



CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 75 - 02039

Dossier : 02-6-40040

INTERN VERSLAG

INLEIDING TOT DE DROOGTECHNIEK

IN DE KERAMISCHE INDUSTRIE

door

J.H. van der Velden

Datum : April 1975

Afschrift aan: Stichting Opleiding Keramici

De Programmacommissie Grofkeramiek

VOORWOORD

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

Het verslag bevat de voorlopige tekst van het hoofdstuk 2.1 "Drogen" van deel 2 "Drogen en Bakken" van dit dictaat, alsmede een algemene inleiding over het ontwateren van klei.

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

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

Ir. P.J. Tichelaar, voorzitter

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

Ir. L.L. van Breukelen

Ir. D.J. Perduyn

Ir. H.J. Timmers

J.H. van der Velden

C. van Zeumeren

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

INHOUDSOPGAVE

blz.

<u>SAMENVATTING</u>	5
1.1 ALGEMENE INLEIDING	6
1.1.1 <u>Water als hulpstof</u>	6
1.1.2 <u>Het verwijderen van het vrije water</u>	6
1.1.2.1 Inleiding	6
1.1.2.2 Mechanische ontwatering	6
1.1.2.3 Ontwateren door drogen	7
1.1.3 <u>Het verwijderen van het adsorptiewater</u>	9
1.1.4 <u>Het verdrijven van het chemisch gebonden water</u>	10
2.1 DROOGTECHNIEK	11
2.1.1 <u>Inleiding</u>	11
2.1.2 <u>Het droogmedium lucht</u>	11
2.1.2.1 Relaties tussen toestandsgrootheden	11
2.1.2.2 Het Mollierdiagram voor vochtige lucht	14
2.1.2.3 Praktisch gebruik van het Mollierdiagram	15
2.1.2.4 Drogen met rookgassen	17
2.1.3 <u>Verdamping aan het oppervlak van een produkt</u>	18
2.1.3.1 Warmte- en stofoverdracht	18
2.1.3.2 De natteboltemperatuur	20
2.1.3.3 De droogsnelheid	21
2.1.3.4 De waterbeweging in een drogende klei	22
2.1.4 <u>Verdamping in de poriën van een produkt</u>	24
2.1.5 <u>Uitvoering van het droogproces</u>	26
2.1.5.1 Inleiding	26
2.1.5.2 Luchtconditioneringsprincipes	26
2.1.5.3 Ongelijkmatigheid van de droging binnen een groep produkten	27
2.1.5.4 De stromingswijze van de drooglucht	28
2.1.5.5 De toelaatbare droogsnelheid	30

blz.

2.1.5.6 Het warmte- en krachtyerbruik	32
2.1.5.7 De droogtijd	32
2.1.6 <u>Convectiedrogers</u>	33
2.1.6.1 Inleiding	33
2.1.6.2 Kamerdrogers	34
2.1.6.3 Tunneldrogers	36
2.1.6.4 Paternosterdrogers	37
2.1.6.5 Straaldrogers	38
2.1.6.6 Sproeidrogers	39
2.1.7 <u>Andere droogsystemen</u>	41
2.1.7.1 Inleiding	41
2.1.7.2 Contactdroging	41
2.1.7.3 Stralingsdroging	42
2.1.7.4 Hoogfrequentdroging	43
<u>LITERATUUR</u>	44

SAMENVATTING

Het verslag bevat een beknopt overzicht van de droogtechniek in de keramische industrie.

Behandeld worden, de relevante eigenschappen van het droogmedium lucht, de luchtconditionerings-principes, de waterbeweging in drogende klei, de droogsnelheid en droogtijd van keramische halffabrikaten, alsmede de verschillende drogerijtypen.

1.1 ALGEMENE INLEIDING

1.1.1 Water als hulpstof

Het water dat van nature in de grondstoffen van de keramische industrie aanwezig is, dan wel afhankelijk van de toegepaste fabricagetechniek wordt toegevoegd voor de zuivering, het malen, het mengen of de vormgeving van de grondstof, maakt geen deel meer uit van het uiteindelijke gebakken keramische produkt. Het water fungeert meestal als een hulpstof, die onontbeerlijk is in bepaalde fasen van het fabricageproces, doch die geheel of gedeeltelijk moet worden verwijderd, zodra zij geen nuttige functie meer vervult en storend wordt in een volgende fase van het proces.

In het systeem vaste stof - water onderscheidt men naar de aard van de binding aan de vaste stof drie soorten water: vrij water, adsorptiewater en chemisch gebonden water.

1.1.2 Het verwijderen van het vrije water

1.1.2.1 Inleiding

Onder vrij water verstaat men het water waarvan de moleculen in het systeem vaste stof - water vrij beweeglijk zijn. Het wordt aan de massa onttrokken door mechanische ontwatering en door verdamping (drogen).

1.1.2.2 Mechanische ontwatering

Mechanische ontwateringsmethoden worden in de keramische industrie alleen toegepast, wanneer het watergehalte in het systeem zo hoog is, dat de massa zich als een vloeistof gedraagt. Van het totaal aanwezige water kan dan een deel verwijderd worden door:

- a) centrifugeren, bijvoorbeeld bij het zuiveringsproces van ruwe kaolien nabij de vindplaats;
- b) filtreren, bijvoorbeeld bij het vervaardigen van plastisch vervormbare massa's uit een suspensie van grondstoffen en water in filterpersen;

- c) capillaire opzuiging, bijvoorbeeld bij een vormgeving in droge gipsen vormen met dik vloeibare gietmassa's.

1.1.2.3 Ontwateren door drogen

Aan vloeibare massa's wordt het vrije water soms ook door verdamping (drogen) onttrokken. Een voorbeeld hiervan is de vervaardiging van granulaat voor het droogpersprocédé uit een suspensie van grondstoffen en water in een sproeidroger. Meestal heeft het ontwateren door drogen echter betrekking op voorwerpen uit een plastische massa of op vochtige vaste lichamen. Tijdens de droging neemt de mechanische sterkte van de voorwerpen toe, hetgeen ze geschikt maakt voor volgende bewerkingen.

Bij het droogproces dient onderscheid gemaakt te worden tussen waterverdamping aan de oppervlakte en in het inwendige van een voorwerp.

Verdamping aan het oppervlak.

Indien de hoeveelheid water in het voorwerp zo groot is, dat de ruimten tussen de afzonderlijke deeltjes geheel met water zijn gevuld en de deeltjes aan het oppervlak derhalve onderling geen vaste contactpunten hebben, die een star skelet vormen, zal de waterverdamping aan het oppervlak van het voorwerp plaatsvinden. De verdamping aan de oppervlakte wordt in stand gehouden door wateraanvoer uit het inwendige van het voorwerp. De drijvende krachten voor deze wateraanvoer zijn:

- het verschil in waterconcentratie aan het oppervlak en in het inwendige, dat een waterbeweging door diffusie veroorzaakt;
- de trekkracht van de holle menisci aan het oppervlak van het capillair-poreuze systeem, die een waterstroming naar het oppervlak bewerkstelligt.

De wateronttrekking gaat gepaard met een overeenkomstige volumevermindering van het beschouwde voorwerp.

In een beiderzijds drogende vlakke plaat klei blijkt bij constante uitwendige droogomstandigheden voor wat betreft de toevoer van warmte en de afvoer van gevormde waterdamp, na een aanlooperperiode, een parabolische watergehalteverdeling te ontstaan zoals weergegeven in figuur 1.a.

De vochtgradiënt aan de oppervlakte zal van klei tot klei bij gelijk gekozen droogsnelheid zeer sterk kunnen variëren. De getalwaarde is voor een gegeven klei bij een gegeven watergehalte aan het oppervlak, recht evenredig met de gerealiseerde droogsnelheid per oppervlakte-eenheid. Wanneer de vochtgradiënt en daarmee de droogsnelheid een bepaalde kritieke waarde overschrijdt ontstaat scheurvorming in het drogende voorwerp. Ook vochtgradiënten voortvloeiende uit een ongelijkmatige verdampingssnelheid per oppervlakte-eenheid van het te drogen voorwerp kunnen scheurvorming veroorzaken. Vochtgradiënten kunnen voorts ernstige vervormingen van het voorwerp bewerkstelligen, die tesamen met "schaalvorming" in het verdere verloop van het droogproces tot het ontstaan van scheuren kunnen leiden. In het algemeen geldt derhalve dat de toe te passen droogsnelheid van keramische voorwerpen begrensd wordt.

Wanneer de deeltjes van het beschouwde drogende voorwerp elkaar zo dicht naderen, dat vaste contactpunten ontstaan en zich een star skelet vormt, zal de droogsnelheid zich onder constante uitwendige condities aanvankelijk nog handhaven op het oorspronkelijke niveau. De fijnere poriën aan het oppervlak houden de waterfilm in stand door aanzuiging van het water uit de grovere waar lucht binnendringt. Ook door expansie van in het systeem aanwezige lucht en door het ontwijken van aanvankelijk in het water opgeloste gassen wordt de waterbeweging naar het oppervlak nog enige tijd onderhouden.

Verdamping in de poriën.

Zodra de waterbeweging naar het oppervlak ten achter blijft bij de verdamping zal het droogfront zich naar het inwendige van het voorwerp verplaatsen. De afvoer van waterdamp vindt nu vanaf het droogfront in het voorwerp plaats door diffusie via het capillair-poreuze systeem. De toevoer van warmte naar het verdampingsfront vindt plaats via geleiding. De droogsnelheid zal als gevolg van de voortdurende positiewijziging van het droogfront bij constante uitwendige condities niet gelijk blijven. Zowel de aanvoerweg voor de warmte als de afvoerweg voor de waterdamp wordt voortdurend langer. De droogsnelheid zal dalen naarmate de droging vordert. Het verloop van het gehele proces is weergegeven in de figuren 1.b en 1.c.

1.1.3 Het verwijderen van het adsorptiewater

Aan de oppervlakte van droge materialen en in het bijzonder ook aan het relatief grote uitwendige en/of inwendige oppervlak van de plaatvormige deeltjes van kleimineralen hechten zich in een waterdamphoudende atmosfeer watermoleculen. Vrije valenties en kationen aan de oppervlakken zorgen daarbij voor de binding.

De dikte van de geadsorbeerde laag watermoleculen neemt voor een gegeven constant blijvend temperatuurniveau toe bij stijgende relatieve vochtigheid van de omgevende lucht. Het proces is omkeerbaar, zij het dan dat hysteresis optreedt.

De wateropneming wordt bij hoge waarden van de relatieve vochtigheid versterkt door een ander mechanisme, de capillair-condensatie. Deze vindt zijn oorzaak in het feit, dat in micro-capillairen (dat zijn capillairen met een diameter van $0,1 \mu\text{m}$ of kleiner), waarin zich als gevolg van oppervlakteadsorptie menisci hebben gevormd, de verzadigde dampspanning bij een gegeven temperatuur lager is dan normaal. Indien de relatieve vochtigheid van de lucht ter plaatse hoger is dan de relatieve vochtigheid waarbij de waterdamp boven de menisci verzadigd is, zal condensatie optreden. Omgekeerd zal uitdroging pas mogelijk zijn, indien de relatieve vochtigheid van de omringende lucht lager is dan de relatieve vochtigheid waarbij de damp boven de menisci verzadigd is.

Voor capillairen met een diameter van $0,1 \mu\text{m}$ is bij 20°C de waterdamp verzadigd bij een relatieve vochtigheid van 98 %.

Voor capillairen met een diameter van $0,02 \mu\text{m}$ geldt dit bij 90 %.

Adsorptie- en desorptie-isothermen van kleien hebben de in figuur 1.d aangegeven algemene gedaante.

Een belangrijke bijzonderheid is, dat de adsorptie bij sommige kleimineralen gepaard gaat met een expansie van de deeltjes en de desorptie met een contractie daarvan. Het verschijnsel treedt zeer sterk op in montmorillonietklei. Ook bij de Nederlandse rivier- en zeekleien is het effect duidelijk waarneembaar.

De bedoelde expansie of contractie kan leiden tot een ernstige verstoring van de structuur van de starre gedroogde halffabrikaten.

Het verdrijven van het geadsorbeerde water, de desorptie, geschiedt door een warmtebehandeling bij een lage relatieve vochtigheid van de lucht.

Het desorptieproces van de kleimineralen zal meestal beginnen in het laatste stadium van het droogproces van de halffabrikaten buiten de oven en worden voltooid in de eerste fase van het bakproces. Bij een temperatuurniveau van 275 °C zal in het algemeen alle geadsorbeerde water verdreven zijn.

1.1.4 Het verdrijven van het chemisch gebonden water

De aanwezige hoeveelheid wordt bepaald door de mineralogische samenstelling van de grondstof. In grondstoffen die kleimineralen bevatten, ligt het gehalte aan chemisch gebonden water meestal tussen 1 en 6 gew.% van de droge stof. De chemische binding van het bedoelde water in de vorm van OH-groepen, is sterk. Het water wordt voornamelijk bij temperaturen hoger dan 425 °C tijdens de warmtebehandeling in de oven verwijderd.

2.1 DROOGTECHNIEK

2.1.1 Inleiding

Ofschoon in de keramische industrie de meest verschillende soorten produkten (in de betekenis van zowel artikelen, als massagoed) worden gedroogd, zijn er voldoende punten van overeenkomst tussen de verschillende droogprocessen voor een integrale behandeling van de droogtechniek.

Wanneer het klimaat zich daartoe leent, kan men voor het drogen van keramische produkten eventueel uitsluitend gebruik maken van de beschikbare warmte in de buitenlucht en van de stralingswarmte van de zon. De droging vindt dan in de open lucht, onder afdaken of in meer of minder afsluitbare loodsen plaats.

In Nederland is deze "natuurlijke" droging alleen mogelijk van eind maart tot eind september. Om bedrijfseconomische redenen en door factoren van sociale aard is zij nagenoeg geheel vervangen door een droging, waarbij gebruik gemaakt wordt van kunstmatig opgewekte warmte. De gepresenteerde stof heeft dan ook op de laatstgenoemde wijze van drogen betrekking en in het bijzonder op droogsystemen, waarin de warmteoverdracht door convectie geschiedt. Convectiedrogers worden in de keramische industrie namelijk verreweg het meest toegepast.

2.1.2 Het droogmedium lucht

2.1.2.1 Relaties tussen toestandsgrootheden

Zowel voor de aanvoer van de warmte naar het drogende produkt als voor de afvoer van de gevormde waterdamp, wordt in convectiedroogsystemen lucht van atmosferische druk gebruikt. Vacuumdroging en droging onder verhoogde druk worden tot nu toe in de keramische industrie niet toegepast.

De relatie tussen de verschillende toestandsgrootheden van vochtige lucht kan worden ontleend aan de wetten van Boyle - Gay Lussac en van Dalton.

Volgens Boyle - Gay Lussac is de toestandsvergelijking voor ideale gassen:

$$P.V. = m.R.T. \quad [01]$$

Hierin is:

P = totale druk van het gas	kN/m ²
V = volume van het gas	m ³
m = massa van het gas	kg
R = gasconstante per kg gas	kJ/(kg.K)
T = absolute temperatuur	K

De wet van Dalton is van toepassing op mengsels van ideale gassen waarvan de componenten onderling geen chemische reacties aangaan. Zij luidt:

"Bij aanwezigheid van meerdere gassen in eenzelfde ruimte, verspreidt elk gas zich in het gehele beschikbare volume, als ware geen van de andere gassen aanwezig. De totale druk van het gasmengsel is daarbij gelijk aan de som van de partiële drukken van de componenten."

Voor globale calculaties mag men voor de totale druk P in Nederland, onafhankelijk van jaargetijde en hoogte boven zeeniveau, een waarde aannemen, gelijk aan de "normale" atmosferische druk, namelijk 101,325 kN/m².

Indien de partiële waterdampdruk P_d bedraagt, zal voor de partiële luchtdruk P₁ gelden:

$$P_1 = P - P_d \quad [02]$$

Het is gebruikelijk, het watergehalte van vochtige lucht uit te drukken in kg waterdamp per kg droge lucht. Bij een watergehalte van x kg/kg bevindt zich derhalve x kg waterdamp in (1 + x) kg vochtige lucht.

Onder de relatieve vochtigheid ϕ van de lucht verstaat men het quotiënt van de partiële waterdampdruk P_d in die lucht en de dampdruk P_{dv} , die de lucht in de verzadigingstoestand bij dezelfde temperatuur en totale druk zou bezitten. Dikwijls geeft men de relatieve vochtigheid ϕ weer in procenten.

$$\phi = \frac{P_d}{P_{dv}} \cdot 100 \quad (\%) \quad [03]$$

(P_d en P_{dv} hierin bij gelijke temperatuur en druk)

Toepassing van de wet van Dalton levert de in de formules 04 en 05 weergegeven relaties op:

$$x = \frac{0.622 \cdot 10^{-2} \cdot \phi \cdot P_{dv}}{P - 10^{-2} \cdot \phi \cdot P_{dv}} \quad [04]$$

Voor de berekening van het watergehalte x , dienen de relatieve vochtigheid ϕ , de temperatuur en de totale druk P bekend te zijn. De waarde van P_{dv} in kN/m^2 bij de betreffende temperatuur wordt in waterdamp tabellen opgezocht.

Voor het massiek volume V_m van vochtige lucht in m^3/kg geldt:

$$V_m = \frac{R_d (x + 0,622) (273 + \theta)}{(1 + x) P} \quad [05]$$

Hierin is:

- R_d = gasconstante van waterdamp = $0,4615 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- x = watergehalte per kg droge lucht in kg/kg
- θ = luchttemperatuur in $^{\circ}\text{C}$
- P = totale druk, bijvoorbeeld $101,325 \text{ kN/m}^2$

De enthalpie h in kJ per $(1 + x)$ kg vochtige lucht bij een temperatuur van θ $^{\circ}\text{C}$ en een totale druk P kN/m^2 wordt bij afspraak berekend ten opzichte van een temperatuurniveau van 0 $^{\circ}\text{C}$ voor 1 kg droge lucht en x kg water in vloeibare toestand bij constant blijvende druk P . 1 kg droge lucht bezit dan bij θ $^{\circ}\text{C}$ een enthalpie gelijk aan $(C_{p1} \cdot \theta)$. Hierin is

C_{pl} de soortelijke warmte bij constante druk van droge lucht in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$..

De enthalpie van x kg water bedraagt na verdamping bij 0°C , $(r_o \cdot x)$. Hierin is r_o de verdampingswarmte van water bij $0^\circ\text{C} = 2501 \text{ kJ/kg}$. Bij verwarming van de x kg gevormde waterdamp tot $\theta^\circ\text{C}$, neemt de enthalpie hiervan toe met $(x \cdot C_{pd} \cdot \theta)$. Hierin is C_{pd} de soortelijke warmte bij constante druk van waterdamp in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. De totale enthalpie h van het lucht-waterdamp-mengsel wordt dan :

$$h = (C_{pl} + x \cdot C_{pd}) \theta + r_o \cdot x \quad [06]$$

Zowel C_{pl} als C_{pd} zijn enigszins temperatuurafhankelijk.

Bij 0°C	: $C_{pl} = 1,0056 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$C_{pd} = 1,858 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Bij 50°C	: $C_{pl} = 1,0063 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$C_{pd} = 1,864 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

2.1.2.2 Het Mollierdiagram voor vochtige lucht.

Mollier heeft aan de hand van bovenstaande formules een doelmatig diagram ontwikkeld, waarmee droogtechnische vraagstukken langs grafische weg kunnen worden opgelost. Het diagram is weergegeven in figuur 2.1a.

Op de horizontale as is het watergehalte x in $(1 + x)$ kg vochtige lucht aangegeven. Toestandsveranderingen bij constant watergehalte verlopen langs lijnen loodrecht op de horizontale x -as. De schaal loopt van 0 tot $0,075 \text{ kg/kg}$, hetgeen voor het gebruik van het diagram in de keramische industrie ruimschoots toereikend is.

In verticale richting is de enthalpie h uitgezet in kJ per $(1 + x)$ kg lucht. De adiabaat $h = 0$ is onder de x -as gesitueerd op verticale afstanden $r_o \cdot x$ van deze as. Alle adiabaten lopen hier evenwijdig aan. De verticale afstand tussen twee adiabaten die 20 kJ/kg van elkaar verschillen bedraagt 20 mm , hetgeen een interpolatie vergemakkelijkt. De scheefhoekige constructie maakt een optimaal gebruik van de beschikbare diagramruimte mogelijk. De hoogste enthalpiewaarde bedraagt 260 kJ/kg .

De isothermen zijn, overeenkomstig formule 06, zwak naar rechts oplopende nagenoeg rechte lijnen. De temperatuurafhankelijkheid van C_{p1} en C_{pd} is in de legenda van het diagram vermeld. $\theta_{max.} = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$. Aan de hand van formule 04 zijn de lijnen van constante relatieve vochtigheid geconstrueerd, geldend voor een totale druk van $101,325 \text{ kN/m}^2$. De verzadigingslijn $\phi = 100 \%$ verdeelt het diagram in een gebied van onverzadigde lucht-waterdampmengsels (boven) en een nevelgebied (onder), waarin de vochtigheid ten dele in dampvorm en ten dele in vloeibare vorm aanwezig is.

De lijnen van constant massiek volume V_m zijn bijna horizontaal lopende praktisch rechte lijnen. Ze zijn aan de hand van formule 05 geconstrueerd.

Parallel aan de x-as is een schaal getekend, die het mogelijk maakt de bij een bepaald watergehalte x behorende partiële dampdruk P_d af te lezen. De schaal is geconstrueerd aan de hand van formule 03 en 04.

2.1.2.3 Praktisch gebruik van het Mollierdiagram

De voor het droogproces beschikbare verse lucht is meestal buitenlucht en/of warme lucht afkomstig van de ovens van het bedrijf. Aanvaardbare standaardwaarden voor de gemiddelde condities van de buitenlucht in Nederland zijn:

	jaar- gemiddelde	januari- gemiddelde	juli- gemiddelde
enthalpie h (kJ/kg)	25	12	40
watergehalte x (kg/kg)	0,006	0,004	0,009
temperatuur θ ($^\circ\text{C}$)	9,8	2,0	17,1

Wanneer men in het Mollierdiagram (figuur 2.1a) bij $x = 0,006$ loodrecht omhoog gaat tot de adiabaat 25 kJ/kg (5 mm boven $h = 20$), dan vindt men de gemiddelde jaarconditie van de lucht. De temperatuur blijkt inderdaad bijna $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ te zijn (zie tabel). De relatieve vochtigheid ϕ van de lucht is circa 80% . Het massiek volume V_m blijkt

tussen 0,80 en 0,82 m³/kg te liggen. Het kan geschat worden op 0,804 m³/kg vochtige lucht.

Op de parallelschaal P_d leest men voor x = 0,006 kg/kg een partiële dampdruk af van circa 0,98 kN/m².

Twee bekende gegevens van de lucht kunnen derhalve met vier andere nuttige gegevens worden aangevuld.

Wanneer men de zojuist gekarakteriseerde lucht met een indirecte luchtverhitter verwarmt tot bijvoorbeeld 100 °C, verloopt deze toestandverandering in het Mollierdiagram langs de ordinaat x = 0,006 tot de isotherm θ = 100 °C. De enthalpie blijkt dan 117 (120 - 3 mm) kJ/kg te bedragen en het massiek volume V_m naar schatting 1,061 m³/kg vochtige lucht.

Stel bij wijze van voorbeeld dat deze lucht aan een drooginrichting wordt toegevoerd en dat in de uitlaat daarvan een relatieve vochtigheid van 80 % en een temperatuur van 35 °C wordt gemeten. De enthalpie alsmede het watergehalte van deze uitlaatlucht kan nu gevonden worden door het snijpunt op te zoeken van de isotherm θ = 35 °C en de lijn van constante relatieve vochtigheid φ = 80 %. Dit snijpunt blijkt zich te bevinden bij een watergehalte x = 0,029 kg/kg droge lucht. De lucht blijkt op het bedoelde snijpunt verder een enthalpie te bezitten van 110 kJ/kg droge lucht. (Naar wens kan ook het massiek volume en de partiële dampdruk van de afgewerkte lucht worden vastgesteld.)

Samenvattend blijkt nu, dat in de drooginrichting per kg droge lucht 0,029 - 0,006 = 0,023 kg waterdamp is opgenomen. Het zogenaamde specifiek luchtverbruik van het geanalyseerde droogproces is dan:

$$\frac{1}{0,023} = 43,5 \text{ kg droge lucht per kg verdampt water.}$$

Dit is een belangrijk gegeven, dat bijvoorbeeld gebruikt kan worden voor de berekening van de ventilator voor de verse lucht van een drooginrichting. Aan warmte is totaal door de luchtverhitter 117 - 25 = 92 kJ/kg droge lucht toegevoerd.

Er is 0,023 kg water per kg droge lucht verdampt, zodat het zogenaamde specifiek warmteverbruik van het geanalyseerde proces:

$$\frac{92}{0,023} = 4000 \text{ kJ per kg verdampt water bedraagt.}$$

Dit is een belangrijk basisgegeven voor de berekening van de capaciteit van de luchtverhitter.

Het diagram is ook geschikt voor het vaststellen van de toestandsverandering van lucht bij een menging van lucht in bijvoorbeeld de toestand A met lucht in de toestand B. Het punt dat in het diagram de toestand van het mengsel M aangeeft ligt dan op de verbindingslijn A-B. Het punt M verdeelt het lijnstuk AB in omgekeerde verhouding van de hoeveelheden A en B.

Indien a kg droge lucht van toestand A wordt gemengd met b kg droge lucht van toestand B, dan geldt: $AM : BM = b : a$. Snijdt de verbindingslijn de verzadigingslijn, dan treedt bij menging condensatie op.

Stel, dat de aan een droogruimte toegevoerde warme lucht (toestand A, $\theta = 100^\circ\text{C}$, $x = 0,0060$ kg/kg) vóór het contact met het drogende produkt wordt gemengd met lucht, die reeds vocht uit het produkt heeft opgenomen (toestand B, $\theta = 35^\circ\text{C}$, $x = 0,0290$ kg/kg) en dat het mengsel een temperatuur van 40°C aanneemt. Ter berekening van de mengverhouding vindt men dan op de verbindingslijn van A en B in het diagram bij $\theta = 40^\circ\text{C}$ de toestand van het mengsel M ($\theta = 40^\circ\text{C}$, $x = 0,0273$ kg/kg).

Toepassing van bovenstaande mengregel heeft tot resultaat dat 0,926 kg droge lucht van toestand B (vochtig) moet worden gemengd met 0,074 kg droge lucht van toestand A (vers) voor het verkrijgen van 1 kg droge lucht van toestand M (mengsel).

2.1.2.4 Drogen met rookgassen

Ook verdunde rookgassen van directe luchtverhitters en ketelinstallaties komen, voor zover zij niet corrosief zijn, als droogmedium in aanmerking.

Bij voldoende sterke verdunning met lucht blijft het Mollierdiagram, althans voor globale calculaties, toepasbaar. Wel dient rekening gehouden te worden met de hoeveelheid waterdamp die bij de verbranding van de brandstof is ontstaan.

De rookgassen van ovens waarin keramische produkten worden gebakken, bevatten meestal chemisch reactieve bestanddelen (bijvoorbeeld SO_3) afkom-

stig uit die produkten of uit de brandstof en zijn in het algemeen niet geschikt voor droogdoeleinden.

2.1.3 Verdamping aan het oppervlak van een produkt

2.1.3.1 Warmte- en stofoverdracht

Een deel van het water in een drogend keramisch produkt wordt in het algemeen aan de oppervlakte daarvan verdampt (zie 1.1.2.3). In het geval van zuivere convectie blijkt het warmtetransport naar een oneindig uitgestrekt nat oppervlak waarlangs lucht stroomt te kunnen worden beschreven met de formule:

$$q = \alpha (\theta - \vartheta) \quad [07]$$

Hierin is:

q = warmtestroomdichtheid in $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

α = warmte-overdrachtscoëfficiënt in $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$

θ = luchttemperatuur in $^{\circ}\text{C}$

ϑ = oppervlaktetemperatuur in $^{\circ}\text{C}$

Het damptransport van het oppervlak naar de langsstromende lucht blijkt met de formules 08 en 09 gekarakteriseerd te kunnen worden.

$$A = \sigma (x_v - x) \quad [08]$$

$$A = \beta (P_{dv} - P_d) \quad [09]$$

Hierin is:

A = massastroomdichtheid in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

σ = verdampingsgetal in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

x_v = watergehalte van de lucht in de verzadigingstoestand bij ϑ $^{\circ}\text{C}$ in kg/kg

x = watergehalte van de lucht bij θ $^{\circ}\text{C}$ in kg/kg

β = verdampingsgetal in $\text{kg}/(\text{kN} \cdot \text{s})$

P_{dv} = partiële dampdruk van de lucht in de verzadigingstoestand bij ϑ $^{\circ}\text{C}$ in kN/m^2

P_d = partiële dampdruk van de lucht bij θ $^{\circ}\text{C}$ in kN/m^2

Voor de relatie tussen σ en β kan met behulp van de formules 03 en 04 worden afgeleid:

$$\beta = \frac{0,622}{(P - P_{dv})} \cdot \sigma \quad [10]$$

Hierin is:

P = totale atmosferische druk in kN/m^2

Verder geldt:

$$q = A \cdot r \quad [11]$$

alsmede:

$$r = r_o - (C_w - C_{pd}) \vartheta \quad [12]$$

Hierin is:

r = verdampingswarmte bij ϑ °C in kJ/kg

r_o = verdampingswarmte bij 0 °C in kJ/kg = (2501)

C_w = soortelijke warmte van water in kJ/(kg·K) = (4,186)

C_{pd} = soortelijke warmte van waterdamp bij constante druk in kJ/kg·K.

Uit de formules 11, 08 en 07 volgt:

$$\frac{\alpha}{\sigma} = r \frac{(x_v - x)}{(\theta - \vartheta)} \quad [13]$$

De waarde van het quotiënt $\frac{\alpha}{\sigma}$ volgt uit een beschouwing van de wijziging in de enthalpie van $(1 + x)$ kg lucht met een temperatuur θ , wanneer deze lucht zonder warmtetoevoer van buitenaf, door verdamping van water bij een temperatuur ϑ wordt verzadigd en een watergehalte x_v verkrijgt. De enthalpie in de verzadigingstoestand van de lucht zal groter zijn dan in de begintoestand, aangezien het verdampte water $\Delta x = (x_v - x)$, de vloeistofwarmte $(x_v - x) \cdot C_w \cdot \vartheta$ in de lucht brengt. Hieruit volgt:

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = C_w \cdot \vartheta \quad [14]$$

Door uitwerking van bovenstaande gegevens kan men aantonen, dat voor het quotient $\frac{\alpha}{\sigma}$ uit formule 13 ook geschreven kan worden

$$\frac{\alpha}{\sigma} = (C_{p1} + C_{pd} \cdot x) \quad [15]$$

Hierin is:

C_{p1} = soortelijke warmte van droge lucht bij constante druk in kJ/(kg·K)

Formule 15 noemt men de relatie van Lewis.

Bij een gegeven stromingstoestand van de lucht zal het quotient $\frac{\alpha}{\sigma}$ constant zijn.

2.1.3.2 De natteboltemperatuur

De getalwaarde van x_v in de formule 13 wordt eenduidig bepaald door ϑ . Wanneer derhalve θ en x van de langstromende lucht bekend zijn, zal de temperatuur ϑ van het natte oppervlak in de stationaire toestand, gezien de constantheid van $\frac{\alpha}{\sigma}$, slechts één bepaalde, van θ en x afhankelijke waarde kunnen aannemen. Men noemt die waarde ϑ , de natteboltemperatuur van de lucht. De naam natteboltemperatuur is ontleend aan de aanwijzing van een vloeistofthermometer, waarvan het vloeistofreservoir omgeven is door een nat lapje. De voorwaarden voor een correcte meting zijn:

- afscherming tegen straling en
- zorg voor een luchtsnelheid \geq 2,5 m/s langs het meetelement

Bij lagere luchtsnelheden wordt een iets te hoge waarde van ϑ gemeten.

Ter onderscheiding heet θ de drogeboltemperatuur van de lucht. $(\theta - \vartheta)$ is het zogenaamde psychrometrische temperatuurverschil van de lucht.

De lijnen met constante natteboltemperatuur (ϑ - constant) zijn ook in het Mollierdiagram aangegeven. Zij zijn geconstrueerd met behulp van formule 14. Door een eenvoudige meting van de drogeboltemperatuur en de natteboltemperatuur is de toestand van de lucht in het Mollierdiagram volledig bepaald.

Voor een berekening van de partiële dampdruk en de relatieve vochtigheid van de lucht uit waarnemingen van de drogeboltemperatuur en de natteboltemperatuur, wordt vaak gebruik gemaakt van de zogenaamde psychrometerformule. Deze kan worden afgeleid uit de formules 15, 13, 10, 09 en 08. Zij luidt:

$$P_d = P_{dv} - C(\theta - \vartheta) \quad [16]$$

De factor C wordt de psychrometerconstante genoemd.

$$C = \frac{(C_{p1} + C_{pd} \cdot x)(P - P_{dv})}{0,622 \{r_o - (C_w - C_{pd}) \vartheta\}} \quad [17]$$

Voor courante droogluchtcondities is de waarde van C nagenoeg constant en bedraagt $0,067 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \pm 2,5 \%$. Formule 16 wordt dan:

$$P_d = P_{dv} - 0,067(\theta - \vartheta) \quad [16a]$$

Hierin is:

- P_d = partiële dampdruk in lucht van θ °C in kN/m^2
- P_{dv} = verzadigde dampdruk bij ϑ °C in kN/m^2
- θ = drogeboltemperatuur van de lucht in °C
- ϑ = natteboltemperatuur van de lucht in °C

De relatieve vochtigheid kan vervolgens worden berekend met formule 03.

2.1.3.3 De droogsnelheid

Uit de formules 07 en 11 volgt:

$$A = \frac{\alpha}{r} (\theta - \vartheta) \quad [18]$$

De waarde α in formule 18 is afhankelijk van de langs het beschouwde oppervlak stromende lucht. Voor luchtsnelheden tussen 0,3 en 3 m/s blijkt bij benadering de volgende relatie te gelden:

$$\alpha = C (1,32 + 1,30 v) \quad [19]$$

Hierin is:

C = constante

v = luchtsnelheid in m/s

Bij de droging van voorwerpen zal de verdampingssnelheid per oppervlakte-eenheid in het algemeen van plaats tot plaats aan het oppervlak variëren, als gevolg van verschillen in aanstroomrichting en snelheid van de lucht. De droogsnelheid van de voorwerpen als geheel blijft in de periode van oppervlakteverdamping echter evenredig met het psychrometrische temperatuurverschil.

Voor de berekening van de invloed van de per vormling en per tijdseenheid toegevoegde hoeveelheid lucht V op de droogsnelheid van de vormlingen als geheel blijft de benaderingsformule 19 in het algemeen bruikbaar, wanneer men voor de snelheid v het quotiënt $\frac{V}{a}$ substitueert. De constanten C en a kunnen voor een gegeven ondersteunings- en groepeeringswijze van de vormlingen in de droger en een gegeven stromingswijze van de lucht, langs experimentele weg worden bepaald.

In de periode van oppervlakteverdamping treedt in het algemeen droogkrimp op. De voor verdamping beschikbare oppervlakte van een voorwerp zal daarbij kleiner worden. De procentuele afneming van de droogsnelheid per vormling is gelijk aan de procentuele oppervlaktevermindering.

Uit het bovenstaande volgt, dat de droogsnelheid per vormling in de periode van oppervlakteverdamping hoger zal zijn naarmate:

- het psychrometrische temperatuurverschil van de drooglucht en de hoeveelheid drooglucht, die per tijdseenheid en per artikel wordt toegevoerd, groter is.
- een groter deel van het oppervlak van de afzonderlijke voorwerpen actief betrokken is bij het verdampingsproces.

2.1.3.4 De waterbeweging in een drogende klei

De waterbeweging in een drogende klei blijkt beschreven te kunnen worden met de relatie van Fourier. Voor een monodimensionale waterbewe-

ging geldt:

$$\Phi = -k \cdot \rho' \cdot \frac{dW}{dy} \quad [20]$$

Hierin is:

Φ = massastroomdichtheid in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

k = vochtgeleidingscoëfficiënt in m^2/s

ρ' = volumieke massa van de klei, uitgedrukt in kg droge klei per m^3 vochtige klei (kg/m^3)

W = watergehalte van de klei uitgedrukt in kg water per kg droge klei (kg/kg)

$\frac{dW}{dy}$ = vochtgradiënt, dat wil zeggen het verschil in watergehalte W per lengte-eenheid in de richting y van de waterbeweging (m^{-1})

Voor een planparallele plaat vochtige klei, met een halve dikte gelijk aan r m, waaruit beiderzijds aan de oppervlakte water verdampt met een constante snelheid van A $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, kan de watergehalteverdeling in de plaat met behulp van formule 20 worden afgeleid. Na een aanloopperiode waarin de vochtgradiënten zich tot evenwichtswaarden ontwikkelen, blijkt de watergehalteverdeling parabolisch te zijn.

De vochtgradiënt aan het oppervlak is dan:

$$\frac{dW}{dy} = \frac{A}{k \cdot \rho'} \quad [21]$$

Het verschil tussen het watergehalte W_k in kg/kg in de kern van de plaat en het watergehalte W_o in kg/kg aan het oppervlak bedraagt:

$$(W_k - W_o) = \frac{A \cdot r}{2 k \cdot \rho'} \quad [22]$$

Het gemiddelde watergehalte W_p in kg/kg van de plaat is gelijk aan:

$$W_p = W_o + \frac{2}{3} (W_k - W_o) \quad [23]$$

In het geval dat de dikte van een plaat klei ($\rho' = 1600 \text{ kg}/\text{m}^3$), bijvoorbeeld 50 mm is en de vochtgeleidingscoëfficiënt $10 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

bedraagt, zal bij een verdampingssnelheid van $100 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in de evenwichtssituatie een verschil in watergehalte tussen kern en oppervlak ontstaan van circa 0,07 kg/kg.

De getalwaarde van k is in de eerste plaats afhankelijk van de afmetingen van de poriën in de klei-watermassa. Naarmate de poriën wijder zijn, wordt het vochtgeleidingsvermogen van de klei beter. De poriëngrootte wordt bepaald door de mineralogische en granulometrische opbouw van de klei, alsmede door het watergehalte.

De vochtgeleidingscoëfficiënt k blijkt verder rechtevenredig te zijn met het quotiënt $\frac{\sigma}{\eta}$, waarbij

σ = oppervlaktespanning van het water in de grondstof in N/m

η = dynamische viscositeit van het water in $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$.

Het quotiënt $\frac{\sigma}{\eta}$ is sterk temperatuurafhankelijk. Bij benadering geldt voor water:

$$\frac{\sigma}{\eta} = 42 + 1,65 \vartheta \quad (\text{m/s}) \quad [24]$$

ϑ is in deze formule de temperatuur van de vochtige grondstof in $^{\circ}\text{C}$.

Aangezien vochtige klei tijdens het droogproces de natteboltemperatuur van de lucht aanneemt, wordt de grootte van de vochtgradiënten in de klei op grond van het bovenstaande mede bepaald door de natteboltemperatuur van de drooglucht.

Bij de droging van keramische voorwerpen, die de meest verschillende vormen en afmetingen kunnen bezitten, is de waterbeweging dikwijls driedimensionaal en is bovendien de verdampingssnelheid per oppervlakte-eenheid niet voor alle delen van het voorwerp gelijk en constant. De aan de formules 20 tot en met 23 te ontleen inzichten blijven in principe echter bruikbaar.

2.1.4 Verdamping in de poriën van een produkt

De beschrijving van de warmte en stofoverdracht in de tweede fase van het droogproces, waarin de verdamping in de poriën plaatsvindt (zie

1.1.2.3), is alleen mogelijk bij een vergaande simplificatie van de werkelijkheid. Vooral voor wat betreft het verloop van de temperatuurgradiënt en de vochtgradiënt in het produkt tijdens deze droogfase, moet bij een mathematische benadering van het probleem van een eenvoudige voorstelling van zaken worden uitgegaan. Deze benaderingswijze blijft hier buiten beschouwing.

Uit experimenteel onderzoek naar de waterverdamping in de tweede droogfase kunnen de volgende algemene conclusies worden getrokken.

a. De droogsnelheid neemt bij dalend restwatergehalte en constante droogcondities voortdurend af.

b. Het droogsnelheidsverloop is afhankelijk van de dikte van de produkten.

c. Het droogsnelheidsverloop is afhankelijk van het vochtadsorptiegedrag van de gebruikte grondstof (zie 1.1.3). De droogsnelheid wordt nul, wanneer het restwatergehalte gedaald is tot het evengewichtswatergehalte, behorende bij de temperatuur en vochtigheid van de drooglucht.

d. Het gemiddelde watergehalte, waarbij de periode van verdamping in de poriën inzet, blijkt hoger te liggen, naarmate de droogsnelheid in de periode van oppervlakteverdamping, als gevolg van een bepaalde keuze van de droogcondities, hoger is en naarmate het produkt dikker is (zie 2.1.3.4).

e. De droogsnelheid blijkt voor elk restwatergehalte bij ruwe benadering ongeveer rechtevenredig te zijn met het psychrometrisch temperatuurverschil van de drooglucht.

f. De droogsnelheid blijkt minder sterk afhankelijk te zijn van de luchtsnelheid langs het oppervlak, dan in de periode van verdamping aan het oppervlak. Naarmate de droging vordert, wordt de invloed van de luchtsnelheid steeds geringer.

Uit het bovenstaande volgt, dat in de periode van verdamping in de poriën het opvoeren van de luchttemperatuur de meest effectieve methode is voor het verhogen van de droogsnelheid. Luchtsnelheidsvermeerdering sorteert weinig effekt.

2.1.5 Uitvoering van het droogproces

2.1.5.1 Inleiding

Het droogproces zal tegen aanvaardbare exploitatiekosten een gedroogd halffabrikaat van de gewenste kwaliteit moeten opleveren.

Het restwatergehalte van gedroogd massagoed en gedroogde voorwerpen, alsmede de constantheid daarvan, moeten voldoen aan eisen, die er in een volgend fabricagestadium aan worden gesteld. Het restwatergehalte wordt bij voorkeur uitgedrukt in gewichtsprocenten van de droge stof.

Gedroogde voorwerpen zullen daarenboven geen uitwendige en inwendige scheuren mogen vertonen of vervormd (bijvoorbeeld kromgetrokken) mogen zijn.

Lage exploitatiekosten vereisen naast een gering verbruik aan hulpstoffen en energie en geringe kosten voor onderhoud en bediening van de droger, zo laag mogelijke investeringen. Aan deze laatste eis kan worden voldaan, wanneer compacte installaties in een eenvoudige uitvoeringsvorm toegepast worden. Er zal daarom, met behoud van de kwaliteit van het gedroogde produkt, gestreefd moeten worden naar de toepassing van korte droogtijden bij een zo groot mogelijke produktbezetting per bouweenheid.

Het spreekt vanzelf, dat ter droging aangeboden voorwerpen gaaf van vorm, oppervlak en structuur moeten zijn.

Het beginwatergehalte, eveneens bij voorkeur uitgedrukt in gewichtsprocenten van de droge stof, wordt zo laag en zo constant mogelijk gehouden. Het is in sterke mate afhankelijk van de grondstofsamenstelling en van de bewerking voorafgaand aan het droogproces.

2.1.5.2 Luchtconditioneringsprincipes

De droogsnelheid van een produkt kan worden geregeld, door het variëren van de drogeboltemperatuur en de natteboltemperatuur van de lucht, die op het produkt toestroomt (zie 2.1.3.3 en 2.1.4). Het toe te passen verloop van de genoemde condities met de tijd noemt men het droogregime. De conditionering komt tot stand door verwarming, menging of bevochtiging van de lucht, dan wel door combinaties van deze maatregelen.

De bijbehorende toestandsveranderingen kunnen in het Mollierdiagram worden aangegeven.

Een verwarming loopt bij $x = \text{constant}$, terwijl op de toestandsverandering die bij menging optreedt, de mengregel van toepassing is.

Bevochtiging vindt plaats wanneer de lucht over een drogend produkt stroomt. Als men de meestal relatief kleine warmteverliezen van de lucht, via bijvoorbeeld de wanden van de droger, buiten beschouwing laat, verloopt de bevochtiging in de stationaire toestand bij constante natteboltemperatuur (formule 14, lijnen $\vartheta = \text{constant}$).

De procesbesturing vindt in de praktijk naar keuze door handbediening of door een volautomatische instelling van de regelorganen van de drooginrichting plaats. Figuur 2.1b toont een automatische regelinstallatie voor een batterij droogkamers. Men ziet in deze figuur onder meer de programmeurs van de afzonderlijke kamers.

2.1.5.3 Ongelijkmatigheid van de droging binnen een groep produkten

Wanneer de drooglucht zoals zo vaak het geval is, door een groep produkten stroomt, die tegelijkertijd worden gedroogd, kan de lucht in het algemeen alleen in het aanstroomtraject naar die groep worden geconditioneerd. Op haar weg door de groep neemt het psychrometrisch temperatuurverschil van de lucht af door bevochtiging tengevolge van waterverdamping. Daardoor wordt ook de droogsnelheid van de produkten afzonderlijk, gezien in de richting van de luchtstroom kleiner. Als gevolg hiervan zijn de produkten aan de aanvoerzijde van de lucht eerder droog en constateert men bij het afbreken van het droogproces verschillen in het restwatergehalte. Het droogproces moet voortgezet worden tot deze verschillen aanvaardbaar zijn, hetgeen in de praktijk soms een aanzienlijke droogtijdverlenging tot gevolg heeft.

De ongelijkmatigheid in de droging kan worden verminderd door het beperken van de afmetingen van de groep in de hoofdstromingsrichting van de lucht, door het vergroten van het luchttransport door de groep of bijvoorbeeld door periodieke omkering van de luchtstromingsrichting.

Vershillen in de droogsnelheid en restwatergehalte kunnen ook

veroorzaakt worden door verschillen in de hoeveelheid lucht, die plaatselijk langs de vormlingen stroomt. Aan de hand van modelproeven kunnen maatregelen getroffen worden die resulteren in een betere luchtverdeling.

2.1.5.4 De stromingswijze van de drooglucht

In de meeste convectiedrogers vindt de warmte-overdracht en het damptransport door gedwongen convectie plaats. De luchtbeweging ontstaat daarbij door drukverschillen in de droogruimte, die mechanisch, bijvoorbeeld met ventilatoren, teweeggebracht worden.

De voorkeur voor een bepaalde stromingswijze van de lucht hangt in het bijzonder bij de droging van voorwerpen, ten nauwste samen met de vorm, de afmetingen, de ondersteuning en de groepering van die voorwerpen.

Er moet gezorgd worden voor:

- een zo effectief en flexibel mogelijk gebruik van de beschikbare ruimte in de droger;
- goede conditioneringsmogelijkheden van de lucht;
- een zo gelijkmatig mogelijke droging van elk van de delen van de afzonderlijke voorwerpen (zie 2.1.5.5);
- het activeren van het verdampingsproces, door er een zo groot mogelijk deel van de oppervlakte van de produkten in te betrekken (zie 2.1.3.3);
- het beperken van de verschillen in het droogsnelheidsverloop met de tijd van produkten die in groepsverband worden gedroogd, met behoud van een aanvaardbaar warmteverbruik (zie 2.1.5.3).

De stroming door een groep produkten maakt dikwijls deel uit van een circulatiestroming. Daarbij wordt een deel van de lucht, die op haar weg door de groep vocht heeft opgenomen, gerecirculeerd en gemengd met zoveel verse drooglucht, dat een mengsel ontstaat, dat na een eventuele additionele verwarming wederom de gewenste droogcondities bezit (zie rekenvoorbeeld mengregel in 2.1.2.4). Recirculatie is derhalve een conditioneringsmethode.

Recirculatie vindt plaats door:

- Uitwendige circulatie. Ventilatoren buiten de eigenlijke droogruimte onderhouden daarbij een "geleide" circulatiestroming.
- Inwendige circulatie. Meestal vrij aanzuigende en uitblazende ventilatoren tussen de drogende produkten, doen een "vrije" circulatiestroming in de droogruimte ontstaan.
- Straalvermenging. Gerichte vrije luchtstralen van hoge snelheid, bijvoorbeeld uit spuitstukken, zuigen lucht uit de omgeving aan en veroorzaken een "vrije" circulatiestroming. Door het gericht zijn van de luchtstroming over een bepaalde afstand vanaf het spuitstuk, worden voor warmte- en stofoverdracht moeilijk toegankelijke plaatsen bereikbaar (bijvoorbeeld holten in voorwerpen).

De luchtbeweging behoeft niet steeds constant van richting en sterkte te zijn. Zo wordt bijvoorbeeld periodieke omkering van de stromingsrichting toegepast (zie 2.1.5.3).

Groepen produkten kunnen ook intermitterend aangeblazen worden. Daarbij wordt periodiek de tussen de produkten aanwezige vochtige lucht weggespoeld en vervangen door verse lucht met een hogere drogeboltemperatuur. De droogsnelheid schommelt dan rond een veilige gemiddelde waarde. Bij een goede uitvoeringswijze van dit systeem verloopt de droging in de groepen gelijkmatig.

Bij de droging van geperforeerde en holle produkten die doorstroomd kunnen worden, dient de luchtstroom bij voorkeur door een aangepaste onderlinge rangschikking van de produkten, zodanig geleid te worden, dat ook of dat uitsluitend de binnenwanden van de produkten als verdampend oppervlak fungeren.

In sommige droogsystemen vindt de warmtetoevoer naar het produkt door natuurlijke convectie plaats. De luchtbeweging ontstaat daarbij door dichtheidsverschillen in de luchtmassa in de droger, die in stand gehouden worden door een warmtebron die zich onder of naast groepen drogende vormlingen bevindt. Ten opzichte van drogers met gedwongen convectie is de luchtconditionering bij toepassing van natuurlijke convectie gebrekkig. De droging verloopt meestal ongelijkmatig, als

gevolg waarvan de droogtijden lang zijn. Het krachtverbruik is uiteraard gering.

2.1.5.5 De toelaatbare droogsnelheid

Tijdens de droging zullen voorwerpen scheuren gaan vertonen en/of deformeren, wanneer de vochtgradiënten en watergehalteverschillen (zie formules 21 en 22), die gepaard gaan met verschillen in de plaatselijke contractie van de klei, bij het opvoeren van de droogsnelheid te groot worden. Watergehalteverschillen, die het gevolg zijn van verschillen in de plaatselijke verdampingssnelheid aan het oppervlak van de produkten kunnen eveneens tot deformatie en scheurvorming aanleiding geven. Een gelijkmatige droging van de produkten afzonderlijk is daarom van belang (zie 2.1.5.4).

De bij een gegeven gemiddeld watergehalte en onder gegeven drogomstandigheden ter waarborging van de kwaliteit nog juist veilig bevonden droogsnelheid per vormling, noemt men de maximaal toelaatbare droogsnelheid onder de gegeven omstandigheden. Deze zal in het gehele te doorlopen watergehaltetraject groter zijn, naarmate de uit de waterbeweging in de klei voortvloeiende watergehalteverschillen kunnen worden beperkt.

Op grond van de formules 21 en 22 is dit onder meer mogelijk door de keuze van een grondstof met een hoge vochtgeleidingscoëfficiënt k . Ook een droging bij een hoog natteboltemperatuurniveau zal de maximaal toelaatbare droogsnelheid kunnen doen toenemen (zie 2.1.3.4). Hierbij wordt opgemerkt, dat de verwarming van koude produkten in een droger meestal gepaard gaat met condensvorming, met een thermische uitzetting van de in de klei eventueel aanwezige lucht en met het vrijkomen van aanvankelijk opgeloste gassen. Deze verschijnselen kunnen het beoogde effect te niet doen.

Door de grondstof reeds vóór de vormgeving met bijvoorbeeld stoom te verwarmen, kan men de genoemde moeilijkheden voorkomen. Bovendien verkrijgt men hierdoor een homogener klei-watremengsel, hetgeen het drooggedrag in het algemeen eveneens positief beïnvloedt.

Uit formule 22 blijkt ook de invloed van de halve scherfdikte r op de watergehalteverdeling in drogende voorwerpen. Deze invloed is zodanig, dat besparingen op de massa van een voorwerp, alsmede de zorg voor slechts geringe plaatselijke verschillen in het verdampend oppervlak per massa-eenheid bij het ontwerp van een produkt, in het algemeen tot een verhoging van de maximaal toelaatbare droogsnelheid leiden. Dit geldt ook wanneer het totale verdampend oppervlak door de genoemde maatregelen niet wordt vergroot. Uiteraard is het bovenstaande slechts mogelijk binnen de grenzen die door het gebruiksdoel van het produkt aan de dimensionering worden gesteld.

Bij afnemend watergehalte wordt de maximaal toelaatbare droogsnelheid meestal groter. Wanneer de droogkrimp aan het einde van de periode van verdamping aan de oppervlakte de eindwaarde heeft bereikt, is het produkt niet scheurgevoelig meer. Het psychrometrisch temperatuurverschil van de lucht kan dan worden opgevoerd, tenzij de droging in de eerste droogfase tot het ontstaan van grote watergehalteverschillen en plastische vervormingen heeft geleid. In dat geval kan ook in de laatste droogfase scheurvorming optreden. Deze kan het best bestreden worden door een correctie van de droogomstandigheden in het eerste droogstadium. Ook wanneer de gebruikte grondstof kleimineralen bevat, die bij het afgeven van adsorptiewater een nakrimp vertonen, blijft het produkt in de laatste droogfase scheurgevoelig en moet relatief langzaam worden nagedroogd.

Overigens zal de droogsnelheid in de laatste droogfase zelfs bij sterke vergroting van het psychrometrisch temperatuurverschil kleiner worden naarmate het restwatergehalte daalt, als gevolg van het terugtrekken van het droogfront in de poriën. Bij een droging van vormlingen in groepsverband dient men daarbij bedacht te zijn op het ontstaan van scheurvorming in de nog niet zover gedroogde, meer achterwaarts in de groep gesitueerde vormlingen.

De minimale droogtijd van een vormling resulteert uit het verloop van de maximaal toelaatbare droogsnelheid met het watergehalte, de totale hoeveelheid te verdampen water en de beperkingen in de keuze van de luchtcondities in de laatste droogfase. Zij kan langs experimentele weg worden vastgesteld.

2.1.5.6 Het warmte- en krachtverbruik

Ter beperking van het warmtegebruik van het droogproces is het van belang, dat de afgewerkte lucht de droger in een zo vochtig mogelijke toestand verlaat. Dit kan betekenen, dat in sommige fasen van het droogproces met mildere luchtcondities wordt gedroogd, dan ter voorkoming van schade aan het produkt noodzakelijk zou zijn, hetgeen de droogtijd doet toenemen.

Het warmteverbruik van drooginrichtingen ligt meestal tussen 4 en 5 MJ/kg verdampt water, exclusief de warmteverliezen bij het transport van warmte van een externe warmtebron naar de droger. Een deel van de benodigde warmte komt vaak als afvalwarmte van ovens ter beschikking.

Van het krachtverbruik kan geen algemeen geldende waarde worden genoemd. Het varieert afhankelijk van het type drogerij en de bedrijfsinterne omstandigheden zeer sterk.

2.1.5.7 De droogtijd

In het voorgaande zijn een aantal factoren besproken die van invloed zijn op de op industriële schaal toe te passen droogtijd.

De droogtijden kunnen variëren van enkele seconden, zoals bij het drogen van kleine granules in sproeidrogers, tot verscheidene dagen, zoals bij schadegevoelige metselsteen- of straatsteenvormingen in kamer- of tunneldrogers.

In het algemeen geldt, dat de droging van produkten als metselstenen, straatstenen, holle bouwstenen en dakpannen, vervaardigd uit Nederlandse kleien, langere droogtijden vergen dan de droging van bijvoorbeeld fijnkeramische produkten. Fijnkeramische produkten hebben meestal betere droogeigenschappen als gevolg van:

- een betere homogenisering van de massa;
- het gebruik van kleien met een relatief geringe totale droogkrimp en het ontbreken van een nakrimp;
- toevoegingen van niet-plastische materialen aan de klei (fijnge-malen kwarts, krijt, veldspaat, gebrande klei of chamotte);
- de dunwandigheid van veel fijnkeramische artikelen.

2.1.6 Convectiedrogers

2.1.6.1 Inleiding

De keuze van een drooginrichting voor keramische produkten vindt plaats op de grondslag van een gedetailleerd programma van eisen betreffende de bedrijfszekerheid, de investerings- en exploitatiekosten, de veiligheid, de flexibiliteit en de bediening van de gewenste installatie.

De installatie dient bovendien te passen in de inrichting van de gehele fabricage-eenheid. De investerings- en exploitatiekosten van de droger zijn bijvoorbeeld in betekenis ondergeschikt aan de totale exploitatiekosten van de fabricage-eenheid. Een relatief kostbare droogmethode kan om deze reden in bepaalde gevallen toch acceptabel zijn. De beschikbare plaatsruimte, de inrichting van de aangrenzende fabricage-afdelingen, de aanwezigheid van voor het droogproces geschikte warmtebronnen in de fabricage-eenheid, zijn mede van invloed op de keuze van het type installatie.

Men treft in de keramische industrie een grote verscheidenheid in typen en uitvoeringsvormen van convectiedrogers aan. Er zijn drogers voor het drogen van bepaalde voorwerpen en drogers voor massagoed. De vorm, de afmetingen, de hoedanigheid en de groeperingswijze van het produkt zijn van grote invloed op de uitvoeringsvorm.

Een ander, belangrijk onderscheidingskenmerk is de mobiliteit van het produkt tijdens de droging. Men kent de drogers waarin de voorwerpen of het massagoed in rusttoestand worden gedroogd (kamerdrogers) en drogers waardoor een continu dan wel intermitterend transport van het produkt plaatsvindt (tunneldrogers, paternosterdrogers, enz.).

Verder onderscheiden de toegepaste drogers zich van elkaar door de manier waarop de drooglucht wordt geconditioneerd en door de stromingswijze van de lucht.

Slechts enkele typen zullen hier nader worden besproken.

2.1.6.2 Kamerdrogers

In deze soort drogers verkeren de vormlingen tijdens de droging in rust. De produkten liggen in het algemeen op droogplaten of latten, die in rekken zijn geschoven of bijvoorbeeld met behulp van zogenaamde vingerwagens (figuur 2.1c) op richels in de wanden van rechthoekige ruimten (droogkamers) zijn geplaatst. Na het vullen van een kamer, wordt deze gesloten en wordt de lading met geconditioneerde lucht gedroogd. Zodra het gedroogde produkt uit de kamer is gehaald, kan de cyclus worden herhaald. Het vullen en ledigen van de droogkamers vindt op de bedrijven in het algemeen volgens hetzelfde dienstrooster plaats, dat wordt toegepast in de fabricagesector "vormgeving".

Een bijzondere groep vormen de zogenaamde ruimtedrogers. Deze bestaan uit één of enkele grote kamers, die plaatselijk kunnen worden geledigd en voorzien van een verse lading produkten, terwijl elders in dezelfde droogruimte het droogproces nog voortgang vindt.

De droogkamers vertonen onderling vooral verschillen in de stromingswijze van de drooglucht in de kamers en in de manier waarop de aan de kamerinzet toegevoerde lucht wordt geconditioneerd. Door accumulatie van warmte in de wanden van een droger in de laatste fase van een droogproces kan het droogregime in de eerste fase van een volgende droogcyclus ernstig worden verstoord. De constructies behoren daarom een lage warmtecapaciteit te bezitten.

Een voorbeeld van een ruimtedroger is afgebeeld in figuur 2.1d. Het betreft het type "Bylandt". De te drogen produkten, bijvoorbeeld straatstenen, worden hierin periodiek angeblazen met geconditioneerde lucht. De conditionering van vers toegevoerde warme lucht geschiedt door waterverdamping en inwendige circulatie. De temperatuur van de verse lucht is bepalend voor het natteboltemperatuurniveau waarop de droging plaatsvindt.

Wanneer het vak C1 reeds half droge en daardoor niet meer zo scheur-gevoelige stenen bevat, wordt warme lucht bij A1 in de zijgang gevoerd

en door de rijdende ventilator B3 tussen de stenen in C1 geblazen. Deze lucht neemt daarbij vocht op en wordt door de rijdende ventilator B1 met mildere condities aan de verse scheurgevoelige stenen in vak C2 toegevoerd. De afgewerkte lucht verlaat de droger dan bij D2. Zodra de vormlingen in vak C1 droog zijn worden deze vervangen door verse vormlingen. De warme lucht wordt dan in de zijgang bij A2 toegevoerd, waarbij de vormlingen in vak C2 worden nagedroogd. Deze cyclus wordt voortdurend herhaald.

In figuur 2.1e is een kamerdroger weergegeven, waarin de produkten, bijvoorbeeld stenen of dakpannen, eveneens periodiek worden angeblazen met geconditioneerde lucht. De conditionering geschiedt door inwendige circulatie. In het afgebeelde type ("Rotomixair") wordt gebruik gemaakt van vast opgestelde ronddraaiende cylinders, met een verticale spleet, waardoor met een ventilator aangezogen lucht tussen de zich aan weerszijden van de rotomixairapparaten bevindende lading wordt geblazen. De onderlinge afstand van de apparaten bedraagt circa 3,5 à 4 meter. De verse warme lucht wordt bij A ingevoerd en wordt, gemengd met vochtige lucht uit de omgeving, door de rotomixairapparaten aangezogen en in circulatie gebracht. Periodieke aanblazing van de produkten en conditionering door inwendige circulatie treft men in talrijke kamerdrogers aan (Canullo, Cairing, Carra, enz.).

Een voorbeeld van een kamerdroger met uitwendige circulatie en verwarming van de circulerende lucht vertoont figuur 2.1f. De ventilator V houdt de circulatiestroming in stand. De luchtverversing is regelbaar met de kleppen I en U. De lucht wordt verwarmd in de luchtverhitter L. Het afgebeelde type wordt gebruikt in de fijnkeramische industrie.

Overeenkomstige typen treft men in de grofkeramische industrie aan. In de figuren 2.1h, 2.1i en 2.1j zijn dergelijke drooginrichtingen, bestaande uit meerdere parallel geschakelde kamers (type Keller), weergegeven. In de uitvoeringsvormen 2.1h en 2.1i stroomt de drooglucht in horizontale richting door de lading, die op richels in de wanden van de kamer is afgezet. De droogkamer 2.1h is uitgerust met twee recir-

culatiecircuits. In droogkamer 2.1j is de stromingsrichting in de charge verticaal. De circulatiestroming wordt in stand gehouden door de ventilatoren (3). Door middel van met heet water gevoede luchtverhitters (4) wordt de gewenste droogluchttemperatuur ingesteld. De toevvoer van voorverwarmde verse lucht, alsmede de afvoer van door waterverdamping uit de charge vochtig geworden lucht, vinden plaats via de kanalen 5, 6 en 7. In dit type drogers wordt dikwijls een periodieke wisseling van de luchtstromingsrichting toegepast door bijvoorbeeld na elke tien minuten, de draairichting van de ventilatoren om te keren. Constructeurs van bovenbedoelde drogers zijn onder meer Aebi, Keller, Walter en Zehner.

2.1.6.3 Tunneldrogers

In tunneldrogers bevindt het te drogen produkt zich in het algemeen in droogrekken op railgebonden wagens of aan hangbanen. Het produkt wordt daarbij continu dan wel intermitterend door een tunnel gevoerd. Er zijn een groot aantal uitvoeringsvormen van dit type droger, dat voor de meest verschillende soorten produkt wordt toegepast. Dikwijls bestaat een tunneldrooginrichting uit meerdere parallelle tunnels. Soms is de tunnel U-vormig uitgevoerd, hetgeen compacte installaties oplevert met één centrale plaats voor de aan- en afvoer van de produkten. De hoofdstromingsrichting van de drooglucht in de tunnels kan tegengesteld zijn aan, gelijk zijn aan of loodrecht staan op de bewegingsrichting van het produkt. Men noemt deze drogers dan respectievelijk tegenstroomdrogers, gelijkstroomdrogers of kruisstroomdrogers.

Het tegenstroomprincipe wordt bijvoorbeeld toegepast wanneer in ruime mate afvalwarmte van ovens in de vorm van warme lucht ter beschikking staat. In figuur 2.1g is een eenvoudige tegenstroomtunneldroger geschetst. De warme lucht wordt hier aan de uitgang voor het produkt in de tunnel gevoerd en doorloopt deze in tegenstroom met het produkt. De lucht neemt daarbij vocht op en koelt af, zodat het aan de andere zijde aangevoerde verse produkt in aanraking komt met lucht met milde droogcondities. De vochtige lucht verlaat de installatie met een hoge verzadigingsgraad. De toestandsverandering die de lucht op haar tocht door

deze tunnel ondergaat, blijkt in het algemeen, behoudens een relatief klein warmteverlies, nagenoeg adiabatisch te verlopen (zie 2.1.5.2).

Ofschoon tunneldrogers in principe een continu doorvoer van het produkt vereisen, lenen in het bijzonder eenvoudige tegenstroomtunneldrogers zich ook voor een semi-continu-bedrijfsvoering. Hierbij wordt gedurende de normale diensturen overdag een continu of intermitterende stroom produkten door de tunnel gevoerd, terwijl de trein met produkten gedurende de rest van het etmaal stilstaat. Het effectieve droogregime op lengtebasis schuift nu gedurende een etmaal, bij een constante toevoer van warme lucht, in zijn geheel heen en weer tussen de uitgang en de ingang van de droger. De verschuiving is daarbij gelijk aan de treinlengte die buiten de normale diensturen zou zijn geleverd bij een continu doorvoer van produkt. Net als bij de kamerdrooginrichtingen dient bij toepassing van dit systeem gezorgd te worden voor een lage warmtecapaciteit van de constructie. Bij een volledige continu bedrijfsvoering geldt deze voorwaarde niet.

Er zijn ook tegenstroomdrogers met kruisstroomcircuits. Deze zijn flexibeler voor wat betreft de keuze van het droogregime. Soms dwingt ook de vorm en de groeperingswijze van de produkten tot een toepassing van kruisstroom, bijvoorbeeld bij de droging van staande gresbuizen in een tunneldroger.

Gelijkstroomdrogers worden nagenoeg altijd uitgerust met kruisstroomcircuits, waarin de lucht trapsgewijs wordt verwarmd. Door teruggewinning van de warmte in de hete vochtige afgewerkte lucht kan het warmteverbruik van deze drogers worden beperkt. Het specifiek luchtverbruik van deze drogers is gering.

2.1.6.4 Paternosterdrogers

Paternosterdrogers zijn evenals tunneldrogers installaties waarin het produkt tijdens het droogproces wordt voortbewogen. De naam is hierbij ontleend aan het transportmiddel, de paternoster. Dit is een transporteur die door een ketting wordt aangedreven en waarbij het draag-

orgaan, bijvoorbeeld een droogrek, zodanig aan de ketting is opgehangen, dat het vrij kan schommelen en zich naar de zwaartekracht kan instellen.

In figuur 2.1k is een paternosterdroger afgebeeld, die in de fijnkeramische industrie bijvoorbeeld wordt gebruikt voor het drogen van borden en schotels.

Het is een hoge gesloten kast, waarin een paternoster is opgesteld. Aan de zijde van het opgaande part van de paternoster bevindt zich onderaan een opening, waardoor de vormer de ledige vormen weg kan nemen en vormen met pas gevormde borden erop in de paternoster kan zetten. Aan de andere zijde is een opening, waardoor de "klaarmaker" de gedroogde borden van de vormen neemt om ze op zijn "poetstoer" af te werken. Door middel van de ventilator V wordt een circulatiestroming in de benen van de paternoster in stand gehouden, waarvan de hoofdstromingsrichting tegengesteld is aan de bewegingsrichting van de drogende borden (tegenstroomprincipe). Boven op het apparaat bevindt zich de regelbare uitlaat van het recirculatiesysteem. Verse lucht wordt aan de zuigzijde van de ventilator via de opening bij de vormer aangezogen. Het droogregime wordt voor wat betreft de temperatuur van de lucht, die vanuit de kamers B en C in de droger stroomt, ingesteld door middel van de luchtverhitter L. De regeling van de vochtigheidstoestand van de lucht geschiedt met de klep in de uitlaat.

2.1.6.5 Straaldrogers

Straaldrogers onderscheiden zich van andere drogers door de bijzondere stromings- en conditioneringswijze van de drooglucht (zie 2.1.5.4). In de fijnkeramiek worden straaldrogers gebruikt voor het drogen van holle artikelen, zoals pas gevormde koppen, kommen, bekers en dergelijke. In elk van de te drogen produkten wordt een straal warme lucht geblazen. Hiermee wordt bereikt, dat de holle voorwerpen gelijkmatiger aandrogen, dan wanneer de drooglucht alleen langs de artikelen gevoerd zou worden. Het beginsel is verduidelijkt in figuur 2.1m.

De drogers zijn dikwijls uitgevoerd als zogenaamde carouseldrogers. Het zijn cilindervormige apparaten. In het hart van de buitenmantel draait om een verticale as een binnencylinder, waaraan boven elkaar

vier plateaus zijn bevestigd. De plateaus bieden plaats aan gipsvormen met bijvoorbeeld kopjes. De plateaus zijn voor het vullen en ledigen toegankelijk via een opening in de buitenmantel. Bij de uitvoeringsvorm in figuur 2.1m bevindt zich boven elk plateau een aan de buitenmantel bevestigde doos, waaruit door openingen aan de onderzijde lucht in de kopjes wordt geblazen. De binnenmantel wordt periodiek over een zodanige hoek gedraaid, dat telkens precies in de kopjes wordt gespoten. Na één rondgang worden de vormen met gedroogde koppen uitgenomen en worden verse ingezet.

Een ander in de fijnkeramische industrie gebruikt type straaldroger is de straaldroogband. Het is een droogtunnel van plaatijzer, waardoor een transportband van bijzondere constructie loopt. Figuur 2.1.1 toont schematisch een verticale dwarsdoorsnede over een tunnel met bovenin het dragende deel van de band met drogende kopjes en onder het leeg teruglopende part. De natte artikelen worden aan de ene zijde van de tunnel op opzetschotels geplaatst en aan de andere zijde van de tunnel droog afgenomen. De verse warme drooglucht wordt aan de zijkan- ten van de tunnel toegevoerd onder het dragende part van de band. De lucht stroomt door de middenbuizen van de opzetschotels de kopjes binnen en ontwijkt door perforaties in de schotels. De vochtige lucht wordt afgevoerd aan de open einden van de tunnel.

Ook in de grofkeramiek worden straaldrogers toegepast, bijvoorbeeld voor het drogen van holle produkten zoals gresbuizen.

2.1.6.6 Sproeidrogers

De voorgaande drogertypen hadden betrekking op het drogen van kera- mische voorwerpen. De sproeidroger is een apparaat waarmee massa's kun- nen worden gedroogd. Sproeidrogen is een granuleertechniek, waarbij een suspensie van grondstoffen en water, waaraan eventueel bindmiddelen zijn toegevoegd, in fijne druppeltjes wordt verdeeld, die vervolgens in een convectiedroogstelsel tot ronde bolletjes, granules genaamd, worden gedroogd.

Het granuleren is een belangrijk onderdeel van het droogpersprocedé. Het granulaat uit een sproeidroger is door de bolvorm van de granules gemakkelijk te doseren, vult de persmatrijzen homogeen en laat zich goed verdichten.

In figuur 2.1n is een sproeidroger afgebeeld. De suspensie wordt door een omhoog gericht spuitstuk verstoven. Het droogmedium, bijvoorbeeld gassen van circa 250 °C, geleverd door een met aardgas gestookte directe luchtverhitter, wordt aan de bovenzijde van de droogruimte binnengeleid. De druppels beschrijven spiraalvormige banen in de droogruimte en worden in de lucht gedroogd. De gedroogde granules worden onder in de droogruimte opgevangen. De uitgaande gasstroom wordt door een cycloon geleid voor het opvangen van de kleinste granules.

In andere typen wordt de suspensie door middel van een roterende schijf boven in de droogruimte radiaal in druppelvorm weggeslingerd.

Het eerstgenoemde type levert in het algemeen kleinere granules op dan het laatstgenoemde.

Op grond van het door verstuiving verkregen grote oppervlak per massa-eenheid water, is de droogtijd kort, 5 à 10 seconden. Grotere granules vergen een langere droogtijd, dus een langere vrije vlucht dan kleinere. Voor het verkrijgen van grote granules zijn dan ook grotere installaties nodig dan in het geval dat kleine granules gewenst zijn.

Diameters van de droogruimte van 5 meter en hoogten van 3 meter zijn normaal. De normale granule-grootte is 50 to 350 µm. Er zijn thans sproeidrogers met verdampingscapaciteiten tot 6000 kg water per uur.

Figuur 2.1o toont een granulaat uit een sproeidroger naast een langs andere weg vervaardigd perspoeder.

Het droogproces van suspensiedruppels komt overeen met dat van plastische grondstoffen en voorwerpen. Het wordt gekenmerkt door een periode met verdamping aan de oppervlakte, tijdens welke de granule krimpt, gevolgd door een periode waarin de droging in de poriën plaatsvindt (zie 1.1.2.3).

Door een te snelle droging in de eerste fase kan een zodanig grote vochtgradiënt in de granule ontstaan, dat deze een broze verharde bui-

tenhuid verkrijgt die niet verder krimpt. Door de zuigkracht van de capillairen groeit deze broze schaal dan van buiten naar binnen aan, waarbij de granule kan imploderen. Er ontstaan in dat geval holle ingedeukte granules. Door temperatuurverlaging van het droogmedium, verlenging van de droogweg en een juiste bindmiddelkeuze kan het imploderen worden voorkomen.

Aangezien het warmteverbruik van de installatie in hoofdzaak wordt bepaald door de hoeveelheid te verdampen water is het van belang het vastestofgehalte in de suspensie zo hoog mogelijk te kiezen.

Het blijkt in industriële installaties mogelijk zowel het restwatergehalte, als de granulegrootte en de volumieke massa van het granulaat op de gewenste waarde in te stellen en te handhaven.

De sproeidroogtechniek werd ontwikkeld ten behoeve van de fabricage van melkpoeder en andere voedingsmiddelen. Het sproeidrogen werd in de keramiek het eerst toegepast voor de vervaardiging van electrokeramiek en vindt thans ook op grote schaal toepassing in de fijukeramische industrie.

2.1.7 Andere droogsystemen

2.1.7.1 Inleiding

Behalve convectiedrogers worden in de keramische industrie, zij het op veel kleinere schaal, ook andere droogsystemen, zoals contactdroging, stralingsdroging en hoogfrequentdroging toegepast.

2.1.7.2 Contactdroging

De warmtetoevoer naar het drogende produkt vindt bij contactdroging door geleiding plaats. Contactdroging wordt voornamelijk toegepast voor het drogen van grondstoffen.

Een voorbeeld is de walsdroger, die gebruikt kan worden voor het drogen van kleisuspensies. Hierbij voeren inwendig met stoom verhitte walsen door geleiding warmte toe aan een op de walsen aangebracht natte kleifilm, waaruit het water verdampt. De droge film wordt vervolgens van de walsen geschraapt.

Het warmtetransport door geleiding kan ook in droogsystemen, waar de warmte-overdracht hoofdzakelijk door convectie plaatsvindt, bijdragen tot de waterverdamming. Men denke aan het gebruik van al dan niet geperforeerde stalen platen en profielen ter ondersteuning van de produkten. De door convectie aan deze ondersteuningsmiddelen toegevoerde warmte wordt door middel van geleiding naar het drogende produkt gevoerd.

2.1.7.3 Stralingsdroging

In stralingsdrogers vindt de aanvoer van warmte voor de verdamping van het water in het produkt plaats door middel van straling. Stralingsdrogers noemt men ook wel infrarooddrogers. Als stralingsbronnen kunnen behalve infraroodlampen ook verhitte metalen of keramische vlakken gebruikt worden.

Electromagnetische straling plant zich rechtlijnig voort. De toepassingsmogelijkheid van deze droogmethode is daarom afhankelijk van de vorm van het te drogen produkt en van de groeperingswijze van het produkt ten opzichte van de stralingsbron.

Bij het gebruik van straling voor de warmte-overdracht zijn in het algemeen hoge verdampingssnelheden bereikbaar, wanneer het produkt deze althans zonder schade kan verdragen. Gezien de relatief hoge energiekosten komt dit droogstelsel alleen in aanmerking, wanneer de realiseerbare droogtijd in vergelijking met convectiedroogsystemen tot een compacte eenvoudige installatie leidt. Men denke bijvoorbeeld aan de nadroging van dunne vlakke produkten op een band. Voor de afvoer van de gevormde waterdamp wordt wederom lucht gebruikt.

Wanneer de temperatuur van deze lucht lager wordt gekozen dan de oppervlaktetemperatuur die het produkt door straling verkrijgt, zal de door straling toegevoerde warmte niet optimaal voor waterverdamming worden gebruikt. Een deel van de stralingswarmte zal als voelbare warmte afvloeien naar de lucht. Het proces zal bovendien trager verlopen, dan wanneer warme lucht van bijvoorbeeld 100 °C als transportmedium wordt toegepast en de droging in een afgesloten ruimte plaatsvindt. Deze laatste werkwijze verdient in het algemeen dan ook de voorkeur.

2.1.7.4 Hoogfrequentdroging

Wanneer een elektrische wisselstroom van hoge frequentie (bijvoorbeeld 10 MHz) door een materiaal met een laag geleidingsvermogen wordt geleid, verdeelt de stroom zich gelijkmatig over de doorsnee. Van dit effect wordt gebruik gemaakt om slecht geleidende stoffen snel en gelijkmatig te verwarmen. Men noemt dit type hoogfrequent-verwarming, diëlectrische verwarming.

Vochtige keramische materialen zijn slecht geleidend en kunnen derhalve in principe op deze wijze worden verwarmd en gedroogd. Het materiaal of artikel bevindt zich daarbij tussen de platen van een condensator. De investeringskosten en de energiekosten van een hoogfrequent-verwarmingsinstallatie zijn echter dermate hoog, dat de industriële toepassing van hoogfrequentdroging in de keramiek nog in een experimenteel stadium verkeert en alleen in bijzondere gevallen in aanmerking zal kunnen komen.

LITERATUR

- | | | |
|-------------|--|--|
| A.W. Lykow | "Experimentelle und theoretische Grundlagen der Trocknung" | V.E.B. Verlag Technik, Berlin. |
| E. Krause | "Technologie der Grobkeramik, Band 2 und 3" | V.E.B. Verlag für Bauwesen, Berlin. |
| W. Häussler | "Lufttechnische Berechnungen im Mollier-i, x-Diagramm" | Verlag Theodor Steinkopf, Dresden. |
| R.W. Ford | "Institute of Ceramics, Textbook series nr. 3, Drying" | Maclaren and Sons Ltd., London, England. |
| K. Masters | "Spray Drying" | Leonard Hill Books, London, International Textbook Company Ltd., London. |

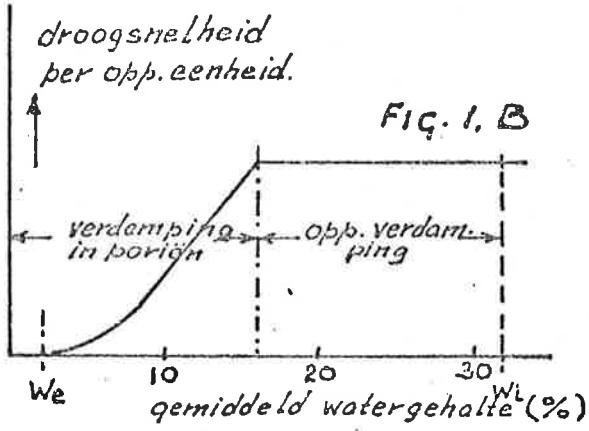


FIG. 1, B

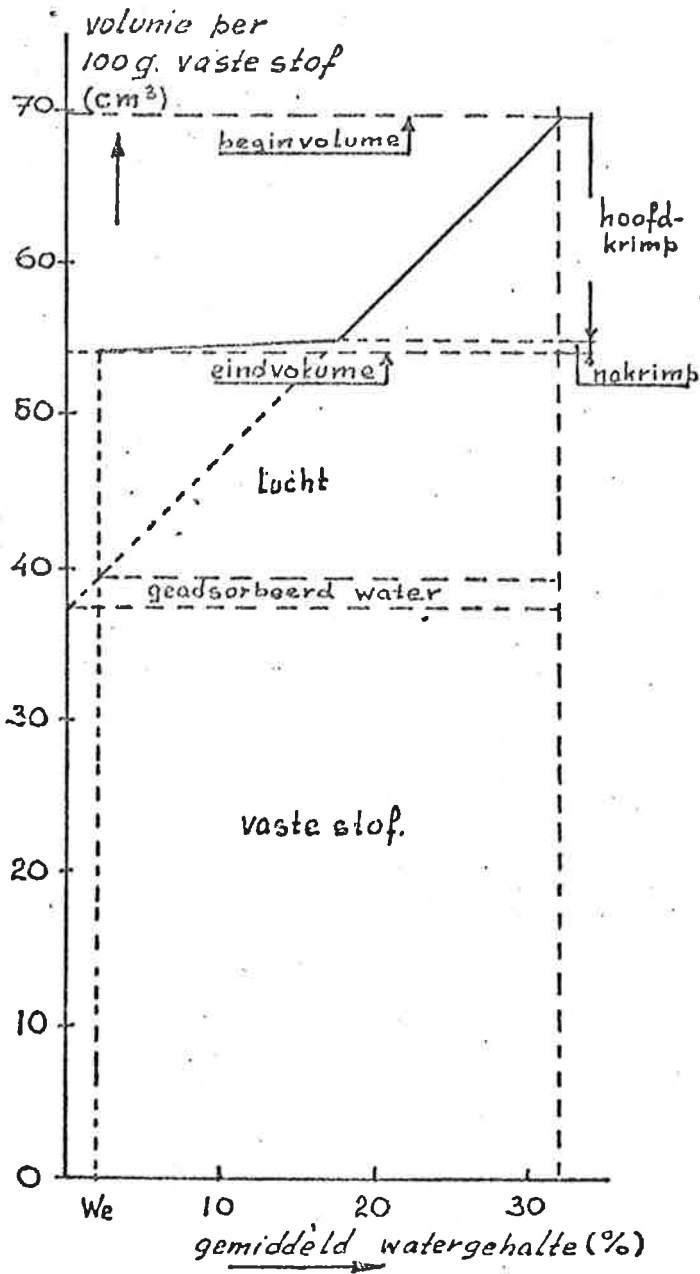


Fig. 1, C verloop van droogproces bij constante uitwendige condities.

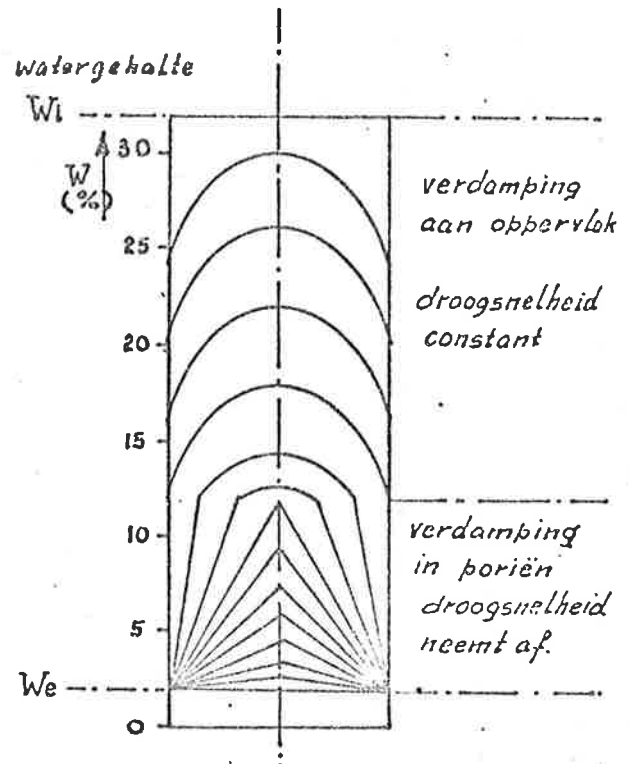


FIG 1, A schématische aanduiding van watergehalte verdelingen in een drogende plaat klei na gelijke tijdsintervallen bij constante uitwendige droogcondities.

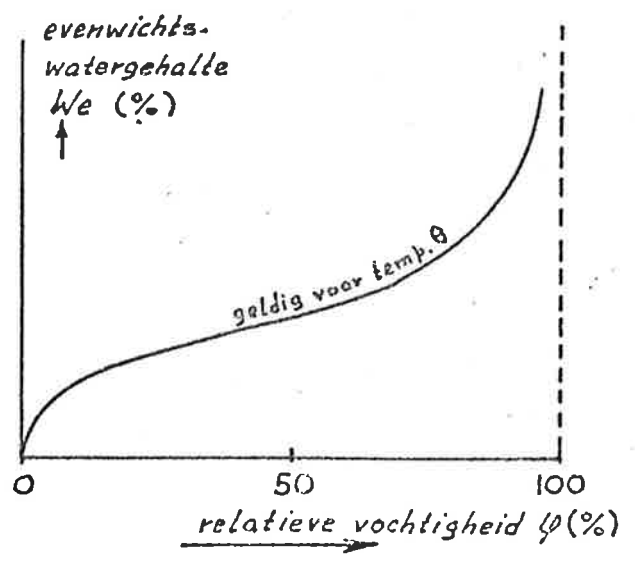


Fig 1, D algemene gedaante van een desorptie-/adsorptie - isotherm

schaalwaarden: horizontaal x: 1mm = 1 kJ/kg
 formaat A3 vertikaal h: 1mm = 0,2 g/kg
 Symbolen en eenheden
 h = enthalpie per kg droge lucht kJ/kg
 tov lucht en water van 0°C
 x = watergehalte per kg droge lucht g/kg
 θ = luchttemperatuur °C
 φ = natte bol-temperatuur %
 φ = relatieve vochtigheid %
 V_m = massiek volume per kg vochtige lucht m³/kg
 P_d = partiële dampdruk kN/m²
 P_{dV} = verzadigde dampspanning kN/m²

--- constant
 - - - - - V_m constant
 - - - - - φ constant

$$h = (C_{pl} + C_{pd})\theta + r_0 x$$

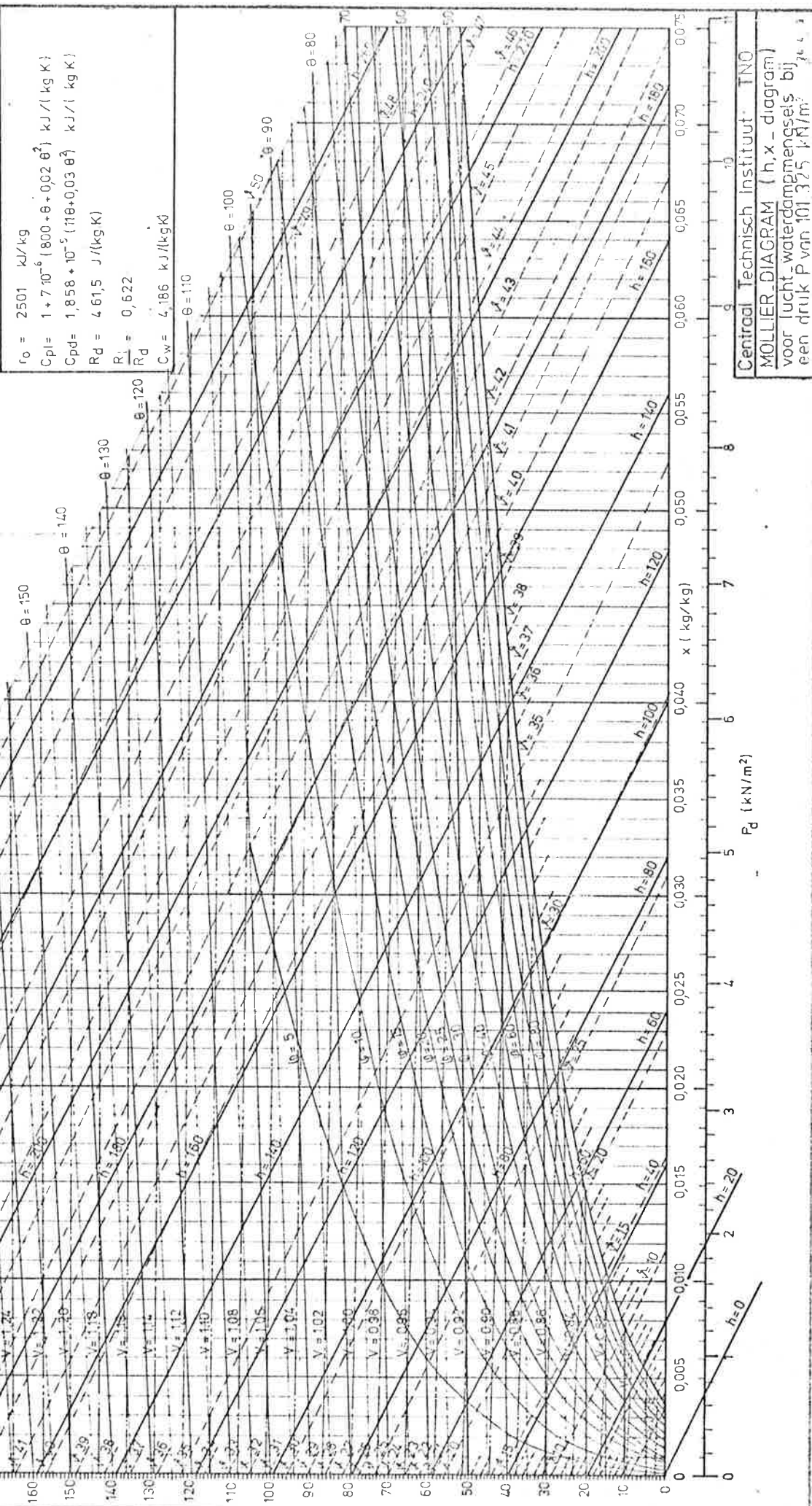
$$x = \frac{0,622 \cdot 10^{-2} \cdot P_{dV}}{P - \varphi \cdot 10^{-2} \cdot P_{dV}}$$

$$V_m = \frac{(x + 0,622) R_d}{(1 + x) P}$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \varphi \cdot C_w$$

$$\theta = 180$$

r₀ = 2501 kJ/kg
 C_{pl} = 1 + 7 · 10⁻⁶ (800 + θ + 0,02 θ²) kJ/(kg K)
 C_{pd} = 1,858 · 10⁻⁵ (11θ + 0,03 θ²) kJ/(kg K)
 R_d = 461,5 J/(kg K)
 R_l = 0,622
 R_d
 C_w = 4,186 kJ/(kg K)



Centraal Technisch Instituut TNO
 MOLLIER-DIAGRAM (h, x - diagram)
 voor lucht-waterdampmengsels bij
 een druk P van 101,325 kN/m²

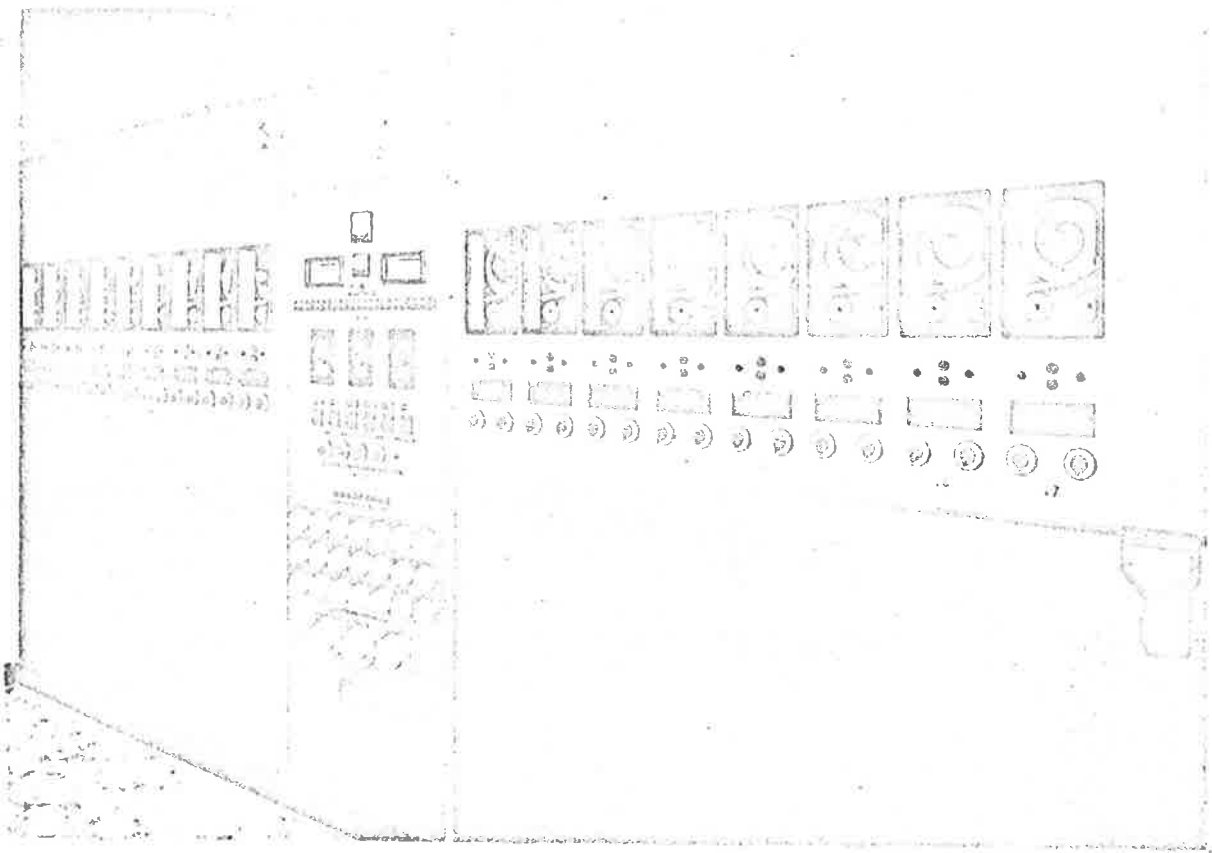


fig.2.I.b INSTRUMENTENPANEEL VAN EEN KAMERDROGER.

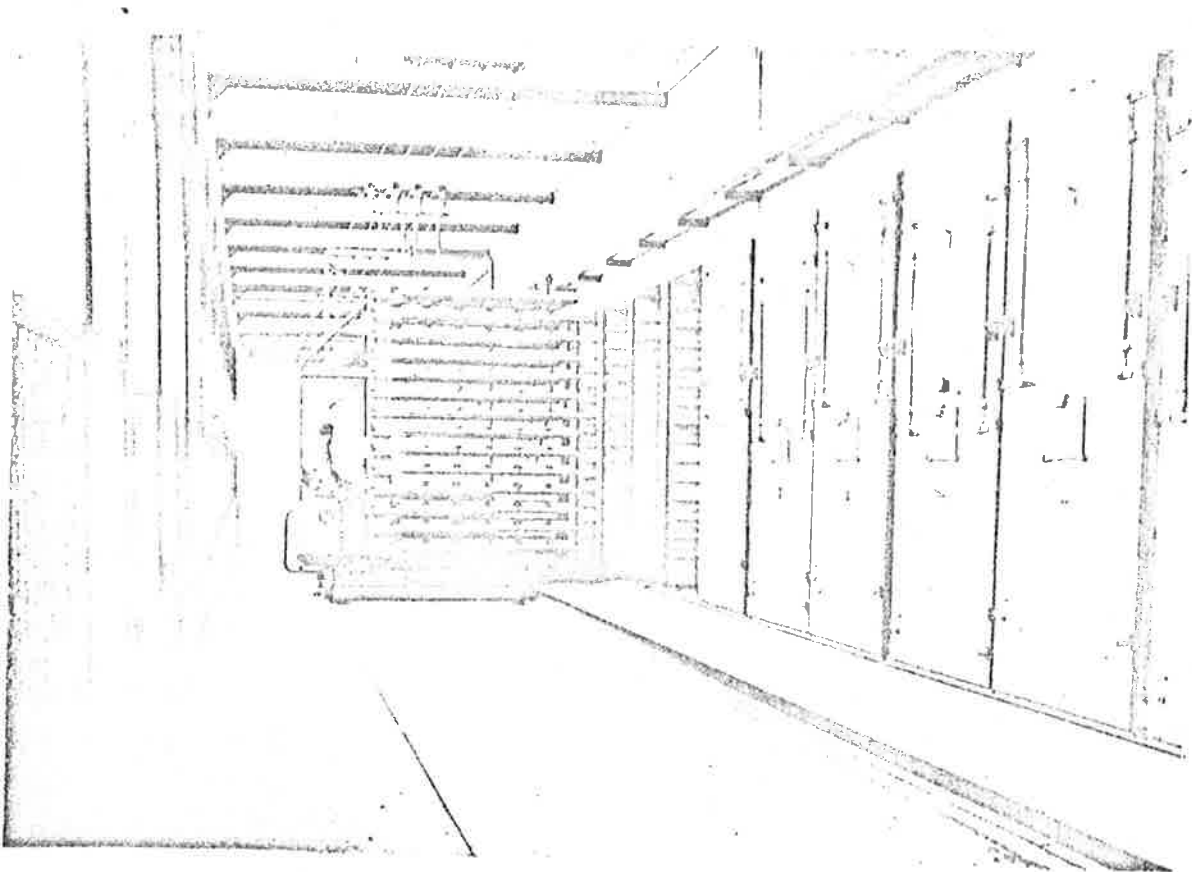


fig.2.I.c TRANSPORT VAN VORMLINGEN NAAR EEN DROOGKAMER

C.T.I-T.N.O.
Werkgroep
Grofkeramiek

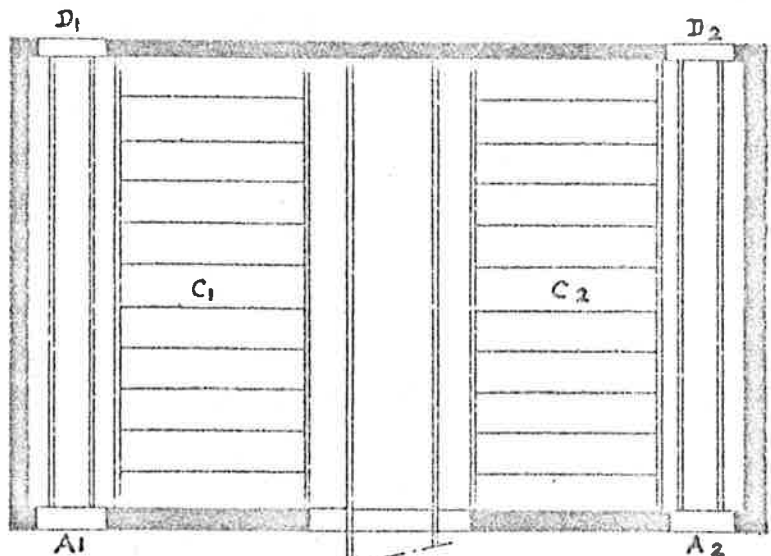
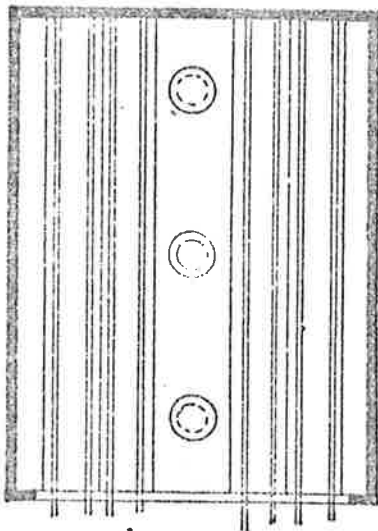
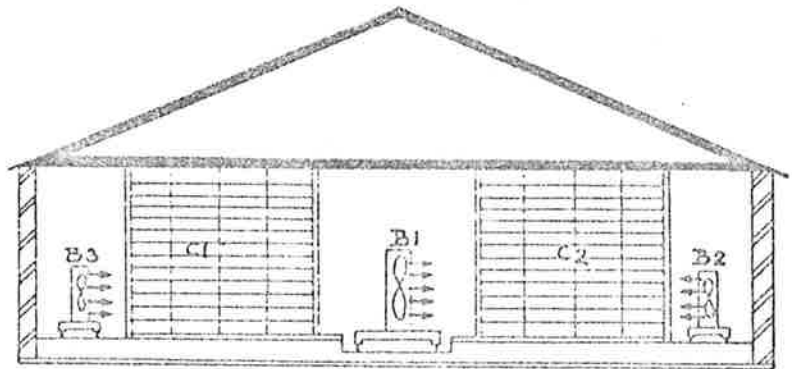
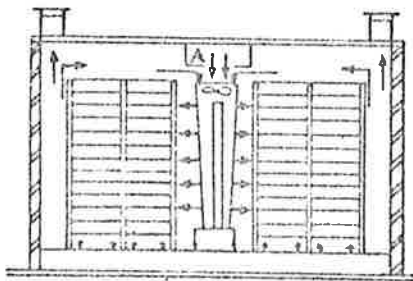


FIG. 2.1.e.

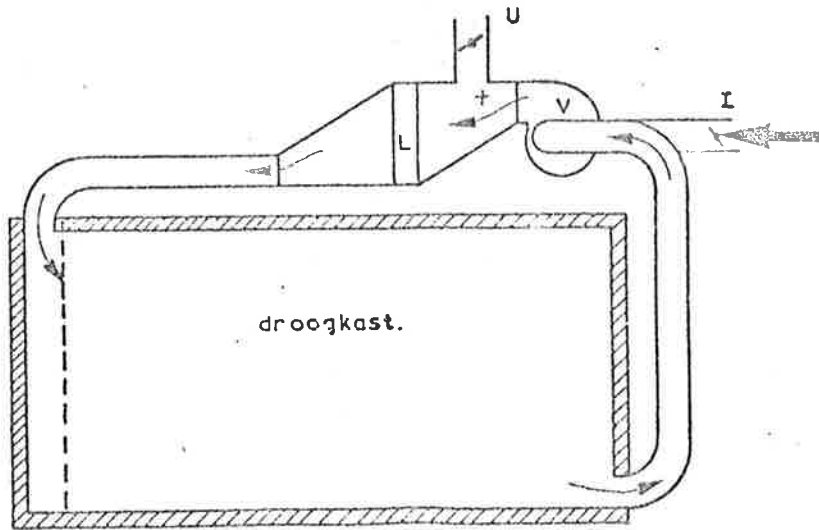
ROTOMIXAIRDROGERIJ

FIG. 2.1.d.

BIJLANDTDROGERIJ

SCHEETS VAN 2 DROGINRICHTINGEN MET INTERNE CIRCULATIE.

C.T.I-T.N.O.
Werkgroep
Grófkeramiek



Drooging met gesloten circuit FIG.2.I.f.

SCHEMA VAN EEN TUNNELDROGER

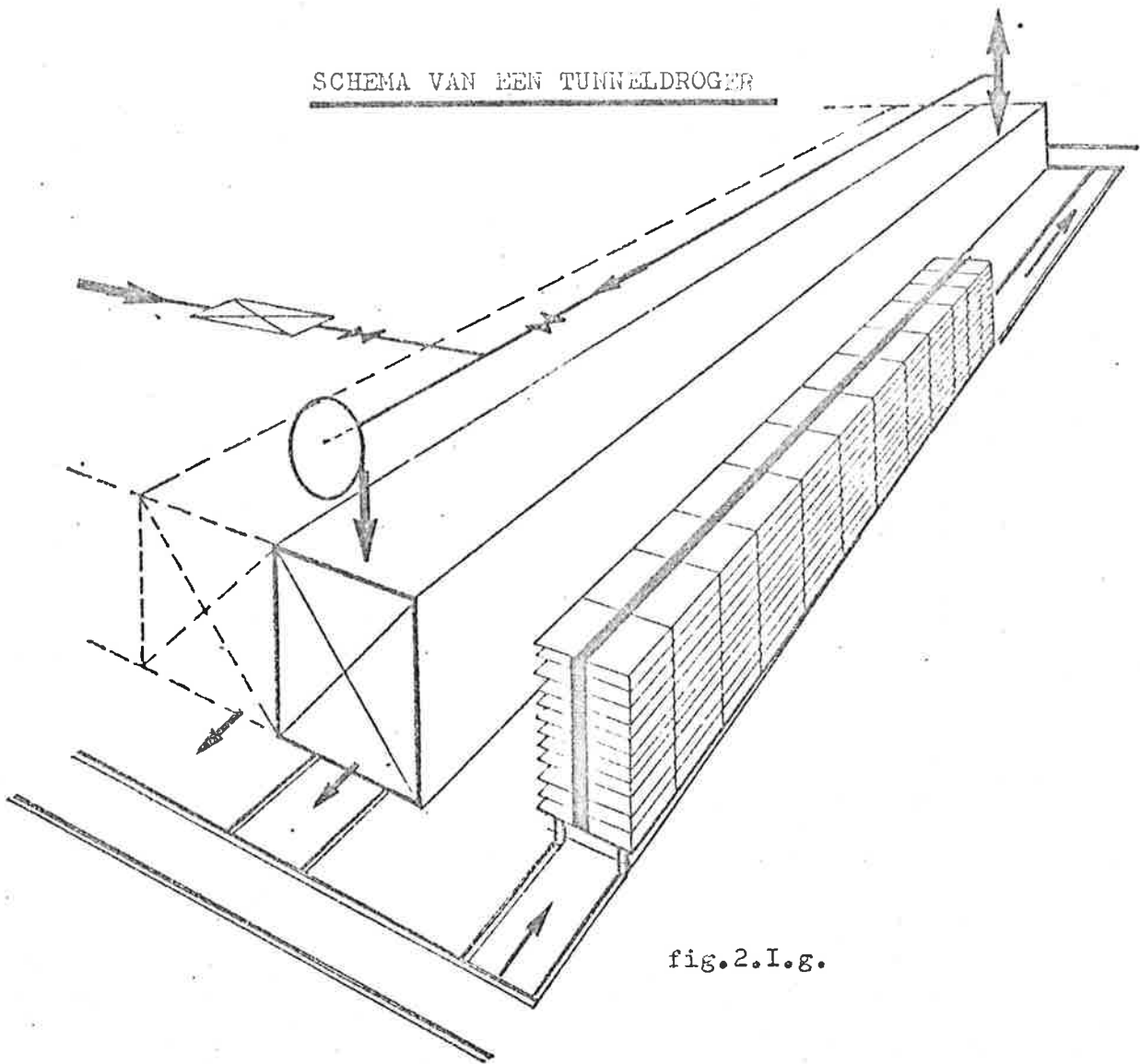


fig.2.I.g.

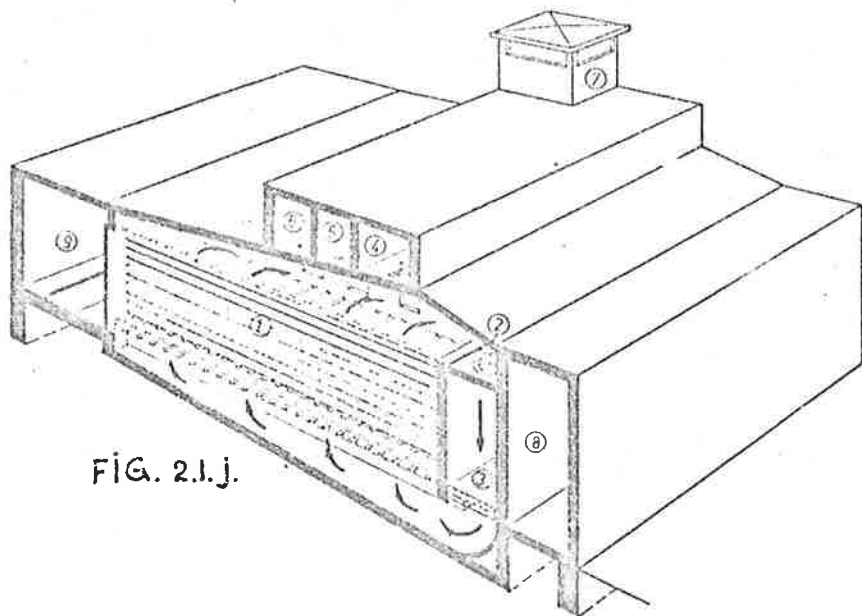


FIG. 2.1.j.

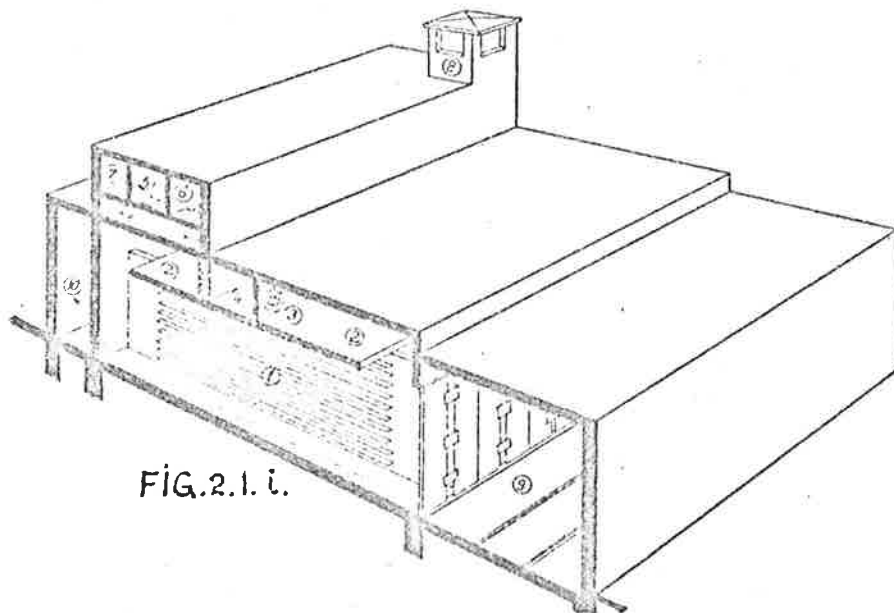


FIG. 2.1.i.

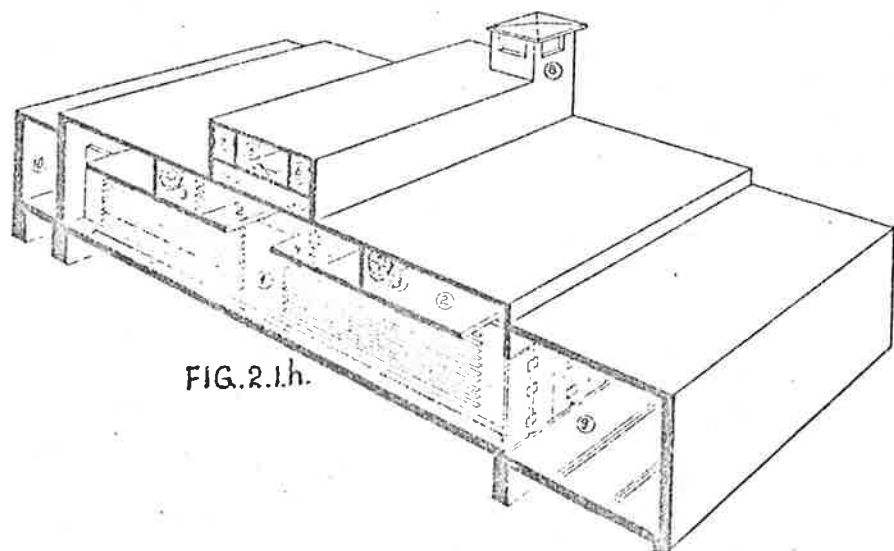


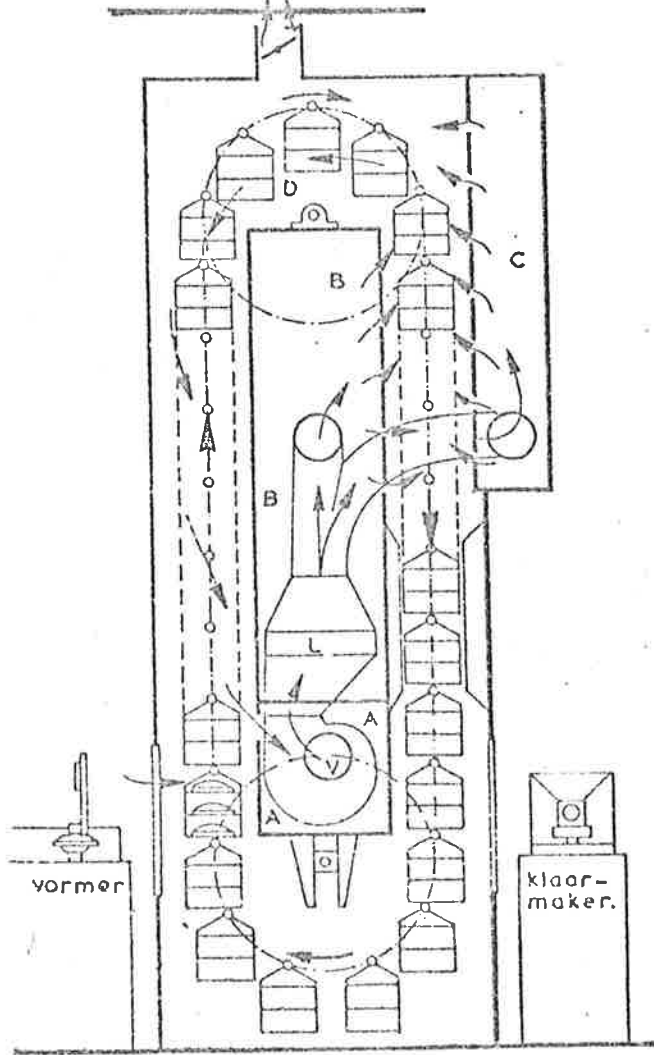
FIG. 2.1.h.

KAMERDROOGINRICHTINGEN (externe circulatie) type KELLEN

C.T.I-T.N.O.
Werkgroep
Grafkeramiek

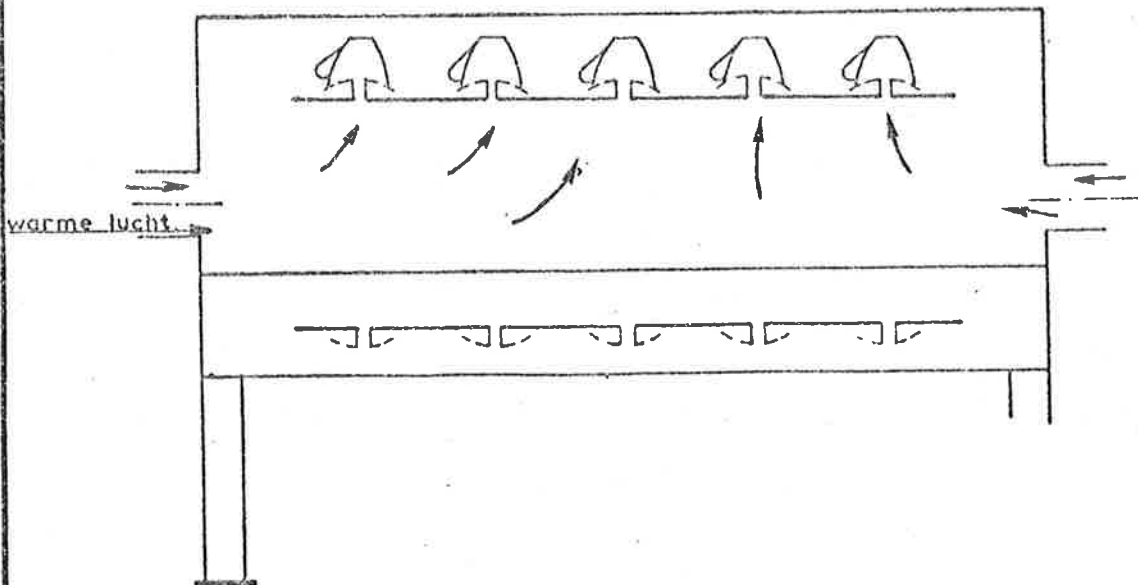
FIG. 2.I.k.

PATERNOSTERDROGER



schets kopjesdroogband

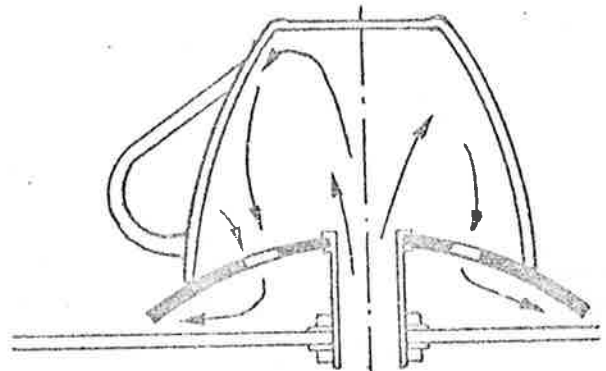
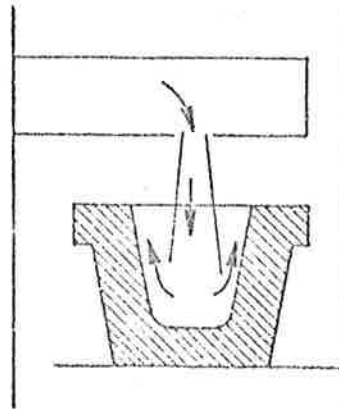
fig.2.I.L.



VOORBEELDEN VAN STRAALDRING.

FIG. 2.I.m.

detail carrousseldroger



Detail oprietschotel.

C.T.I-T.N.O.

Werkroep -
Grafkeramiek

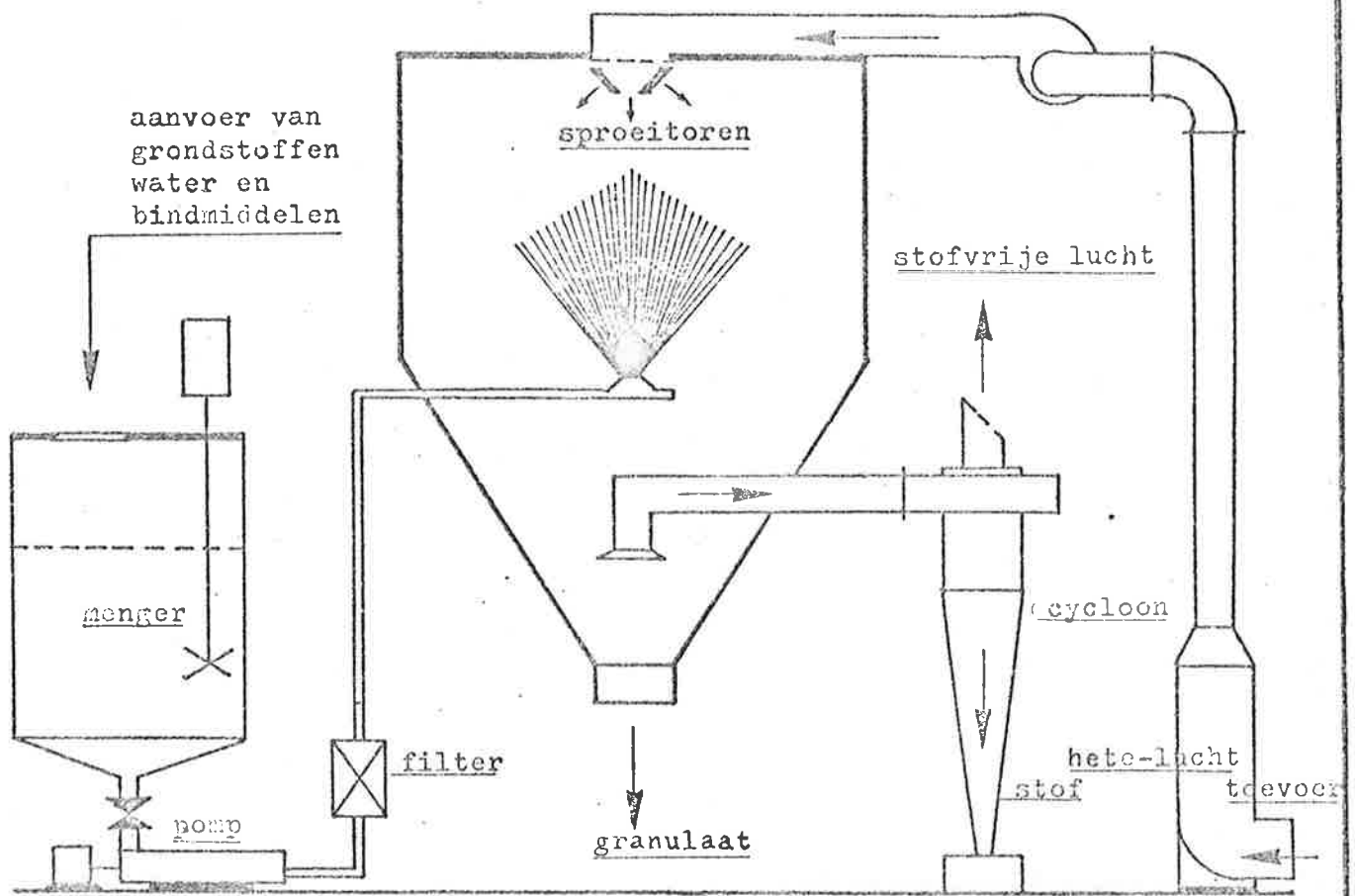


FIG. 2.1.n.
SCHEMA VAN EEN SPROEIDROGER

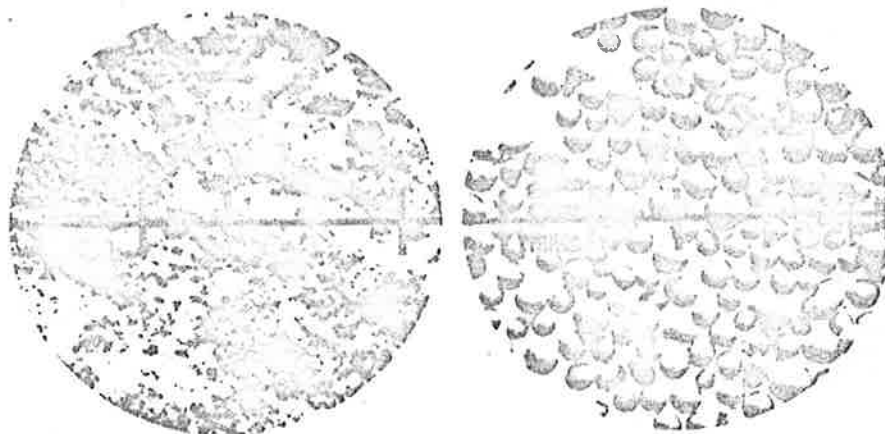


fig 2.1.o.

perspoeder verkregen
door maling

granulaat verkregen
door sproeidroging