9,81
1 millibar	1 mbar	100
1 millimeter kwik (1 torr)	1 mm Hg	133,3
1 technische atmosfeer	1 kgf/cm ² (at)	98,1.10 ³
1 bar	1 bar	100 .10 ³
1 normale atmosfeer (760 mm Hg)	1 atm	101,3.10 ³

De meting wordt met allerlei typen manometers verricht.

Het gemeten drukverschil over bijvoorbeeld een ovengedeelte, een deel van een koelsysteem of over een lekkend ovenplafond, is een maat voor de betrokken volumestroom. Bij een laminaire stroming (Re < 2320) is deze recht evenredig met het drukverschil en bij een turbulente stroming ongeveer recht evenredig met de wortel uit het gemeten drukverschil.

2.2.9.7 Regeling van de oventemperatuur

De belangrijkste grootheid die tijdens het bakproces wordt geregeld is de oventemperatuur. De wijze waarop die regeling tot stand komt is voor de opeenvolgende stadia van het bakproces verschillend en wordt mede bepaald door het oventype.

In periodieke ovens wordt het temperatuurverloop gedurende de opwarming en de rijpingsperiode door de energietoevoer gecorrigeerd. Tijdens de koeling vindt de regeling meestal plaats met de volumestroom van de koellucht die indien nodig door recirculatie of toevoer van warmte wordt geconditioneerd. Soms wordt tot betrekkelijk lage temperatuur zonder een beheerste luchtdoorvoer gekoeld. Het temperatuurverloop wordt dan meestal bepaald door de transmissieverliezen en toevallige lekkages van de oven.

In continue ovens wordt het temperatuurverloop in de stookzone met de energietoevoer geregeld. In de voorwarmzone vindt de temperatuurregeling in het algemeen met de volumestroom van de ovengassen afkomstig uit de stookzone plaats en in de koelzone met de volumestroom van de koellucht (zie 2.2.2.6).

Plaatselijk wordt de koellucht soms door recirculatie of injectie van relatief koude lucht geconditioneerd.

De temperatuurregeling door middel van de energietoevoer verloopt in veel gevallen geheel automatisch.

De volumestromen van de ovengassen en de koellucht worden echter meestal met de hand ingesteld en gecorrigeerd (zie 2.2.9.6). Soms kan de temperatuurregeling tijdens de opwarming en de koeling worden verbeterd door een belangrijke storingsbron, te weten, de variaties van het drukverloop in het systeem te elimineren met een automatische trekregeling op een constante waarde.

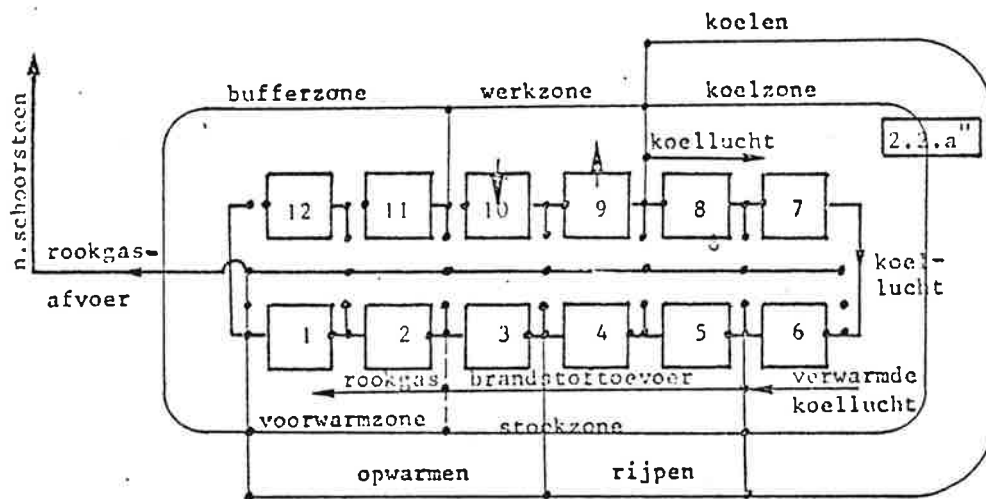
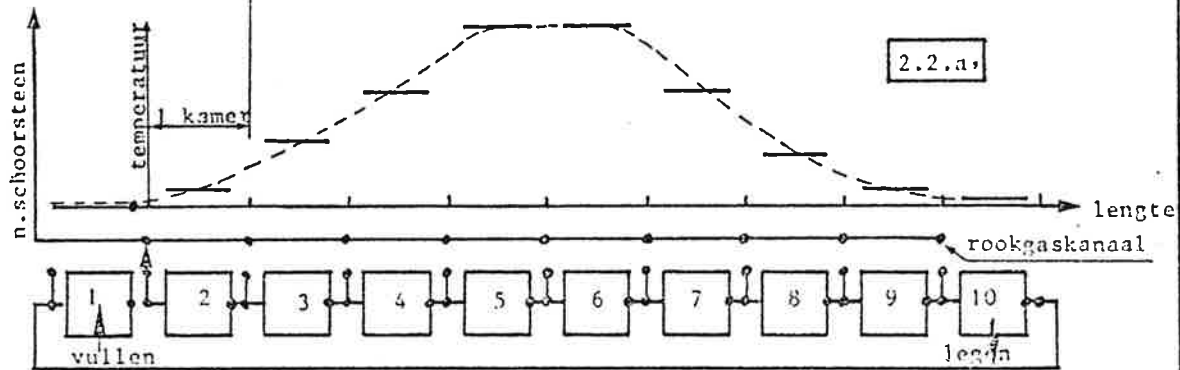
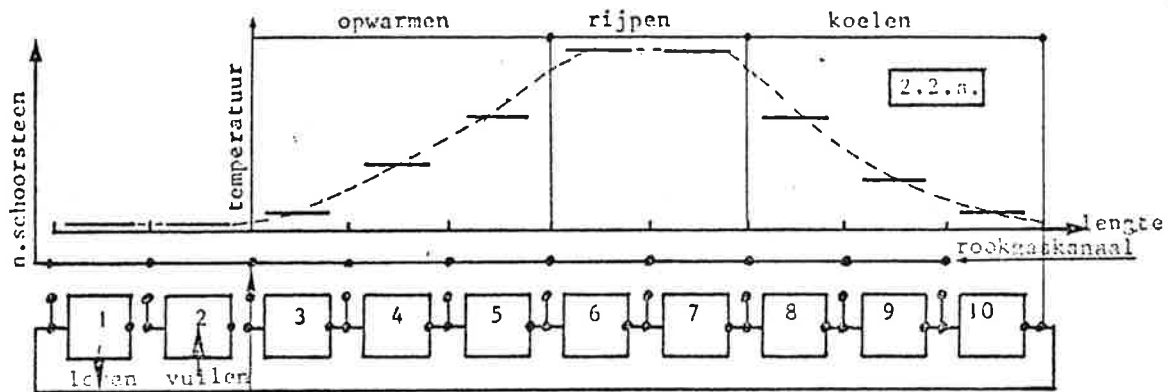
De werking van de regelorganen van automatische temperatuurregelingen op ovens is gewoonlijk discontinu. Het corrigerend element, bijvoorbeeld een klep in de brandstoftoevoer kan meestal twee standen innemen. Ten opzichte van regelaars met een continue werking heeft de tweestandenregeling het voordeel, dat deze eenvoudig is, weinig kostbaar en bedrijfszeker. Een nadeel is dat het temperatuurverloop steeds een rimpel vertoont, ook als er geen storende invloeden zijn.

Zowel in elektrische als met brandstof gestookte ovens worden vaak tijd-proportionele regelingen toegepast. Hierbij wordt de energietoever aan de oven ter regeling van de temperatuur met kortere of langere tussenpozen onderbroken. Zowel de frequentie van de onderbrekingen als de tijdsduur daarvan binnen een periode, kan worden gevarieerd.

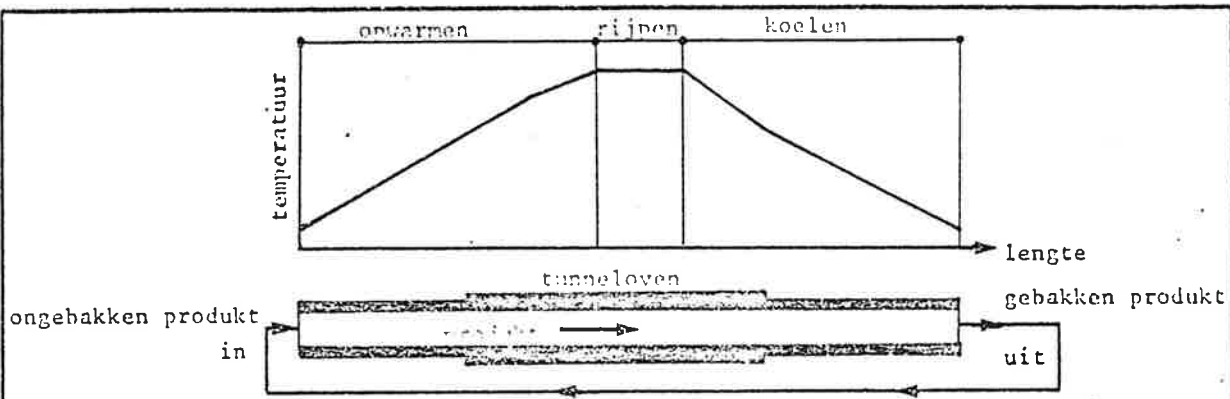
Ofschoon tussen de meiler en de moderne oven uit een oogpunt van procesbeheersing grote verschillen zijn aan te wijzen, blijft men mede in regeltechnisch opzicht streven naar een verdere ontwikkeling van baktechnieken voor de grote verscheidenheid van keramische produkten.

Literatuur

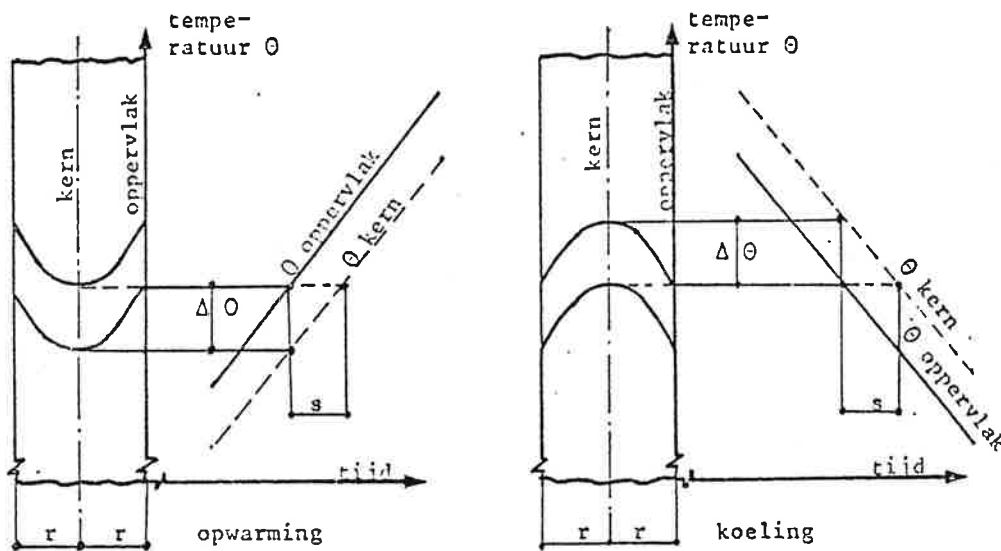
- F. Singer, F. Singer ; Industrial Ceramics
Chapman & Hall Ltd London
- J.H. Brunklaus , Industrieofenbau
Vulkan-Verlag Dr. W. Classen Essen
- F.H. Norton , Fine ceramics,
Technology and applications
Mc Graw-Hill Book Company New York
- Gröber/Erk und
U. Grigull , Die Grundgesetze der Wärme-übertragung
Springer Verlag Berlin
- W. Trinks , Industrial Furnaces, Vol I and II
John Wiley & Sons New York
- H. Etherington , Modern Furnace Technology
Charles Griffin & Company Ltd London
- H.M. Spiers , Technical Data on Fuel
R & R Cark, Ltd Edinburgh



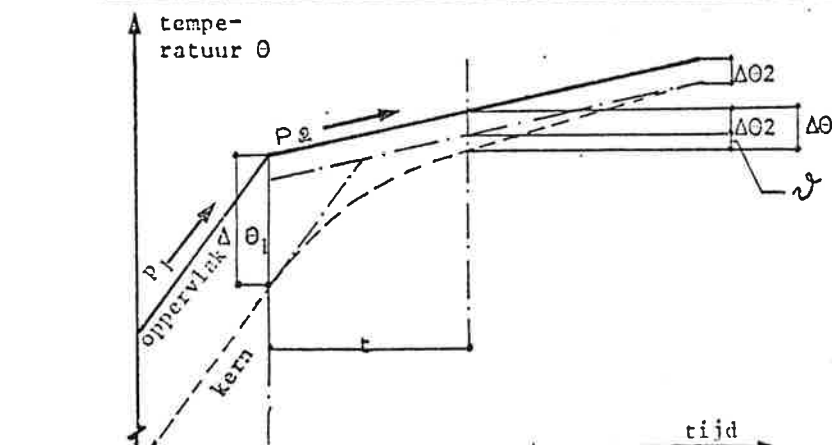
figuur 2.2.a; 2.2.a' en 2.2.a'' principeschema van een continue kameroven



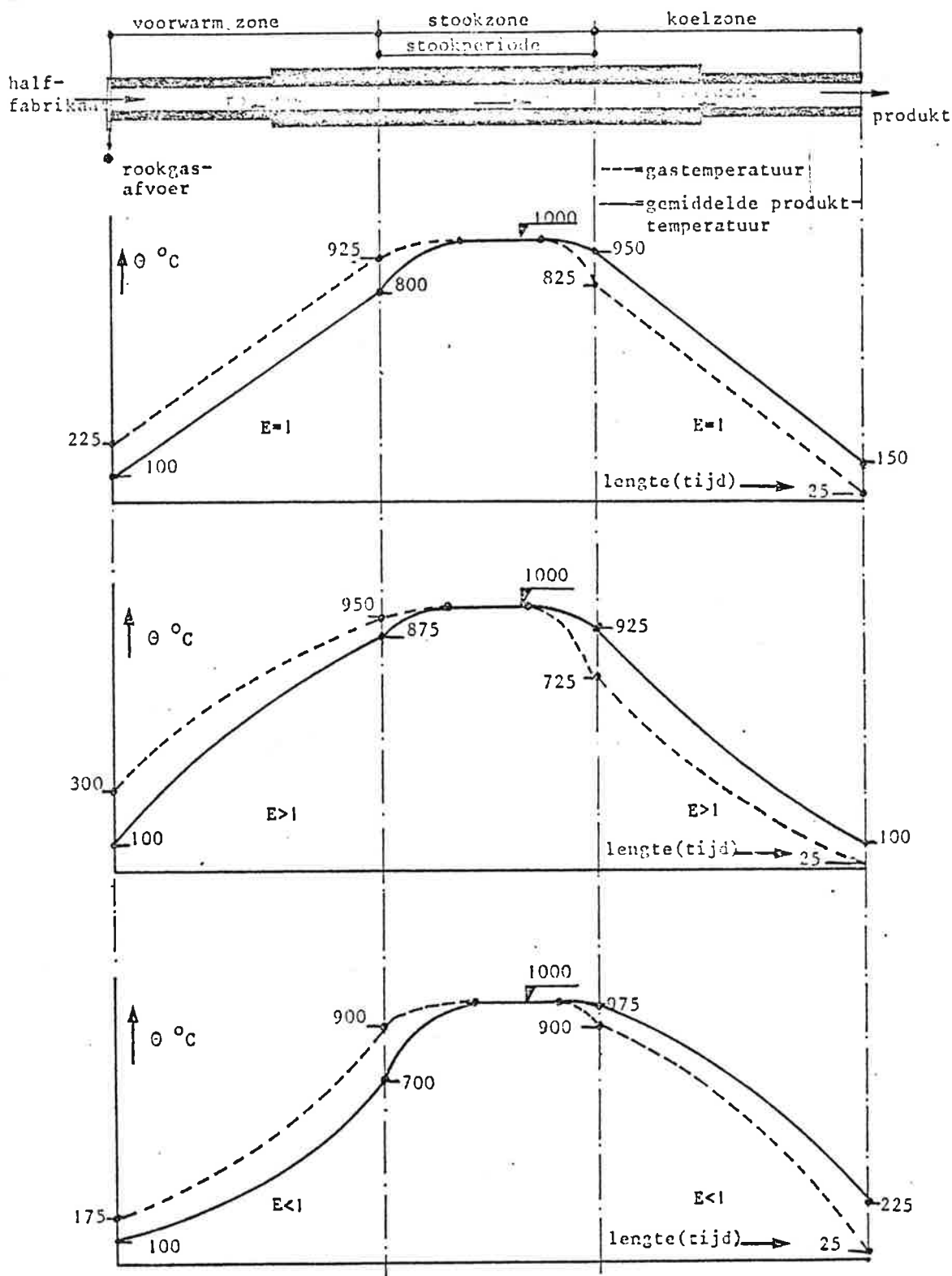
figuur 2.2b. principe schema van een tunneloven



figuur 2.2c. warmtetransport in een planparallelle plaat



figuur 2.2d. temperatuurverloop aan het oppervlak en in de kern van een planparallelle plaat bij verandering van de opwarmingsnelheid aan het oppervlak.



figuur 2.2.e. temperatuurverloop in een openvlam-tunneloven bij verschillende waarden van het quotient E in voorwarm- en koelzone.

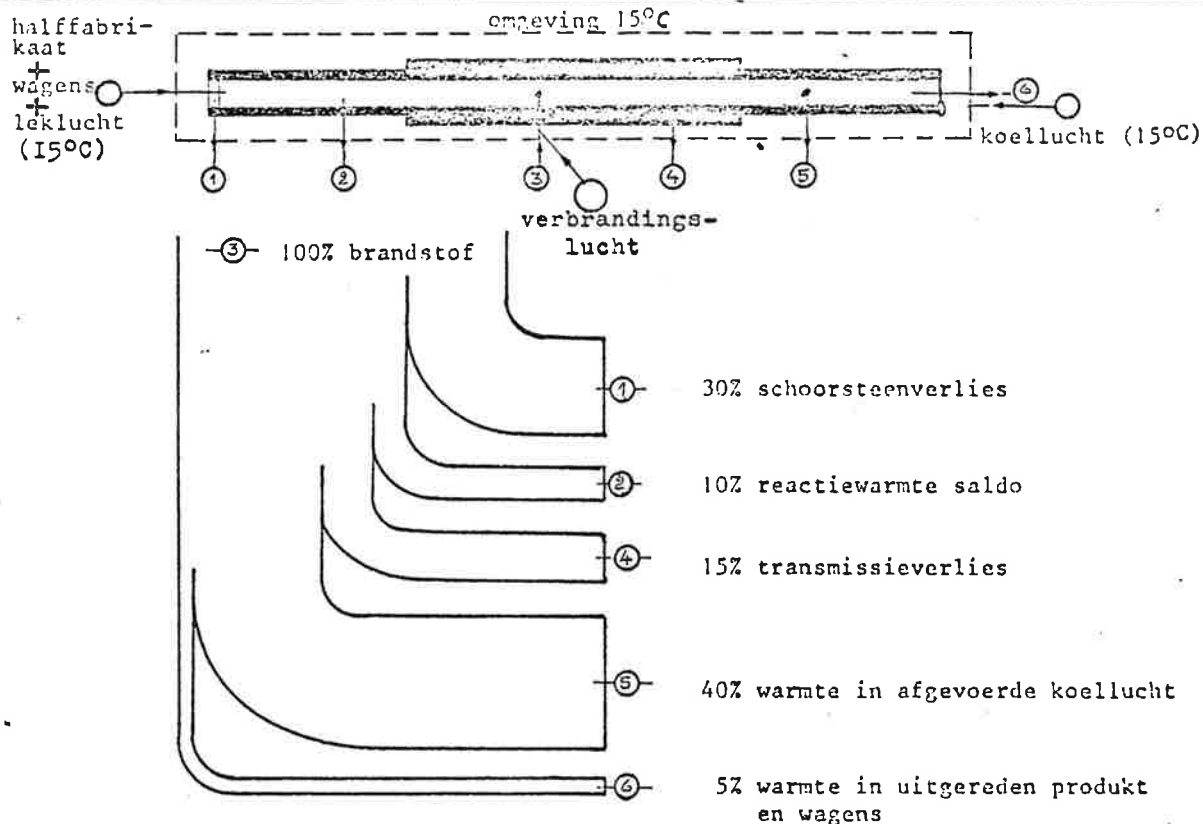


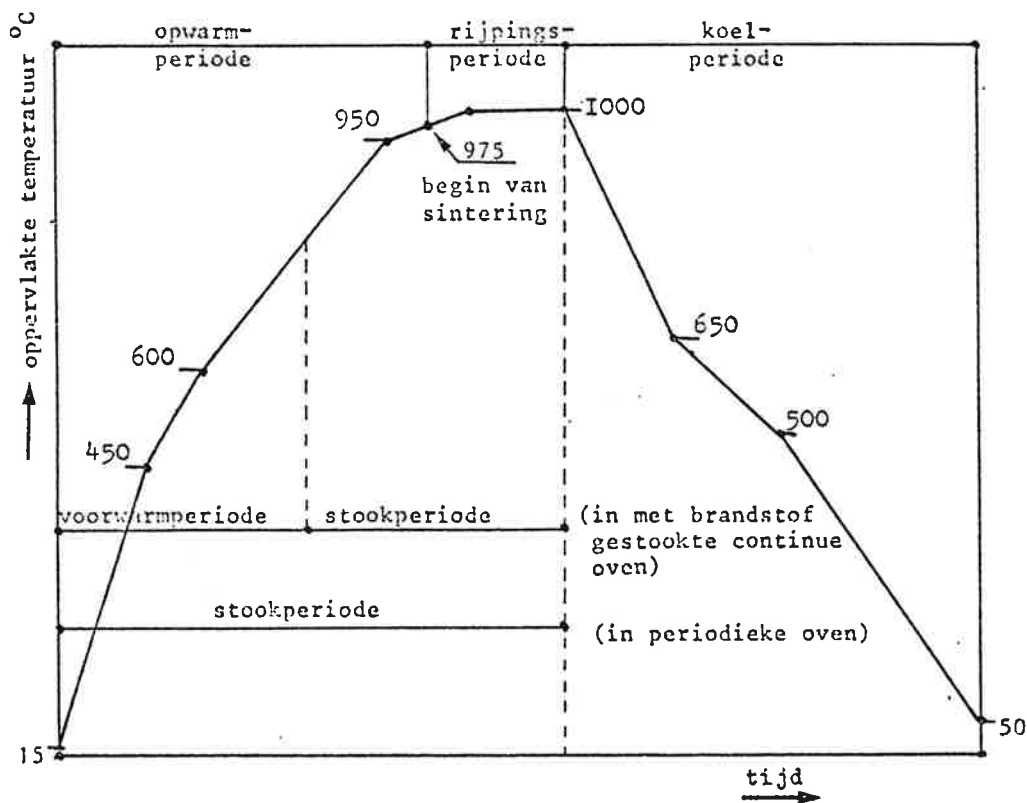
fig.2.2.f. Warmtebalans van een openvlam-tunneloven

tempe- ratuur in °C	soortelijke enthalpie hg in kJ/m ³ (i.n.)				hw in kJ/kg klei- produkten
	rookgassen (n=luchtfactor)			lucht	
	n=1	n=2	n=4	n=∞	
15	21,0	20,3	20,0	19,6	12,0
200	280	271	267	262	172
400	576	554	543	532	364
600	889	852	833	814	582
800	1212	1158	1132	1105	825
1000	1553	1479	1443	1406	1084
1200	1904	1808	1761	1713	1352
1400	2256	2149	2085	2028	1599

figuur 2.2.g. Gemiddelde soortelijke enthalpie van rookgassen, lucht, gebakken kleiprodukten en droge halfabrikaten ten opzichte van 0°C.

grofkeramische produkten	temperatuur- gebied °C	vuurvaste produkten	temperatuur- gebied °C
dakpannen	950-1000	chamottestenen	1200-1400
metseibakstenen	1025-1125	silicastenen	1425-1500
greswaren	1150-1250	magnesiëstenen	1500-1600
		mullietstenen	1450-1700
fijnkeramische produkten		elektrokeramische produkten	
aardewerk	1000-1300	isolatiematerialen	1200-1800
vitreous-china	1200-1300	magnetische materialen	1200-1400
porselein	900-1425	ferroelectrische materialen	1200-1450
decorbrand	650-850		

figuur 2.2.h. Baktemperaturen van keramische produkten.



figuur 2.2.i. Bakcurve van een fictief keramisch produkt.

vaste en vloeibare brandstoffen

soort	samenstelling	gewichtsprocenten (v.o.b.)					
		C	H ₂	N ₂ +O ₂	S	H ₂ O	as
gasvlankool, EGKS nr.633, V ₁ = 33,6%		77,7	5,2	8,6	0,71	2,0	5,8
vetkool, EGKS nr.434, V ₁ = 22,4%		81,6	4,5	5,3	0,61	2,0	6,0
zware stookolie, RI = 6000s, ρ _v = 980 kg/m ³		85,3	11,0	0,4	3,1	≤ 0,2	≤ 0,1
middelzware stookolie, RI = 350s, ρ _v = 950 kg/m ³		85,6	11,5	0,3	2,5	≤ 0,2	≤ 0,1

gasvormige brandstoffen

soort	samenstelling	volumeprocenten (v.g.b.)				gew. proc. (v.g.b.)		
		CH ₄	C _n H _{2n+2}	CO ₂	N ₂	S	H ₂ O	as
Nederlands aardgas								
ρ _g = 0,833 kg/m ³ (i.n.)		81,3	3,4	0,9	14,4	0	0	0
handelspropana								
ρ _g = 1,96 kg/m ³ (i.n.), ρ _v = 529 kg/m ³								
		C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C _n H _{2n} C _n H _{2n+2}	S	H ₂ O	as	
		70	30	< 1	0,001	0	0	

verbrandingstechnische gegevens	per kg brandstof				per m ³ gas (i.n.)	
	steenkool EGKS nr		stookolie RI		Ned. aardgas	handelspropana
	633	434	6000 s	350 s		
calorische bovenwaarde, MJ	32,16	33,27	43,01	43,74	35,17	97,95
stookwaarde, MJ	30,98	32,23	40,52	41,15	31,65	90,42
theor.verbrandingslucht, m ³ (i.n.)	8,06	8,32	10,60	10,80	8,41	23,09
theor.rookgas, droog, m ³ (i.n.)	7,82	8,10	10,00	10,10	7,69	21,24
theor.rookgas, vochtig, m ³ (i.n.)	8,42	8,62	11,23	11,39	9,43	24,94
rookgascomponenten, m ³ (i.n.)						
N ₂	6,38	6,59	8,39	8,48	6,79	18,24
CO ₂	1,44	1,51	1,59	1,60	0,90	3,00
SO ₂	0,005	0,004	0,022	0,018	0,000	0,000
H ₂ O	0,60	0,52	1,23	1,29	1,74	3,70
(CO ₂ +SO ₂) _{max} vol % (v.d.r.)	18,5	18,7	16,1	16,0	11,7	14,1

symbolen en afkortingen

EGKS nr.... = codering volgens internationaal classificatiesysteem voor steenkolen van de Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal.

V₁ = vluchtige stoffen in gew.% van oorspronkelijke brandstof.

(v.o.b.) = van oorspronkelijke brandstof.

(v.g.b.) = van brandstof in gasvormige toestand.

R_I.....s = viscositeit in Redwood I seconden bij 100° Fahrenheit.

(i.n.) = in normaaltoestand, d.w.z. bij 0°C en 101,3 kN/m².

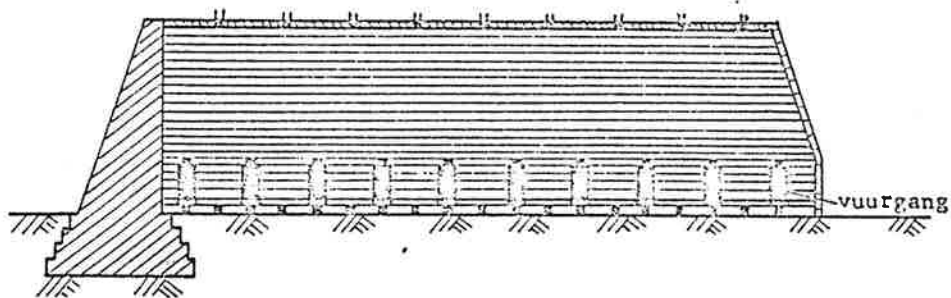
(v.d.r.) = van droog rookgas.

ρ_v = volumieke massa in vloeibare toestand bij 0°C.

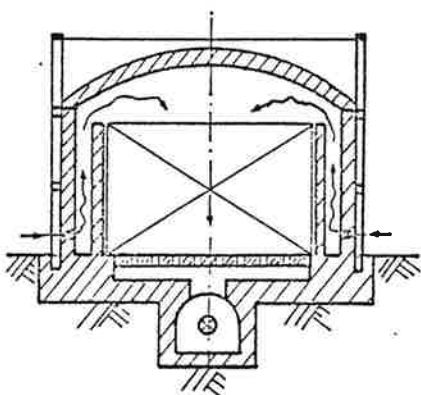
ρ_g = volumieke massa in gasvormige toestand (i.n.).

Inleiding tot de baktechniek
Cursus Keramiek S.O.K.
Gegevens van enkele brandstoffen.

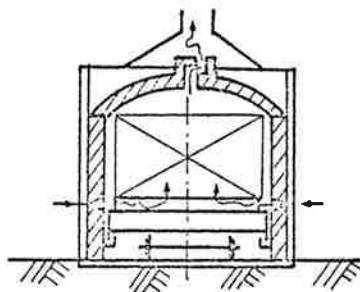
CTI - TNO
Afdel. Grofkeramiek
Doss.nr. 02-6-40040
Fig.nr. 2.2.j.



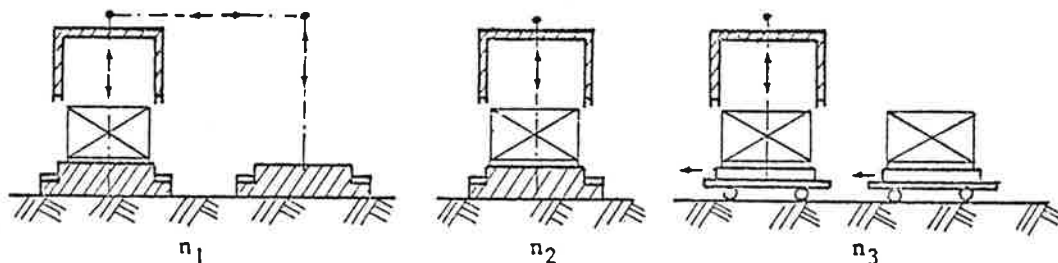
figuur 2.2.k vertikale doorsnede van een veldoven



figuur 2.2.l. periodieke oven met overslaande vlam
(vertikale dwarsdoorsnede)

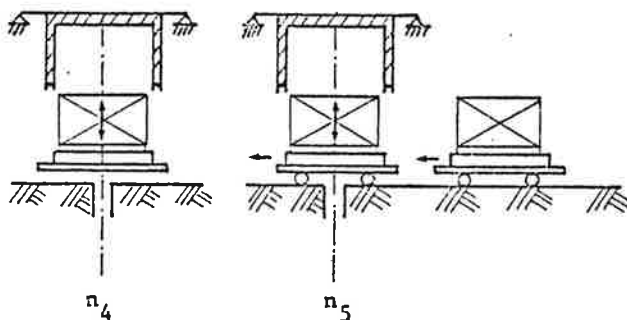


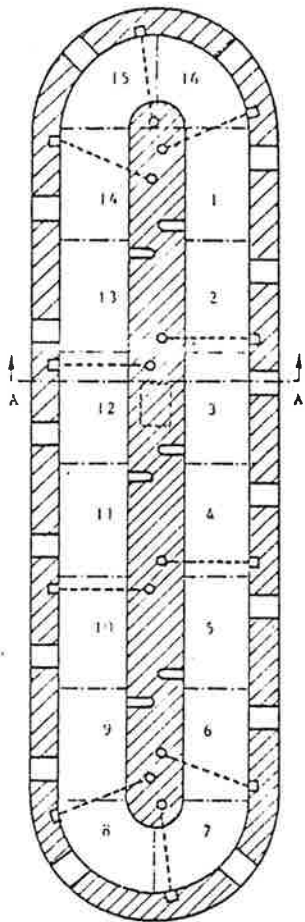
figuur 2.2.m periodieke wagenoven
(vertikale dwarsdoorsnede)



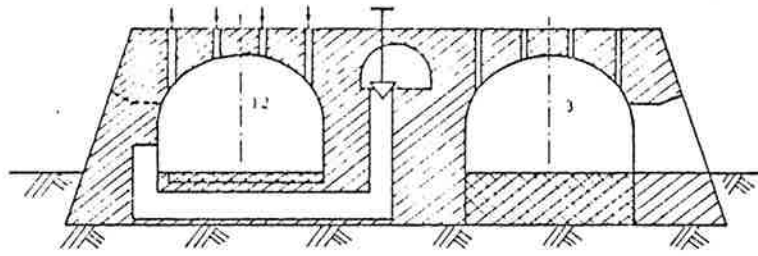
figuur 2.2.n.
varianten van de klokoven

(n_1, n_2 , en n_3 klok beweegbaar,
 n_4, n_5 klok in vaste
positie)

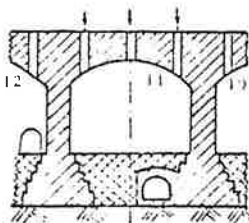




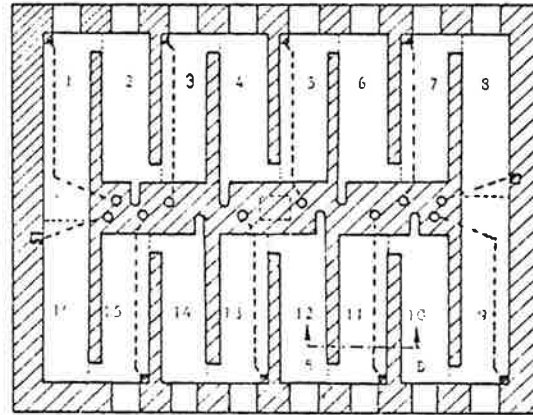
figuur 2.2.o. ringoven



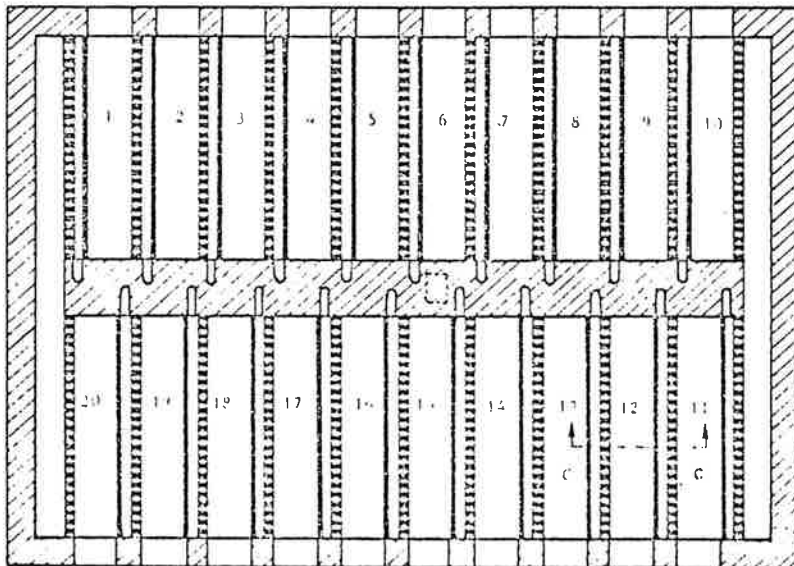
doorsnede A-A van ringoven



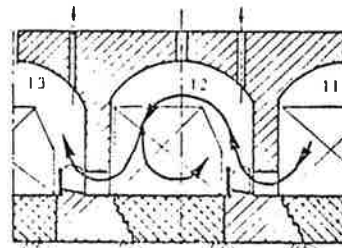
doorsnede B-B van zig-zagoven



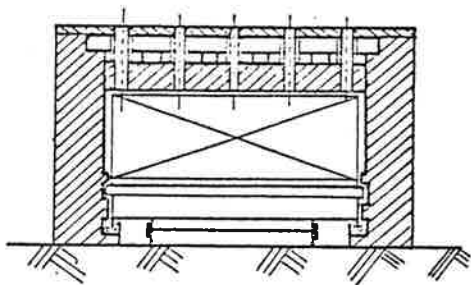
figuur 2.2.p. zig-zagoven



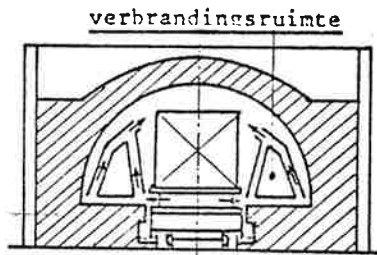
figuur 2.2.q. Kamerringoven met overslaande vlam(vlamoven).



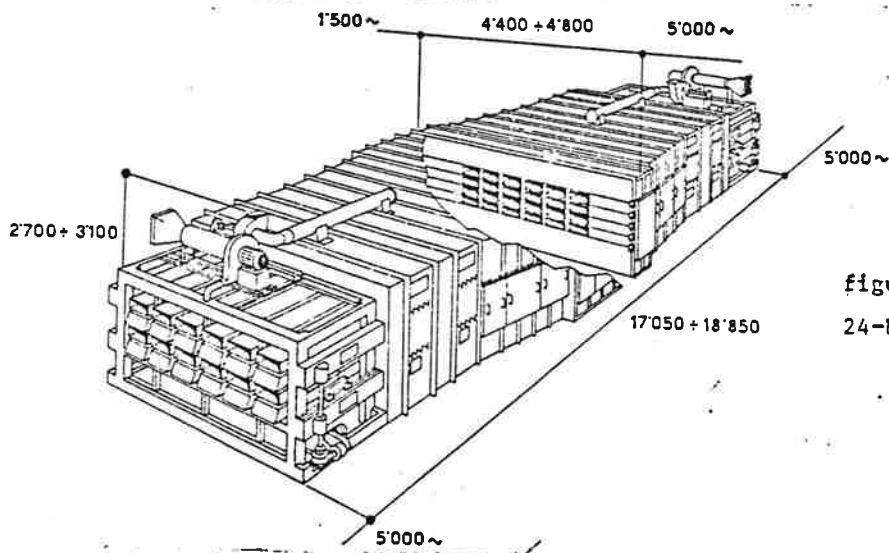
doorsnede C-C van vlamoven.



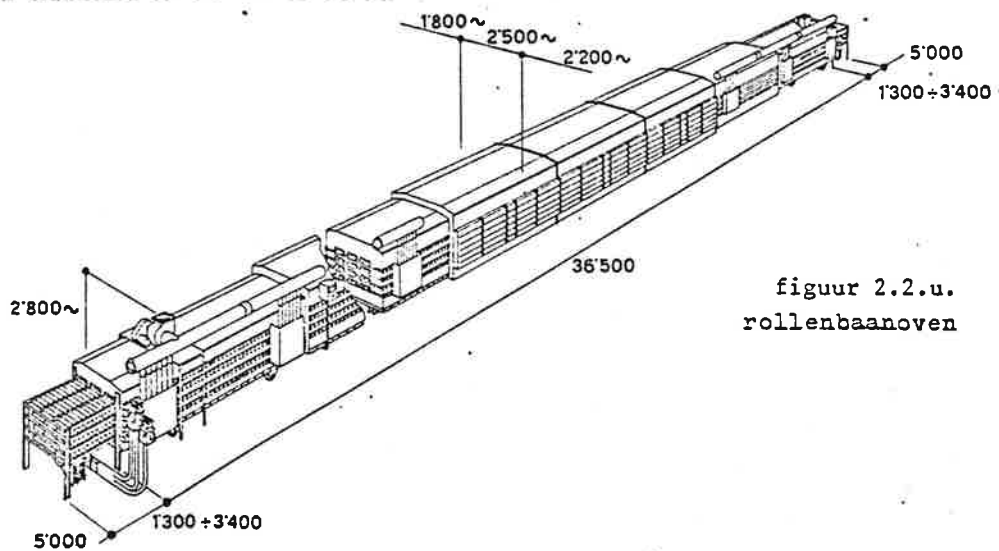
figuur 2.2.r.
dwarsdoorsnede over de
stookzone van een
openvlam-wagentunneloven.



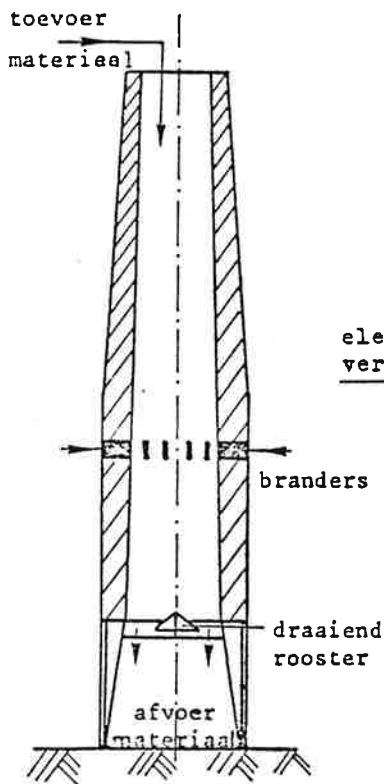
figuur 2.2.s.
dwarsdoorsnede over
de stookzone van een
moffel-tunneloven.



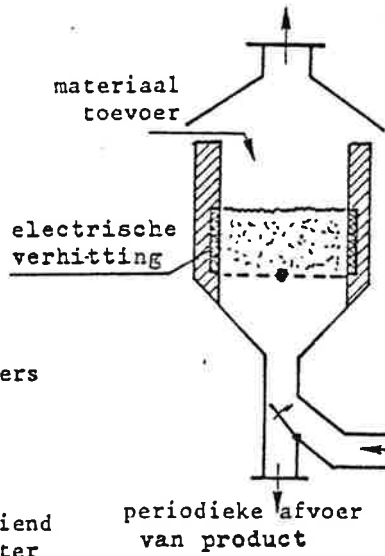
figuur 2.2.t,
24-baans-passage oven.



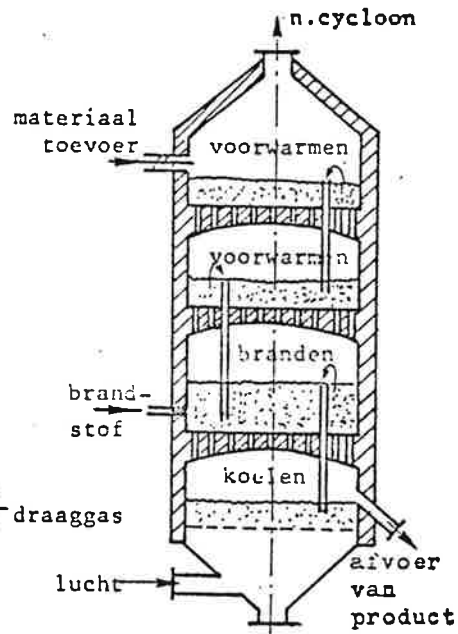
figuur 2.2.u.
rollenbaanoven



figuur 2.2.v. schachtoven



figuur 2.2.w.
periodieke oven
met fluïde bed.



figuur 2.2.x.
continue oven
met fluïde bed.

SK	°C	SK	°C	SK	°C	SK	°C	SK	°C	SK	°C	SK	°C
022	595	013a	835	04a	1025	6a	1240	15	1425	23	1560	34	1755
021	640	012a	860	03a	1055	7	1260	16	1445	26	1585	35	1780
020	660	011a	900	02a	1085	8	1280	17	1480	27	1605	36	1805
019	685	010a	920	01a	1105	9	1300	18	1500	28	1635	37	1830
018	705	09a	935	1a	1125	10	1320	19	1515	29	1655	38	1855
017	730	08a	955	2a	1150	11	1340	20	1530	30	1680	39	1875
016	755	07a	970	3a	1170	12	1360	23	1560	31	1695	40	1900
015a	780	06a	990	4a	1195	13	1380			32	1710	41	1940
014a	805	05a	1000	5a	1215	14	1400			33	1730	42	1980

figuur 2.2.y. Reeks segerkegels met valpunttemperaturen bij een opwarmingssnelheid van 150° C/uur.