



CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 70-0615

Dossier: 3572D-6412

RAPPORT

Het warmte- en stromingstechnische
gedrag van een vlamoven

door

Ir. J.Claus

en

G.Wentink

Datum : Februari 1970

Bestemd voor: De Nederlandse Grofkeramische Industrie

INHOUDSOPGAVE

| | <u>pag.</u> |
|--|-------------|
| 1. SAMENVATTING | 4 |
| 2. INLEIDING | 5 |
| 3. DE OVEN | 7 |
| 4. DE METINGEN | 8 |
| 4.1. Het openpottenverlies | 8 |
| 4.1.1. De meting | 8 |
| 4.1.2. Nadere beschouwing van de meting | 9 |
| 4.2. De warmte naar de drogerij | 13 |
| 4.2.1. De meting | 13 |
| 4.2.2. Nadere beschouwing van de meting | 13 |
| 4.2.3. Berekening van de uit de oven naar de drogerij gevoerde warmte | 13 |
| 4.3. De door de oven stromende hoeveelheid gas | 16 |
| 4.3.1. De meting | 16 |
| 4.3.2. Nadere beschouwing van de meting | 16 |
| 4.4. Het schoorsteenverlies | 19 |
| 4.4.1. De meting | 19 |
| 4.4.2. Nadere beschouwing van de metingen | 19 |
| 4.4.2.1. De hoeveelheidsmeting | 19 |
| 4.4.2.2. De temperatuurmeting | 22 |
| 4.4.2.3. De berekening | 23 |
| 4.5. Warmteverliezen van de ovenromp | 24 |
| 4.5.1. De meting | 24 |
| 4.5.2. Nadere beschouwing van de meting | 25 |
| 4.5.2.1. De warmteverliezen door de verticale ovenwand | 25 |
| 4.5.2.2. De warmteverliezen door het dak van de oven | 30 |
| 4.5.2.3. De warmteverliezen door de vloer van de oven | 32 |
| 4.6. De hoeveelheid aardgas | 33 |
| 4.6.1. De meting | 33 |
| 4.6.2. Nadere beschouwing van de meting | 34 |
| 4.7. De temperaturen in het steenpakket | 35 |
| 4.7.1. De meting | 35 |
| 4.7.2. Nadere beschouwing van de meting | 35 |

| | <u>pag.</u> |
|--|-------------|
| 4.8. De gastemperatuur in de fietsenrekken | 38 |
| 4.8.1. De meting | 38 |
| 4.8.2. Nadere beschouwing van de meting | 38 |
| 4.9. De temperatuur onder het gewelf | 40 |
| 4.9.1. De meting | 40 |
| 4.9.2. Nadere beschouwing van de meting | 40 |
| 4.10. Vergelijking van de temperaturen in het steenpakket, de fietsenrekken en onder het ovengewelf | 41 |
| 4.11. De temperatuur in het ovendak | 42 |
| 4.11.1. De meting | 42 |
| 4.11.2. Nadere beschouwing van de meting | 42 |
| 4.12. Het drukverschil over een ovenkamer | 43 |
| 4.12.1. De meting | 43 |
| 4.12.2. Nadere beschouwing van de meting | 43 |
| 4.13. De temperatuur en de gashoeveelheid tussen de steen- stapeling | 45 |
| 4.13.1. De meting | 45 |
| 4.13.2. Nadere beschouwing van de meting | 45 |
| 5. DE WARMTEBALANS | |
| 5.1. De berekening | 46 |
| 5.2. Nadere beschouwing van de warmtebalans | 47 |
| 6. DE STOFBALANS | 50 |
| 7. CONCLUSIES | 51 |
| 8. SLOTBESCHOUWING | 53 |
| 9. LITERATUUR | 54 |
| APPENDIX | 55 |

Figuren 1 t/m 41

1. SAMENVATTING

Dit rapport bevat de resultaten van een uitgebreide meting aan een moderne met gasgestookte vlamoven.

Van deze oven werd een warmte- en een stofbalans opgesteld. De warmtebalans vertoonde een voor dit soort metingen zeer acceptabele sluitpost van -7%. De schoorsteenverliezen en de verliezen door de open potten bleken met respectievelijk 32% en 22% de belangrijkste verliesposten te zijn.

Met behulp van een He-tracertechniek werd de stofbalans van de oven opgesteld. Hiermee kan de grootte van de verschillende gasstromen in de oven worden vastgelegd. Het papierlek bleek 43% van de totaal door de schoorsteen gaande rookgashoeveelheid te bedragen, de door de ovenpoorten inlekkende lucht 2,5%.

De He-tracertechniek toonde aan dat in de ovenkamers na het omloopkanaal snelheidsverschillen van 300% voorkomen.

Met uitgebreide temperatuurmetingen in het steenpakket, in de fietsenrekken, onder het ovengewelf, in de ovenvloer en op en in de ovenwanden, kon het warmtetechnisch gedrag van de oven nader worden geanalyseerd en konden conclusies worden getrokken met betrekking tot de invloed van het papierlek op de temperaturen in het steenpakket, en de verschillen in de luchttemperatuur in de koelzone.

Uit de temperatuurmetingen bleek bovendien de juistheid van de met behulp van modelproeven gevonden stromingspatronen in de vlamovenkamers.

2. INLEIDING

In de grofkeramische industrie bestaat een duidelijke behoefte om te komen tot een verhoogde economie en een betere beheersing van de kwaliteit van het eindprodukt. In samenwerking tussen TNO en de Technische Centra is daarom begonnen met een onderzoek met het doel te komen tot een betere beheersing van het bakproces. Hierbij zal behalve aan het verbeteren van de bestaande oventypen ook moeten worden gedacht aan het ontwikkelen van een aan de eigenschappen van de Nederlandse klei aangepaste oven. In het bijzonder zal daarbij aan de mogelijkheid tot mechanisering en automatisering van het proces aandacht moeten worden geschonken.

Aangezien momenteel in de Nederlandse grofkeramische industrie de vlamoven het gebruikelijkste oventype is, werd besloten om het onderzoek te beginnen met het vastleggen van het gedrag van een moderne met aardgas gestookte vlamoven. Een vergelijkbaar onderzoek werd 10 jaar geleden reeds uitgevoerd in het kader van de werkzaamheden van de "Stichting Produktiviteitscentrum voor de Baksteenindustrie", echter aan met kolen en turf gestookte ovens [1]. Sinds die tijd zijn de produktiecijfers van de vlamoven zodanig veranderd en is een zodanige verandering in de bedrijfsvoering van deze ovens opgetreden, dat een hernieuwd onderzoek naar de werking van een vlamoven zonder meer noodzakelijk moest worden geacht.

De bestudering van de economie van een proces waarbij verwarming of verbranding plaats vindt, geschiedt doorgaans aan de hand van een warmte- en een stofbalans. De ovenmetingen waren in eerste instantie dan ook gericht op het opstellen hiervan. Nauw samenhangend met de economie van het proces is uiteraard ook de kwaliteit van het eindprodukt. Om hierover een oordeel te kunnen geven werd na afloop van de proeven een uitgebreide analyse van de tijdens de proef gebakken stenen gemaakt [2].

Aangezien bij de opzet van het gehele onderzoek gestreefd wordt naar een zo algemeen mogelijke beschrijving van wat zich in een vlamoven afspeelt, werden in het meetprogramma ook een aantal metingen opgenomen die een analytische beschrijving van het ovenproces mogelijk moeten maken. Deze metingen zullen in een later stadium worden gebruikt om een "rekenmodel" van een vlamoven op te stellen.

De keuze van de oven geschiedde in overleg tussen TNO en de Technische Centra. De metingen werden, nadat een oriënterende proevenserie aan een identieke oven was uitgevoerd, gedaan aan de oven van de N.V. Druten te Druten.

In dit verslag zijn de resultaten van alle metingen met uitzondering van de kwaliteitstests opgenomen. Voor de bespreking hiervan zij verwezen naar het betreffende rapport [2].

3. DE OVEN

De oven waaraan de metingen zijn verricht, werd in onderling overleg tussen de Technische Centra en TNO uitgezocht. De keuze viel hierbij op de onlangs in bedrijf genomen oven van de N.V. Druten te Druten (N.Br.). De oven (zie figuur 1) is een met aardgas gestookte vlamoven met grote poorten. Er worden geen vlammuren toegepast.

De inzet bestaat uit twee op elkaar geplaatste Hulobladen. De toevoer van het gas geschiedt met behulp van verplaatsbare lansen die door de "Technische Dienst Waalsteen" zijn ontwikkeld uitgaande van de GIVEG-lans. De primaire verbrandingslucht wordt aangezogen uit de oven. De gashoeveelheid wordt per lans geregeld door middel van een naaldventiel.

De warmeluchtaftrek naar de drogerij vindt plaats via boven de oven aangebrachte uitschuifbare kanalen, die met een vlinderklep kunnen worden aangesloten op of afgesloten van een boven de oven lopende leiding. De luchtaftrek vindt plaats in de 3e en 4e kamer achter het vuur.

De rookgassen worden door een opening in de achterwand van de ovenkamer via een ventiel naar het midden op de oven gelegen rookgaskanaal gevoerd. Doorgaans worden de rookgassen uit twee ovenkamers afgezogen.

In totaal heeft de oven 22 kamers. Iedere kamer is voorzien van 12 stookpotten, 6 observatiepotten en 6 meetpotten. Aan de voorzijde van de kamer is in de ovenromp een kijkgat aangebracht, waarmee de branders visueel op hun goede werking kunnen worden gecontroleerd.

Het vervaardigde produkt is gele metselsteen. Per kamer worden 38.500 stenen vervaardigd. Dit komt neer op een gemiddelde produktie van 4750 kg steen per uur.

4. DE METINGEN

Aan de vlamoven werd een uitgebreide serie metingen verricht met het doel de gegevens te verzamelen die voor het opstellen van een warmte- en stofbalans van de gehele oven noodzakelijk zijn. Daarnaast werd een aantal metingen verricht met het doel de werking van de oven meer in detail te kunnen beoordelen.

Tot de eerste serie metingen behoren bijvoorbeeld de bepaling van het schoorsteenverlies, de bepaling van de hoeveelheid warmte die naar de drogerij wordt gevoerd en de bepaling van de warmteverliezen van de ovenromp. Tot de tweede categorie metingen behoren onder andere de temperatuurmetingen in het steenpakket, de gastemperatuurmetingen in de fietsenrekken en de drukmetingen.

In dit hoofdstuk zullen alle verrichte metingen in afzonderlijke paragrafen worden behandeld. Aandacht zal worden geschonken aan de praktische uitvoering van de metingen, aan de betekenis van de metingen zowel afzonderlijk als in hun onderlinge samenhang en aan de nauwkeurigheid van de metingen.

4.1. Het openpottenverlies

4.1.1. De meting

Van de onderzochte steenoven zijn gemiddeld 7 kamers als openpottenkamer in bedrijf. Iedere kamer heeft 12 stookpotten, 6 meetpotten en 6 observatiepotten. Daarnaast is in iedere kamer een grote afzuigopening voor de warmeluchtaftrek aangebracht, die ook als een "open pot" dient te worden beschouwd. Het is duidelijk dat met dit grote aantal uitstroomopeningen (in totaal 175) een beperking in het aantal meetplaatsen noodzakelijk was.

Op grond van oriënterende metingen werd besloten de snelheidsmetingen te verrichten in de 2e, de 7e en de 11e stookpot, (de eerste stookpot is de stookpot aan de poortzijde) en in de middelste kijkpot en de middelste meetpot. De snelheid in de warmeluchtafzuigopening bleek bijna 10% hoger te zijn dan de gemiddelde snelheid in de overige potten. De snelheid werd in het midden van de open potten gemeten met een direct-aanwijzende pitot. De afgelezen meetwaarde werd later, via de ijkcurve van het apparaat en een temperatuurcorrectie, omgerekend in een werkelijke snelheid in de open potten. Aangezien in de open potten de stroming turbulent is, kon de gemiddelde snelheid uit deze

berekening worden berekend door de gemeten snelheid door 1,2 te delen.

Eveneens op grond van de oriënterende metingen werd besloten de temperatuurmeting te beperken tot een meting in een stookpot, een meetpot en een kijkpot. De temperatuur werd gemeten met een thermometer die in het openpottenkanaal werd gehangen ten einde de stralingsinvloed van de omgeving zoveel mogelijk tegen te gaan. De "natteboltemperatuur" werd op dezelfde plaats bepaald met behulp van een van een nat kousje voorziene thermometer.

Doordat de bepaling van het openpottenverlies op een vrij willekeurig gekozen tijdstip is geschied, was het noodzakelijk om de metingen, ook wat betreft de tijd waarop ze werden uitgevoerd, te vergelijken. Dit is gedaan door in de presentatie van de resultaten de horizontale as van de grafiek onder te verdelen in 7 gelijke stukken van ieder 14 uur en de tijd die verlopen is tussen de meting en het openen van de deksels in een nieuwe kamer, in rekening te brengen door de plaats van het punt in de grafiek over deze tijd naar rechts te verschuiven.

4.1.2. Nadere beschouwing van de meting

In figuur 2 is de met de thermometer gemeten gemiddelde luchttemperatuur zoals die tijdens de verschillende metingen werd bepaald, uitgezet tegen de tijd die verlopen is na het openen van de deksels. Uit de grafiek blijkt dat direct na het openen van de deksels de luchttemperatuur ruim 250°C bedraagt. Deze temperatuur ligt 50°C boven de hoogste luchttemperatuur die in het fietsenrek aan de uittree van de eerste openpottenkamer werd bepaald (vergelijk figuur 34). Kennelijk is hier sprake van een extra opwarming van de uit de open potten stromende lucht in het bovenste gedeelte van de kamer, dat in de voorgaande stadia minder sterk is afgekoeld.

Na het openen van de deksels daalt de temperatuur van de lucht die uit de open potten stroomt vrij snel. Het verschil met de in de fietsenrekken gemeten temperatuur is in de 3e openpottenkamer nagenoeg verdwenen.

Uit de spreiding van de meetresultaten blijkt dat de gemiddelde temperatuur van de uit de open potten stromende lucht sterk

varieert. Voor de metingen die 15 uur na het openen van het deksel zijn uitgevoerd bedraagt de standaarddeviatie 21,8% en de standaardfout van het gemiddelde 9,7%. Voor de metingen die na ongeveer 85 uur zijn verricht is dit respectievelijk 13,5% en 6,9%. Met de vijf meetseries die zijn verricht, bedraagt de bereikte nauwkeurigheid van de voor alle open potten gemiddelde luchttemperatuur dus ongeveer 9%. Het kleinere absolute verschil tussen de gemeten temperaturen van de 3e en volgende openpottenkamers duidt er op dat wellicht ook tijdelijke variaties in het ovenbedrijf, die uiteraard in de heetste kamers de grootste invloed hebben, van invloed zijn geweest.

In figuur 3 is op dezelfde wijze als hierboven omschreven de natteboltemperatuur uitgezet. De absolute variatie in deze temperatuur is geringer dan die in de luchttemperatuur.

Voor de metingen die ongeveer 15 uur na het openen van de deksels zijn verricht, bedraagt de standaarddeviatie 10% en de standaardfout van het gemiddelde 4,2%. Voor de metingen na ca. 85 uur bedragen deze waarden: standaarddeviatie 10,8% en standaardfout van het gemiddelde 5,4%. Gemiddeld over alle openpottenkamers zal de standaardfout van het gemiddelde van de natteboltemperatuur dus ongeveer 5% bedragen.

In figuur 4 zijn de in de open potten gemeten snelheden uitgezet. De opgenomen meetpunten zijn de direct met de afleesbare pitot waargenomen waarden. De getrokken lijn geeft de voor de ijking van de pitot, de temperatuur van de lucht en de snelheidsverdeling in het kanaal gecorrigeerde gemiddelde waarden. In deze lijn is dus de gemiddelde luchttemperatuur van figuur 2 verwerkt. De originele meetpunten zijn in de grafiek opgenomen om te illustreren hoe groot de spreiding van de meetresultaten op dit punt is. De metingen die ongeveer 15 uur na het openen van de deksels zijn verricht vertonen een standaarddeviatie van 32,5% en een standaardfout van het gemiddelde van 14,5%. Voor de metingen na 85 uur bedragen deze waarden respectievelijk 10% en 5%. Dit houdt in dat, aangezien de snelheidsverdeling vrij vlak is, de gemiddelde standaardfout in het gemiddelde van de ongecorrigeerde snelheidsmeting ongeveer 10% zal bedragen.

De snelheid wordt gecorrigeerd voor de temperatuur van de uitstromende lucht. Deze correctie vindt plaats door vermenigvuldiging

met de wortel uit de absolute temperatuur. Bij een gemiddelde luchttemperatuur van ongeveer 100°C en een gemiddelde fout van 9% bedraagt de gemiddelde fout in de absolute temperatuur 4%. De fout in de snelheidsbepaling als gevolg van de temperatuurcorrectie bedraagt dus 2%. De totale fout in de gemiddelde snelheid wordt hiermee 12%.

Het verloop van de snelheid vertoont een maximum in de 3e openpottenkamer. Dit kan als volgt worden verklaard. De drijvende kracht achter het openpottenverlies is de schoorsteenwerking van het openpottenkanaal. Door deze schoorsteenwerking moet in de eerste plaats de wrijving van het openpottenkanaal worden overwonnen. Daarnaast dient met deze "schoorsteentrek" ook de aanstroomweerstand van de lucht te worden overwonnen. In formule gebracht wordt dit:

$$\frac{1}{2} \frac{\gamma_2}{g} v^2 \xi \frac{h}{d} + P_a = h (\gamma_1 - \gamma_2)$$

Hierin is

- γ_1 = soortelijk gewicht van de lucht in de omgeving, kg/m³
- γ_2 = soortelijk gewicht van de lucht in het openpottenkanaal, kg/m³
- v = snelheid in het openpottenkanaal, m/sec
- ξ = weerstandscoëfficiënt van het openpottenkanaal
- h = hoogte van het openpottenkanaal, m
- d = diameter van het openpottenkanaal, m
- P_a = aanstroomweerstand, mm wk
- g = versnelling van de zwaartekracht, m/sec²

Wanneer de poorten geheel geopend zijn zal P_a in eerste instantie kunnen worden verwaarloosd. Door de hogere temperatuur in de dichterbij het vuur gelegen open potten zal nu de snelheid van de lucht in de open potten dichterbij het vuur toe groter worden, aangezien een groter drukverschil ter beschikking staat.

Wanneer, zoals in de 1e en 2e openpottenkamer het geval is, de poort van de kamer slechts gedeeltelijk is geopend, zal voor het aanzuigen van de lucht niet alleen de weerstand van het openpottenkanaal moeten worden overwonnen, maar bovendien nog de stromingsweerstand van het gat in de poort. De snelheid in het openpottenkanaal zal daardoor afnemen.

Op de berekening van de luchtsnelheid in de open potten met behulp van de hierboven vermelde formule zal in een volgend verslag nader worden ingegaan.

Uit de temperatuurs- en snelheidsmetingen kan het openpottenverlies worden berekend. Bij deze berekening zijn de verliezen per kamer berekend uit de gemiddelde temperatuur en de gemiddelde luchtsnelheid gedurende de periode van 14 uur. Voor de temperatuur van de intredende lucht is 15°C aangehouden. In figuur 5 is het verlies in kcal/h voor de verschillende kamers uitgezet.

Het totale verlies van de 7 openpottenkamers bedraagt 815.000 kcal/h. De nauwkeurigheid van dit getal moet, gezien de nauwkeurigheid van de snelheids- en de temperatuurmeting, worden geschat op 21%. Bij deze berekening dient te worden opgemerkt dat geen rekening is gehouden met de verdampingswaarde van het vocht in de uit de open potten komende lucht. Deze wordt reeds in rekening gebracht door de met het aardgas ingebrachte warmte te baseren op de stookwaarde en de bodemverliezen, die verdamping van grondwater veroorzaken, afzonderlijk in rekening te brengen. De totale hoeveelheid lucht die uit de open potten stroomt bedraagt $35.200 \text{ nm}^3/\text{h}$.

De gemiddelde absolute vochtigheid van de uit de open potten stromende lucht is weergegeven in figuur 6. Hierin is tevens de vochtigheid van de in de kamers instromende lucht opgenomen. De standaardfouten in deze waarden bedragen bij 15 uur 16% en bij 85 uur 8%.

Uit deze metingen kan de totaal uit de open potten komende hoeveelheid vocht worden berekend. Over alle open potten gerekend bedraagt de gemiddelde absolute vochtigheid $0,0084 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ droge lucht. Hieruit volgt dat de totaal uit de open potten ontwijkende hoeveelheid water $380 \text{ kg}/\text{h}$ bedraagt. De nauwkeurigheid van dit getal moet worden geschat op 24%.

De in de eerste openpottenkamer gemeten absolute vochtigheid is, vergeleken met de absolute vochtigheid in de overige openpottenkamers, extreem hoog. Een nadere verificatie van deze waarde is dan ook noodzakelijk.

4.2. De warmte naar de drogerij

4.2.1. De meting

De naar de drogerij afgevoerde warme lucht wordt voornamelijk in twee kamers, die voor de openpottenkamers zijn gelegen, afgezogen. Daarnaast wordt door afdichtingen van de afzuigbuizen op de kamers ook lucht uit de boven de oven gelegen ruimte aangezogen.

De warmte die zich in deze lucht bevindt, is afkomstig van de uitstralingsverliezen van de oven en van de warmte uit de open potten. Voor het bepalen van de hoeveelheid warmte die aan de oven wordt onttrokken via de warmeluchtafzuigbuizen, moet dus de uit de boven de oven gelegen ruimte aangezogen lucht in mindering worden gebracht van de totale hoeveelheid lucht die naar de drogerij wordt gevoerd.

De totale hoeveelheid lucht naar de drogerij werd bepaald met behulp van een pitotmeting in het kanaal tussen de oven en de drogerij. De temperatuur van deze lucht werd gemeten met de aanwezige bedrijfsmeter.

4.2.2. Nadere beschouwing van de meting

In figuur 7 is het verloop van de temperatuur van de naar de drogerij gevoerde gassen aangegeven en de hoeveelheid gas die per uur wordt afgevoerd. In de hoeveelheid gas komen sterke fluctuaties voor, die samenhangen met de behoefte aan warmte van de drogerij.

De gemiddelde warmeluchttemperatuur in het kanaal bedraagt 186°C . De standaardfout van dit gemiddelde is 2,1%. De gemiddelde gashoeveelheid bedraagt 12.000 kg/h ($9.300 \text{ m}^3/\text{h}$) en de standaardfout van het gemiddelde 6%. Bij de berekening van dit laatste gemiddelde is de geheel uit de toon vallende waarneming van zondag 13 april buiten beschouwing gelaten.

4.2.3. Berekening van de uit de oven naar de drogerij gevoerde warmte

Uit na afloop van de proeven gevoerde metingen bleek dat bij een onderdruk van 14 mm wk in het warmeluchtkanaal door een op een afgesloten afzuigbuis geplaatste meetopening een hoeveelheid leklucht van $135 \text{ m}^3/\text{h}$ van 40°C ging. De diameter van de

meetopening bedroeg 9 cm, de gemiddelde snelheid in de meetopening 5,85 m/sec. Bij een contractiecoëfficiënt α van 0,6 betekent dit dat over de meetopening het drukverschil $\Delta p = 5,4$ mm wk heeft bedragen. Het drukverschil over de afdichting van de telescoopbuizen is tijdens de meting dus 8,6 mm wk geweest.

Tijdens de overmetingen heeft de gemiddelde onderdruk in het warmeluchtkanaal 12 mm wk bedragen. Dit betekent dat tijdens de overmeting $\sqrt{\frac{12}{8,6}} = 1,18$ maal zoveel lucht is binnengelekt als tijdens de later uitgevoerde proef. Dit komt dus neer op $20 \times 135 \times 1,18 = 3200 \text{ m}^3/\text{h}$ ($2800 \text{ nm}^3/\text{h}$). Bij een totale luchthoeveelheid van $9300 \text{ nm}^3/\text{h}$ betekent dit dat gemiddeld uit de oven direct $6500 \text{ nm}^3/\text{h}$ is afgezogen.

Met de bekende eindtemperatuur in het warmeluchtkanaal kan nu de uit de oven afgezogen warmte worden berekend uit:

$$\begin{aligned} Q &= 9300 \times 186 \times 0,313 - 2800 \times 40 \times 0,31 \\ &= 505.000 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

Hierbij is aangenomen dat de temperatuur van de lucht boven in het ovengebouw 40°C bedraagt.

Uit deze berekende waarde kan worden afgeleid dat de temperatuur van de lucht die uit de oven wordt afgezogen, in dit geval 235°C zou hebben moeten bedragen. Deze temperatuur ligt duidelijk lager dan de boven in de kamer gemeten temperaturen (vergelijk figuur 33).

De netto warmteafvoer van de oven naar de drogerij zou op basis van deze berekening en bij een omgevingstemperatuur van 15°C :

$$505.000 - 6500 \times 0,31 \times 15 = 475.000 \text{ kcal/h}$$

hebben bedragen.

Gezien de onwaarschijnlijk lage temperatuur van de uit de oven afgezogen gassen die uit de bovenstaande beschouwing volgt, is het gewenst de schatting van het verlies van de oven aan de drogerij nog via een andere weg te berekenen.

Uit de onder het gewelf gemeten temperaturen volgt dat de gemiddelde temperatuur in de twee kamers waaruit warme lucht wordt afgezogen 450°C bedraagt. Uit de metingen met de zuigpyrometer in de fietsenrekken blijkt dat bij dit temperatuurniveau de fout in de temperatuurmeting met een thermokoppel ca. 40°C bedraagt.

Op grond hiervan is een gemiddelde gastemperatuur van 410°C te verwachten.

Met deze temperatuur kan de volgende vergelijking worden opgesteld:

$$9300 \times 186 \times 0,313 = (9300 - x) \times 410 \times 0,312 + x \times 40 \times 0,31.$$

Hierin is x de hoeveelheid gas die via de afdichtingen van de warmteluchtaftekbuizen wordt aangezogen. Uit deze vergelijking volgt dat $x = 5650 \text{ nm}^3/\text{h}$.

De netto warmteafvoer naar de drogerij wordt dan:

$$(9300 - 5650) (410 \times 0,312 - 15 \times 0,31) = 450.000 \text{ kcal/h}.$$

Hoewel de volgens de beide berekeningen berekende hoeveelheid lucht die uit de oven wordt gezogen, aanzienlijk verschilt, is het verschil in de berekende hoeveelheid warmte die direct uit de oven naar de drogerij wordt gevoerd, gering.

Van de twee berekeningsmethoden leidt de eerste tot een onwaarschijnlijk lage temperatuur van de uit de oven afgezogen gassen. Het dient dan ook te worden betwijfeld of het na afloop van de proeven aan de afzuigbuizen gemeten lek, voldoende representatief is voor de tijdens de proeven opgetreden lekkage. De voorkeur zal dan ook moeten worden gegeven aan de tweede berekeningsmethode waarvan het resultaat is een warmteafvoer van 450.000 kcal/h en een hoeveelheid direct uit de oven aangezogen lucht van $3650 \text{ nm}^3/\text{h}$. De fout waarmee in dit verband rekening moet worden gehouden moet, op grond van de nauwkeurigheid van de temperatuur en de snelheidsmeting, op 8% worden gesteld.

De uit de oven naar de drogerij gevoerde hoeveelheid vocht kan alleen worden berekend wanneer de vochtigheid van deze lucht uit de temperatuurmetingen in de open potten wordt afgeleid. De gemiddelde absolute vochtigheid in de open potten bedroeg $0,0084 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ droge lucht. Uitgaande van deze waarde, zou met de warme lucht die uit de oven wordt afgezogen, $39 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{h}$ worden getransporteerd.

4.3. De door de oven stromende hoeveelheid gas

4.3.1. De meting

De gashoeveelheid die door de oven stroomt, werd bepaald met behulp van een He-tracertechniek. Deze techniek is uitgebreid besproken in [3]. In principe komt de meting erop neer, dat van een op een bepaalde plaats ingebrachte hoeveelheid He de concentratie op stroomafwaarts gelegen punten wordt vastgesteld. Uit deze concentratiemeting kan dan de op de betreffende plaats door de oven stromende gashoeveelheid worden berekend. Bovendien geeft de meting kwalitatieve gegevens over de wijze waarop de gasstroom over de ovendoorsnede is verdeeld.

4.3.2. Nadere beschouwing van de meting

Tijdens de proef werd tweemaal een meting met de He-tracer uitgevoerd. De eerste maal werd de He gedoseerd in kamer nr. 1, de tweede maal in kamer nr. 13. Beide keren dus in vrijwel direct achter het omloopkanaal gelegen kamers. De tijdens deze twee metingen in de kamers gemeten He-concentratieverdeling vertoont goede overeenstemming, zodat de verdere bespreking van deze meting, althans voor zover het het concentratieverloop in de kamers betreft, aan de hand van een van de metingen zal geschieden. In figuur 8 zijn de in de diverse kamers gemeten concentraties uitgezet.

In de direct op de kamer waarin het He werd geïnjecteerd volgende kamer 14, wisselt de He-concentratie sterk. De invloed van het omloopkanaal op de snelheidsverdeling is hier nog duidelijk merkbaar. Vooral aan de binnenzijde van de oven is de He-concentratie hoog. Aangezien het getekende concentratieverloop aan de achterzijde van de kamer uitsluitend gebaseerd is op metingen in de stockpotten 8 en 12, zal op deze plaats in de oven de interpretatie van het concentratieverloop en van het daaruit afgeleide snelheidsverloop onder enig voorbehoud moeten geschieden.

Het uit de He-concentratiemetingen in kamer 14 afgeleide snelheidsverloop is uitgezet in figuur 9. Deze verdeling laat zien hoe onregelmatig de luchtstroming over de ovendoorsnede is verdeeld. De grootste snelheid treedt op in het midden van de ovenkamer. Aan de poortzijde is de gassnelheid aanzienlijk lager dan in het midden,

maar toch nog bijna tweemaal zo hoog als de gassnelheid aan de achterzijde van de kamer. De maximum snelheid in de ovendoorsnede is meer dan driemaal zo hoog als de minimum snelheid. Deze snelheidsverdeling is zonder enige twijfel te verklaren uit de invloed van het omloopkanaal op de stroming. De lage snelheid aan de achterzijde van de kamer is een gevolg van het ombuigen van de stroming bij het binnenstromen van de ovenkamers na het omloopkanaal.

In deze figuur is ook de uit de andere He-meting voor kamer 2 afgeleide verdeling uitgezet. Hoewel in deze kamer het verloop iets minder grillig is, blijkt ook uit deze meting dat de snelheidsverschillen over de kamerlengte 300 à 400% bedragen. Ook dit verloop duidt op de slechte doorstroming van het achterste gedeelte van de direct achter het omloopkanaal gelegen kamers.

In de verder stroomafwaarts gelegen kamers wordt de He-concentratie gelijkmatiger. Dit duidt erop dat de grote snelheidsverschillen die dicht bij het omloopkanaal nog bestaan, snel kleiner worden. In kamer 18 is de concentratie vrijwel constant over de kamerdoorsnede.

Door het inlekken van lucht door de poorten van de kamers, het toevoeren van gas en het vrijkomen van CO_2 uit de stenen, daalt de gemiddelde He-concentratie in de kamers. De concentratiemetingen in stookpot 1 worden door het inlekken het sterkst beïnvloed. Op deze plaatsen neemt de He-concentratie dan ook steeds af. Het verschil tussen de He-concentraties aan de poortzijde van de kamers 14 t/m 18 is gering. Tussen de kamers 18 en 21 treedt echter een aanzienlijke daling op, hetgeen erop wijst dat in dit gedeelte van de oven de afdichting van de poorten minder goed is geweest.

In figuur 10 zijn de gemiddelde He-concentraties in de verschillende kamers uitgezet. In de kamers juist na de kamer waarin het He werd geïnjecteerd, is de gemiddelde He-concentratie berekend uit het gewogen gemiddelde, d.w.z. dat de in deze kamers aanwezige snelheidsverdeling in de berekening van het gemiddelde is verdisconteerd. In verder van de plaats van de injectie en dus van het omloopkanaal gelegen kamers zal de snelheidsverdeling gelijkmatiger worden. Bovendien wordt ook de He-concentratieverdeling over de doorsnede gelijkmatiger (zie figuur 8), zodat in deze kamers met het rekenkundig gemiddelde kan worden gewerkt. In de grafiek is dezelfde stromingsrichting van de rookgassen aangehouden als bij de grafieken waarin de verschillende temperaturen zijn weergegeven.

De richting van de gasstroom is dus van rechts naar links.

In de stookzone treedt een daling van de He-concentratie op. Deze daling wordt gedeeltelijk veroorzaakt door het groter worden van de doorstromende gashoeveelheid als gevolg van het toevoeren van aardgas, gedeeltelijk door het inlekkende van leklucht uit de omgeving als gevolg van de in de kamers heersende onderdruk en gedeeltelijk door de vergroting van het gasvolume door de uit de stenen ontwijkende CO_2 . In de kamers die aangesloten zijn op het rookgaskanaal, treedt een plotselinge daling van de He-concentratie op. Dit komt door het inlekkende van omgevingslucht door de met papier afgedichte fietsenrekken. De He-concentratie daalt tot bijna de helft, hetgeen inhoudt dat de hoeveelheid leklucht bijna even groot is als de door de laatste stookkamer stromende gashoeveelheid.

In dezelfde figuur is ook het verloop van de gemiddelde CO_2 -concentratie weergegeven. Hoewel ook dit verloop door de lekkages wordt beïnvloedt, is de grootte van de hoeveelheid leklucht uit deze concentraties niet vast te stellen, omdat de concentratie van het CO_2 ook door de verbranding en de CO_2 -produktie uit de stenen wordt beïnvloed. Bovendien geschiedde de gasmonsternamen dicht bij de vlam, zodat de gemeten CO_2 -concentratie niet als een gemiddelde van de kamer mag worden beschouwd. Wel kan ook uit deze lijn worden geconcludeerd dat de hoeveelheid leklucht als gevolg van het papierlek van eenzelfde orde van grootte is als de door de laatste stookkamer stromende gashoeveelheid.

De uit de over twee metingen gemiddelde He-concentratie berekende rookgashoeveelheid is in figuur 11 uitgezet. Zowel de hoeveelheid droog als de hoeveelheid nat rookgas is in deze figuur opgenomen. Na de warmeluchtaftek stroomt door de oven ca. 9000 nm^3 lucht per uur. In de stook- en opwarmzone neemt de hoeveelheid rookgas met $1150 \text{ nm}^3/\text{h}$ toe van $9350 \text{ nm}^3/\text{h}$ tot $10.500 \text{ nm}^3/\text{h}$. Van deze toename is $400 \text{ nm}^3/\text{h}$ een gevolg van het toevoeren van aardgas en $270 \text{ nm}^3/\text{h}$ een gevolg van het vrijkomen van CO_2 uit de stenen. De hoeveelheid leklucht in dit gedeelte van de oven bedraagt dus ongeveer $480 \text{ nm}^3/\text{h}$. In de op het schoorsteenkanaal aangesloten ovenkamers worden de rookgassen met door de papierafdichting inlekkende omgevingslucht verdund.

De in figuur 10 aangegeven He-concentratie is de waarde die in stookpot 12 op 1,8 m hoogte van de bodem is gemeten. Uit het

feit dat de He-concentratie in de schoorsteen lager is dan de op 1,8 m hoogte in de op de schoorsteen aangesloten kamers gemeten concentratie, blijkt dat deze concentratie van deze kamers geen goed gemiddelde is. Dichter bij de vloer is de concentratie in deze kamer, als gevolg van het inlekken van de leklucht door de papierafdichtingen, aanzienlijk lager. De op 0,25 m hoogte gemeten concentratie is ook in figuur 10 weergegeven. Hieruit blijkt duidelijk de invloed van de leklucht op de concentratieverdeling in verticale richting.

Uit de in figuur 10 gegeven concentraties volgt dat door het papier $7900 \text{ nm}^3/\text{h}$ inlekt. De totale gemiddelde rookgashoeveelheid over de twee meetseries bedraagt dan $18.400 \text{ nm}^3/\text{h}$.

4.4. Het schoorsteenverlies

4.4.1. De meting

Voor de bepaling van het schoorsteenverlies moeten worden gemeten:

- de hoeveelheid rookgas
- de temperatuur van het rookgas
- de gassamenstelling

De hoeveelheid rookgas werd bepaald met drie verschillende metingen. In de eerste plaats werd met behulp van de He-tracertechniek (zie hoofdstuk 4.3.) de gashoeveelheid bepaald. Daarnaast werd de gashoeveelheid berekend uit het CO_2 -percentage in de rookgassen. De derde meting waarmee de hoeveelheid rookgas werd vastgesteld was een snelheidsmeting in het rookgaskanaal met behulp van een pitotbuis.

De temperatuur van het rookgas werd op vier verschillende manieren vastgesteld. Gebruik werd gemaakt van de bedrijfsmeter, een voor controle aangebrachte thermometer, een in het rookgaskanaal aangebracht thermokoppel en een temperatuurmeting met een zuigpyrometer.

De gassamenstelling werd bepaald met een gasanalyse in de gaschromatograaf. De vochtigheid van de rookgassen werd met het Mollier-diagram bepaald uit de natte- en drogeboltemperatuur.

4.4.2. Nadere beschouwing van de metingen

4.4.2.1. De hoeveelheidsmeting

Tijdens de rondbrand werden twee metingen met de He-tracertechniek verricht. Uit de in de schoorsteen gemeten

He-concentraties volgt dat de totale hoeveelheid droog rookgas $17.250 \text{ nm}^3/\text{h}$ bedraagt.

Uit de metingen van de natte- en drogeboltemperatuur in de rookgasstroom volgt dat de absolute vochtigheid van de rookgassen gemiddeld $0,042 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ droge lucht heeft bedragen. Betrokken op de rookgashoeveelheid die met de He-tracer werd bepaald, komt dit neer op $1150 \text{ nm}^3 \text{ H}_2\text{O}$ -damp per uur. De gemiddelde natte rookgashoeveelheid die uit de twee He-metingen werd gevonden is dus $18.400 \text{ nm}^3/\text{h}$.

Uit de snelheidsmetingen met de pitotbuis waarmee het gehele rookgaskanaal werd afgetast, volgt een rookgashoeveelheid die grafisch in figuur 12 is weergegeven. Het gemiddelde van deze dagelijks uitgevoerde metingen bedraagt $17.000 \text{ nm}^3/\text{h}$ nat rookgas. De standaarddeviaties van de pitotmetingen is ruim 11% en de standaardfout van het gemiddelde 3,5%.

De rookgashoeveelheid kan ook worden berekend uit de CO_2 -concentratie in de schoorsteen. Uit de aan de oven toegevoerde gashoeveelheid en de uit de stenen vrijkomende CO_2 kan worden berekend hoeveel $\text{nm}^3 \text{ CO}_2$ de oven door de schoorsteen verlaat.

Per uur wordt 404 nm^3 aardgas toegevoerd (zie hoofdstuk 4.6.), waardoor $404 \times 0,903 = 365 \text{ nm}^3 \text{ CO}_2$ per uur ontstaat. De produktie van de oven bedraagt 5400 stenen per uur. Uit de analyse van de grondstof volgt dat per kg steen $0,099 \text{ kg CO}_2$ ontstaat (zie Appendix). De totale CO_2 -produktie uit de stenen bedraagt dan $5400 \times 0,099/1,98 = 270 \text{ nm}^3 \text{ CO}_2$ per uur. Totaal verlaat de oven dus $635 \text{ nm}^3 \text{ CO}_2$ per uur.

De CO_2 -analyse werd afwisselend uitgevoerd met de gaschromatograaf (samen met de He-analyse), met een Orsat-apparaat en met een Fyrite. De gemeten concentraties zijn uitgezet in figuur 13. De uit de figuur afgeleide gemiddelde concentratie van het CO_2 bedraagt 4,5%. De hoeveelheid droog rookgas die hiermee overeenkomt is $63.500/4,5 = 14.000 \text{ nm}^3/\text{h}$, de hoeveelheid nat rookgas $15.000 \text{ nm}^3/\text{h}$. De standaarddeviatie bij deze metingen bedraagt 19%. De standaardfout van het gemiddelde 5,3%.

Vergelijken we nu de met drie verschillende methoden bepaalde gashoeveelheden, dan blijkt in de eerste plaats dat de

uit de He-analyse bepaalde gemiddelde gashoeveelheid bijna 10% groter is dan de met de pitotmetingen vastgestelde hoeveelheid. De He-tracertechniek werd gedurende de gehele proefperiode maar twee maal toegepast, zodat het uit deze twee analyses bepaalde gemiddelde lang niet die nauwkeurigheid bezit als het uit de pitotmetingen bepaalde gemiddelde. In aanmerking genomen dat van de twee He-analyses één analyse (He-concentratie is 0,075%) een rookgashoeveelheid geeft die precies overeenkomt met de uit de pitotmetingen bepaalde gemiddelde waarde, kan van een redelijke overeenstemming tussen de twee metingen worden gesproken. De uit de CO₂-analyse bepaalde rookgashoeveelheid wijkt 12% af van de met de pitotmetingen bepaalde waarde. Mede gezien het veel grotere aantal analyses waarop dit gemiddelde berust, is de overeenstemming tussen de uit de pitotmetingen en de uit de CO₂-concentratie afgeleide rookgashoeveelheden slechter dan tussen de uit de He-analyse en de pitotmetingen afgeleide gashoeveelheden.

Bij een nadere beschouwing van het verloop van de CO₂-concentratie gedurende de rondbrand, valt het op dat deze concentratie de neiging heeft om toe te nemen wanneer uit dicht bij de schoorsteen gelegen kamers wordt afgezogen. Dit zou kunnen betekenen dat de menging van het CO₂ in het rookgaskanaal bij een kleiner wordende afstand tussen de afzuiging en het meetpunt onvoldoende is. In figuur 14 is dit effect in beeld gebracht door een vergelijking te maken tussen de gemeten rookgassnelheden bij afzuiging uit de kamers 1 en 22 (dicht bij het punt van monstername) en de kamers 11 en 12 (het verst van het punt van monstername). Duidelijk blijkt uit deze figuur dat bij afzuiging uit de verst verwijderde kamers de snelheidsverdeling in het kanaal veel gelijkmatiger is dan de snelheidsverdeling bij het afzuigen uit de kamers 1 en 22 die het dichtst bij het meetpunt gelegen zijn. In het laatste geval is er zowel in de hoogte- als in de dwarsrichting een aanzienlijk verloop in de gassnelheid aanwezig. Het is duidelijk dat in deze laatste situatie niet met één monstername kan worden volstaan.

Bij een rookgashoeveelheid van 17.000 nm³/h zou de gemiddelde CO₂-concentratie in de rookgassen 4% hebben moeten

bedragen. Dit is de waarde die in de schoorsteen gemeten wordt wanneer de lengte van het rookgaskanaal tussen het meetpunt en de plaats van de monstername groot is (zie figuur 13). Het lijkt daarom verantwoord om op deze gronden te concluderen dat de bepaling van het gemiddelde CO₂-gehalte in de rookgasstroom beïnvloed is door de ongelijkmatigheid in de gasstroming in het rookgaskanaal. Deze conclusie geldt uiteraard ook voor de He-meting. Het effect van de aanstrooilenkte zal bij de He-analyse echter een minder sterke invloed hebben, en wel om twee redenen. In de eerste plaats zal het He dat reeds in de achter het vuur gelegen kamers wordt gedoseerd, tijdens de stroming door de oven gelijkmatig met de rookgasstroom worden vermengd, dit in tegenstelling tot het CO₂ dat tijdens de verbranding op verschillende plaatsen en in verschillende hoeveelheden wordt gedoseerd. In de tweede plaats zullen de He-moleculen door hun kleine afmetingen veel sneller diffunderen (3,3 maal zo snel als de CO₂-moleculen) en daardoor bij He eerder een gelijkmatige concentratieverdeling veroorzaken dan bij CO₂.

Resumerend kan wat betreft de hoeveelheidsmeting in het rookgaskanaal worden vastgesteld dat het meest volledige en betrouwbare gemiddelde beeld van deze hoeveelheid verkregen is met de snelheidsmetingen in het rookgaskanaal. De voor het opstellen van de warmtebalans aan te houden waarde van de hoeveelheid rookgas zal daarom op deze meting worden gebaseerd. Dit betekent dat over de gehele rondbrand de volgende gemiddelde waarden zullen worden aangehouden:

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| hoeveelheid droog rookgas | 15.900 nm ³ /h |
| hoeveelheid nat rookgas | 17.000 nm ³ /h |
| nauwkeurigheid | 3,5%. |

4.4.2.2. De temperatuurmeting

In figuur 15 zijn de temperatuurmetingen die in het rookgaskanaal met de bedrijfsmeter, de controlemeter en het thermokoppel zijn uitgevoerd, weergegeven. De meting met de zuigpyrometer werd slechts eenmaal uitgevoerd. Hierbij bleek dat de met het thermokoppel bepaalde temperatuur en de temperatuur die met de zuigpyrometer werd gemeten nagenoeg met elkaar in overeenstemming waren. Voor de gastemperatuur kan daarom de

met het thermokoppel gemeten waarde worden aangehouden. Als gevolg van een storing in de registratie van de thermokoppeltemperatuur, zijn deze temperaturen niet over de gehele rondbrand gemeten.

Uit een vergelijking tussen de met het thermokoppel gemeten temperaturen en de door de bedrijfsmeter aangegeven temperaturen, blijkt dat de door het koppel gemeten temperatuur gemiddeld ongeveer 20°C hoger is. Voor dat gedeelte van de rondbrand waar de registratie heeft gefaald, kan daarom de met de bedrijfsmeter gemeten temperatuur plus 20°C worden aangehouden.

De gemiddelde temperatuur van de bedrijfsmeter over de rondbrand bedraagt 185°C. De standaardfout van het gemiddelde is 3%. Voor de ware gasttemperatuur in het rookgaskanaal kan dus 205°C worden aangehouden.

4.4.2.3. De berekening

Met de in bovenstaande beschouwingen vastgestelde waarden kan het schoorsteenverlies als volgt worden berekend.

| | | | |
|----------------------------|----------------------|---|-------------------------|
| Warmte in CO ₂ | 635 x 205 x 0,431 | = | 56.000 kcal/h |
| Warmte in H ₂ O | 1100 x 205 x 0,362 | = | 82.000 kcal/h |
| Warmte in rest | 15.265 x 205 x 0,313 | = | 980.000 kcal/h |
| | Totaal in rookgas | | <u>1.118.000 kcal/h</u> |
| Toegevoerd met aardgas | 404 x 15 x 0,36 | | 2.000 kcal/h |
| Toegevoerd met lucht | 16.000 x 15 x 0,31 | | <u>74.000 kcal/h</u> |
| | Totaal toegevoerd | | 76.000 kcal/h |

Hieruit volgt:

| | |
|--------------------|------------------|
| Schoorsteenverlies | 1.042.000 kcal/h |
|--------------------|------------------|

Gezien de nauwkeurigheid van de snelheidsmeting (3,5%) en de temperatuurmeting (3%) zal de nauwkeurigheid van het schoorsteenverlies op ongeveer 7% moeten worden gesteld.

4.5. Warmteverliezen van de ovenromp

4.5.1. De meting

De warmteverliezen van de ovenwanden en het ovendak werden continu gemeten met behulp van warmtestroommeters. De warmtestroom door de vloer werd bepaald via een bepaling van het temperatuurverschil over een in de bodem ingemetselde steen. De plaats van de warmtestroommeters is aangegeven in figuur 16. Deze plaatsen werden gekozen op grond van oriënterende temperatuurmetingen. In de figuur is met gearceerde vlakken aangegeven op welke vlakken de warmtestroommeteraflezing werd betrokken. De warmtestroommeters aan de ovenwand werden bevestigd met bisonkit. De warmtestroommeters op het dak van de oven werden juist onder het oppervlak in het zand ingegraven. Bij iedere warmtestroommeter werd een thermokoppel aangebracht.

In het algemeen kan in stationaire toestand de warmtestroom door de ovenwand worden weergegeven met de formule:

$$Q = k \Delta t$$

Hierin is:

Q = warmtestroom, kcal/m²h

k = warmtedoorgangscoefficiënt, kcal/m²h°C

t = temperatuurverschil tussen de gassen in en de lucht buiten de oven, °C

De warmtedoorgangscoefficiënt k kan worden berekend uit:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_u} + \frac{d}{\lambda}}$$

Hierin is:

α_i = warmteoverdrachtscoefficient aan de binnenzijde van de ovenwand, kcal/m²h°C

α_u = warmteoverdrachtscoefficient aan de buitenzijde van de ovenwand, kcal/m²h°C

d = dikte van de ovenwand, m

λ = warmtegeleidingscoefficient van de ovenwand, kcal/mh°C

Uiteraard kan de warmtestroom ook worden berekend uit een op een beperkt stuk van de totale warmtedoorgang gerichte formule, zoals bijvoorbeeld:

$$Q = \alpha_u (t_u - t_o)$$

Hierin is:

t_u = temperatuur van de ovenwand aan de buitenzijde, °C
 t_o = temperatuur van de omgeving, °C

4.5.2. Nadere beschouwing van de meting

4.5.2.1. De warmteverliezen door de verticale ovenwand

De warmtestroom door de ingemetselde poort is weergegeven in figuur 17. De door de warmtestroommeter I1 (aangebracht op de poort van kamer 11) aangegeven warmtestroom is ten behoeve van de presentatie over een tijd van 14 uur verschoven weergegeven en in de grafiek dus direct vergelijkbaar met de signalen van de overige warmtestroommeters. De op de poorten aangebrachte warmtestroommeters waren bruikbaar tot 200°C. De nauwkeurigheid van deze meters bedraagt 8%.

De grootste warmtestroom wordt gemeten met warmtestroommeter J1 die aan de linkerzijde van de poort op de halve hoogte is aangebracht. Tijdens het opwarmen is er nauwelijks van een verschil tussen de meters J1 en G1 (midden boven op de poort) sprake.

Tussen de temperaturen van de poortwand ter plaatse van de warmtestroommeters J1 en G1 (figuur 18) bestaat weinig verschil. Het uit de toon vallende stuk tussen vrijdag 11/4 en maandag 14/4 is een gevolg van het losraken van het thermokoppel J1. Nadat dit opnieuw op de poort was bevestigd, werd het temperatuurniveau van koppel G1 weer bereikt. De hoogste temperatuur op de poortwand is bij deze poort gemeten ter plaatse van warmtestroommeter I1, dat is in het midden van de poort. Dat de warmtestroom daar niet het grootst is, is slechts schijnbaar het geval. Het plotseling terugvallen van de warmtestroom 110 uur na het begin van de proef duidt erop dat de bevestiging van de warmtestroommeter op de poort verslechterd is. Het signaal van deze meter moet dan ook onbetrouwbaar worden geacht.

Wat betreft het temperatuurverloop kan worden opgemerkt dat, totdat in de ovenkamer een stationaire toestand is bereikt, (\sim 125 uur na het begin), de temperatuurverschillen over de ovenpoort gering zijn. Wanneer in de kamerinzet en in de gasstroom door de kamer de temperatuurverschillen gering zijn geworden, gaan juist de temperaturen op de ovenpoort verder uiteenlopen. Na 150 uur is ook aan de buitenzijde van de oven de temperatuur constant geworden. Het verschil in de eindwaarden betekent dat, aangezien voor de gehele poort Δt constant is, de warmtedoorgangscoefficiënt van de poort van plaats tot plaats verschilt.

Beschouwen we de toestand op 150 uur na het begin van de proef, dan kan voor de ovenpoort ter plaatse van F1 en J1 de volgende berekening worden opgezet:

$$\begin{aligned} \text{F1: } Q &= 900 \text{ kcal/m}^2\text{h} & \Delta t &= 1053^\circ\text{C} & \frac{\lambda}{d} &= 0,9 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \\ \text{F2: } Q &= 1200 \text{ kcal/m}^2\text{h} & \Delta t &= 1077^\circ\text{C} & \frac{\lambda}{d} &= 1,12 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Hierbij is voor $t_1 = 1150^\circ\text{C}$ genomen.

Dit verschil in de warmteweerstand moet worden toegeschreven aan een plaatselijk verschil in de wijze van opbouw van de ovenpoort, zoals bijvoorbeeld een plaatselijk afwijkende dikte van de luchtspouw. Ook de invloed van een door natuurlijke convection opgewekte stroming in de luchtspouw kan hierbij een rol spelen. Gemiddeld over de gehele poort bedraagt de warmtestroom ongeveer $1050 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ en de gemiddelde uitwendige temperatuur 90°C . Gemiddeld voor de gehele poort is dus in stationaire toestand bij gemiddeld 620°C $\frac{\lambda}{d} = 1 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$.

Voor de warmteoverdracht aan de buitenzijde van de ovenwand kan worden berekend:

$$\begin{aligned} \text{F1: } \alpha_{\text{tot}} &= 11 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \\ \text{J1: } \alpha_{\text{tot}} &= 20,8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Hierbij is voor de omgevingstemperatuur 15°C genomen. Voor de ovenwand kan uit literatuurgegevens worden berekend dat bij warmteafgifte in stilstaande lucht de warmteoverdrachtscoefficient ter plaatse van F1 $11,8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ en ter plaatse van J1 $11 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ bedraagt. Voor F1 is er een goede overeenstemming tussen de gemeten en de berekende waarde. De gemeten

warmteoverdrachtscoëfficiënt ter plaatse van J1 is echter aanzienlijk hoger. De aanname dat de warmteoverdracht door natuurlijke convectie in stilstaande lucht geschiedt, is voor punt J1 kennelijk niet juist. Op dat punt is waarschijnlijk de warmteoverdracht door de luchtstroming in de gangen rondom de oven beïnvloed.

In figuur 19 zijn de met warmtestroommeter E1 en het daarbij geplaatste thermokoppel gemeten waarden uitgezet. Het verloop van zowel de warmtestroom als de oppervlaktetemperatuur is veel meer analoog aan het temperatuurverloop in de oven dan dat van de meters op de ovenpoort.

De maximum warmtestroom wordt al bereikt voordat in het steenpakket in de oven de temperaturen gelijkmatig zijn. Dit komt omdat voor dit gedeelte van de ovenwand het gedrag voor het grootste gedeelte afhangt van wat zich in de verbrandingsruimte afspeelt. Bij een warmtestroom van $1900 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ en een temperatuurverschil $\Delta t = 1050 - 130 = 920^\circ\text{C}$, wordt de warmteweerstand van de ovenwand ter plaatse van warmtestroommeter E1 $\frac{d}{\lambda} = 0,5 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$. De dikte van de ovenwand bedraagt $0,43 \text{ m}$. Bij een gemiddelde temperatuur van 600°C bedraagt de warmtegeleidingscoëfficiënt van de ovenwand $0,9 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ [4], zodat de aldus berekende warmteweerstand $\frac{d}{\lambda} = 0,48 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ bedraagt. De overeenstemming met de uit de warmtestroommetingen berekende waarde is dus zeer goed.

Uit de warmtestroommetingen aan de poort en het direct als afscheiding van de ovenkamer dienende gedeelte van de muur, onder de horizontale ovenbalk kan een gemiddelde warmtestroom worden berekend die in figuur 20 is aangegeven. Het stuk in het tijdsbestek na het wegnemen van de poort is berekend door de uitstraling van de oven door de geopende poort in rekening te brengen. Hierbij is voor de maatgevende temperatuur het gemiddelde van de aan de voorzijde van de kamer in de fietsenrekken gemeten temperatuur en de onder het gewelf gemeten temperatuur aangehouden. De emissiecoëfficiënt van de geopende poort is gelijk aan één genomen.

Uit deze figuur volgt dat de gemiddelde warmtestroom door het onder de ovenbalk gelegen gedeelte van de verticale ovenwand $615 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ heeft bedragen. Bij een oppervlak van 251 m^2

komt dit neer op een warmteverlies van 154.000 kcal/h.

Voor het bepalen van de warmteverliezen van het boven de poorten gelegen gedeelte van de verticale ovenwand is op de oven de warmtestroommeter D1 aangebracht. De met deze meter gemeten waarden zijn uitgezet in figuur 21, de bijbehorende temperatuur in figuur 22.

De warmtestroom door het bovenste gedeelte van de verticale ovenwand is aanzienlijk lager dan van het gedeelte van de wand dat direct met de kamer in verbinding staat. In het begin van de proef neemt de warmtestroom nog af, omdat de opwarming, die in de ovenkamer reeds is begonnen, nog niet tot het ovenoppervlak op die plaats is doorgewerkt (zie ook paragraaf 4.5.2.2.). De warmtestroom bereikt ca. 100 uur na het begin van de rondbrand een minimum om vervolgens toe te nemen als gevolg van de doorwarming van de ovenwand. In het temperatuurverloop valt, met uitzondering van het afwijkende stuk gedurende zaterdag 12/4 en zondag 13/4 (zie hiervoor ook paragraaf 4.5.2.2.), een overeenkomstige tendens waar te nemen.

In het begin van de rondbrand is de warmtestroom 10 kcal/m²h. Bij een temperatuur van 25°C en een omgevingstemperatuur van 12°C (zie figuur 41) bedraagt de uitstraling naar de omgeving 40 kcal/m²h. Dit betekent dat de ovenwand op deze plaats nog door de langsstrijkende en op lager gelegen gedeelten van de wand opgewarmde lucht wordt opgewarmd. Bij een warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie van 5 kcal/m²h betekent dit dat het temperatuurverschil tussen de ovenwand en de langsstrijkende lucht 10°C zou moeten bedragen. Dit komt neer op een luchttemperatuur van 35°C hetgeen, gezien de in de figuren 18 en 19 gegeven wandtemperaturen, niet onmogelijk moet worden geacht.

Na ongeveer 200 uur bereikt de warmtestroom op de plaats D1 een maximum. De temperatuur bedraagt dan ongeveer 20°C. Dit betekent dat de warmteafgifte door straling naar een omgeving van 12,5°C (zie figuur 41) 36 kcal/m²h bedraagt. De van de totale warmtestroom resterende 44 kcal/m²h wordt dus door convectie overgedragen. Voor $\alpha_{\text{conv}} = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ wordt berekend dat $Q_{\text{conv}} = 5 \times 7,5 = 37,5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$. De overeenstemming is

dus redelijk goed. Een opwarmend effect van de opstijgende luchtstroom is hier niet aantoonbaar, een gevolg van het feit dat de temperatuur van de ovenwand juist onder de warmtestroommeter (figuren 18 en 19) veel lager geworden is.

Wanneer de poort opengestoten wordt, daalt de warmtestroom direct, omdat nu de uit de ovenkamer komende warme lucht de warmteverliezen van de ovenwand vermindert.

Voor het ovenwandgedeelte boven de steunbalk volgt uit deze metingen dat de gemiddelde warmtestroom $25 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ bedraagt. De gemiddelde temperatuur is 24°C . Het warmteverlies van dit gedeelte van de oven bedraagt dan $88 \times 25 = 2200 \text{ kcal/h}$.

De warmteverliezen van de kopmuur van de oven en van de wanden van het omloopkanaal kunnen uit de warmtestroommeting met warmtestroommeter H worden berekend. De gemiddelde warmtestroom door deze wanden bedraagt $35 \text{ kcal/m}^2\text{h}$, wat neerkomt op een warmteverlies van 11.000 kcal/h . Over het verloop van de warmtestroom in de kopmuur (zie figuur 21) kan nog het volgende worden opgemerkt. In het begin neemt de warmtestroom af omdat aan de buitenzijde van de kopmuur de afkoeling van het omloopkanaal tijdens de vorige rookbrand nog merkbaar is. Door de luchtspouw en de dikkere wand is de vertraging waarmee een temperatuurverandering in het omloopkanaal aan het oppervlak van de kopmuur merkbaar wordt veel groter dan bij de poorten en het dak. Bovendien ligt de kopmuur ten opzichte van de meetkamer 28 uur achter op het stookschema. De vrij sterke daling na 130 uur valt samen met het tijdstip waarop de warmtestroommeter van de muur is losgeraakt. Hoewel de meter opnieuw bevestigd werd, is de gemeten warmtestroom na dinsdag 15/4 zo laag dat een invloed van een luchtinsluiting op de meting niet ondenkbaar is.

Uit de voor de afzonderlijke vlakken berekende warmteverliezen kan nu het totale verlies van de verticale ovenwand worden bepaald. Dit bedraagt 167.000 kcal/h . De nauwkeurigheid van deze waarde moet, gezien de nauwkeurigheid van de warmtestroommeting, op 8% worden gesteld.

4.5.2.2. De warmteverliezen door het dak van de oven

De warmtestroom door en de temperatuur van het ovendak ter plaatse van de in figuur 16 aangegeven meetpunten zijn respectievelijk uitgezet in figuur 23 en figuur 24. Hoewel de grootte van het signaal van plaats tot plaats verschilt, is het verloop van de warmtestroom en de temperatuur voor de verschillende plaatsen onderling identiek.

Uit het verloop van de warmtestromen is vooral in het begin duidelijk te zien dat de warmtestroom op het midden van de dag afneemt, doordat het dak van het ovengebouw, dat door de zon wordt verwarmd, terug gaat stralen. Vooral tijdens de eerste dagen van de proef, toen de zon vrijwel de gehele dag scheen, is dit effect duidelijk waarneembaar. Ook in het temperatuurverloop is dit effect terug te vinden.

De schommelingen als gevolg van de zoninstraling in aanmerking genomen, kan worden opgemerkt dat de warmtestroom door het ovendak na het openen van de klok van de meetkamer eerst nog afneemt en daarna vrijwel constant blijft. Vervolgens neemt de warmtestroom voortdurend toe om tenslotte ongeveer 225 uur na het proefbegin bij het openen van de openpottendeksels een maximum waarde te bereiken. Het verloop van de warmtestroom ijlt dus ongeveer 100 uur na op het temperatuurverloop in de oven.

In het verloop komen nog enkele vermeldenswaardige punten voor. Wanneer de warmeluchtafzuigbuis op de meetkamer wordt aangebracht, daalt de warmtestroom door het dichtst bij de warmeluchtafzuigopening gelegen gedeelte van het ovendak. Dit wordt veroorzaakt door de terugstraling van de warmeluchtafzuigbuis naar de warmtestroommeter C1. De andere warmtestroommeters worden hierdoor niet beïnvloed. Het openen van de openpottendeksels heeft een tijdelijke daling van de warmtestroom tot gevolg. De reden hiervan is dat de uit de eerste openpottenkamer stromende warme lucht het ovendak verwarmt, waardoor de terugstraling van dit dak naar de oven toeneemt. Door het defect geraken van het stempelmechanisme in het weekeinde, kon niet over de waarnemingen aan het einde van de

proef worden beschikt. Het verloop van de gemiddelde warmtestroom van de meters A, B en C is daarom geëxtrapoleerd. Hierbij is ervan uitgegaan dat als gevolg van het 100 uur na-ijlen van het verloop van de warmtestroommeters ten opzichte van het temperatuurverloop in de oven, de warmtestroom na 250 uur weer zal afnemen tot de waarde die aan het begin van de proef werd vastgesteld.

Het temperatuurverloop komt in grote lijnen overeen met het verloop van de warmtestroom. Vanaf het begin van de proef treedt een daling op die echter op zaterdag 12/4 en zondag 13/4 door een onverwachte toename wordt onderbroken. De reden hiervoor is onduidelijk. Noch in de warmtestroom, noch in de temperatuur van de koude las zijn aanwijzingen te vinden die deze toename en de daarop volgende plotselinge daling op maandagmorgen kunnen verklaren. De betekenis van dit gedeelte van de temperatuurkromme is dan ook twijfelachtig. Wellicht is het feit dat de deuren van het ovengebouw gedurende het weekeinde gesloten zijn gebleven de aanleiding tot het afwijkende gedrag.

Wanneer de temperatuurstijging in de oven tot het ovenoppervlak doordringt stijgt de oppervlaktemperatuur vrijwel continu totdat een maximum waarde wordt bereikt bij 225 uur na het begin van de rondbrand. Het met elkaar in verband brengen van de warmtestroom en de oppervlaktemperatuur is met de beschikbare gegevens nauwelijks mogelijk. De uitstraling van het ovendak vindt namelijk plaats naar een overkapping waarvan de temperatuur, door het opwarmend effect van de uit de open potten stromende lucht, onbekend is. Ook de convectieve warmteoverdracht is moeilijk te berekenen, omdat niet alleen de natuurlijke convectie van het ovendak een rol speelt, maar ook de extra aanzuiging van omgevingslucht op dat gedeelte van de oven waar uit open potten warme "luchtstralen" uit het ovendak "blazen".

In de lengte van de oven gezien zal de warmtestroom variëren, omdat de afstand van het dak tot het gewelf van plaats tot plaats verschilt. Helaas ontbreekt een warmtestroommeting op een plaats van het dak juist tussen twee kamers in. Om toch het verloop van de warmtestroom in rekening te kunnen brengen werden met behulp van de relaxatiemethode (zie b.v. [5])

de isothermen in de dakconstructie bepaald. In figuur 25 is het resultaat van deze berekening gegeven. Uit de afstand van de isothermen kan de verdeling van de warmtestroom worden bepaald. Ook deze verdeling is in figuur 25 opgenomen.

Uit deze verdeling volgt dat de gemiddelde warmtestroom uit de gemeten warmtestroom kan worden gevonden door vermenigvuldiging met een factor 0,91. De gemiddelde warmtestroomdichtheid van het ovendak bedraagt dus $0,91 \times 115 = 104,5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$. Het warmteverlies van het ovendak wordt dan $50 \times 32 \times 104,5 = \underline{\underline{167.000 \text{ kcal/h}}}$. Ook de nauwkeurigheid van deze waarde moet op 8% worden gesteld.

4.5.2.3. De warmteverliezen door de vloer van de oven

De in de vloer van de oven gemeten temperaturen zijn uitgezet in figuur 26. Het verloop is typisch het verloop dat bij een periodiek werkende oven kan worden verwacht. Tot ongeveer 135 uur na het begin van de rondbrand stijgt de temperatuur als gevolg van de opwarming van de ovenkamer. Daarna treedt een zodanige daling op dat de temperatuur van de dieper gelegen koppels hoger wordt dan de temperatuur van de koppels die dichterbij aan het oppervlak zijn gelegen. De hoeveelheid warmte die uiteindelijk via de vloer uit de oven gaat kan worden berekend door het gemiddelde temperatuurverschil over de meetstenen te bepalen.

Zowel voor de in het midden van de oven gelegen steen als voor de aan de poortzijde gelegen steen bedraagt dit verschil 10°C . Hieruit volgt een warmtestroomdichtheid $q = \frac{\lambda}{d} \Delta t = \frac{0,9}{0,1} \cdot 10 = 90 \text{ kcal/m}^2\text{h}$. De netto warmtestroom door de vloer van de oven wordt dan $50 \times 31 \times 90 = 140.000 \text{ kcal/h}$. De nauwkeurigheid van deze waarde moet, mede gezien de nauwkeurigheid waarmee de warmtegeleidingscoëfficiënt bekend is, op 10% worden gesteld.

In dit verband moet worden opgemerkt dat de warmte die door warmtegeleiding door de vloer van de oven aan het proces wordt onttrokken, gedeeltelijk weer in de vorm van verdampend grondwater in de oven wordt teruggevonden. Door de verliezen door de ovenvloer volledig in rekening te brengen, is het

niet nodig om in de warmtebalans het warmteverlies door latente warmte in het rookgas en de warmeluchtaftek in rekening te brengen.

4.6. De hoeveelheid aardgas

4.6.1. De meting

Het gasverbruik is gemeten door de Stichting Technische Dienst Waalsteen. De verzamelde gegevens en de uitwerking ervan zijn vermeld in het rapport "Meting gasgebruik N.V. Steenfabriek Druten d.d. 29-4-1969" door P.C.F. Bekker [6].

Gemeten werden:

- a. de totaal tijdens een rondgang verbruikte hoeveelheid aardgas
- b. de tijdens de rondgang aan de meetkamer toegevoerde hoeveelheid aardgas
- c. de per branderlans toegevoerde hoeveelheid aardgas.

ad a. De totaal tijdens de rondgang verbruikte hoeveelheid aardgas werd gemeten met de in het aardgasontvangststation aanwezige gasmeter.

Het totale verbruik tijdens de rondgang bedroeg 135.878 nm^3 . Bij een rondbrandtijd van 336 uur komt dit neer op een gemiddeld gasverbruik van $404 \text{ nm}^3/\text{h}$.

ad b. De tijdens de rondgang naar de meetkamer toegevoerde hoeveelheid aardgas werd gemeten met een Instromet-hoeveelheidsmeter, die om de 2 uur werd afgelezen.

Het verbruik van de meetkamer tijdens de rondgang bedroeg 5473 nm^3 . Tijdens een tweede meting werd 5260 nm^3 gemeten. Een verschil ten opzichte van de eerste meting van ongeveer 4%.

ad c. Het gasverbruik per lans werd gemeten met behulp van rotameters. Tevens werd het gasverbruik bepaald met behulp van manometers en een bij iedere lans behorende ijkgrafiek, die het verband tussen de gasdruk en de door het spuitstuk stromende gashoeveelheid weergeeft.

In verband met het te kleine meetbereik van de flowmeters ($6 \text{ nm}^3/\text{h}$), werden deze meters soms overbelast.

4.6.2. Nadere beschouwing van de meting

Voor de beoordeling van de verschillende gasmetingen is het gewenst de metingen onderling te vergelijken. In figuur 27 zijn de meetresultaten, zoals deze met de drie verschillende meetmethoden werden verkregen, opgenomen.

De met de Instromet-hoeveelheidsmeter bepaalde totale gashoeveelheid komt goed overeen met de uit de branderlansdruk berekende gashoeveelheid. De met de rotameters bepaalde gashoeveelheid is echter aanzienlijk groter. Voor de kleinste gashoeveelheid van $30 \text{ nm}^3/\text{h}$ bedraagt het verschil 40%. Dat bij de grotere gashoeveelheden het verschil tussen de manometercurve en de curve van de flowmeters kleiner wordt, is maar schijn. Dit komt omdat bij de hogere belastingen de flowmeter overbelast is, waardoor de aflezing te laag uitvalt. Bij nadere beschouwing van de resultaten blijkt dat bij een groot aantal gaslansen de flowmeter $6 \text{ nm}^3/\text{h}$ (de maximum stand) aan blijft wijzen ondanks een belangrijke vermindering van de gasdruk. Het is danook zeker dat sommige flowmeters onjuiste informatie hebben opgeleverd.

Uitgaande van de voor meetkamer 10 bepaalde totale gashoeveelheid, zou, indien voor de overige ovenkamers eenzelfde hoeveelheid gas nodig zou zijn, het totale gasverbruik tijdens de rondbrand $22 \times 5473 = 120.406 \text{ nm}^3$ hebben moeten bedragen. De met de gasmeter in het gasontvangststation bepaalde gashoeveelheid bedraagt echter 135.878 nm^3 , een verschil van ongeveer 13%. Dit betekent dat kamer 10 niet als een gemiddelde kamer kan worden beschouwd. De oorzaak hiervan is dat in de kamers die na het omloopkanaal gelegen zijn een boven het kamergemiddelde liggende hoeveelheid gas moet worden toegevoerd om de uit het omloopkanaal komende "koude" gasstroom op te warmen tot het voor deze kamers vereiste niveau.

Een ander verschil tussen kamer 10 en de "gemiddelde" kamer is de stooktijd. De gemiddelde stooktijd van de kamers bedraagt 107 uur. Kamer 10 is gedurende 112 uur gestookt. Het gasverbruik van kamer 10 per uur is dan ook aanzienlijk lager dan het gemiddelde verbruik, n.l. $48,9 \text{ nm}^3/\text{h}$ tegen een gemiddelde van $57,7 \text{ nm}^3/\text{h}$. Het in de diverse processtadia in kamer 10 gemeten gemiddelde verbruik is uitgezet in figuur 28.

4.7. De temperaturen in het steenpakket

4.7.1. De meting

Voor het meten van de temperatuur in het steenpakket werden 12 chromel-alumelkoppels in het steenpakket aangebracht. De plaats waarop de koppels in het steenpakket werden aangebracht en de plaats van het pakket in de ovenkamer zijn weergegeven in figuur 29.

De meetsignalen van de koppels werden geregistreerd met een 12 punts-recorder. De resultaten van deze meting zijn opgenomen in figuur 30. Het koppel 3 gaf reeds aan het begin van de meetrun een zodanig afwijkend signaal dat het bij de verdere uitwerking van de metingen buiten beschouwing is gelaten. De nummering van de koppels in het pakket is in overeenstemming met de nummering die door de Technische Dienst Waalsteen bij andere proeven is aangehouden.

4.7.2. Nadere beschouwing van de meting

In figuur 30 valt het op dat reeds direct vanaf het moment waarop de meetkamer wordt "bijgenomen" in het steenpakket grote temperatuursverschillen ontstaan. Het pakket warmt ter plaatse van koppel 4 veel sneller op dan ter plaatse van de koppels 1, 8 en 12, die onderin het pakket zijn aangebracht. De reden voor deze verschillen is dat de door de fietsenrekken in de kamer instromende "warme" gasstroom door de invloed van de thermiek direct naar boven afbuigt, om het steenpakket heen stroomt en daarna het pakket ter plaatse van koppel 4 "treft". Hierdoor worden de aan de onderzijde van het pakket gelegen koppels minder snel opgewarmd.

Een ander effect dat uitsluitend in het eerste begin van invloed is, is het inlekken van omgevingslucht door de papierafdichting. Deze "koude" lucht, die onderin de ovenkamer inlekt, zal het opwarmen van de vormelingen in de onderzijde van het pakket tegengaan. Het plotseling toenemen van de opwarming van het pakket ter plaatse van koppel 1 nadat de rookgasafvoer is gesloten, wijst sterk in deze richting. Na het sluiten van de klok in de meetkamer, zal immers de leklucht niet meer tot deze plaats kunnen doordringen en zal de opwarming van het pakket op deze plaats door het instromende "warme" gas worden versneld.

De punten 8 en 12 blijven als gevolg van het slechte indringen van de warme gassen in het pakket nog enige tijd achter alvorens

met eenzelfde opwarmsnelheid als de overige koppels te worden opgewarmd. Vanaf dat moment (ongeveer 25 uur na het begin van de rondbrand) warmt het hele pakket met uitzondering van het reeds vermelde stuk ter plaatse van koppel 1 met nagenoeg dezelfde snelheid op. Het oorspronkelijke grote temperatuurverschil tussen de koppels 4 en 12 blijft hierdoor bestaan.

Verbetering in de temperatuurverdeling zal dus moeten worden bereikt door direct aan het begin van de rondbrand maatregelen te treffen die verhinderen dat de temperaturen zover uiteen gaan lopen. Hierbij moet primair worden gedacht aan het verbeteren van de papierafdichting of aan een extra voorziening aan het steenpakket, die de door de fietsenrekken inlekkende "koude" lucht verhindert aan de onderzijde in het steenpakket binnen te dringen. Ook het bevorderen van het indringen van warme lucht in de steenstapeling dient te worden overwogen. Hierbij zou bijvoorbeeld kunnen worden gedacht aan een tijdelijke afsluiting tussen het fietsenrek en de spleet tussen de twee op elkaar geplaatste Hulo-pakketten, die bij een temperatuur van 150 à 200°C wegbrandt.

Wanneer met stoken wordt begonnen, gaan de temperaturen in het pakket verder uiteen lopen. Duidelijk blijkt uit de figuur dat de buitenzijde van het pakket (de punten 1, 10, 2, 5 en 4) veel sneller wordt opgewarmd dan de in het pakket gelegen plaatsen (6, 7, 8, 9 en 12). Het verschil tussen de maximum en minimum temperatuur in het pakket stijgt hierdoor van 140°C tot 220°C. De reden van dit verder uiteenlopen van de temperaturen is, dat bij het hoger worden van de gas-temperatuur het aandeel van de straling in de warmteoverdracht toeneemt. Hierdoor worden die gedeelten van het steenpakket die sterker aan straling zijn blootgesteld sneller opgewarmd. Ook in de slitten vindt de warmteoverdracht plaats door straling en convectie, maar omdat de laagdikte van de gaslaag hier aanzienlijk kleiner is dan die van de ruimte tussen het steenpakket en het ovengewelf, zal het aandeel van de straling duidelijk kleiner zijn. Verbetering in dit verloop zou kunnen worden bereikt door de slitbreedte te vergroten. Hierdoor neemt de emissiecoëfficiënt van de tussenliggende gaslaag toe. Aangezien het in de bedoeling ligt om in een afzonderlijk verslag dieper op deze punten in te gaan, zal in dit verslag deze problematiek niet verder worden besproken.

Het is duidelijk dat, indien men er in slaagt om de temperaturen aan het begin van de rondbrand dicht bij elkaar te houden en boven-

dien het achterblijven van de kern van het pakket te beperken, de stooktijd aanzienlijk zou kunnen worden verkort. In de huidige situatie is na 120 uur stoken pas een evenwichtstoestand bereikt. In de hierna volgende 25 uur blijft het bestaande temperatuurverschil gehandhaafd. Het verschil tussen de maximum- en de minimumtemperatuur blijft tijdens de aanhoudperiode 40°C . Langer aanhouden bevordert dus de temperatuurgelijkmatigheid in het steenpakket niet. Kennelijk is hier van een evenwichtstoestand sprake waarin de temperatuurverdeling wordt bepaald door de warmteverliezen naar de omgeving en de wijze waarop de gassen door de ovenkamer stromen.

Tijdens het afkoelen treedt weer het verschil in de koppels (1, 2, 4, 5 en 10) en (6, 7, 8, 9 en 12) aan het licht. De koppels van de eerste groep dalen sterker in temperatuur dan die van de tweede groep. Ook hier zal het verschil in de eerste plaats in de wijze van warmteoverdracht moeten worden gezocht. Het maximum temperatuurverschil loopt op tot 330°C . Het is de vraag of dit verschil van enig belang is voor de kwaliteit van het eindprodukt. Zolang bij de kwartssprong de maximum koelsnelheid niet te groot is, zal het wel of niet gelijkmatig afkoelen van de lading van weinig betekenis zijn.

In het temperatuurverloop in de afkoelzone valt het op dat het pakket ter plaatse van koppels 6 en 7 het langste warm blijft. Dit moet een gevolg zijn van de invloed van de tussenmuur op de afkoeling van het pakket. Opvallend is dat ter plaatse van koppels 8 en 12 de afkoeling veel sneller verloopt dan bij de koppels 6 en 7. Dit kan worden verklaard met de in de kamer instromende "koude" gasstroom die als gevolg van het dichtheidsverschil de neiging heeft om onder in de kamer te blijven, waardoor het pakket daar ter plaatse sterker wordt gekoeld.

Na het aansluiten van de tweede warmeluchtaftrek neemt de koelsnelheid op een aantal plaatsen toe. Dit is een gevolg van de grotere gasstroom in het volgende gedeelte van de oven en tevens van het veranderde stromingsbeeld in de ovenkamer. Het aansluiten van de eerste warmeluchtaftrek beïnvloedt in dit geval de koelsnelheid niet zo sterk, omdat de door de eerste warmeluchtaftrek afgezogen luchthoeveelheid geringer is. Door het openen van de deksels en het aanbrengen van een gat in de poort verandert de afkoelsnelheid van het steenpakket.

De minder snelle afkoeling van de koppels 1, 2, 4, 5 en 10 duidt erop dat de doorstroming van het pakket op deze plaats na het openen van de deksels aanzienlijk is verslechterd, doordat naast de "hoofdstroom" door de fietsenrekken nu ook een belangrijk gedeelte van de koellucht door de geopende poort wordt aangezogen, en bovendien door de trek van de open potten de door het fietsenrek binnestromende lucht direct langs de ovenwand omhoog wordt gezogen.

Ter plaatse van het koppel 7 blijft de temperatuur duidelijk hoger, omdat de toevoer van koude lucht naar deze plaats onvoldoende is.

4.8. De gastemperatuur in de fietsenrekken

4.8.1. De meting

De gastemperatuur in de fietsenrekken werd gemeten met chromel-alumel thermokoppels. De plaatsen waarop de meting werd verricht zijn aangegeven in figuur 31.

Aangezien de temperatuurmeting door straling wordt beïnvloed, werd de aflezing van het thermokoppel gecorrigeerd voor deze invloed door op verschillende ogenblikken met een zuigpyrometer de ware gastemperatuur te bepalen en deze met de met de koppels gemeten temperatuur te vergelijken.

Tijdens oriënterende metingen was reeds gebleken dat tijdens het aanhouden van de oven het verschil tussen de met de zuigpyrometer gemeten temperatuur en de met een thermokoppel gemeten temperatuur zo gering was dat de koppelmetingen in deze zone geen correctie behoeften. De zuigpyrometer werd daarom alleen in de opwarm- en afkoelzone gebruikt. De gecorrigeerde temperaturen zijn weergegeven in figuur 32. In deze figuur zijn op die plaatsen waar met de zuigpyrometer werd gemeten ook de met koppels gemeten temperaturen opgenomen. Hieruit blijkt duidelijk dat vooral in de koel- en opwarmzone de afwijkingen in de met een thermokoppel gemeten gastemperatuur aanzienlijk kunnen zijn.

4.8.2. Nadere beschouwing van de meting

In dat gedeelte van de oven waar de lucht binnestroomt, dus in de openpottenkamers waarvan de poort geheel is geopend, blijkt de toename van de luchttemperatuur bij het doorstromen van een ovenkamer gering te zijn. Dit komt doordat een groot gedeelte van de doorstro-

mende lucht de ovenkamer via de open potten verlaat en in het volgende fietsenrek ook weer "vers" aangezogen koude lucht wordt meegevoerd. Pas wanneer de poorten van de kamers verder gesloten zijn, begint de luchttemperatuur bij de uittree van de kamer te stijgen. Deze stijging wordt ongeveer 14 uur later ook merkbaar aan de intreezijde van de kamer, omdat dan het gehele proces één kamer wordt opgeschoven. Dit tijdsverschil van 14 uur (de tijd tussen het bijnemen van de kamers) blijft over de gehele rondbrand gehandhaafd.

De luchttemperatuur aan de poortzijde van de kamer blijft in het begin duidelijk lager dan de luchttemperatuur in het midden en achterin de ovenkamer. Dit verschil is een gevolg van de sterkere afkoeling van de kamer en de inzet aan de poortzijde en van het feit dat de aangezogen lucht juist aan de poortzijde de kamer instroomt.

Dichter bij de stookzone waar de temperatuurverschillen in de inzet over de kamerlengte gezien gering zijn, omdat in de stookzone de gastoevoer aan de plaatselijke warmtebehoefte wordt aangepast, worden ook de verschillen in de gastemperatuur kleiner.

Opvallend in het temperatuurverloop is de kleine discontinuïteit op het tijdstip waarop de deksels worden geopend en een gat in de poort wordt gestoten. Een verklaring die hiervoor kan worden gegeven is dat op het moment dat de deksels worden geopend minder lucht door de fietsenrekken wordt aangezogen, waardoor de temperatuur van deze lucht stijgt. Een andere mogelijkheid is dat de regelklep van de afzuigbuis na het verplaatsen van de warmeluchtafzuiging naar een kamer met een hogere temperatuur door de stoker meer is afgesloten ten einde een constante temperatuur van de lucht die naar de drogerij gaat, te behouden. Ook in dat geval neemt de doorstromende luchthoeveelheid af als gevolg waarvan de luchttemperatuur stijgt.

Bij het binnenstromen van de stookzone bedraagt het temperatuurverschil over de kamerlengte gezien ongeveer 50°C . Dit verschil wordt in de stookzone, waar de gashoeveelheid wordt geregeld op de temperatuur van de inzet, nog kleiner. In het gebied waar de oven wordt "aangehouden" is er nagenoeg geen verschil tussen de in- en uittretemperatuur van het rookgas.

Dit betekent dat de in deze kamers met het aardgas toegevoerde warmte wordt gebruikt voor het opwarmen van de oven en de lading en voor het compenseren van de warmteverliezen. Gedurende dat gedeelte van de aanhoudtijd waarin ook de temperatuur van de inzet en het ovenlichaam constant zijn (vergelijk figuur 30) komt de met het aardgas

toegevoerde warmte overeen met de warmteverliezen van de ovenkamer bij deze temperatuur. In een volgend verslag zal hier nog nader op worden ingegaan.

Nadat de gassen de kamers die worden "aangehouden" zijn gepasseerd, neemt de gastemperatuur af doordat warmte uit de rookgassen aan de inzet en aan het ovenlichaam wordt afgestaan. Het temperatuurverschil tussen de in- en uittree van de kamers neemt toe tot 200°C . Het verschil tussen de gastemperaturen over de lengte van de ovenkamer gezien, blijft klein door de corrigerende invloed van het stookproces op deze temperatuurverdeling. Het verschil van 200°C tussen de in- en uittreetemperatuur blijft vrijwel constant tot in de kamer voorafgaand aan de op het schoorsteenkanaal aangesloten kamer. In deze kamer daalt de temperatuur aan de uittreezijde sneller. Dit komt duidelijk tot uiting in de aan de intree van de op het rookgaskanaal aangesloten kamer gemeten temperaturen.

Deze sterkere daling kan als volgt worden verklaard. In de op de schoorsteen aangesloten kamer wordt een aanzienlijke hoeveelheid omgevingslucht aangezogen. Dit blijkt uit de sterke daling van de CO_2 -concentratie in deze kamer. Bovendien blijkt uit een aantal in verticale richting gemeten He -concentraties (zie figuur 10) dat de aangezogen koude lucht voornamelijk onderin de ovenkamer stroomt. Het grootste gedeelte van deze lucht stroomt de kamer in door het fietsenrek van de voorgaande kamer. Dit houdt in dat in de kamer volgend op de laatste op het schoorsteenkanaal aangesloten kamer, de rookgassen in de inzet een "koude" plek aantreffen die in de voorgaande fase is ontstaan. Als gevolg van de plaatselijk sterk verlaagde temperatuur van de inzet, zal de afkoeling van de rookgasstroom daardoor sterker zijn.

4.9. De temperatuur onder het gewelf

4.9.1. De meting

De temperaturen onder het gewelf werden gemeten op de in figuur 31 aangegeven plaatsen. De koppels werden 20 cm onder het gewelf aangebracht en via de deksels uit de oven gevoerd. De resultaten zijn weergegeven in figuur 33.

4.9.2. Nadere beschouwing van de meting

De temperatuurmeting is uitgevoerd met thermokoppels. Dit betekent dat de gemeten temperatuur door de straling van de stenen en het gewelf en door de convectie van de gasstroom is beïnvloed. Het verloop is

identiek aan het verloop van de steen- en gastemperaturen. De spreiding in de temperaturen is zeer gering. Dit is een gevolg van de invloed van de straling van de ruimte boven het steenpakket, waardoor verschillen in de gastemperatuur ter plaatse van de koppels worden afgezwakt. De discontinuïteit in het verloop op het moment waarop de deksels worden geopend, kan op gelijke wijze worden verklaard als bij de gastemperatuur in het fietsenrek (zie hoofdstuk 4.8.2.).

Aan het temperatuurverloop in de opwarmzone dient geen enkele betekenis te worden toegekend. De deksels waardoor de koppeldraden uit de oven werden gevoerd waren in dit stadium van de proef niet gesloten. Hierdoor werd, als gevolg van de onderdruk in de ovenkamers, koude lucht door het pottenkanaal aangezogen, waardoor het juist onder dit kanaal gelegen koppel werd gekoeld. Na het sluiten van de deksels steeg de temperatuur direct tot de juiste waarde.

Op het tijdstip dat met het stoken wordt begonnen stijgt de koppeltemperatuur zeer snel. De reden hiervoor is de directe invloed van de warmere gassen op de koppelaflazing. De temperaturen in het steenpakket vertonen door de traagheid van het pakket deze snelle stijging niet.

4.10. Vergelijking van de temperaturen in het steenpakket, de fietsenrekken en onder het ovengewelf

In figuur 34 zijn de gemiddelde gewelftemperatuur, de gemiddelde temperatuur van de gassen bij de in- en uittree van kamer en de gemiddelde temperatuur aan de buitenzijde van het steenpakket weergegeven. Een aantal interessante punten komt uit deze vergelijking naar voren.

In de koelzone voor de 2e warmeluchtaftrek blijkt de temperatuur onder het gewelf het hoogste te zijn. Dit is een direct gevolg van het feit dat in de koelzone de lucht vooral onderin de kamers stroomt, waardoor de afkoeling van het gewelf minder sterk is. Na het openen van de potten wordt het verschil tussen de gewelftemperaturen en de overige temperaturen snel kleiner.

Tijdens het aanhouden is de onder het gewelf gemeten temperatuur het laagst. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat in deze min of meer stationaire toestand de warmteverliezen uitsluitend bestaan uit de warmtegeleiding door de ovenromp. De lagere temperatuur van het ovendak die hiervan een gevolg is werkt hier door op de aflezing van het thermokoppel.

Pas wanneer de stenen door de aanstromende lucht worden gekoeld,

wordt het verschil tussen de temperatuur van het gewelf en de stenen kleiner met het uiteindelijk gevolg dat, zoals reeds werd opgemerkt, de gewelftemperatuur hoger wordt dan de steentemperatuur.

De stijging van de gastemperatuur aan de uittree van de kamer in de koelzone tot waarden boven de steentemperatuur is op het eerste gezicht verrassend. De in deze figuur uitgezette steentemperaturen zijn echter de steentemperaturen aan de buitenzijde van het pakket. Binnen in de steenstapeling komen hogere temperaturen voor, waardoor de lucht tot deze schijnbaar hoge temperaturen kan worden opgewarmd.

De in vergelijking tot de overige temperatuurverlopen snelle temperatuurstijging onder het gewelf bij het begin van het stoken is in het vorige hoofdstuk reeds besproken. Vermeldenswaard is dat de met het thermoelement onder het gewelf gemeten temperatuur overeenkomt met de met de bedrijfspyrometer waargenomen temperatuur.

In de opwarmzone is, zoals te verwachten was, de intreegastemperatuur het hoogste. De op één na hoogste temperatuur is de temperatuur onder het gewelf. De oorzaak hiervan is dat de warme gassen die de relatief koude kamer binnenstromen, door de invloed van de thermiek opstijgen en het gewelf eerder opwarmen dan de buitenkant van het steenpakket. De reeds met modelproeven vastgestelde stromingspatronen [7] worden door deze temperatuurmetingen bevestigd.

4.11. De temperatuur in het ovendak

4.11.1. De meting

De temperatuur in het ovendak werd gemeten op de in figuur 16 aangegeven plaatsen. De koppels K, M en O werden op het gewelf aangebracht. De koppels L, N en P 0,5 m boven het gewelf.

4.11.2. Nadere beschouwing van de meting

In figuur 35 zijn de gemeten temperaturen uitgezet. Het verloop van de temperatuur in het ovendak wordt bepaald door de niet-stationaire warmtegeleiding. Uit het najlen van de temperaturen ten opzichte van elkaar en ten opzichte van het temperatuurverloop in de oven kan dit niet-stationaire gedrag van het ovendak nader worden berekend. In een volgend rapport zal hierop nader worden ingegaan.

In figuur 25 is de gemiddelde temperatuur van de koppels M, N en O, P aangegeven. De met het koppel P gemeten temperatuur wijkt sterk af van de temperatuur die op deze plaats met de relaxatiemethode is berekend. De temperatuur ter plaatse van koppel N komt goed met de berekende temperatuur overeen. Wat betreft de door koppel P gemeten temperatuur is enig wantrouwen op zijn plaats. Ondanks het feit dat

dit koppel door een veel dikkere zandlaag van het ovendak is gescheiden, is de temperatuur toch even hoog als die ter plaatse van koppel N. Het is dan ook niet ondenkbaar dat door kortsluiting in het thermokoppel in feite de temperatuur op een hoger gelegen plaats van de dakconstructie is gemeten.

4.12. Het drukverschil over een ovenkamer

4.12.1. De meting

Het drukverschil over de meetkamer werd bepaald door voor het fietsenrek aan de intreezijde en aan de uittreezijde van de kamer een drukmeetpunt aan te brengen (zie figuur 36). De drukmeting geschiedde via keramische pijpen waarvan de opening juist bij de muur van het fietsenrek uitmondde.

Het drukverschil over de kamer werd gemeten met een Betz-micromanometer. Door een van de aansluitleidingen los te koppelen van de manometer kon de onderdruk in de meetkamer worden bepaald.

De meetresultaten zijn weergegeven in figuur 36. Hierin is zowel het over de kamer gemeten drukverschil als de op de aangegeven plaats in de kamer gemeten druk uitgezet.

4.12.2. Nadere beschouwing van de meting

Het drukverschil tussen de meetkamer en de voorafgaande kamer blijkt in de richting van de rookgasstroom toe te nemen. Dit is een gevolg van een aantal factoren. In de eerste plaats neemt de door de oven stromende hoeveelheid gas toe, waardoor de snelheid van de gassen stijgt en het drukverlies toeneemt. In de tweede plaats stijgt de temperatuur van de gassen, waardoor de snelheid toeneemt en het drukverlies groter wordt. Dit effect speelt alleen een rol in dat gedeelte van de oven waar de gassen worden opgewarmd, dus in de koelzone en de 6e en 7e stookkamer. Een derde effect is de verandering die optreedt in de wijze waarop de rookgassen door de kamer stromen. In de koelzone zal de doorstroming voornamelijk onderin het steenpakket plaatsvinden. In de stookkamers en vooral in de opwarmzone zal de rookgasstroming door de thermiek veel meer door het bovenste gedeelte van de kamer gaan. Dit betekent een langere weg, het meerdere malen veranderen van stromingsrichting en dientengevolge een drukverschil dat hoger is dan dat wat bij een gelijke temperatuur in de koelzone wordt gemeten.

Uit een sommatie van het over de meetkamer gemeten drukverschil zou volgen dat de onderdruk in de op de schoorsteen aangesloten kamer ongeveer 15 mm wk zou moeten bedragen. De gemeten onderdruk bedraagt echter maar 11 mm wk.

Bij nadere beschouwing van de voor de trek en het drukverschil getekende krommen blijkt dat in veel gevallen het over een kamer gemeten drukverschil niet overeenkomt met de gemeten afname van de trek. Een zeer duidelijke discrepantie blijkt uit de trek en de drukmeting in de de 3e koelkamer. Het gemeten drukverschil bedraagt 1,1 mm wk, de gemeten trek in kamer 10 0,7 mm wk. Dit zou betekenen dat in de 4e koelkamer, van waaruit warme lucht naar de drogerij wordt gevoerd, op 0,25 m boven de vloer een overdruk van 0,4 mm wk zou heersen. Dit is niet reëel. Aan het eind van de proef werd bij het openen van de poort van kamer 9 geconstateerd dat het drukmeetpijpje gebroken was. Uiteraard is niet vast te stellen waar gedurende de rondbrand deze beschadiging is ontstaan. Zeker is evenwel dat de drukmeting in kamer 9 en daarmee de drukverschilmeting tussen de kamers 9 en 10 door deze breuk is beïnvloed. De zeer plotselinge toename van het drukverschil over de eerste stookkamer zou er op kunnen wijzen dat reeds in een vroeg stadium van de rondbrand de meetpijp in kamer 9 is beschadigd.

Een tweede reden voor een afwijking tussen de drukverschil en de trekmeting is de verschillende betekenis van de beide drukmetingen. De in meetkamer 10 gemeten "trek" heeft betrekking op het stroomopwaarts van kamer 10 gelegen gedeelte van de oven. Daarentegen heeft het tussen de kamers 9 en 10 gemeten drukverschil uitsluitend betrekking op de stroming door kamer 10. Een verandering van de stromingsweerstand van de oven stroomopwaarts vankamer 10 zal daardoor wel van invloed zijn op de trekmeting, maar bij een gelijkblijvende gashoeveelheid niet op de drukverschilmeting over kamer 10. Wanneer bijvoorbeeld meerlucht naar de drogerij wordt afgezogen zal de stromingsweerstand in de eerste kamers toenemen. De trek zal hierdoor stijgen, maar het over de kamers voor de afzuiging gemeten drukverschil niet.

Op grond van de beschadiging van de meetpijp in kamer 9 is de betekenis van de drukverschilmeting tussen de kamers 10 en 9 twijfelachtig. Het zal dan ook nuttig zijn om, indien zich daartoe een mogelijkheid voordoet, deze metingen met een nieuwe serie drukmetingen aan te vullen.

4.13. De temperatuur en de gashoeveelheid tussen de steenstapeling

4.13.1. De meting

In figuur 37 is de in een tussen de stenen uitgespaarde ruimte gemeten He- en CO₂-concentratie uitgezet. De meting vond plaats op een moment dat de betreffende kamer de 5e stookkamer was.

Figuur 38 geeft de tussen de stenen gemeten gastemperaturen toen de kamer de positie van 4e stookkamer innam.

4.13.2. Nadere beschouwing van de meting

Het verloop van de He- en CO₂-concentraties over de hoogte is vrij vlak. De iets lagere He-concentratie in het midden zou erop kunnen wijzen dat de invloed van een luchtinlek of van de brandstoftoevoer het sterkst in het midden aanwezig is. De verschillen zijn echter te gering om hieraan een definitieve conclusie te verbinden. De gemiddelde He-concentratie tussen de stenen bedraagt 0,175%, overeenkomend met een gastransport van 8000 nm³ droog rookgas per uur. Bovenin het pakket is de CO₂-concentratie hoger, omdat door de verbranding van gas in de verbrandingsruimte de plaatselijke CO₂-concentratie is beïnvloed.

De gastemperatuur tussen en boven de stenen is uitgezet in figuur 38. Onderin de kamer is de temperatuur duidelijk lager door de veel lagere steentemperatuur daar ter plaatse (zie figuur 30). Middenin en bovenin het steenpakket is de temperatuur nagenoeg constant. Boven het steenpakket neemt de temperatuur af omdat daar de invloed van het koudere ovengewelf merkbaar wordt (vergelijk figuur 34). De in de meetpot gemeten temperatuur is erg laag en is zeer waarschijnlijk beïnvloed door door de meetopening binnenlekkende koude lucht.

5. DE WARMTEBALANS

5.1. De berekening

Met de in het vorige hoofdstuk vastgestelde warmteverliezen kan een warmtebalans van de oven worden opgesteld. Hiervoor dient eerst nog de naar de oven toegevoerde warmte te worden berekend en dient de hoeveelheid warmte, die tijdens het bakproces nuttig wordt verbruikt, te worden bepaald.

De toegevoerde warmte kan worden berekend uit de hoeveelheid aardgas en humus die per uur wordt verbruikt.

Toegevoerd met het aardgas wordt:

$$Q = \text{nm}^3 \text{ aardgas/h} \times \text{stookwaarde}$$

$$Q = 404 \times 7600 = 3.070.000 \text{ kcal/h}$$

Toegevoerd met humus wordt:

$$Q = \text{kg vormlingen/h} \times \text{humusgehalte} \times \text{stookwaarde}$$

$$Q = 5404 \times 0,008 \times 4400 = 190.000 \text{ kcal/h}$$

Totaal wordt dus toegevoerd 3.260.000 kcal/h

De voor het bakproces benodigde warmte kan worden gesplitst in de warmte die nodig is voor het vrijmaken en verdampen van het water en de warmte die nodig is voor het ontleden van de kalk.

De voor het vrijmaken en het verdampen van het water benodigde warmte kan worden berekend met de formule:

$$Q = \text{kg vormlingen/h} \times \text{percentage water} \times \text{warmte voor vrijmaken en verdampen}$$

Gesplitst naar de diverse vormen waarin het water voorkomt wordt dit:

| | | |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Voor chemisch gebonden water | $5404 \times 0,015 \times 964 =$ | 88.600 kcal/h |
| Voor fysisch gebonden water | $5404 \times 0,013 \times 680 =$ | 47.700 kcal/h |
| Voor restwater | $5404 \times 0,012 \times 575 =$ | <u>37.200 kcal/h</u> |

Totaal vrijmaken en verdampen van het water 173.500 kcal/h

Voor de ontleding van de kalk is aan warmte benodigd

$$5404 \times 0,126 \times 759 = 516.500 \text{ kcal/h.}$$

Hieruit volgt dat de totaal voor het bakproces benodigde warmte 690.000 kcal/h bedraagt.

De warmtebalans wordt nu:

| | kcal/h | % van toege- voerde warmte | nauwkeurig- heid in % van totaal |
|---|-----------|-------------------------------------|--|
| Nuttig verbruikte warmte | 690.000 | 21 | |
| Warmte naar de drogerij rechtstreeks | 450.000 | 14 | ± 1 |
| via de open potten | 90.000 | 3 | ± 0,25 |
| Openpottenverlies | 725.000 | 22 | ± 4,5 |
| Schoorsteenverlies | 1.042.000 | 32 | ± 2,2 |
| Verlies door ovenromp vloer | 140.000 | 4 | ± 0,4 |
| dak | 167.000 | 5 | ± 0,4 |
| verticale wanden | 167.000 | 5 | ± 0,4 |
| Verlies in uitgekruide stenen | 39.000 | 1 | |
| Totaal verbruikte warmte | 3.510.000 | 107 | ± 9,15 |
| Toegevoerde warmte | 3.260.000 | 100 | |
| Sluitpost | - 250.000 | - 7 | |

In figuur 39 is deze warmtebalans in beeld gebracht.

5.2. Nadere beschouwing van de warmtebalans

De opgestelde warmtebalans besit een zeer acceptabele nauwkeurigheid. Een sluitpost van 7% is voor metingen van dit type zonder meer goed te noemen. De grootste onnauwkeurigheid ($\pm 4,5\%$) heeft het openpottenverlies. Deze onnauwkeurigheid is terug te voeren tot een onnauwkeurigheid in de snelheids- en de temperatuurmeting van de uit de open potten stromende lucht van ca. 10%. Een grotere nauwkeurigheid zal hier alleen kunnen worden bereikt door het vergroten van het aantal waarnemingen.

De grootste verliespost van de oven is het schoorsteenverlies, dat 32% bedraagt. Dit verlies dient te worden beoordeeld in het licht van het feit dat voor de afvoer van de rookgassen met natuurlijke trek nu eenmaal een bepaalde schoorsteentemperatuur vereist is, terwijl bovendien een te lage schoorsteentemperatuur condensatie van zwavelzuur zou kunnen veroorzaken (zie voor SO_2 - en SO_3 -metingen [8]). In verband met het condensatiegevaar zal de wandtemperatuur van de top van de schoorsteen niet lager

dan 150°C mogen zijn [9]. De trek van de schoorsteen zal bij een gelijk blijvende gassamenstelling tot 83% van de huidige waarde dalen indien de rookgastemperatuur met 50°C wordt verlaagd. Het benutten van deze lagere rookgastemperatuur is dus alleen mogelijk indien de stromingsweerstand van de oven wordt verlaagd. In verband met het noodzakelijke evenwicht tussen de rookgasstroom en de hoeveelheid stenen die per uur wordt gebakken is de weerstand van de oven zolang de steenstapeling niet wordt gewijzigd een vast gegeven. Verder afkoelen van de rookgasstroom in een volgende kamer zou zelfs een verhoging van deze weerstand tot gevolg hebben. De lagere schoorsteentrek zal dus moeten worden opgevangen door een kleiner gastransport door de ventielen en dus, aangezien het gastransport door de oven ongewijzigd moet blijven door een minder groot lek van de papierafdichting. De in dat geval minder sterke afkoeling van de rookgasstroom door de kleinere hoeveelheid leklucht, zou weer een nog verdere afkoeling van de rookgassen in met stenen gevulde kamers mogelijk maken. De door het kleinere gastransport door de ventielen beschikbaar komende drukval zou in dat geval moeten dienen om de grotere weerstand van de oven en de in verband met het hogere CO_2 -percentage lagere trek te compenseren. Op grond van de in hoofdstuk 4.4. gegeven getallen zou theoretisch, indien het papierlek zou kunnen worden gedicht, een minimaal warmteverlies uit de schoorsteen van 412.000 kcal/h mogelijk zijn, een besparing van 630.000 kcal/h ofwel 83 nm^3 aardgas per uur.

Een andere mogelijkheid om het schoorsteenverlies te beperken zou zijn de in de rookgassen aanwezige warmte te benutten voor droogdoeleinden. Het is echter de vraag of, gezien de aanwezigheid van SO_2 en SO_3 in het rookgas [8], dit in de praktijk niet op moeilijkheden zal stuiten in verband met een mogelijke verkleuring van de stenen.

Ook het openpottenverlies van de oven is met 22% van de totaal ingebrachte warmte een aanzienlijke verliespot. Van de totaal uit de open potten stromende warmte (815.000 kcal/h) worden slechts 90.000 kcal/h ofwel 11% nuttig gebruikt. De rest van deze warmte gaat verloren onder de kap van de oven. In vergelijking met vorige metingen [1] is het open pottenverlies belangrijk toegenomen (meer dan driemaal). Dit is een gevolg van het feit dat door het opvoeren van de produktiesnelheid eerder met het uitkruien van de kamers wordt begonnen. Hierdoor is een snellere afkoeling van de inzet nodig, die weer wordt verkregen door het steeds vroeger openen van de open potten. De consequentie hiervan is echter een aanzienlijk

warmteverlies. In dit verband rijst de vraag of het openpottenverlies kan worden verkleind of op de een of andere wijze nuttig kan worden aangewend. Aangezien uit produktietechnische overwegingen het eerste moeilijk realiseerbaar zal zijn, zal de verbetering vooral in het nuttig maken van deze warmte moeten worden gezocht. Ook hier zal in eerste instantie aan het gebruik van de warme lucht voor droogdoeleinden moeten worden gedacht. Het over de oven lopende ringkanaal biedt wellicht mogelijkheden om de afzuiging van de uit de openpottenkamers komende lucht te realiseren.

De warmteverliezen door de ovenromp bedragen in totaal 14% van de ingebrachte warmte. Verkleinen van deze verliezen is alleen mogelijk door het verbeteren van de isolatie van de oven of het vergroten van de wanddikte. De extra kosten die hiermee gepaard gaan moeten echter worden afgewogen tegen de betrekkelijk geringe winst die kan worden bereikt.

6. DE STOFBALANS

In tegenstelling tot wat bij de warmtebalans mogelijk is kan van de opgestelde stofbalans geen sluitpost worden bepaald, omdat de inlekkende hoeveelheid lucht niet afzonderlijk kon worden gemeten. In figuur 40 is de met behulp van de He-tracertechniek opgestelde stofbalans weergegeven. De figuur geeft een duidelijk inzicht in de grootte van de gasstroom op verschillende plaatsen in de oven.

Door de kamers waarin de poorten geheel of gedeeltelijk zijn geopend stroomt in totaal ruim 45.000 nm^3 lucht per uur. Een gedeelte van deze lucht verlaat direct via de open potten deze kamers. Slechts 13.000 nm^3 lucht gaat de oven in. Van deze hoeveelheid wordt $3650 \text{ nm}^3/\text{h}$ afgezogen naar de drogerij en gaat 9350 nm^3 naar de stookzone. In de stookzone neemt de hoeveelheid rookgas met $1150 \text{ nm}^3/\text{h}$ toe tot $10.500 \text{ nm}^3/\text{h}$. Van deze toename is $400 \text{ nm}^3/\text{h}$ een gevolg van het toevoeren van aardgas en $270 \text{ nm}^3/\text{h}$ een gevolg van het vrijkomen van CO_2 uit de stenen. De hoeveelheid leklucht in dit gedeelte van de oven bedraagt $480 \text{ nm}^3/\text{h}$. In de op het schoorsteenkanaal aangesloten kamers lekt door de papierafdichting $7900 \text{ nm}^3/\text{lucht}/\text{h}$ naar binnen. Het rookgastransport stijgt hiermee tot $18.400 \text{ nm}^3/\text{h}$. Van de uit de open potten stromende lucht wordt een klein gedeelte, n.l. $5650 \text{ nm}^3/\text{h}$ (16%), nog naar de drogerij gevoerd. Hiermee komt de totale luchthoeveelheid die naar de drogerij gaat op $9300 \text{ nm}^3/\text{h}$.

De door de poorten in de oven binnenlekkende lucht is bijzonder gering, n.l. $480 \text{ nm}^3/\text{h}$. Toch moet voor deze lucht, die gemiddeld op een temperatuur van 800°C moet worden gebracht, nog 15 nm^3 aardgas/h worden toegevoerd (4% van totale aardgasverbruik). Een goede verzorging van de afdichting van de ovenpoorten is dan ook aan te bevelen. Eventuele speciaal aan te brengen voorzieningen zoals ovendeuren moeten echter in verhouding tot de hier aangegeven bereikbare besparingen worden beoordeeld.

Bij de bespreking van de warmtebalans is reeds de wens naar voren gekomen het papierlek zoveel mogelijk te beperken. Ook de stofbalans illustreert nog eens duidelijk dat 43% van de uit de schoorsteen ontwijkende gassen bestaat uit de uit de ovenruimte aangezogen lucht.

7. CONCLUSIES

Bij de opzet van het rapport is er bewust naar gestreefd de betekenis van iedere meting zowel afzonderlijk als in zijn samenhang met de overige metingen in gescheiden hoofdstukken te bespreken. Het zou te ver voeren alle in deze hoofdstukken besproken aspecten hier opnieuw te presenteren. Volstaan wordt daarom met het vermelden van de voornaamste conclusies. Voor een uitgebreide bespreking van de metingen kan worden teruggegrepen op de "nadere beschouwing van de meting" die in ieder hoofdstuk wordt gegeven.

Bovenstaande conclusies zijn:

- Het is mogelijk gebleken van de steenoven een goed sluitende warmtebalans (sluitpost -7%) op te stellen. De grootste warmteverliezen worden gevormd door het schoorsteenverlies (32%) en het openpottenverlies (22%). De warmte-economie zou belangrijk kunnen worden verhoogd door het verbeteren van de papierafdichting of door, voor zover mogelijk in verband met het SO₂- en SO₃-gehalte, de rookgassen en de uit de open potten stromende lucht aan te wenden voor droogdoeleinden.
- Door het toepassen van de He-tracertechniek is het mogelijk gebleken om het gastransport door de oven vast te leggen. Van de 45.000 nm³ lucht/h die in de openpottenkamers aan het ovengebeuren deelneemt, bereikt uiteindelijk 9350 nm³/h de stookzone. Van de 18.400 nm³ rookgas die per uur de schoorsteen verlaat is 7900 nm³ (43%) leklucht door de papierafdichting en 480 nm³ (2,5%) leklucht die door de ovenpoorten is binnengelekt.
- In de direct na het omloopkanaal gelegen kamers komen over de kamerlengte snelheidsverschillen voor van ruim 300%. De snelheid is het laagste aan de achterzijde van de kamer en het hoogste in het midden.
- De door het papierlek binnenstromende lucht beïnvloedt in sterke mate het rookgastransport en het schoorsteenverlies; bovendien verhindert deze luchtstroom de opwarming van de onderzijde van het steenpakket. Hierdoor begint de opwarming aan de onderzijde van het pakket pas 25 uur later dan de opwarming van de bovenzijde van het pakket. Dit verschil blijft gedurende de gehele opwarmperiode gehandhaafd en verlengt daarmee de stooktijd.
- Na 120 uur stoken veranderen de temperaturen in het steenpakket niet meer. Nog langer aanhouden van de oven bevordert de temperatuurgelijkmatigheid niet.
- In de koelzone blijft de luchttemperatuur aan de poortzijde duidelijk lager dan de temperatuur aan de achterzijde van de kamer. Het verschil in luchttemperatuur over de kamerlengte bedraagt 150°C.

- Het gemiddelde gasverbruik van de meetkamer ligt 18% lager dan het gemiddelde verbruik van alle ovenkamers. De naar de meetkamer toegevoerde hoeveelheid gas is 13% lager dan de naar de gemiddelde ovenkamer toegevoerde hoeveelheid.
- De met behulp van modelproeven gevonden stromingspatronen in vlamovenkamers worden door de temperatuurmetingen in het steenpakket, onder het gewelf en in de fietsenrekken bevestigd.

8. SLOTBESCHOUWING

Zoals in de inleiding van dit rapport is gesteld was in eerste instantie de bedoeling van de metingen en het rapport: het vastleggen van de warmte- en stofbalans van een moderne vlamoven. Op grond van het voorgaande kan zonder meer worden geconcludeerd dat aan dit doel is voldaan.

Daarnaast was het de bedoeling om voldoende metingen te verzamelen om in een volgend stadium een rekenmodel van een vlamoven op te stellen. Een beoordeling of de metingen ook in dit opzicht aan hun doel hebben beantwoord is op dit moment nog niet mogelijk. Het is niettemin niet onwaarschijnlijk dat voor een bredere opzet van een rekenmodel een aantal metingen zoals in dit rapport is beschreven, aan een andere vlamoven moet worden herhaald. In dat geval zal met vrucht gebruik kunnen worden gemaakt van de verkregen meetervaring.

9. LITERATUUR

- [1] Vergelijkende studie naar aanleiding van het onderzoek van drie baksteenovens.
Rapport 656-0357. Keramisch Instituut TNO en Centraal Technisch Instituut TNO, afd. Warmtetechniek
- [2] Bekker, P.C.F.
Proef kwaliteitsonderzoek IV. N.V. Steenfabriek "Druten"
Stichting Technische Dienst Waalsteen, 29 juli 1969
- [3] Claus, J., en G. Wentink
Het bepalen van de lucht- en rookgasstroming in steenovens met behulp van een He-tracertechniek.
Intern Verslag 69-01275. Centraal Technisch Instituut TNO, april 1969
- [4] VDI-Wärmeatlas
- [5] Jakob, M.
Heat Transfer
John Wiley & Sons, New York
- [6] Bekker, P.C.F.
Meting gasverbruik N.V. Steenfabriek "Druten"
Stichting Technische Dienst Waalsteen, 29 april 1969
- [7] Voskuil, J.
Modelproeven van stromingen in vlamovens
Chemisch Weekblad 56 (1960) 206-213
- [8] Kiel, M.
SO₂- en SO₃-metingen in de steenoven van de N.V. "Druten"
Rapport 70-0749. Centraal Technisch Instituut TNO, februari 1970
- [9] Gumz, W.
Brennstoffschwefel und Rauchgastemperatur
Brennstof-Wärme-Kraft 5 (1953) 8, 264-269

APPENDIX

Kleianalyse Ovenmeting Druten (gewichtsprocenten)

| | |
|---------------------------------------|----------------------|
| ijzeroxyde | 3,2% |
| kalk (CaO uit carbonaat) | 12,6% |
| Fe ₂ O ₃ /CaO | 0,25% |
| CO ₂ | 9,9% |
| humus | 0,8% |
| totaal zwavel | 0,02% |
| chemisch gebonden H ₂ O | 1,5% |
| gloeiverlies | 13,5% |
| specifiek oppervlak | 52 m ² /g |