

MEDEDELING Nr. 10
van het
KERAMISCH INSTITUUT T.N.O.
tevens
RAPPORT T.A. 259
van de
ALGEMENE TECHNISCHE AFDELING T.N.O.

Het drogen van klei.
(Literatuurstudie)



Lange Tiendeweg 79
Koningskade 5

Gouda
's-Gravenhage

Tel. 3156
Tel. 777920*

AUTEURSRECHTEN VOORBEHOUDEN.

Parceleynre Flas
Delft

Het geheel noch tekstgedeelten mogen worden
overgenomen of voor reclamedoeleinden worden
gebruikt zonder schriftelijke goedkeuring van
de Algemene Technische Afdeling T.N.O. te
's-Gravenhage.

"Dit rapport is op de volgende wijze tot stand gekomen.

Gezien de belangrijkheid van het probleem van het kunstmatig drogen in de keramische industrie en ter voorbereiding van een experimenteel onderzoek over dit onderwerp, verzocht het Keramisch Instituut T.N.O. aan de Algemene Technische Afdeling T.N.O. een literatuuroverzicht samen te stellen. De literatuur bleek zeer omvangrijk en sterk verspreid te zijn; dit staat in verband met het grote aantal aspecten van het onderwerp. Het kwam de Algemene Technische Afdeling T.N.O. gewenst voor bijzondere aandacht te schenken aan de aard van de klei en aan de klei-waterbetrekkingen. Daarom werd getracht medewerking te verkrijgen van een op mineralogisch, agro-chemisch en bodemfysisch gebied georiënteerde landbouwkundig ingenieur. Ir P.L. Arens werd bereid gevonden in opdracht van en in samenwerking met de Algemene Technische Afdeling T.N.O. de literatuur te bewerken en het rapport samen te stellen".

Mededeling Nr. 10
van het Keramisch Instituut T.N.O.
tevens
Rapport T.A. 259
van de Algemene Technische Afdeling T.N.O.

- TITEL** : Het drogen van klei. (Literatuurstudie)
- AUTEUR** : Ir P.L. Arens (Laboratorium voor Landbouwscheikunde van de Landbouw Hogeschool te Wageningen).
- GOEDGEKEURD DOOR** : Dr Ir H.A. Leniger.
- DATUM** : Juli 1949.
- KORTE INHOUD** : De droogeigenschappen van klei zijn een functie van de betrekkingen tussen klei en water. De colloïdale bodembestanddelen (kleimineralen, menggelen en humus) vormen de zetel van de wateradsorptie en kationenadsorptie. Hiertoe behoren de deeltjes kleiner dan ongeveer 2μ . De grovere deeltjes (zand en stof) bepalen de poriënwijsdte en daarmee de beweeglijkheid van water in de gevormde klei. De consistentiewaarden volgens ATTERBERG worden voorgesteld als een eenvoudige maat voor de klei-water betrekkingen. Het droogproces van klei omvat een z.g. "constant-rate" periode, waarin de droogsnelheid een lineaire functie is van het waterverzadigingsdeficit van de lucht en een "falling-rate" periode, waarin de droogsnelheid afneemt met de diepte van het droogfront in de klei. De overgang valt samen met de krimprens. De krimp tijdens constant rate is gelijk aan het verdampste watervolume en kan onder bepaalde omstandigheden de oorzaak zijn van scheurvorming; de voorwaarden hiervoor worden besproken. Een overzicht wordt gegeven van de factoren, die het droogproces beïnvloeden. Deze droogfactoren worden deels door de klei zelf bepaald (z.g. intrinsieke factoren), deels door keuze van de droogomstandigheden en van de voorbereiding (z.g. extrinsieke droogfactoren). Tenslotte worden enige drooginrichtingen beschreven, welke in de praktijk gebruikt worden voor het drogen van keramisch materiaal. De Russische en Japanse literatuur was helaas niet beschikbaar, hoewel daarin waardevolle gegevens voorkomen. Wat betreft de overige literatuur is naar volledigheid gestreefd tot eind 1948.

Summary.

A study is made of the literature on drying of ceramic materials, especially of clay. The mechanism of drying is considered as a function of the clay-water relationships. In soil materials the finest fraction (clay minerals, mixed gels and humus) is the seat of two important phenomena, intimately related with drying: water adsorption and cation adsorption. A discussion is given of the different clay minerals and humus, the adsorptive capacity appearing to be closely related to water adsorption and dry strength of the clay. The 2:1 lattice minerals exhibit larger adsorptive capacities and dry strength than 1:1 lattice types. The coarse fraction of the soil material is generally inactive towards water, but greatly affects the porosity and movement of water in puddled soils.

The ATTERBERG limits of soil consistency are considered a valuable means of diagnosing clay-water relationships and drying properties, high values of the lower plastic limit being correlated with long drying times and important normal shrinkage.

In the third chapter a theoretical discussion is given of the drying process. During constant rate the rapidity of drying is directly proportional to the waterunsaturation of the surrounding air. According to MACEY drying during constant rate equals the evaporation of a free water surface under the same conditions and thus drying velocities may be calculated, using a form-factor to account for different surface forms. Some formulae are given for evaporation of free water surfaces under various air velocities.

Shrinkage during constant rate equals the volume of water evaporated. For safe drying the water supply from inside the green ware must equal the evaporation, steep moisture-potential gradients being the cause of cracks. The surface tension of water accounts for the maintenance of the water film on the clay surface during constant rate.

Following KRISCHER, an equation is derived to account for evaporation during falling rate; drying rapidity decreases with sinking of the water table. Applying of heat during falling rate tends to increase drying velocity.

The difference of normal drying (with heat supply from outside) and drying in a high frequency field (heat supply from inside the ware) is shortly discussed.

The factors, affecting the drying process, are summarized in chapter IV; these may be divided in *i n t r i n s i c* factors, depending on the nature of clay, the mechanical composition, the presence of humus and CaCO_3 etc. and *e x t r i n s i c* factors, depending on the drying conditions, the preparation of the mould etc. Temperature, humidity and air velocity are the most important extrinsic factors, and their influence and relative importance are discussed. Some means of improving drying properties of clays are given.

The last chapter contains a brief description of some driers, in use of ceramic industries. A comparison of costs of operation of some driers is given in table 13.

III

INHOUDSOPGAVE.

	pag.
Hoofdstuk I : De aard en de eigenschappen van bodemcolloïden.	1
§ 1. Algemene Beschouwingen	1
§ 2. De organische bodemcolloïden	2
§ 3. Menggelen	3
§ 4. De kleimineralen	4
§ 5. Samenvatting	9
Hoofdstuk II: De klei-water betrekkingen	10
§ 1. Inleiding; definitie van consistentie	10
§ 2. De binding tussen klei en water	11
§ 3. De factoren, welke de plasticiteit en de bewerk- baarheid beïnvloeden	16
§ 4. Samenvatting	20
Hoofdstuk III: Beschrijving van het droogproces van klei; de theorie van het drogen	20
§ 1. Beschrijving van het droogproces	20
§ 2. De theorie van het drogen; de "constant-rate" periode	22
§ 3. De "falling-rate" periode	32
§ 4. Droging door middel van inwendige warmtetoevoer	36
§ 5. Samenvatting	36
Hoofdstuk IV: De factoren, die van invloed zijn op het drogen van klei	37
§ 1. Intrinsieke droogfactoren	37
§ 2. Extrinsieke droogfactoren	40
§ 3. Samenvatting	54
Hoofdstuk V : Voorbeelden van het drogen van klei in de praktijk	55
§ 1. Inleiding	55
§ 2. Warmtebronnen	56
§ 3. Enige in de literatuur beschreven drooginrichtingen	58
Literatuurlijst	62
Tabellen 1 t/m 13	65
Figuren 1 t/m 43	

HET DROGEN VAN KERAMISCH MATERIAAL,
IN HET BIJZONDER VAN KLEI.

Hoofdstuk I.

DE AARD EN DE EIGENSCHAPPEN VAN BODEMCOLLOIDEN.

§ 1. Algemene Beschouwingen.

Grond is een polydispers systeem, d.w.z. een systeem, bestaande uit een mengsel van grove delen (zandkorrels) en fijnere delen (stofkorrels, kleideeltjes), welke laatste onderling en met de zandkorrels geaggregeerd kunnen zijn door kittende stoffen (o.a. organische stoffen, humus, CaCO_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{ aq}$).

Het drogen van klei is een functie van de betrekkingen tussen water en het complexe systeem grond; daar deze betrekkingen berusten op reacties, welke zich afspelen aan het buitenoppervlak der afzonderlijke gronddeeltjes, is derhalve dit buitenoppervlak van uitermate groot belang, in het bijzonder de som van de buitenoppervlakken van de gronddeeltjes. De som van de buitenoppervlakken van de gronddeeltjes per 1 cm^3 grond wordt het soortelijk oppervlak van de grond genoemd. OSTWALD (zie BAVER 1948, pag. 64) is een van de eersten geweest, die wees op het belang van de grootte van het soortelijk oppervlak van colloïdale deeltjes in verband met de eigenschappen van het colloïd. Het soortelijk oppervlak neemt n.l. toe, naarmate de deeltjesgrootte afneemt, zoals uit een eenvoudige berekening blijkt. In tabel 1 zijn enige gegevens vermeld over de invloed van deeltjesvorm en -grootte op het soortelijk oppervlak, ontleend aan OSTWALD.

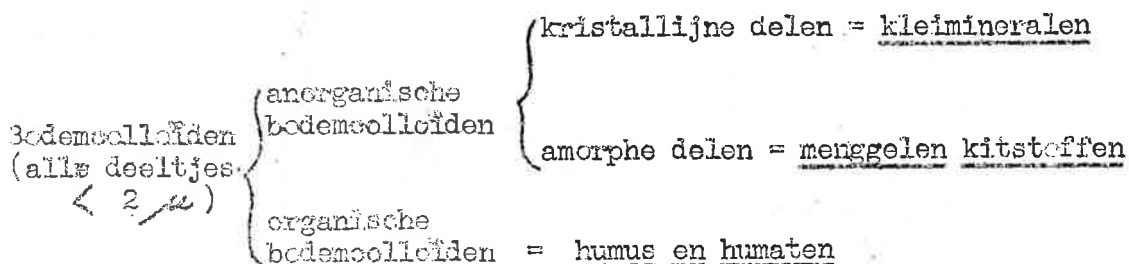
Uit deze cijfers blijkt, dat het soortelijk oppervlak van kleideeltjes belangrijk groter is dan dat van zanddeeltjes. Door hun groot soortelijk oppervlak bepalen de kleideeltjes derhalve de betrekkingen tussen grond en water (BAVER 1948, MACEY 1941-1942, WILLIAMSON 1948, etc.).

In dit hoofdstuk laten wij de grofdisperse gronddeeltjes buiten beschouwing, omdat deze van minder betekenis zijn voor de aard van de kleigrond dan de fijndisperse deeltjes. Tot de fijndisperse (= colloïdale) bodemdeeltjes worden gerekend alle deeltjes met een equivalent diameter kleiner dan 2μ . In de bodemkunde vat men deze deeltjes samen als lutum.

De aanname van de deeltjesgrootte 2μ als bovengrens voor de kleifractie berustte aanvankelijk op conventionele gronden (ATTERBERG). In recente tijd is echter gebleken, o.a. door onderzoekingen van MARSHALL (1935) en van BAREN (1935), dat de fractie $< 2 \mu$, behalve in oppervlakte-eigenschappen bovendien ook in mineralogische samenstelling, zodanig verschilt van de fractie groter dan 2μ , dat deze aanname volkomen gerechtvaardigd is (zie ook tabel 2). In de allerlaatste tijd (FAVEJEE, 1949) is men geneigd de deeltjesgrootte $0,5 \mu$ als bovenste grens van de kleifractie aan te nemen.

Dat de fractie $< 2 \mu$ kwalitatief verschilt van de fractie $> 2 \mu$, wordt thans algemeen aanvaard. Bovendien is de samenstelling van de fractie $< 2 \mu$ allerm minst voor alle kleigronden gelijk, waardoor hun onderling afwijkend gedrag verklaarbaar wordt.

De bodemcolloïden kunnen als volgt ingedeeld worden:



De fysisch-chemische eigenschappen van de diverse colloïdale bodemconstituenten zullen nu nader onderzocht worden.

§ 2. De organische bodemcolloïden.

Hoewel de organische bodemcolloïden slecht gekarakteriseerd zijn, kunnen zij in grote trekken als volgt onderverdeeld worden:

- a. instabiele organische stof, nog aan biologische mineralisatie onderhevig;
- b. stabiele organische stof, vrijwel onaantastbaar voor biologische invloeden (z.g. stabiele humus).

Van de sub a gencemde componenten is weinig positiefs te vermelden. Alle plantaardige en dierlijke producten in de grond (wortelresten, bacteriële lichamen e.d.) zijn aan verandering (= mineralisatie) onderhevig en bijgevolg is de samenstelling ervan allerminst constant. Behalve een mineraliseerbaar deel kent men echter ook organische stoffen, die niet of vrijwel niet aan verwerking onderhevig zijn (chitine bijv.) en dit deel wordt aangeduid met de verzamelnaam stabiele humus.

Stabiele humus omvat een aantal slecht gekarakteriseerde, waarschijnlijk o.a. van lignine afgeleide, ketenverbindingen, waarin chemisch reactieve groepen (bijv. -COOH en -NH₂) voorkomen, in sterk variërende hoeveelheden. Aan deze reactieve groepen heeft de ionenuitwisseling plaats. De kationenadsorptie bedraagt gemiddeld 100 - 300 milli-aequivalenten per 100 g humus.

Van humus zijn hydrophiele (= water-minnende) en hydrophobe (= water-mijdende) componenten bekend. Het hydrophobe Fe-humaat en het hydrophiele Ca-humaat vormen wel de uitersten.

Hydrophiele humus gedraagt zich als een spons: zij bezit een groot waterhoudend vermogen, terwijl wateropname gepaard gaat met intramoleculaire zwelling, waterafgifte daartegenover met krimp (vgl. o.a. MEYER 1934). De binding van water door humus berust waarschijnlijk op een oriëntering van de dipolen van de watermoleculen door de actieve plekken van de humusketens, waarna een adsorptieve binding, hetzij door electrostatische aantrekking, hetzij door London- van der Waalse krachten plaats heeft.

Behalve ten opzichte van water bezit humus affiniteit ten opzichte van de kleisubstantie, hetgeen uit landbouwkundig oogpunt zeer gunstig is. De kleideeltjes worden door klei-humus-binding als het ware omhuld door een beschermende mantel (Schutz-kolloïd, TYULIN 1938, MEYER 1941), waardoor deze kleideeltjes van eigenschappen veranderen. Zo heeft de klei-humus-binding grote invloed op de plasticiteit, op het waterbindend vermogen en op de porositeit van de klei. Zelfs een humusgehalte

van 0,5 % beïnvloedt de consistentie van de klei reeds in belangrijke mate (zie verder hoofdstuk II § 3).

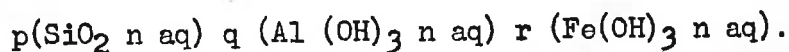
Door haar ketenstructuur is de humus bovendien in staat bruggen te vormen tussen de afzonderlijke kleideeltjes, waardoor voorkomen wordt, dat deze in dichte pakking geraken, zodat het poriënvolume van de klei minimaal en de waterbeweging dienovereenkomstig slecht zouden worden. Het bestaan van humus-bruggen tussen de kleideeltjes is bewezen aan electronen-microscopische foto's van kleien (JACOB und LOOFMANN, 1940); (JACKSON, MACKIE and PENNINGTON, 1947). De porositeit van kleimassa's wordt groter naarmate meer humus-brugverbindingen tussen de kleideeltjes voorkomen. Enerzijds is dit voor een snelle droging van de klei bevorderlijk (vgl. hoofdstuk II, de invloed van de porositeit op de droogsnelheid); anderzijds vergroot de humus door haar sponskarakter het watergehalte van de kleimassa (vgl. § 5 van dit hoofdstuk) en daarmee de krimp.

In de practijk worden de kleien met laag humusgehalte of ook humusloze kleien geprefereerd boven humushoudende kleien, waarschijnlijk omdat het initiaal watergehalte van de plastische klei, welke gedroogd wordt, veel hoger is naarmate de klei humushoudender is. De nadelige invloed van de organische stof op de kleur en de kwaliteit van het gebakken product, o.m. gereleveerd door DETAILLE (1948), wordt hier buiten beschouwing gelaten. Voor de invloed van het humusgehalte op de dwarse sterkte van het gedroogde materiaal zie men hoofdstuk II.

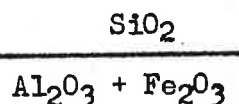
Kleien, waarin Fe-humaat de belangrijkste humuscomponent is, zijn hydrophoob en vertonen het verschijnsel van de irreversibele indroging: een eenmaal drooggeworden klei verstuift zeer gemakkelijk en is niet meer bevochtigbaar. De waterbeweging in deze kleien verloopt gemakkelijker dan in kleien met hydrophiele humus (DUYVERMAN, 1948). Hydrophobe humaten spelen waarschijnlijk een belangrijke rol bij vormzanden, in gebruik bij de steenfabricage. Ideaal vormzand moet volgens FAVEJEE (1948) volkomen bevochtigbaar zijn, zodat het onmiddellijk aan de vochtige steen blijft kleven; de aanwezigheid van huidjes hydrophoob humaat rond de zandkorrels, maakt dit waardeloos als vormzand. Zelfs in hoeveelheden van 0,1 - 0,01 gew. % werkt het hydrophoob humaat ongunstig. Zand, dat als vormzand gebruikt wordt, dient derhalve tevoren gegloeid te worden.

§ 3. Menggelen.

Onder menggelen in de grond verstaat men mengsels van colloidale, niet kristallijne componenten van de samenstelling



Deze menggelen behoren tot de moeilijkst toegankelijke en derhalve tot de slechtst onderzochte bodemconstituenten. Vast staat, dat zij voorkomen en algemeen wordt aangenomen, o.a. door EDELMAN (1937), KELLEY (1942), dat zij het moedermateriaal vormen voor de kleimineralen, welke er uit kristalliseren. Gewoonlijk worden de menggelen gekarakteriseerd (MATTSON) naar het quotiënt:



Naarmate dit quotiënt kleiner is (< 2) zijn deze componenten minder hydrophiel en omgekeerd. Menggelen met verhoudingen kiezelzuur : sesquioxiden groter dan 2, zijn sterker hydrophiel en vertonen een betrekkelijk

hoog kationenadsorbtievermogen.

Een grote hoeveelheid sesquioxyden komt de droogeigenschappen van klei ten goede volgens HOLDRIDGE (1948), daar deze de porositeit vergroten zonder zelf sterk watervasthoudend te zijn.

De hoeveelheid menggelen, die in kleigronden voorkomt, is slechts een fractie van het colloïdaal bodemdeel, behoudens in enkele uitzonderlijke gevallen. Volgens ruwe schatting bedraagt het bedrag aan menggelen in Nederlandse kleigronden 0 - 10% van de fractie $< 2 \mu$.

Dat de hoeveelheid aanwezige sesquioxyden de kleur van het gebakken product bepaalt, is genoegzaam bekend.

§ 4. De kleimineralen.

De anorganische kristallijne bodemcolloïden vormen het belangrijkste deel van de klei-fractie.

Sedert de ontdekking met behulp van röntgenologisch onderzoek van FRY en HENDRICKS (1929) en van WHERRY c.s. (1929), dat klei voornamelijk uit microkristallijne delen bestaat, en niet uit amorf materiaal, zoals tot dan toe verondersteld werd, zijn een aantal kleimineralen met onderling uiteenlopende eigenschappen beschreven. Op dit ogenblik kent men ongeveer 30 verschillende kleimineralen, die in enige grote groepen onderverdeeld kunnen worden. Recente overzichtsartikelen op het gebied der kleimineralogie zijn de volgende: EDELMAN en FAVEJEE (1939), MACEY (1941-1942), 5 artikelen in Journal of Geology vol. 50, Nr. 3 (1942), NAGELSCHMIDT (1944), CAILLÈRE et HENIN (1947), EDELMAN (1948), JOHNSTON (1944-1947), MARSHALL (1942), PARMELEE (1946).

Bij de nu volgende indeling van de kleimineralen volgen wij in hoofdzaak MARSHALL (1942) en NAGELSCHMIDT (1944). Hun indeling omvat:

- | | | |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| a. de kaolinietgroep | } | silicatische
kleimineralen |
| b. de montmorillonietgroep | | |
| c. de micagroep | | |
| d. de attapulgiëtgroep | | |
| e. oxydische kleimineralen | | |
| f. kleimineralen met mengroosters | | |
| g. detritus mineralen | | |

ad a. de kaoliniet-groep.

De kaoliniet-achtige mineralen zijn in principe opgebouwd uit een (Si_2O_5) -rooster (bestaande uit een koppeling van SiO_4 -tetraëders in een plat vlak; zie fig. 1), afgewisseld met een $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{++}$ -rooster. De chemische samenstelling van kaoliniet is derhalve bij benadering $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, maar het is principiëel juist als formule voor kaoliniet te schrijven $\text{Al}_2(\text{OH})_4 \text{Si}_2\text{O}_5$. (zie fig. 2).

Doordat beide roosters elkaar electrisch volkomen neutraliseren en doordat het buitenoppervlak van het mineraal (gevormd door O gekoppeld aan Si enerzijds en OH gekoppeld aan Al anderzijds) inert is onder normale omstandigheden (EDELMAN (1935)), vertoont kaoliniet een geringe kationen-adsorbtiecapaciteit en eveneens een betrekkelijk geringe affiniteit tot water (vgl. ook EDELMAN, 1937 en 1948 a en b). Dit komt mede tot uiting in lage waarden voor de vloei- en uitrolgrens (zie Hoofdstuk II).

Tot de kaoliniet-groep behoren de volgende mineralen: kaoliniet,

dickiet, nacriet, anauxiet, metahalloysiet, halloysiet, faratsihiet en antigoriet. Het Al kan in kaolinitroosters isomorph door Fe^{+++} vervangen zijn, zoals bij faratsihiet het geval is (LACROIX), terwijl ook isomorphe vervanging tussen Al en Mg bestaat (antigoriet, volgens GAILLIERE et HENIN). Halloysiet en metahalloysiet verschillen van kaolinit, doordat zij niet uit laagroosters zijn opgebouwd, maar uit lintvormige roosters met configuratie Si_4O_{11} ; de beide mineralen verschillen onderling in watergehalte. Dickiet en nacriet zijn tamelijk zeldzame mineralen, die van kaolinit verschillen in watergehalte en in roosterafstand (BRAGG, 1946).

Op electronenmicroscopische foto's is de kristalvorm van deze kleimineralen duidelijk waar te nemen (vgl. JACOB en LOOGMANN, (1940), JACOB (1942), SHAW and HUMBERT (1942), SHAW (1942), JACKSON, MACKIE and PENNINGTON (1947) etc.). Kaolinit, dickiet en nacriet zijn plaatvormig, hexagonaal, terwijl halloysiet en metahalloysiet lintvormig zijn.

De mineralen van de kaolinit-groep bezitten een gesloten structuur, d.w.z. tussen de roosters komen geen z.g. intermicellaire ruimten voor; zij vertonen dan ook niet het verschijnsel van de micellaire zwelling bij bevochtiging en -krimp bij uitdroging, hetgeen voor de drooigeenschappen van grote betekenis is (vgl. LAURITZEN (1948) en Hoofdstuk II).

De kationenadsorbtie aan kaolienmineralen heeft volgens MARSHALL (1942) waarschijnlijk vrijwel uitsluitend plaats aan kristalranden en hoeken, en aan breukvlakken, waar n.l. restvalenties optreden. De effen buitenoppervlakken zijn inert onder normale omstandigheden.

In de natuur komen kaolinitachtige mineralen in grote hoeveelheden voor, vooral in tropische gronden (de witte klei in laterietten); z.g. china clay bestaat vrijwel geheel uit kaolinit.

Ook buiten de tropen komen min of meer uitgestrekte kaolinitafzettingen voor, o.a. in de zuidelijke staten van de U.S.A., in Frankrijk en in Duitsland.

Volgens de onderzoeken van FAVEJEE en GRIM (1944) (zie FAVEJEE 1949), moet men binnen de kleimineraalsoort kaolinit onderscheiden tussen het grof gekristalliseerde (met deeltjesgrootte tot ongeveer 10μ) en het zeer fijn gekristalliseerde kaolinit (met gemiddelde deeltjesgrootte, kleiner dan $0,5 \mu$), die volkomen verschillende fysische eigenschappen bezitten. Voor de fijn-keramische industrie komt vooral het grof-kristallijne product in aanmerking (Chinees porcelein, o.a. van BANKA), dat een uitstekende bewerkbaarheid paart aan een geringe krimp. Het fijn-disperse kaolinit vormt het hoofdbestanddeel van de z.g. fire clays, waaruit isolatiestenen e.d. gebakken kunnen worden.

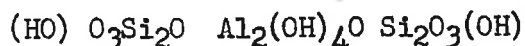
De meeste Europese kaoliniten behoren tot de fijn-disperse. Het grof gekristalliseerde kaolinit moet men voornamelijk zoeken in oude tropische verweringsgronden.

Zuivere kaolinit, vooral het grof-kristallijne product, bezit door de lage adsorbtiecapaciteit slechts een geringe dwarse sterkte in droge toestand. Hierover meer in Hoofdstuk II.

ad. b. De montmorilloniet-groep.

Omtrent de kristalbouw van de mineralen uit deze groep bestaat nog geen eenstemmigheid; de opvatting van HOFMANN, ENDELL en WILM staat tegenover die van EDELMAN en FAVEJEE (1940), terwijl MARSHALL een middenpositie inneemt. Wij zullen slechts het structuurmodel volgens EDELMAN en FAVEJEE weergeven, omdat hiermede een betere verklaring voor de eigenschappen van de montmorillonieten gegeven kan worden dan met de

overige modellen. Volgens deze opvatting bestaat ideale montmorilloniet uit een $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{++}$ rooster, ter weerszijden geflankeerd door $\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})^-$ roosters. De formule voor de elementaire cel van ideale montmorilloniet is derhalve:



Dit kristalmodel kent drie soorten binding, n.l.

- 1o. (OH) gekoppeld aan Si,
- 2o. O gekoppeld aan Si en
- 3o. OH gekoppeld aan Al (zie fig. 3).

De aan Si gekoppelde OH groep op de buitenoppervlakken (en op de intermicellaire binnenoppervlakken) verleent aan het mineraal zijn grote reactiviteit. De cristobaliet-achtige structuur $\cong \text{Si-OH}$ is n.l. in staat om te ioniseren, d.w.z. het H-ion kan afgesplitst worden en daarvoor in de plaats kunnen andere kationen aangetrokken (geadsorbeerd) worden. Montmorilloniet behoort derhalve tot de colloïdale electrolyten, in de zin van MARSHALL (1942). H-montmorilloniet is een colloïdaal zuur, Na-montmorilloniet, Ca-montmorilloniet, etc. zijn colloïdale zouten.

Door de aan Si gekoppelde OH groep, die sterk zuur reageert, is de hoge kationen adsorptiecapaciteit van montmorillonieten verklaarbaar. Per eenheid van buitenoppervlak bezitten montmorillonieten een sterke negatieve lading, waardoor behalve kationen ook de dipolen van de watermoleculen gericht worden; de affiniteit van water tot montmorillonieten is groot en bij wateropname vertonen deze mineralen het verschijnsel van de micellaire zwellings, bij waterafgifte micellaire krimp. HOFMANN en BILKE bepaalden de afstand tussen opeenvolgende 001 splijtvlakken van montmorilloniet, in afhankelijkheid van het watergehalte (tabel 3).

Volgens de huidige opvattingen, o.a. van HENDRICKS and JEFFERSON (1938), van MACEY (1941-1942) en WILLIAMSON (1948), wordt het water op het oppervlak van montmorilloniet niet in willekeurige moleculaire rangschikking gebonden, maar in de ijsconfiguratie. Water in de ijsconfiguratie kan men zich voorstellen als een rangschikking van tetraëders, gevormd door een watermolecuul met aan zijn vier polen (n.l. 2 positieve en 2 negatieve) vier naburen, in lagen van regelmatige zeshoeken (of PRINS: Grondbeginselen der hedendaagse natuurkunde). Het ijspatroon is analoog aan het Si_2O_5 patroon van fig. 1, ontstaan uit de rangschikking van SiO_4 tetraëders, vgl. fig. 4a en 4b. MACEY berekende nu, dat dit ijspatroon juist past op het oppervlaktepatroon van montmorilloniet, hetgeen een aannemelijke verklaring geeft voor: 1o. de sterke binding tussen montmorilloniet en water, 2o. de grote waarde voor de bevochtigingswarmte van montmorilloniet (15 - 18 cal per g). Wanneer water van de waterconfiguratie in de ijsconfiguratie overgaat, komt er n.l. warmte vrij door energieverlies en deze warmte manifesteert zich o.a. als de z.g. bevochtigingswarmte. Bevochtigingswarmte en hygrosopiciteit (= watergehalte van het mineraal boven 30% H_2SO_4) zijn nauw gecorreleerd, zoals uit tabel 4 moge blijken.

Tot de montmorilloniet-groep behoren o.a. de volgende mineralen:

montmorilloniet, nontroniet, beidelliet, askaniet, hectoriet en saponiet.

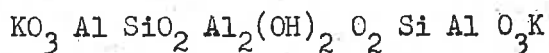
Nontroniet is te beschouwen als een montmorilloniet, waarin Al isomorph door Fe vervangen is volgens DE LAPPERENT; bij beidelliet is een deel van de Si uit montmorilloniet vervangen door Al + Na volgens ROSS and HENDRICKS (1941), terwijl een deel van de Al isomorph door Fe vervangen kan zijn, Hectoriet en saponiet bevatten vrijwel geen Al, maar daarvoor in de plaats Mg + Na of Mg + Li (hectoriet) en Mg + Mg (saponiet volgens ROSS and HENDRICKS).

De kristalvorm van montmorillonieten is op electronenmicroscopische foto's slechts goed waar te nemen, als het kleimonster op een bepaalde manier wordt geprepareerd (SHAW (1942)). Uit waterige suspensies gedroogde montmorilloniet vertoont op de foto's een wolkig opgerold beeld, waarschijnlijk tengevolge van ongelijkmatige krimp. Uit benzeen-suspensies gedroogde montmorilloniet vertoont een mooi vlak beeld.

Montmorillonieten komen in de natuur voor in verweerde vulkanische afzettingen, in betrekkelijk zuivere toestand. Het sterke micellaire krimp- en zwelvermogen, gepaard aan een hoog watergehalte in plastische toestand, is de oorzaak, dat deze kleien in het algemeen voor de keramische industrie van weinig waarde geacht worden. In Nederlandse alluviale kleien komt montmorilloniet voor in betrekkelijk geringe hoeveelheden (vgl. tabel 6).

ad c. De mica-groep.

De kristalstructuur van de kleimineralen uit de mica-groep wordt beschouwd analoog te zijn aan die van muscoviet. De roosterbouw bestaat in principe volgens NAGELSCHMIDT (1944) uit superpositie van $\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot \text{Al}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{Si}_2\text{O}_5$ (=pyrophylliet), waarbij echter telkens één uit de vier Si-ionen van het eenheidskristal isomorph vervangen is door (Al + K). De K-ionen liggen in het 001 slijtvlak, in de holten tussen de zuurstofionen van de $(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$ ringen (vgl. fig. 1) en worden derhalve omringd door 12 O. De geidealiseerde formule van de mineralen van de mica-groep wordt derhalve:



ofwel:



De 001 oppervlakken van de mica-achtige mineralen worden gevormd door O gekoppeld aan Si en zijn wat dat betreft inert. Door de vervanging echter van Si door Al + K, is de elektrische balans niet zo volkomen in evenwicht als bij het inerte pyrophylliet, of zoals bij kaoliniet. De mineralen uit deze groep vertonen dan ook een matig grote reactiviteit ten opzichte van kationen en water, een reactiviteit ongeveer intermediair tussen die van kaoliniet en montmorilloniet.

Juist zoals bij de overige kleimineralen komen ook in deze groep isomorfe vervangingen voor. Zo kunnen bijv. de K-ionen, die de brug vormen in de 001 slijtvlakken, geheel of gedeeltelijk vervangen zijn door kationen met dezelfde ion-afmeting ($\pm 1,43 \text{ \AA}$). De vervanging door het H_3O^+ -ion (hydronium) komt volgens HAUSER (1941) in de natuur veelvuldig voor. TAMM nam waar, dat kali-arme mica-kleien steeds per gewichtseenheid droge klei een grotere hoeveelheid water bevatten dan kalirijke mica-kleien (geciteerd bij HAUSER, pag. 71), Volgens NAGELSCHMIDT (p.17) zijn gemiddeld slechts de helft van de K-posities met

het K-ion bezet, waaruit berekend kan worden een K₂O-gehalte van 5-6%.

De vraag, of het rooster van mica-achtige mineralen kan zwellen en krimpen, is nog niet geheel opgelost. Waarschijnlijk vertoont het mineraal een geringe micellaire krimp en zwel, voornamelijk beïnvloed door de aard van de kationen, die de K-posities innemen.

De afzonderlijke mineralen van de mica-groep zijn nog niet goed beschreven. Voor de systematiek van deze groep raadplege men HENDRICKS and JEFFERSON (1939) en NAGELSCHMIDT (1944). Men onderscheidt: illiet, bravaisiet, "ordovician bentonite" en sericiet. Tussen Al en Fe bestaat wederom isomorphe vervanging. In Nederlandse illieten komt deze vervanging waarschijnlijk voor (cf. DAL, 1948).

De kristalvorm van illiet (= tonmineraal X) is plaatachtig, zoals uit electronenmicroscopische foto's van JACOB (1942) en SHAW and HUMBERT (1942) blijkt.

In Nederlandse alluviale kleien vormen de mineralen van de mica-groep het hoofdbestanddeel. Daarnaast komt een weinig kwarts voor met kaoliniet en montmorilloniet (cf. tabel 6). Men raadplege ook FAVEJEE (1949).

De meest zuivere illiet-afzetting in Nederland, tot dusverre bekend, is gelegen in Winsum (Gron.), n.l. de kleiput van de dakpannen-fabriek v.h. Timmer.

Door onderzoekingen van RIJKEN en FAVEJEE (1941) is bekend geworden, dat het kleimineraal illiet vermoedelijk verantwoordelijk is voor het ontstaan van het terra sigillata laagje, bekend van het Romeinse aardewerk. Het procédé voor de fabricage van terra sigillata ging, zoals bekend, na de Romeinse tijd verloren. Door bestrijken van nog ongebakken aardewerk met een illiet-suspensie verkregen RIJKEN en FAVEJEE terra sigillata-achtige producten bij het bakken.

ad d. De attapulgiët-groep.

De tot nu toe besproken kleimineralen bezaten, behalve halloysiet en metahalloysiet, een laagroosterstructuur. Er bestaan echter ook kleimineralen met een vezelstructuur (met configuratie SiO₃). De ontdekking van de vezelvorm dezer kleimineralen is te danken aan het electronen-microscop (MARSHALL, SHAW and HUMBERT (1941), JACKSON, MACKIE and PENNINGTON (1947)). In principe zijn de attapulgiëten gehydrateerde Mg-Al-silicaten, met amfibool-achtige structuur. Volgens BRADLEY (1940) bezitten de attapulgiëten inwendige kanalen, evenwijdig aan de lengte-as van de vezels. Door het groot inwendig oppervlak bezitten deze mineralen overeenkomstige chemische eigenschappen als montmorilloniet; zij vertonen echter geen krimp en zwel.

Tot de attapulgiëtgroep behoren: attapulgiët, palygorskiet en sepioliet. In sepioliet (= meerschaum) is alle Al door Mg vervangen.

In Nederlandse en Indische kleien zijn tot op heden geen attapulgiëten aangetoond;

ad e. De oxydische kleimineralen.

Tot de oxydische kleimineralen behoren: kwarts, Al-oxyden (hydrargilliet, gibbsiet, diaspoor en bauxiet), Fe-oxyden (haematiet, lepidocrociet, goethiet en limoniet) en wellicht nog Ti-oxyde. Behalve kwarts vertonen deze kleimineralen een geringe affiniteit tot kationen en tot water. Naarmate de kleien rijker zijn aan mineralen van de sesqui-

oxyden, bezitten zij een grotere doorlatenheid (porositeit) en derhalve een gemakkelijker te beheersen waterbeweging. Van de tropische laterieten, die relatief rijk zijn aan deze mineralen, is algemeen bekend, dat zij een grote porositeit paren aan geringe affiniteit tot water, hoewel de hoeveelheid fractie $< 2 \mu$ belangrijk groter is dan in de Nederlandse kleien, die slechts matig poreus zijn.

Kwartsrijke kleien zijn waarschijnlijk vrij slecht doorlatend en weinig poreus, tengevolge van de hydrophiele natuur van colloïdaal kwarts. Een grote hoeveelheid kwarts in de fractie $< 2 \mu$ komt in de natuur echter slechts sporadisch voor.

Voor zover bekend bezitten de Nederlandse kleigronden relatief weinig oxydische kleimineralen. Ondanks deze geringe quantiteiten wordt de kleur en de kwaliteit van het gebakken product in belangrijke mate er door bepaald.

ad f. Kleimineralen met mengroosters.

Afzettingen van zuivere kleimineralen komen in de natuur betrekkelijk zelden voor. De meeste kleien en vooral alluviale kleien, bestaan uit een mengsel van verschillende kleimineralen. Nu is in de jongste tijd gebleken, bijv. uit onderzoeken van HENDRICKS and ALEXANDER (1939) en van SCHACHTSCHABEL (1940, 1941), dat deze mengsels niet alleen mechanische mengsels zijn, waarbij de constituerende componenten naast elkaar blijven bestaan, maar dat er mengcomponenten met een typerend mengrooster uit kunnen ontstaan. Van mica + montmorilloniet zijn deze mengroosters het eerst beschreven (vgl. NAGELSCHMIDT p. 18-19). Door malen van deze kleien komen de oorspronkelijke componenten vrij, zoals SCHACHTSCHABEL vond bij klei uit Saröspatak.

Het is waarschijnlijk, dat ook de Nederlandse kleien deels uit mineralen met dergelijke mengroosters bestaan, hoewel het bewijs hiervoor nog niet geleverd is. De fysisch-chemische eigenschappen van mengcomponenten zijn nog onvoldoende onderzocht. Waarschijnlijk vertonen deze mengcomponenten eigenschappen, intermediair tussen die van de constituenten.

§ 5. Samenvatting.

1. De fractie $< 2 \mu$ vormt het fysisch-chemisch reactieve deel van de grond; de grovere delen fungeren als z.g. skelet. Tot het reactieve bodemdeel behoren: humus, menggelen en kleimineralen, waarvan de structuur en eigenschappen achtereenvolgens behandeld worden.
2. Van de grovere delen verschilt de fractie $< 2 \mu$: a) in oppervlakte-eigenschappen en in deeltjesvorm, b) in mineralogische en chemische samenstelling.
3. De grove bodemdelen beïnvloeden de porositeit (poriënvolume, poriënwijdte) van de grond en hebben bijgevolg een belangrijke invloed op de waterbeweging in klei. De colloïdale bodemdelen bepalen de klei-water betrekkingen.
4. De eigenschappen van de colloïdale fractie, welke het meest op de voorgrond treden, zijn:
 - a. wateradsorbtie;
 - b. kationenadsorbtie.

Deze beide grootheden zijn evenredig, d.w.z. hoe groter de kationen-adsorbtie, hoe sterker ook de wateradsorbtie.

5. Het mechanisme der adsorbtie is voor kaolien- en mica-achtige mineralen waarschijnlijk anders dan voor humus en montmorillonietachtige mineralen. Bij de eerstgenoemde treedt adsorbtie waarschijnlijk uitsluitend op aan restvalenties, kristalranden, hoeken en breukvlakken, terwijl humus en montmorilloniet te rangschikken zijn onder echte colloïdale electrolyten.
6. De affiniteit tot water is voor de diverse bodemcolloïden verschillend en is in grote trekken recht evenredig met het quotiënt kiezelzuur: sesquioxyden. Hetzelfde geldt in grote trekken voor de kationenadsorbtie. Oxydische kleimineralen (behalve SiO_2) bezitten relatief het kleinste adsorbtievermogen, montmorilloniet en humus het grootste.
7. In Nederlandse alluviale kleien overheersen mica-achtige kleimineralen.

Hoofdstuk II.

DE KLEI-WATER BETREKKINGEN.

§ 1. Inleiding, definitie van consistentie.

De drooigeenschappen van kleien berusten op de betrekkingen tussen water en de kleideeltjes. Daar de betrekkingen tot water verschillend zijn voor de diverse bodemcolloïden, zullen de drooigeenschappen derhalve ten nauwste gecorreleerd zijn met de aard en de relatieve hoeveelheid dezer colloïden. Een grote oppervlakte-reactiviteit van de kleideeltjes (bijv. bij montmorilloniet- of illiethoudende kleien), tot uiting komende in een hoge waarde voor de kationenadsorbtie, is daarbij ten nauwste gecorreleerd met een grote affiniteit tot water.

De klei-water betrekkingen worden gewoonlijk samengevat onder de term *c o n s i s t e n t i e*, waaronder verstaan wordt (cf. BAVER, 1948, p.101) de resultante van de cohesie- en adhesiekrachten, werkzaam in de kleimassa bij verschillende watergehalten. Met het veranderen van het watergehalte veranderen cohesie en adhesie en bijgevolg de plasticiteit, de bewerkbaarheid, enz.

De consistentie van kleien is, behalve van het variabele watergehalte, afhankelijk van de volgende factoren (cf. KRYNINE (1941), p.43, TERZAGHI (1944), BAVER (1948), p. 101):

- a. de granulaire samenstelling van het materiaal,
- b. de aard en relatieve hoeveelheid en samenstelling der kleifractie,
- c. de deeltjesvorm van de kleicolloïden,
- d. het humusgehalte,
- e. de geadsorbeerde kationen.

Voor een gegeven kleisoort is het watergehalte de variabele factor in het systeem klei-water, terwijl de overige factoren vrijwel invariabel zijn en behoren tot de z.g. intrinsieke droogfactoren van de klei. In § 3 meer hierover.

De literatuur over de klei-waterbetrekkingen is zeer omvangrijk en ligt verspreid over bodemfysische, keramische en landbouwkundige geschriften; in dit hoofdstuk zijn slechts de voor de keramicus belangrijkste aspecten belicht.

§ 2. De binding tussen klei en water.

Volgens moderne opvattingen (cf PRINS (1947): Grondbeginselen der hedendaagse natuurkunde) bestaat water uit tetrapolaire moleculen. De beide waterstofatomen staan in het H_2O -molecuul niet diametraal tegenover elkaar, maar vormen onderling een hoek van ongeveer 109° met de kern van het zuurstofatoom. De waterstofkant van het H_2O -molecuul kan als de positieve pool beschouwd worden, terwijl de negatieve pool diametraal daartegenover is gelegen.

Door deze bipolariteit (juister: tetrapolariteit) kunnen tal van eigenschappen van water verklaard worden, o.a. ook de adsorbtie aan allerlei oppervlakken. Onder invloed van een electrisch geladen oppervlak worden de dipolen gericht (gepolariseerd) en vervolgens aangetrokken, hetgeen men het adsorbtieproces noemt. Behalve een LONDON- VAN DER WAALS-binding bestaat er bij water-adsorbtie derhalve ook een electrostatische binding volgens de wet van COULOMB. De bindingskracht tussen water en klei (evenals tussen water en ieder ander fysisch-chemisch reactief materiaal) is derhalve groot; men spreekt ook van grote a d h e s i e.

Volgens de opvattingen van HENDRICKS and JEFFERSON (1938), MACEY (1942) en GRIM and BRADLEY (1948) zijn nu de geadsorbeerde watermoleculen niet kris-kras gerangschikt, maar in een bepaalde regelmatige configuratie, overeenkomende met de ijsconfiguratie (zie fig. 4a en 4b).

HENDRICKS and JEFFERSON hebben hun opvatting door röntgenanalyse trachten te bevestigen, terwijl MACEY indirecte viscositeitsmetingen verrichtte om de hypothese waarschijnlijkheid te geven.

Wanneer water van de vloeibare in de ijsconfiguratie overgaat, neemt de dichtheid af. HAUSER en LE BEAU (1938, 1941) namen echter, in tegenstelling tot MACEY, waar, dat de gemiddelde dichtheid van water in een geconcentreerde montmorillonietsuspensie hoger is dan die van zuiver water. Deze waarneming is in overeenstemming met een berekening van ZUNKER (1931) en van SCHOFIELD (1935). Volgens deze laatste onderzoekers wordt het water in de binnenste molecuullagen tegen een adsorbtiewand gebonden met een kracht van rond 10.000 atm. (overeenkomend met een pF van ongeveer 7)[‡]. Bij een dermate grote adsorbtiekracht treden uiteraard deformaties van de ijsconfiguratie op, zodat de boven aangeduide tegenstrijdigheid enigszins verklaarbaar is. Het is echter nog de vraag of onder invloed van de zeer grote bindingskracht het geadsorbeerde water bijv. soms in dichte pakking gaat zitten, waardoor het röntgenbeeld van HENDRICKS en JEFFERSON eveneens verklaard zou kunnen worden. Verder onderzoek zal moeten uitmaken, welke opvatting de juiste is.

[‡] Onder de pF volgens SCHOFIELD wordt verstaan de log van de zuigspanning van water (= onderdruk), wanneer deze zuigspanning wordt uitgedrukt in cm water.

Voor een juist begrip van de verschijnselen dient men, in navolging van SIEFERT en HENRY (1941) en van KELLEY, JENNY en BROWN (1936), te onderscheiden tussen de verschillende bindingstoestanden van het water in de klei. Deze onderzoekers onderscheiden (vgl. ook KEITH, 1941):

- a. het hydratatie-water van de geadsorbeerde kationen,
- b. het aan de kleideeltjes zelf geadsorbeerde water (oppervlakte-adsorbtiewater),
- c. het vrije water tussen de bodemdeeltjes.

Volgens WILLIAMSON (1948) bezit het hydratatie-water van de kationen een grotere dichtheid dan vrij water; het is zeer sterk gebonden. De aan het klei-oppervlak geadsorbeerde watermoleculen zijn, volgens KELLEY, JENNY en BROWN, deels gebonden aan breukranden, waaraan restvalenties optreden (z.g. broken-bond water), deels aan vrije valenties in het platte oppervlak van de kristalroosters (z.g. planar water). Het "broken-bond water" is intenser gebonden dan het "planar water" en zal derhalve moeilijker verdampen dan dit laatstgenoemde. Het is bekend, dat door droog malen van klei in kogelmolens, het aantal breukplaatsen toeneemt; gemalen klei houdt het water vaster dan niet gemalen klei.

Bij een bespreking van de klei-water betrekkingen is het nodig te onderscheiden tussen cohesie en adhesie. Adhesie heeft betrekking op de aantrekking van de watermoleculen door de vaste deeltjes in de kleimassa, terwijl cohesie optreedt tussen de watermoleculen onderling in een vochtige grond. Cohesie en adhesie veranderen met het watergehalte. HAINES (1924, 1925) was een van de eersten, die een verklaring voor het verschijnsel gegeven heeft, zich baserende op beschouwingen over de oppervlaktetenspanning van waterfilmpjes, welke op en tussen de kleideeltjes aanwezig zijn. NICHOLS (1931) heeft op deze gedachtengang voortgebouwd en komt tot de volgende formule voor de cohesiekracht bij aanwezigheid van een waterfilm tussen twee plaatvormige deeltjes:

$$K = c \frac{4 \pi r T \cos \alpha}{d} \dots\dots\dots(1)$$

- waarin: c = materiaalconstante,
r = straal van de (cirkelvormig gedachte) platen,
T = oppervlakte spanning,
 α = randhoek tussen vloeistofoppervlak en deeltje (gewoonlijk bij volledig bevochtigbare stoffen aangenomen als 0°),
d = onderlinge afstand van de deeltjes.

De afstand d is een functie van het watergehalte; een groter watergehalte doet de cohesiekracht afnemen, terwijl bovendien het product van watergehalte en cohesiekracht, Kd, constant is. Dit laatste wist NICHOLS experimenteel te bevestigen.

Voor een gegeven watergehalte hangt de cohesie af van de som van het aantal aanwezige waterfilmen, hetwelk een functie is van het kleigehalte van de grond. Kleigronden vertonen derhalve grotere cohesiekrachten dan zanderige gronden; plaatvormige deeltjes veroorzaken eveneens grotere cohesie dan anders vormige deeltjes. Bij een bepaald watergehalte is de cohesie maximaal; bij dit watergehalte bestaan de waterfilmpjes volgens NICHOLS (vgl. ook BAVER (1948) slechts uit vast geadsorbeerd water. Vergroting van het gehalte aan vrij water doet de cohesie afnemen. Dit punt van maximale cohesie is vermoedelijk voor de pottenbakkers van belang.

De adhesiekracht is evenzo een functie van het watergehalte. Bij toenemend watergehalte neemt de adhesie af, om een limiet te bereiken, wanneer alle oppervlakte-valenties van de klei verzadigd zijn.

ATTERBERG (1911, 1912) nu is een van de eersten geweest, die de klei-water betrekkingen in cijfers trachtte vast te leggen. Van hem zijn de z.g. consistentiewaarden afkomstig, waartoe behoren: de vloeigrens, kleefgrens, hechtgrens, uitrolgrens en het omslagpunt als primaire grootheden en de plasticiteit, de bewerkbaarheid, het surplus en de maximale watervoorraad als afgeleiden. Wij zullen deze grootheden in het kort bespreken aan de hand van het bevochtigingsproces van grond.

Wanneer overdroge grond aan langzame bevochtiging wordt blootgesteld, nemen allereerst de kationen en alle vrije valenties aan het klei-oppervlak, hydratatie water op. De kleideeltjes worden allengs met het z.g. hygroscopisch water omkleed, waartoe na het "broken bond" water het "planar" water behoort. De adhesie is derhalve allereerst het belangrijkste proces. De hygroscopiciteit (term. ingevoerd door RODEWALD (1904) en MITSCHERLICH (1923)) verschilt voor de diverse kleimineralen en is vrij nauw gecorreleerd met de adsorptiecapaciteit (vgl. tabel 4). Zij is mede een functie van het soortelijk oppervlak; derhalve bezitten zware kleigronden een grotere hygroscopiciteit dan de lichtere gronden. Per eenheid van buitenoppervlak is de dikte van de hygroscopisch gebonden waterlaag evenredig met de kromtestraal van dat buitenoppervlak (ZUNKER 1931). Bij plaatvormige kleideeltjes (illiet, montmorilloniet, kaoliniet) is de hygroscopiciteit derhalve groter dan bij bol- of vezel-vormige kleideeltjes (kwarts, halloysiet etc.). Hygroscopisch water bezit een zeer hoge osmotische waarde; uitgedrukt in atm. zuigspanning bedraagt deze volgens ZUNKER $4,18 \times 10^4$ atm., overeenkomende met een pF van 7,6. BAVER geeft als benaderende waarde een pF van 5,6.

De hygroscopiciteit komt ruwweg overeen met het vochtgehalte van aan de lucht gedroogd keramisch materiaal. De krimp tijdens de droging in de oven (z.g. residual shrinkage) hangt samen met de grootte van de hygroscopiciteit. De bepaling van het omslagpunt volgens ATTERBERG benadert de hygroscopiciteit zeer goed.

Bij het omslagpunt zijn alle poriën tussen de gronddeeltjes nog met lucht gevuld. Bevochtiging van de kleimassa leidt er nu toe, dat deze poriën zich allengs volzuigen; de waterfilmpjes worden dikker en dikker, totdat tenslotte alle lucht uit de poriën is verdwenen. Dit punt is de uitrolgrens van ATTERBERG. Zij valt samen met de benedenste plasticiteitsgrens (lower plastic limit in de Eng. literatuur). De vaste gronddeeltjes hebben bij dit watergehalte nog juist onderlinge contactplaatsen (afgezien van enige molecuullagen "broken bond" water); bij drogen van vochtige kleimassa's is dit dan ook de krimprens (normal shrinkage limit) en de kennis ervan is van groot belang om de droogeigenschappen te diagnosticeeren.

De uitrolgrens en de hechtgrens vallen vrijwel samen in de meeste gronden.

Wordt de kleimassa bevochtigd boven de uitrolgrens, dan komt zij in een kneedbare (plastische) toestand. Voordat klei gekneed kan worden tot bepaalde gewenste vormen, moet derhalve het vochtgehalte groter zijn dan de uitrolgrens.

Bevochtiging boven de uitrolgrens heeft tengevolge, dat de kleimassa opzwellt, daar bij deze grens alle lucht uit de kleimassa verdreven is. De swelling, uitgedrukt in cc is gelijk aan het aantal cc water, dat toegevoegd is boven de rolgrens. De cohesie tussen de watermoleculen onderling speelt nu de belangrijkste rol; door deze krachten

wordt de eenmaal gevormde massa in zijn vorm gehouden. Het water, dat boven de rolgrens is toegevoegd, is vrijer (moleculair) beweeglijk; de rechtstreekse binding aan het oppervlak van de kleideeltjes is veel geringer. Deze binding kan nu bij verdere bevochtiging zo gering worden, dat watermoleculen aan bijv. metalen voorwerpen, welke in de kleimassa gestoken worden, adsorberen, daarbij hier en daar kleideeltjes meesleurende. Men spreekt dan van een kleven van de kleimassa. De grens, waarbij de cohesiekracht, welke de kleimassa samenbindt, kleiner wordt dan de adhesiekracht ten opzichte van metalen voorwerpen, die in de kleimassa gestoken worden, noemt men de kleefgrens (sticky point, limite de dérance, Klebegrenze). De kleefgrens is het hoogste watergehalte, waarbij de klei met metalen voorwerpen bewerkt kan worden, zonder dat zij aan deze voorwerpen vast blijft plakken.

Het verschil tussen kleefgrens en uitrolgrens is de bewerkbaarheid van de klei, een gegeven van groot belang voor keramici en landbouwers. Een grote bewerkbaarheid wil zeggen, dat er een brede marge bestaat van het vochtgehalte, waarbinnen de kleimassa plastisch gevormd kan worden.

Sommige gronden bezitten een zeer hoge of in het geheel geen kleefgrens en zijn dus onbeperkt bewerkbaar (zie verder § 3).

Bij bevochtiging van klei bereikt men tenslotte een punt, waarbij de massa onder invloed van de zwaartekracht gaat vloeien. De cohesie tussen de watermoleculen is dan dermate gering geworden, dat de gevormde kleimassa niet uit zichzelf die vorm kan bewaren. Dit vochtgehalte wordt door ATTERBERG de vloeigrens genoemd (upper plastic limit, limite supérieure de plasticité). Het is derhalve het hoogste vochtgehalte, waarbij de klei plastisch is.

Het verschil tussen vloeigrens en uitrolgrens is de plasticiteits-index van de grond; in § 3 wordt deze grootte uitvoerig behandeld.

De vloeigrens kan boven of onder de kleefgrens liggen, naar de aard van het materiaal. Bij sterk zandhoudende gronden, grofkristallijne kaolienkleien, loessgronden en kwartsrijke lemen ligt de kleefgrens boven de vloeigrens; bij deze gronden spreekt men van een positief surplus (surplus = kleefgrens - vloeigrens). De Nederlandse alluviale kleien hebben vrijwel steeds een negatief surplus.

Het verschil tussen vloeigrens en omslagpunt stelt voor de z.g. maximale watervoorraad. Dit getal geeft aan hoeveel water door een grond kan worden vastgehouden beneden de moddertoestand; de kennis ervan is voor landbouwers van meer belang dan voor keramici.

Voor de wijze, waarop de Atterbergse consistentiecijfers bepaald worden, is de volgende literatuur van belang: ATTERBERG (1911, 1912), BAVER (1930), CASAGRANDE (1932), RUSSELL and WEHR (1928), MOHR (1915), VAGELER (1927/1928) en JOHANNSEN (1914).

In tabel 5 zijn consistentiecijfers vermeld van enige gronden en klei-afzettingen, in gebruik bij de keramische industrie.

Behalve de werkwijze volgens ATTERBERG bestaan er nog een aantal andere methoden om de klei-water betrekkingen in cijfers vast te leggen. De methode, waarbij een geknede klei-pasta door een nauwe buis gedrukt wordt onder invloed van een bekende kracht, is verreweg de bekendste. (BLAIR and CROWTHER (1929), KEEN and BLAIR (1929)). Het verband tussen volume doorgestroomde kleipasta en de aangewende kracht is weer gegeven in fig. 5. In deze z.g. plastometrische curven zijn drie karakteristieken te onderscheiden, n.l.

- a. bij lage druk treedt geen vloeï van de kleipasta op (OA in curve 2). De kracht OA noemt BLAIR de "yield value", een grootheid, kenmerkend voor het watergehalte van de kleipasta (= variabele factor) en voor de plasticiteitseigenschappen (= invariabele factor),
- b. bij A begint de pasta te vloeïen: evenwel is het doorgevloeïde volume niet evenredig met de aangewende kracht,
- c. vanaf B is het volume van de doorgevloeïde pasta evenredig met de aangewende kracht. Wanneer BC tot D geëxtrapoléerd wordt, verkrijgt men wat KEEN and BLAIR (1929) noemden, de "static rigidity" van het materiaal, een grootheid, welke men als maat beschouwt voor de cohesiekrachten van de plastische kleïmassa.

De resultaten van de methode van BLAIR c.s. om plasticiteiten te bepalen, hangen uiteraard af van de lengte en van de diameter van de capillaire buis en wel volgens:

$$A = \frac{kR}{2l} \quad \text{en} \quad B = \frac{k'R}{2l}$$

- k = aangewende kracht OA (zie fig. 5),
k' = aangewende kracht OB,
R = straal van de capillair,
l = lengte van de capillair.

A en B stellen krachten voor, die per eenheid van oppervlak werken op de wand van de buis; deze grootheden zijn een functie van de plasticiteit van het materiaal.

Een derde methode om kleïen te prospecteren ten aanzien van hun droogeïgenschappen, is afkomstig van COSSELMAN (1927). Deze onderzoeker mengt de kleï met water tot een niet duidelijk omschreven vochtgehalte, vermoedelijk niet ver van de vloeïgrens verwijderd. De kleïmassa wordt uitgespreïd op een glad oppervlak, waarna langzaam gedroogd wordt. Het kleïoppervlak verkrijgt bij drogen alléngs een convexe vorm, waarvan de kromtestraal bepaald wordt. Tijdens en na het droogproces wordt het kleïoppervlak onderzocht op barsten en scheurtjes. Tegelïkertïjd wordt aan een kleine kubus plastische kleï de totale krimp bepaald. Volgens COSSELMAN bezitten kleïen met goede droogeïgenschappen nu:

- a. een geringe lineaire krimp, n.l. 7 % of minder,
- b. een grote kromtestraal van het kleïoppervlak, n.l. 40 cm of meer,
- c. geen grote scheuren en slechts een zeer gering aantal kleine barstjes in het droge oppervlak.

Kleïsoorten met een kleine kromtestraal (20 cm of minder) van het droge oppervlak, evenals kleïen met grote lineaire krimp (10% of meer) of met veel scheurtjes, zijn weinig geschikt voor de meeste keramische doeleïnden.

Een methode, in Duitsland veelvuldig gebruikt om kleï-water betrekkingen te analyseren, is die van PFEFFERKORN. Hierbij laat men op kleïcilindérs met verschillend vochtgehalte een gewichtje vallen van een bepaalde hoogte. De kleïcilindérs worden hierdoor samengedrukt. Volgens PFEFFERKORN is nu het verband tussen het watergehalte en de indrukking van de kleïcilindérs, een maat voor de plasticiteit van de kleï. Zet men watergehalte en indrukking tegen elkaar uit, dan verkrijgt men een rechte, welke voor iedere kleïsoort een verschillende ligging en een verschillende hellingshoek heeft. Het is de vraag of met deze metho-

de een juiste diagnose van de plasticiteit gesteld kan worden.

De methode van ATTERBERG is vermoedelijk de beste en snelste methode om inzicht te krijgen in de klei-water-relaties van de te gebruiken gronden. Met eenvoudige middelen kan zij uitgevoerd worden, terwijl de diagnose scherp genoeg is voor de meeste doeleinden.

Samenvattend mogen ten aanzien van het droogprobleem de volgende criteria gelden:

- a. het omslagpunt en de uitrolgrens van de klei moeten bij voorkeur zo laag mogelijk liggen. Een lage waarde voor deze twee grenzen is een indicatie voor een snel aflopend droogproces,
- b. de plasticiteitsindex mag niet te klein zijn; wanneer derhalve een lage uitrolgrens gewenst is, mag de vloeigrens toch hoog liggen. In § 3 zal blijken, dat de combinatie lage uitrolgrens + hoge vloeigrens slechts in uitzonderlijke gevallen voorkomt,
- c. de bewerkbaarheidsmarge mag eveneens niet te klein zijn; voor een fabriekmatige bewerking is het zeer gewenst, dat de bewerkbaarheid niet binnen te enge grenzen is bepaald in verband met de watertoevoer in de kneedmolens, die bezwaarlijk ieder ogenblik veranderd kan worden. Een bewerkbaarheid, kleiner dan 8, wordt wel als onvoldoende aangeduid, groter dan 12 als voldoende.

§ 3. De factoren, welke de plasticiteit en de bewerkbaarheid beïnvloeden.

In § 1 van dit hoofdstuk werd een opsomming gegeven van de factoren, die van invloed zijn op de consistentie van klei. In deze § zal de invloed van ieder dezer factoren nader onderzocht worden.

a. de granulair samenstelling.

De vloeigrens, zowel als de uitrolgrens zijn een functie van het gehalte aan kleicolloïden in de grond. ATTERBERG, TERZAGHI, CASAGRANDE e.a. toonden aan, dat, naarmate de grond een grotere kleifractie bezit, de vloeigrens en de uitrolgrens toenemen. Relatief neemt de vloeigrens echter méér toe dan de uitrolgrens, waardoor de plasticiteitsindex derhalve groter wordt naarmate meer colloïdale fractie in de grond aanwezig is. RUSSELL is zo ver gegaan, dat hij uit de plasticiteitsindex het kleigehalte van een grond berekent. Voor de fractie $< 5 \mu$ geldt volgens deze onderzoeker:

$$pl = 0,6 kl - 12$$

waarin pl = plasticiteitsindex en kl = kleifractie $< 5 \mu$.

Voor het kleigehalte $< 1 \mu$ geldt:

$$pl = 0,66 kl - 10$$

Indien deze formules algemeen gelden, hetgeen te betwijfelen is, zouden derhalve gronden met een fractie $< 5 \mu$ van 20% of minder niet plastisch zijn; hetzelfde geldt voor gronden met een fractie $< 1 \mu$ van 15% of minder.

CASAGRANDE (1926) vond een overeenkomstig rechtlijnig verband tussen plasticiteitsindex en kleifractie, hoewel voor uiteenlopende grondsoorten de relaties onderling verschillen.

BAVER varieerde door bijmenging met kwartszand het zandgehalte (dus ook het kleigehalte in % van de totale grondmassa) van een kaolinietrijke kleigrond. Uit onderstaande cijfers blijkt, hoe de plasticiteitsindex verloopt met het veranderde kleigehalte.

	% \leftarrow 5 μ	vloei- grens	uitrol- grens	plasticiteits- index
kaolinietrijke kleigrond met kwartszand ver- mengd	87 70 53 37	71 57 42 30	31 28 23 23	40 29 19 7

De door RUSSELL opgestelde vergelijking gaat bij deze grond derhalve goed op.

Uit bovenstaande tabel blijkt tevens, dat de uitrolgrens toeneemt parallel met het kleigehalte. Daar de uitrolgrens nauw gecorreleerd is met de droogeigenschappen van klei (TERZAGHI 1926) en met het initiaal watergehalte bij de droging, is het van belang deze grootheid te kennen. Een hoge uitrolgrens betekent steeds een langdurig droogproces.

b. de aard en samenstelling der kleifractie.

Boven werd reeds aangeduid, dat een hoge kationen-adsorptiecapaciteit gewoonlijk gepaard gaat met een grote affiniteit tot water en omgekeerd. Ditzelfde kan men zeggen ten aanzien van de plasticiteit en van het plasticiteitstraject. Zo heeft een kaolinietrijke grond minder water nodig om alle adsorptieplekken te bezetten dan een montmorilloniet (bentoniet). Deze laatste grond wordt derhalve bij een hoger watergehalte plastisch dan een kaolien; de plasticiteitsindex, welke een functie van het kleigehalte is, kan in beide gevallen wel gelijk zijn, maar het plasticiteitstraject is verschillend, zoals nog moge blijken uit tabel 5. Gewoonlijk hebben montmorillonieten echter een grotere plasticiteit dan kaolinieten. Attapulgië, illiet en halloysietrijke gronden staan tussen deze uitersten in.

Kaliumarme illieten (bijv. de meeste Maasklei-afzettingen) bezitten een hogere uitrolgrens en vloei-grens dan kaliumrijke illieten. Dit hangt vermoedelijk samen met de isomorfe vervanging van K in het kristalrooster door H_2O , zoals in hoofdstuk I werd uiteengezet.

In de bodemkundige literatuur (MATTISON (1937), v.d. MAREL (1935), BURGESS (1929) is reeds lang bekend, dat door behandeling met aluminium- en ijzerzoutoplossingen, bijv. $FeCl_3$, de adsorptiecapaciteit van kleien omlaag gebracht kan worden. Deze verlaging gaat tevens gepaard met een geringere affiniteit tot water en dit is dan ook de reden, waarom in de literatuur wel eens melding gemaakt is van een gunstige beïnvloeding van de droogeigenschappen van kleien door behandeling met $FeCl_3$ (vgl. MACEY (1941-1942), FRÉCHETTE en PHILLIPS (1929), COX (1938), SCHURECHT en McMAHON (1942)). Aan deze behandeling kan men tweërlei effect toeschrijven, n.l. een volstreekte coagulatie van de klei, waardoor de waterbeweging binnen de massa gemakkelijker verloopt (waterbeweging in relatief wijde capillairen), en een bezetting van adsorptieplekken met Fe, dat aan de klei een betrekkelijk hydrofob karakter geeft. Beide

effecten resulteren in verbeterde droogeigenschappen met minder krimp- ook op krimpseuren.

De adsorbtie-capaciteit van gronden, welke bepaald wordt door de kwalitatieve en kwantitatieve aanwezigheid van humus en kleimineralen, is mede sterk gecorreleerd met de dwarse sterkte van het gedroogde product. Klei met een lage adsorbtiecapaciteit (grof gekristalliseerde kaolinit bijv.) is in droge toestand gemakkelijk breekbaar, zulks in tegenstelling tot illieten en montmorillonieten (vgl. HARMAN en PARMELEE (1945) en MEYER (1934)). Om de dwarse sterkte in droge toestand te verbeteren voegt men in sommige gevallen wel een geringe hoeveelheid adsorbens (humusrijke zandgrond bijv. volgens MEYER) aan de kleimassa toe. De dwarse sterkte in droge toestand wordt mede bepaald door het al of niet optreden van microscopisch kleine krimpseurtjes in het materiaal, ontstaan door locale spanningen tijdens de droging, dus onafhankelijk van de adsorbtie-eigenschappen van het materiaal. Een gering totaal poriënvolume van de droge massa is steeds een indicatie voor sterkte. Kei-lemen en in het algemeen gronden met zeer kleine poriënvolumina in droge toestand, staan daarom ook bekend voor hun dwarse sterkte.

c. de deeltjesvorm.

Reeds door de onderzoeken van ATTERBERG is vast komen te staan, dat de deeltjesvorm een uiterst belangrijke factor is voor de plasticiteit van gronden. ATTERBERG vermaalde verschillende gesteenten (veldspaten, kwarts, muscoviet, biotiet etc.) tot poeder van vrijwel colloïdale afmetingen. Het bleek daarbij, dat slechts die "kunstmatige kleigronden" plasticiteit vertoonden, waarvan de deeltjes plaatvormig waren, dus bijv. muscoviet en biotiet. Kwarts en vermalen veldspaten bezaten weinig of totaal geen plasticiteit. ATTERBERG kwam dan ook reeds toen tot de conclusie, dat plastische gronden voornamelijk uit plaatvormige deeltjes moeten bestaan.

Tegenwoordig weet men, dat ook de meeste kleimineralen plaatstructuren bezitten; het is dus niet verwonderlijk, dat deze een soms zeer grote plasticiteit bezitten. Gronden met grote hoeveelheden mica, ook in de fracties, groter dan 2 μ , kunnen een plasticiteit vertonen, welke belangrijk hoger ligt dan men op grond van de granulaire samenstelling zou verwachten. Kwartsrijke kleien en lemen en bijv. ook de meeste loessgronden vertonen geen of zeer geringe plasticiteit (zie ook tabel 5). Door vermenging van plastische grond met kwartsmeel kan men de plasticiteit derhalve verlagen.

Met de bewerkbaarheid is het juist omgekeerd gesteld als met de plasticiteit. Gronden met plaatvormige kleideeltjes hebben een geringere bewerkbaarheidsmarge dan gronden met andersvormige deeltjes. Een verlaging van de plasticiteit door middel van kunstgrepen (die in sommige gevallen gewenst is), gaat derhalve gewoonlijk gepaard met een vergroting van de bewerkbaarheidsmarge.

d. het humusgehalte.

Door onderzoeken van BAVER (1930) is de invloed van het humusgehalte op de plasticiteit bekend geworden. Humus vergroot of verkleint de plasticiteitsindex van een grond niet, maar verschuift wel het traject, waarin de grond plastisch is. Oxydatie van de organische stof

in een grond veroorzaakt een verlaging van vloeigrens en uitrolgrens beide, maar het verschil van deze grootheden blijft constant. Bij humus-toevoeging treedt het tegengestelde op, waarbij eveneens de plasticiteit hetzelfde blijft. BAVER verklaart dit als volgt. Bij bevochtiging van een grond neemt allereerst de sterk wateraantrekkende humus water op. Pas daarna kunnen de oppervlakte-filmen van de kleicolliden zich allengs verzadigen. De uitrolgrens ligt derhalve hoog. Is de uitrolgrens echter eenmaal bereikt, dan neemt humus geen water meer op, zodat alle water, wat boven de uitrolgrens wordt toegevoegd, dient om de waterfilmpjes van de klei te verzadigen. Dit water is in hoeveelheid hetzelfde als bij de humusvrije klei. De plasticiteitsindex van klei is derhalve onafhankelijk van het humusgehalte (vgl. onderstaande cijfers):

	humus %	vloeigrens	uitrolgrens	plasticiteitsindex
Grond I	{ 3,5	41,6	36,5	5,1
	{ 0	25,1	19,8	5,3
Grond II	{ 7	62,3	52,2	10,1
	{ 0	37,5	27,7	9,8
Grond III	{ 3,9	32	27	5
	{ 2,6	26	22	4

De bovengrond van de meeste klei-afzettingen bezit gewoonlijk een hoger humusgehalte dan de ondergrond. Ondergronden bezitten een lagere uitrolgrens dan bovengronden.

Op de invloed van humus op de dwarse sterkte van het droge product, werd sub c reeds gewezen.

e. de geadsorbeerde kationen.

Experimenten over de beïnvloeding van de plasticiteit en van de drooigeïenschappen door middel van zouttoevoegingen zijn o.m. verricht door SCHURECHT en McMAHON (1942), FRÉCHETTE en PHILLIPS (1929), BODIN en GAILLARD (1930, 1933) en HENRY en SIEFERT (1941).

BAVER (1928) vond, dat de kationenbezetting van groot belang is voor de plasticiteit. Zouttoevoegingen verlagen zowel vloeigrens als uitrolgrens, doch niet steeds beide in gelijke mate. Na-klei bezit een grotere plasticiteit dan K-klei, H-klei en Ca-klei. Ca-klei en H-klei zijn eveneens meer plastisch dan K-klei. BAVER verklaart dit op grond van de verschillende hydratatie van deze ionen. HENRY en SIEFERT (1941) komen tot overeenkomstige conclusies: H-klei bezit betere drooigeïenschappen dan kleien met andere kationenbezetting (zie fig. 6a en 6b); de droogsnelheid van H-klei is groter dan van de Na, K en Ca-klei (Tennessee ball clay en N. Carolina kaolien).

De toevoeging van zouten leidt tot coagulatie van de kleien. Vooral H-kleien en Ca-kleien bezitten een poreuze coagulaat-structuur, zodat de waterbeweging in deze kleien gemakkelijker verloopt dan in de gepeptiseerde kleien (SCHURECHT en McMAHON); een snelle waterbeweging in de plastische kleimassa voorkomt het optreden van een te steile vochtgradiënt, waardoor krimp scheuren ontstaan.

§ 4. Samenvatting.

1. De klei-water-betrekkingen bepalen de droogeigenschappen van de gronden.
2. Er bestaan verschillende methoden om deze klei-water-betrekkingen objectief vast te leggen. Besproken werden de methoden van BLAIR, ATTERBERG, COSSELMAN en PFEFFERKORN.
3. Met behulp van de Atterbergse consistentiecijfers kunnen snel en eenvoudig de droogeigenschappen gediagnosticeerd worden. Een hoge uitrolgrens is gewoonlijk gecorreleerd met een geringe droogsnelheid; een grote plasticiteit met een belangrijke normale krimp; een hoog omslagpunt met een belangrijke "residual shrinkage". Worden in een grond lage waarden voor alle consistentiecijfers gevonden, dan wijst dit op geringe dwarse sterkte in droge toestand. De plasticiteit en de bewerkbaarheidsmarge moeten bij voorkeur met elkaar in evenwicht zijn.
4. De intrinsieke factoren, welke de klei-water-betrekkingen bepalen, werden nagegaan.

Hoofdstuk III.

BESCHRIJVING VAN HET DROOGPROCES VAN KLEI.

DE THEORIE VAN HET DROGEN.

§ 1. Beschrijving van het droogproces.

Het drogen van klei is te beschrijven als een verdampingsproces van poreus, min of meer hygroscopisch materiaal. De mate van porositeit en hygroscopiciteit kan door verschillende factoren beïnvloed worden (Hoofdstuk II § 3), maar is gewoonlijk voor een bepaalde kleisoort een gegeven grootheid.

Bij het begin van het droogproces heeft de klei een watergehalte, liggende tussen uitrolgrens en kleefgrens, steeds echter kleiner dan de vloeigrens. In het gunstigste geval komt het initiaal watergehalte overeen met het punt van maximale cohesie; de plasticiteit is hierbij optimaal en de plastische vervormbaarheid is derhalve groot.

Op het oppervlak van de kleimassa bevindt zich een aaneengesloten waterfilm, waarvan de verdamping uitgaat (vgl. KRISCHER 1938). De meniscus is in het algemeen niet horizontaal, maar gegolfd, zoals aangegeven in fig. 7. Daar de gebolde menisci relatief de kleinste oppervlaktespanning bezitten, gaat de verdamping voornamelijk hiervan uit. Het verdampte water wordt door stroming uit het binnenste van de kleimassa aangevuld.

Bij het droogproces onderscheidt men nu gewoonlijk drie stadia (vgl. HAINES (1923), MELLOR (1932 - 1933), MACEY (1933-1934), KRISCHER (1938) etc.):

a. "constant rate period", waarin de droogsnelheid (= waterverlies per tijdseenheid) per oppervlakte-eenheid constant is, onafhankelijk van het watergehalte van de klei. De droogsnelheid blijkt uitsluitend een functie te zijn van het gebrek aan waterverzadiging van de lucht bij de temperatuur, waarbij het proces zich afspeelt (MACEY, 1937-1938); m.a.w. de droogsnelheid wordt bepaald door het verschil tussen de dampdruk van de waterfilm op de kleimassa en de dampdruk van de omringende lucht. De verdamping verloopt volgens dezelfde wetten als de verdamping van een vrij wateroppervlak; op de analogie tussen verdamping in het "constant rate" stadium en de verdamping van een vrij wateroppervlak, werd o.m. gewezen door MACEY, KRISCHER, TERZAGHI en WOODRUFF.

Wanneer water van het kleioppervlak verdampt, heeft dit tengevolge, dat de kleideeltjes in de oppervlaktelaag dichter bij elkaar getrokken worden (z.g. oppervlaktekrimp). Volgens MACEY (1941-1942) betekent dit een toename van de afstoting tussen de gelijknamig geladen kleideeltjes, waardoor hydrostatische onderdruk ontstaat in het water van de oppervlaktelaag. Deze hydrostatische onderdruk wordt opgeheven door aanvoer van water uit het binnenste van de kleimassa, waardoor het waterfilmje op het kleioppervlak in stand gehouden wordt. Deze verklaring voor het in stand houden van het waterfilmje op het oppervlak is vermoedelijk niet juist. Eenvoudiger is het om te zeggen, dat vloeibaar water steeds streeft naar de toestand van de kleinste oppervlaktetenspanning, d.w.z. de instandhouding van de waterfilm is waarschijnlijker dan de terugtrekking van de menisci in de poriën, tijdens "constant rate". Voor de instandhouding van de waterfilm wordt derhalve water aangezogen uit het binnenste van de kleimassa. Deze aanzuiging roept een hydrostatische gradiënt in het leven.

In het normale geval is de verdamping aan het kleioppervlak in evenwicht met de wateraanvoer uit het binnenste. Blijft het watertransport beneden de verdamping (wordt m.a.w. de drukgradiënt te steil) dan treedt differentiële krimp op met als gevolg scheurvorming.

Kenmerkend voor het constant rate stadium is het optreden van krimp; uit het bovenstaande volgt, dat de krimp quantitatief gelijk is aan het verdampte watervolume. In fig. 8 is het constant rate stadium weergegeven door de lijn AB, die de bissectrix vormt tussen horizontale en verticale as. AB geëxtrapoleerd naar de verticale as geeft het netto-volume van de vaste fase van de kleimassa; DC stelt het poriënvolume van de gedroogde kleimassa voor. HAINES publiceerde een aantal van deze curven, evenals vele anderen na hem, betrekking hebbend op uiteenlopende grondsoorten. Bij alle gronden zijn de krimpcurven gelijkvormig.

Naarmate de kleideeltjes onderlinge vaste contactplaatsen krijgen, houdt de normale krimp op. SHERWOOD en COMINGS hebben opgemerkt, dat deze z.g. "surface shrinkage limit" samenvalt met het einde van de constant rate periode; vgl. ook HAINES (1923).

b. "falling rate period", waarin de droogsnelheid kleiner wordt, naarmate de droging voortschrijdt. De waterfilm op het kleioppervlak blijft (in het normale geval) in stand, totdat de zanden kleideeltjes in de gehele kleimassa onderlinge vaste contactplaatsen

bezitten. Bij verdere droging trekken de watermenisci zich in de capillairen terug, m.a.w. het droogfront verplaatst zich van het kleioppervlak naar binnen. Het waterdamp-transport geschiedt in de capillairen door diffusie; naarmate de dampspanningsgradient afneemt (bij het langer worden van de capillairen), wordt de droegsnelheid derhalve kleiner.

Tijdens dit droogstadium treedt een geringe nakrimp van het materiaal op, toe te schrijven aan gedeeltelijk verlies van de geadsorbeerde waterfilmpjes. Deze "residual shrinkage" treedt het minst op bij de grofkristallijne kaolinieten (vgl. HAINES), het meest bij de montmorillonieten.

G. s. n a d r o g i n g s s t a d i u m, waarbij het adsorbief gebonden water verdreven wordt. Dit stadium speelt zich in de oven af en is van minder belang. De z.g. residual shrinkage, begonnen in de "falling rate" periode, zet zich in dit nadrogingsstadium voort en kan oorzaak zijn voor het optreden van kleine scheurtjes in het materiaal. Het nadrogingsstadium, dat in wezen slechts een voortzetting is van de falling rate periode, zal hieronder niet apart behandeld worden.

In de fig. 8 tot en met 12 is het droogproces van klei schematisch weergegeven.

De theoretische uitwerking van het droogproces van klei geschiedde in hoofdzaak door HAINES (1923), FISHER (1923), MACEY (1932-1944), KRISCHER (1938, 1940), KRISCHER en GÖRLING (1938), VAN DER HELD (1939), WOODRUFF (1941), LAURITZEN en STEWART (1941, 1948), SPRENGER (1948), L'HERMITE (1947) e.a.

§ 2. De theorie van het drogen. De "constant rate" periode.

De verdamping gaat uit van het aaneengesloten waterfilmpje op het kleioppervlak (KRISCHER 1938), waar water van de vloeistof-phase in de gasphase over gaat, zodra de relatieve vochtigheid van de lucht kleiner dan ongeveer 99% bedraagt. De verdampingssnelheid (= waterverlies per tijdseenheid) is derhalve allereerst afhankelijk van de diffusiesnelheid van waterdamp in de lucht. Het verdampte water wordt tijdens dit droogstadium aanstonds aangevuld door capillaire stroming van water uit het binnenste van de kleimassa. Bij een beschouwing van de verdamping tijdens de "constant rate" periode moeten derhalve betrokken worden:

- a. diffusie van waterdamp van het kleioppervlak naar de omringende lucht,
- b. waterstroming en diffusie uit het binnenste van de kleimassa naar het verdampend oppervlak.

ad a. De hoeveelheid waterdamp, die per tijdseenheid door een oppervlak van 1 cm^2 diffundeert, is evenredig met het concentratieverhang in de richting, loodrecht op dat oppervlak. Is bijv. c_1 de waterdampconcentratie in een bepaald punt op het kleioppervlak en c_2 de waterdampconcentratie op een punt op afstand Δx van c_1 , dan bedraagt het concentratieverval $c_1 - c_2 = \Delta c$, en het concentratieverhang

$\frac{\Delta c}{\Delta x}$. De hoeveelheid waterdamp, welke per tijdseenheid door een vlakje van 1 cm^2 passeert, bedraagt nu:

$$q = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} \dots\dots\dots(1)$$

waarin D de diffusiecoëfficiënt van waterdamp in lucht voorstelt, een van het milieu afhankelijke grootheid. Wanneer wij Δx tot nul laten naderen, kan verg. (1) als een differentiaalquotiënt geschreven worden:

$$q = -D \frac{dc}{dx} \dots\dots\dots(2)$$

De invloed van een eventueel temperatuursverschil tussen c_1 en c_2 is in het bovenstaande buiten beschouwing gelaten. Houdt men wel rekening met een temperatuursverschil, dan moet verg. (2) als volgt gewijzigd worden. Het concentratieverval tussen c_1 en c_2 bedraagt:

$$\Delta c = \frac{\gamma_w \Delta \pi}{p} \dots\dots\dots(3)$$

waarin γ_w = s.g. van waterdamp bij de druk p en de temperatuur van het proces. Voor de omrekening van de rekengrootheid γ_w zie men VAN DER HEID, pag. 117:

$$\gamma_w = \gamma_{w0} \frac{p_0^{T_0}}{p^T}$$

γ_{w0} = s.g. van waterdamp bij 0° en 760 mm Kwik = $8,04 \times 10^{-4}$ g/cm³
 T_0 = 273 °K

T = temperatuur van het droogproces, °K

p_0 = 760 mm kwik.

p = druk van het gasmengsel in mm kwik

$\Delta \pi$ = verschil van de partiële waterdampdrukken in c_1 en c_2 , in mm kwik

Verg. (3) gesubstitueerd in (1) resp. (2) geeft:

$$q = -D \frac{\gamma_w}{p} \frac{d\pi}{dx} \dots\dots\dots(4)$$

Deze vergelijking geeft de bruto-verdamping aan per cm² kleioppervlak en heeft derhalve betrekking op stroming en diffusie. Het bedrag van de stroming is als volgt te berekenen: aan het kleioppervlak gaat water van de vloeistof- in de gasfase over; deze overgang gaat gepaard aan volumevergroting per gewichtseenheid water, daar water in de vloeistofphase een kleiner volume inneemt dan in de gasfase. Men kan ook zeggen, dat tengevolge hiervan een waterdampstroming van het oppervlak af plaats vindt. De snelheid van deze stroming bedraagt, bij een verdamping van q g water per tijdseenheid,

$$\frac{q}{\gamma_w} \text{ om/sec.}$$

Door een oppervlak van 1 cm², evenwijdig aan het kleioppervlak, wordt nu door stroming medegevoerd:

$$\frac{q}{\gamma_w} \cdot e = \frac{q}{\gamma_w} \cdot \frac{\pi}{p} \gamma_w = q \frac{\pi}{p} \text{ g/m}^2 \text{ sec.}$$

De hoeveelheid waterdamp, meegevoerd door zuivere diffusie, bedraagt derhalve:

$$q - q \frac{\pi}{p} = - D \frac{\gamma_w}{p} \frac{d\pi}{dx}$$

ofwel:

$$q = - D \frac{\gamma_w}{p - \pi} \frac{d\pi}{dx} \dots\dots\dots(5)$$

Bij droging in normale lucht van 1 atm. en kamertemperatuur is π te verwaarlozen ten opzichte van p , zodat dan verg. (4) gebruikt kan worden. Bij droging onder verlaagde druk of bij hoge temperatuur mag π niet verwaarloosd worden ten opzichte van p , en derhalve moet dan verg. (5) gebruikt worden.

Van de in het bovenstaande gebruikte diffusiecoëfficiënt bestaan verschillende metingen. KRISCHER geeft op:

$$D = 1,59 \times 10^{-4} \frac{T^{2,3}}{P_0}$$

Volgens MACHE is

$$D = 1,43 \times 10^{-3} \frac{T^{1,89}}{P_0}, \text{ terwijl STIRMER vermeldt:}$$

$$D = 3,23 \times 10^{-3} \frac{T^{1,81}}{P_0}$$

De orden van grootte van de drie opgaven stemmen ten naasten bij overeen; de temperatuur-afhankelijkheid is evident.

Voor de berekening van de droogsnelheid gedurende de constant rate periode, kan men in de praktijk met voldoende nauwkeurigheid voor de meeste gevallen gebruik maken van de formules voor de verdamping van een vrij wateroppervlak. TERZAGHI vermeldt, dat een vochtig klei-oppervlak per tijdseenheid ongeveer 4% méér verdampt dan een vrij wateroppervlak. WOODRUFF vermeldt voor zandige leem, dat deze per tijdseenheid per cm^2 iets minder water verdampt dan vrij water (vgl. ook fig. 10). MACEY vond een bevredigende overeenstemming tussen beide verdampfingsprocessen, berekend uit literatuurgegevens.

In de loop der jaren is een groot aantal vergelijkingen opgesteld of empirisch bepaald om de verdamping van wateroppervlakken te berekenen, o.a. de volgende, deels ontleend aan een publicatie van LURIE en MICHAILOFF (1936):

STEFAN:
$$\frac{q}{t F} = \frac{D}{l} \ln \frac{p - \pi_1}{p - \pi_w}$$

SCHIRBECK:
$$\frac{q}{t F} = \frac{D'}{l} (1 + \alpha T) \ln \frac{p - \pi_1}{p - \pi_w} \sqrt{v}$$

TRABERT:
$$\frac{q}{t F} = D'' (1 + \alpha T) (\pi_w - \pi_1) \sqrt{v}$$

HIMUS and HINCHLEY:
$$\frac{q}{tF} = \left(\frac{\pi_w - \pi_l}{50} \right)^{1,2} \cdot 1000 \text{ (in stilstaande lucht)}$$

$$\frac{q}{tF} = (31,0 + 13,5 v) (\pi_w - \pi_l) \text{ (in stromende lucht)}$$

LURIE en MICHAÏLOFF:
$$\frac{q}{tF} = (22,0 + 16,8 v) (\pi_w - \pi_l)$$

BRAAK (Ref. VAN DER HELD):
$$\frac{q}{tF} = C(1 + \alpha T)(1 + Av)(\pi_w - \pi_l) \frac{760}{p}$$

VAN DER HELD:
$$\frac{q}{tF} = \frac{8,12 \cdot 10^3}{p} (e^{-1,0 v} + 2,25 v^{0,75}) (\pi_w - \pi_l)$$

waarin voorstellen:

q = verdampte waterhoeveelheid in g.

t = tijd in uren.

F = verdampend oppervlak in m².

D = diffusieconstante voor water in lucht.

l = afstand van het verdampend oppervlak tot de buitenatmosfeer.

p = barometerstand in mm kwik.

π_w = verzadigde waterdampdruk bij de temperatuur van het verdampend wateroppervlak, in mm kwik.

π_l = partiële waterdampdruk in de lucht, in mm kwik.

v = windsnelheid in m/sec.

α = uitzettingscoëfficiënt van gassen (= $\frac{1}{273}$)

C en A = experimenteel te bepalen constanten.

e = grondtal van de natuurlijke logaritmie = 2,71828.

De formule van LURIE en MICHAÏLOFF, die empirisch opgesteld is bij windsnelheden van 1 tot 7,5 m/sec, geeft voor v = 0.

$$\frac{q}{tF} = 22,0(\pi_w - \pi_l)$$

terwijl de formule van VAN DER HELD geeft (voor p = 760 mm, v = 0)

$$\frac{q}{tF} = 10,7(\pi_w - \pi_l)$$

en die van HIMUS en HINCHLEY:

$$\frac{q}{tF} = 31,0(\pi_w - \pi_l)$$

De uitkomsten lopen derhalve vrij sterk uiteen. In onderstaande tabel zijn voor enige windsnelheden deze drie formules vergeleken:

v in m/s	waarden voor $\frac{q}{tF(\pi_w - \pi_1)}$		
	vgl. LURIE-MICHAÏLOFF	vgl. V.D.HELD	vgl. HIMUS-HINCHLEY
0	22,0	10,7	31,0
0,2	25,4	15,9	33,7
1	38,8	28,0	44,5
5	106	80,8	98,5
10	(190)	136	(166)
25	(442)	269	(368)

(voor $\phi = 760$ mm).

Bij toepassing van bovenstaande formules op het drogen van klei tijdens "constant rate", moet men wel bedenken, dat deze slechts gelden voor éénzijdige verdamping. Drogende stenen bijv. staan bloot aan vrijwel alzijdige verdamping; als verdampend oppervlak moet dus het totale buitenoppervlak genomen worden.

De totale per steen te verdampen hoeveelheid water kan gemakkelijk bepaald worden volgens in hoofdstuk II beschreven methoden. Voor de constant rate periode bedraagt deze hoeveelheid:

initiaal watergehalte - krimprens = "constant rate" water.

Het buitenoppervlak van het te drogen materiaal is gemakkelijk te meten, terwijl bij bekende droogtemperatuur π_w en π_1 eveneens te meten zijn (o.a. uit het verschil tussen de temperatuur van droge en natte thermometer, vgl. MACEY 1937 - 1938). De droogtijd voor de constant rate periode is derhalve te berekenen. Welke formule het best voor deze berekening te gebruiken is, is niet zonder meer te voorspellen. Vermoedelijk is de formule van VAN DER HELD nauwkeuriger dan de overige. Deze onderstelling dient echter nog door experimenten bevestigd te worden.

ad b. De wateraanvoer uit het binnenste der kleimassa moet op ieder moment van de constant rate periode gelijke tred houden met de verdamping aan het oppervlak. De maximale droogsnelheid is derhalve, naast de oppervlakteverdamping, afhankelijk van de snelheid van waterbeweging binnen de klei. De watertoevoer naar het kleioppervlak wordt in stand gehouden door de oppervlaktetension van de watermenisci in de capillaire ronden aan het verdampend oppervlak. De trekkracht van de watermenisci bedraagt:

$$K = 2 \pi r \cdot s \cos \alpha = \pi d \cdot s \cos \alpha \dots \dots \dots (6)$$

waarin: d = diameter van de capillair

s = oppervlaktetension

α = randhoek tussen vloeistofspiegel en capillaire wand.

Bij het begin van het droogproces heeft de kromtestraal van de meniscus nog geen minimale waarde. α is groot (bijna 90° , zie fig. 11), $\cos \alpha$ derhalve klein. Gedurende de "constant rate" periode

neemt ϕ allengs af, totdat zij tenslotte vrijwel 0° wordt. De trekkracht van de watermeniscus bereikt dan haar maximale waarde; de kromtestraal is dan minimaal.

Met betrekking tot de waterbeweging in de kleimassa, moeten volgens WOODRUFF (1941) drie soorten poriën onderscheiden worden:

1. poriën met effectieve straal, groter dan $1,5 \mu$. Waterverplaatsing in deze poriën geschiedt door stroming (d.w.z. in de vloeibare fase), en wel volgens de wetten, welke gelden in capillairen. Vocht-potentiaalverschillen worden snel verevend.
2. poriën met effectieve straal van $0,2 - 1,5 \mu$. De verdrijving van een spoortje water uit poriën van deze afmetingen verlaagt de druk op het overblijvende water tot de dampdruk van het water aan het grensvlak vloeistof-gas, d.w.z. tot de waterdampspanning boven de meniscus. Dit water bevindt zich bij het kookpunt en kan alleen in dampvorm verdreven worden. Het water in deze poriën beweegt zich alleen door diffusie, d.w.z. als waterdamp. De verevening van vocht-potentiaalverschillen geschiedt langzaam.
3. poriën met effectieve straal, kleiner dan $0,2 \mu$. Het water in deze poriën wordt beheerst door adsorbtieve krachten, werkzaam aan het grensvlak vaste stof/vloeistof. De totale druk op het water (= atmosferische druk plus adsorbtiekracht) gaat haar dampspanning te boven en derhalve is dit water stabiel; het kan in de grond als vloeistof bewegen, maar kan slechts als damp eruit verdreven worden.

De meeste kleien bevatten poriën van alle genoemde wijden. De overgang van de waterbeweging van de sub 1 genoemde capillairen naar de sub 2 genoemde, geschiedt bij een vocht-potentiaal van $pF = 3$ (= field capacity); de overgang van poriën van groep 2 naar groep 3 bij een vocht-potentiaal overeenkomende met $pF = 4,1$ (= ongeveer bij het z.g. wilting point).

In zandige gronden komen voornamelijk poriën van de eerste groep voor, terwijl in geknede zware kleigronden voornamelijk poriën van de tweede en derde groep voorkomen.

De hoeveelheid water, die per tijdseenheid door een oppervlak van 1 cm^2 in de kleimassa stroomt, bedraagt:

$$Q_w = -k \frac{d\psi}{dx} \dots\dots\dots(7)$$

waarin: Q_w = het debiet (in gewichtseenheden per oppervlakte-eenheid per tijdseenheid),

k = vochtgeleidingsvermogen, een grootheid, afhankelijk van het vochtgehalte en van de aard van de klei.

$$\frac{d\psi}{dx} = \text{vochtigheidsgradiënt.}$$

Verg. (7) is principiëel hetzelfde als de door DARCY voorgestelde betrekking voor watertransport in de grond: stroomsnelheid = drukverhang \times doorlatendheidscoëfficiënt.

Behalve capillaire waterstroming (in de sub 1 en 3 genoemde poriën) heeft er in de kleimassa diffusie plaats (in de sub 2 genoemde poriën). Het totale watertransport binnen de klei wordt derhalve:

$$Q_{tot} = Q_w + Q_D \dots\dots\dots(8)$$

waarin Q_D het vochttransport door diffusie voorstelt. Nu is (cf KRISCHER 1940):

$$Q_D = - \frac{D}{\mu \phi} \frac{P}{RT} \frac{1}{P - \pi} \frac{d\pi}{dx} \dots\dots\dots(9)$$

waarin:

- D = diffusieconstante van water in de kleimassa
- P = totale druk van het gasmengsel, atmosferische druk
- R = gasconstante
- T = absolute temperatuur
- π = partiële waterdampdruk
- $\mu \phi$ = een van het vochtgehalte en van de aard van het materiaal afhankelijke grootte, die aangeeft hoeveel maal de diffusie binnen het materiaal kleiner is dan de diffusie in de vrije lucht. Zijn alle poriën volledig met water gevuld, dan is $\mu \phi = \infty$, d.w.z. dan is er geen diffusie. Voor $\phi = 0$ wordt $\mu \phi$ de diffusieweerstand van de droge klei.

VAN DER HELD (1939) noemt $\frac{D}{\mu \phi}$ de schijnbare diffusieconstante, D_s . Verg. (7) en (9) gesubstitueerd in (8) geeft:

$$Q_{tot} = - \left\{ k \frac{d\phi}{dx} + D_s \frac{P}{RT} \frac{1}{P - \pi} \frac{d\pi}{dx} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

Door differentiëren naar de tijd t leidt KRISCHER (1940 p. 18) hieruit de differentiaalvergelijking voor de totale waterbeweging binnen de kleimassa af. Wij volstaan met het weergeven van het resultaat:

$$\frac{d(\phi + V_L \frac{P}{RT})}{dt} = \frac{d \left\{ \chi \frac{d\phi}{dx} + D_s \frac{P}{RT} \frac{1}{P - \pi} \frac{d\pi}{dx} \right\}}{dx} \dots\dots(11)$$

V_L is het volume van de met lucht gevulde poriën in de kleimassa. Voor de drogingen van grof poreuze stoffen met goede capillaire vochtgeleiding, bij lage temperatuur en in normale luchtdruk mag gedurende de "constant rate" periode het aandeel van de diffusie in het watertransport verwaarloosd worden ten opzichte van het aandeel van de capillaire stroming. Verg. (11) mag dan vereenvoudigd worden tot:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d(\chi \frac{d\phi}{dx})}{dx} \quad \text{ofwel:}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \chi \frac{d^2\phi}{dx^2} \dots\dots\dots(12)$$

waarin: χ de hydrostatische overdruk voorstelt en χ de permeabiliteitscoëfficiënt.

Verg. (12) geldt slechts voor monodimensionale waterstroming. Bij het droogproces heeft men in het algemeen met waterstroming in drie dimensies te maken, n.l. in de x, y en z richting. De algemene vergelijking voor de waterstroming luidt dan:

$$\frac{d\psi}{dt} = \chi \left(\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{d^2\psi}{dy^2} + \frac{d^2\psi}{dz^2} \right) \dots\dots\dots(13)$$

Om verg. (13) in een oplosbare vorm te krijgen, maakt men gebruik van het feit, dat de hydrostatische overdruk als functie van het vochtgehalte en van het poriënvolume is te schrijven (vgl. MACEY (1941-1942), l'HERMITE 1947 e.a.).

Wanneer V het brutovolume van 100 g klei is, S het nettovolume en W het watergehalte, dan geldt:

$$V = S + M.$$

Experimenteel vond MACEY nu, in overeenstemming met waarnemingen van TERZAGHI, dat bij toepassing van mechanische druk op een plastische klei, het vochtgehalte exponentieel samenhangt met de aangewende druk, n.l.

$$P = \alpha e^{-\beta M} \dots\dots\dots(14)$$

waarin P de aangewende druk voorstelt, α en β materiaalconstanten (zie tabel 7) en e het grondtal van de natuurlijke logarithme.

Ook het waterdoorlatend vermogen C bleek in eenzelfde eenvoudige betrekking te staan tot het vochtgehalte, n.l.

$$C = \nu e^{\xi M} \dots\dots\dots(15)$$

waarin ν en ξ wederom constanten voorstellen (zie tabel 7).

De differentiaalvergelijking voor monodimensionale waterstroming door klei kan nu geschreven worden (vgl. MACEY 1941-1942, p. 79)

$$\frac{d}{dx} \left(C \frac{dP}{dx} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{M}{S + M} \right) \dots\dots\dots(16)$$

Substitutie van (14) en (15) in (16) geeft:

$$\alpha\beta\nu \frac{d}{dx} \left[e^{(\xi - \beta)M_0} \frac{dM}{dx} \right] = \frac{d}{dt} \left(\frac{M}{S + M} \right)$$

ofwel:

$$\alpha\beta\nu (S + M) e^{(\xi - \beta)M_0} \cdot \frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dM}{dt} \dots\dots\dots(17)$$

Om verg. (17) te kunnen integreren maakt men gebruik van de volgende grensvoorwaarden:

1. bij het begin van "constant rate" is het water uniform verdeeld in de gehele kleimassa, d.w.z. $M = M_0$ bij $t = 0$ voor alle waarden van x .
2. tijdens "constant rate" is de droogsnelheid constant, d.w.z. M is een lineaire functie van t , dus

$$\frac{dM}{dt} = \text{constant.}$$

Wanneer de dikte van de te drogen steen = 1 gesteld wordt, leidt MACEY nu uit (17) af, voor grote waarden van t :

$$M = M_0 - \frac{A}{l} \left(t + \frac{x^2}{2} - \frac{l^2}{6} \right) \dots \dots \dots (18)$$

Met deze vergelijking (die echter opgesteld is voor éézijdige verdamping) kan voor grote waarden van t het vochtigheidsverloop in het drogende materiaal beschreven worden. Uit een groot aantal experimenten bleek (MACEY, 1941-1942 p. 100 - 115), dat de experimenteel bepaalde watergehalten zeer goed overeenstemden met de berekende waarden. Men raadplege hiervoor de originele publicatie.

In verg. (18) is de tijd t opgegeven in seconden. Voor omrekening op de tijd in uren gebruikt men:

$$t = \alpha/\beta \sqrt{e^{(\beta - \alpha)} M_0 (S + M) \Theta} \cdot 60^2$$

terwijl dan voor A geschreven wordt:

$$A = \frac{\text{gewichtsverlies van het monster}}{\Theta \cdot 60^2 \cdot \alpha/\beta \sqrt{e^{(\beta - \alpha)} M_0} \cdot \text{dwarse doorsnede}}$$

Zeer belangrijk, met het oog op het optreden van krimpscheuren, is het om de snelheid van de waterbeweging binnen de kleimassa in verband te brengen met de verdamping aan het oppervlak. Boven werd reeds kort aangeduid, dat scheurvorming te verwachten is bij een te steile vochtgradiënt in het materiaal, waarbij de buitenste lagen reeds sterk gekrompen zijn, terwijl het binnenste van de kleimassa nog vrijwel het oorspronkelijk volume behouden heeft.

Wanneer een kleimassa opgevat wordt als een bundel capillairen, kan de waterbeweging met grove benadering beschreven worden met de wet van Poisseuille:

$$Q = \frac{\pi r^4 (p_2 - p_1) t}{8 l \eta} \dots \dots \dots (19)$$

- Q = het doorgestroomde volume in cm³.
- r = straal van de capillair in cm
- p₂-p₁ = hydrostatisch drukverschil tussen begin en einde van de capillair in g per cm per sec².
- t = tijd in sec.
- l = lengte van de capillair in cm.
- η = viscositeit van de vloeistof in g per cm per sec.

Nemen wij als voorbeeld een steen, die aan eenzijdige verdamping is blootgesteld. Per eenheid van oppervlak komen op de dwarse doorsnede van de steen bijv. n capillairen voor; de som van de dwarse doorsnedes van deze rond gedachte capillairen bedraagt nu bij benadering

$$n \cdot \pi \bar{r}^2, \text{ waarbij } \bar{r} \text{ de gemiddelde straal dezer capillairen voorstelt.}$$

Het poriënvolume van de groene steen, tijdens constant rate geheel ingenomen door water, bedraagt nu:

$$M = \bar{l} \cdot n \pi \bar{r}^2 \dots \dots \dots (20)$$

waarin \bar{l} de gemiddelde lengte van de capillairen voorstelt. Voor zeer poreus materiaal, aan eenzijdige verdamping blootgesteld, bedraagt \bar{l} ongeveer de totale dikte van de vorm. Voor zeer dicht materiaal berekende VAN DER HELD, dat \bar{l} ongeveer 2 x de dikte van de vorm bedraagt.

Voor de beschouwde n capillairen per m² dwarse steendoorsnede bedraagt nu het doorgestroomde watervolume per tijdseenheid:

$$\frac{Q}{t} = \frac{M r^2 (p_2 - p_1)}{8 \bar{l}^2 \eta} \text{ g/sec.cm}^2 \dots\dots\dots (21)$$

ofwel met gebruik van (20):

$$\frac{Q}{t} = \frac{M^2 (p_2 - p_1)}{8 \pi n \bar{l}^3 \eta} \dots\dots\dots (22)$$

Voor zeer poreus materiaal kan nu voor \bar{l}^3 geschreven worden het totale volume van de beschouwde kleimassa = V. Voor zeer dicht materiaal is \bar{l}^3 ongeveer gelijk aan 8 V. Voor de meeste kleien zal \bar{l}^3 dichter bij de laatste dan bij de eerste waarde liggen. Als benadering nemen wij aan $\bar{l}^3 = 6 V$.

Omtrent het aantal capillairen n, en de straal ervan, heeft MACEY (1941-1942) enige cijfers gepubliceerd, zoals hij deze berekend heeft uit het waterdoorlatend vermogen (zie tabel 8). De waarden voor n lopen uiteen tussen $1,2 \cdot 10^{11}$ en $6,5 \cdot 10^{11}$. Het is duidelijk, dat n een functie is van de granulaire samenstelling van het materiaal. De cijfers van MACEY zijn te verwachten bij klei met een betrekkelijk hoog gehalte aan deeltjes $< 1 \mu$.

De viscositeit ~~van water in een~~ vochtige kleimassa, mag niet zonder meer gelijkgesteld worden aan de viscositeit van vrij bewegelijk water bij die temperatuur. In hoofdstuk II werd reeds gewezen op het feit, dat door de sterke klei-water binding de viscositeit van het water toeneemt. Zij kan zelfs 2 x zo groot worden.

In verg. (22) zijn nu bij benadering alle termen bekend of te bepalen, behalve het drukverschil ($p_2 - p_1$). Het is dit drukverschil per cm (= hydrostatische drukgradiënt), dat het optreden van krimp scheuren bepaalt. Voor iedere kleisoort is de critieke hydrostatische drukgradiënt verschillend, derhalve ook de maximaal toelaatbare droogsnelheid. In de literatuur konden echter geen gegevens gevonden worden omtrent de maximaal toelaatbare drukgradiënt. Wel zijn gegevens bekend omtrent de trekvastheid van kleien (z.g. Festigkeitszahl volgens ATTERBERG), die bij benadering voor ons doel gebruikt kunnen worden. WINTERKORN (1936) vond bij verschillende kleien de volgende waarden:

kleisoort	kleimineraal	% deeltjes $< 5 \mu$	trek vastheid in kg/cm^2
Cecil clay	kaoliniet	77%	4,28
Hagerstown silt loam	illiet ?	42%	7,35
Putnam silt loam	beidelliet	35%	11,55

Hoe geringer derhalve de adsorbtiecapaciteit van het kleimineraal is, des te geringer is ook de trek vastheid.

Wij zijn nu in staat verg. (22) in verband te brengen met de vergelijkingen voor de verdamping vanaf het kleioppervlak, zoals besproken onder a van deze §. Als voorbeeld wordt de vergelijking volgens VAN DER HELD gebruikt, die luidt voor $v = 0$ en $p = 760 \text{ mm}$

$$Q = 10,7 (\pi_w - \pi_1) \text{ g/m}^2.\text{uur}$$

Omgerekend in $\text{g cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ bedraagt Q :

$$Q = 3 \cdot 10^{-7} (\pi_w - \pi_l) \dots \dots \dots (23)$$

In het geval van evenwicht tussen wateraanvoer naar het verdampend oppervlak, en verdamping vanaf dat oppervlak, mag (22) gelijk aan (23) gesteld worden:

$$\frac{M^2 (p_2 - p_1)}{6.8 \pi n V \eta^{*1}} = 3 \cdot 10^{-7} (\pi_w - \pi_l) \dots \dots \dots (24)$$

Voor een willekeurig geval, waarin $V = 1 \text{ cm}^3$ en $M = 0,25 \text{ cm}^3$ genomen wordt en waarbij voor $n = 2 \cdot 10^{11}$, voor $\eta = 0,02$ poise en voor $\pi = 3,14$ gesubstitueerd wordt, luidt (24):

$$\frac{1,04}{1013} (p_2 - p_1) = 3 \cdot 10^{-7} (\pi_w - \pi_l)$$

Wanneer het maximaal toelaatbare drukverschil ($p_2 - p_1$) op 8 atm gesteld wordt ($= 8 \cdot 1,013 \cdot 10^6 \text{ g cm}^{-1} \text{ sec}^{-2}$), dan is het maximum toelaatbare dampdrukverschil ($\pi_w - \pi_l$) hieruit te berekenen. Voor het onderhavig materiaal bedraagt dat:

$$(\pi_w - \pi_l) = \frac{1,04 \cdot 8 \cdot 1,013 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{-7} \cdot 1013} = 2,8 \text{ mm Hg.}$$

Bij 18 °C bedraagt π_w 15,5 mm Hg. Voor een veilige droging moet π_l minstens 12,7 mm Hg bedragen, d.w.z. de relatieve vochtigheid moet boven 82 % blijven.

Voor materiaal met grovere poriën, waarbij $l^3 \propto V$ gesteld mag worden en waarbij n een kleiner getal voorstelt, is het toelaatbare verschil ($\pi_w - \pi_l$) uiteraard groter, zoals uit verg. (24) volgt.

Het is echter duidelijk, dat bovenstaande beschouwing slechts bij grove benadering opgaat. Voorlopig is het veiliger de maximum toelaatbare droogsnelheid gedurende "constant rate" experimenteel te bepalen. De literatuur omtrent de waterbeweging in klei bevat nog te veel tegenstrijdigheden om er een berekening omtrent de bewegingssnelheid voor praktisch gebruik op te baseren.

Voor een berekening van de vochtverdeling in de kleimassa tijdens "constant rate", is verg. (18) praktisch bruikbaar. Zij geldt echter slechts voor eenzijdige verdamping. In een publicatie van 1942 heeft MACEY getracht een vergelijking voor de vochtverdeling af te leiden voor drie dimensionele verdamping. Wij gaan er hier echter niet verder op in.

§ 3. De "falling rate" periode.

Bij de verdamping van iedere kleimassa komt er een moment, waarop de capillaire watertoevoer naar het kleioppervlak niet meer constant kan blijven. Door de gehele massa heen krijgen de gronddeeltjes onderlinge contactplaatsen, waardoor de capillaire radii gefixeerd worden. De zuigspanningen van de watermenisci aan de capillaire monden hebben een maximale waarde bereikt, de wijdsten capillairen het eerst, daarna de nauwere; deze zuigspanningen aan het oppervlak worden in evenwicht gehouden door de allengs groter wordende zuigspanning van de nu gefixeerde capillairen in het binnenste van de kleimassa.

De watermenisci breken tenslotte los van de capillaire mond en wel het eerst in de capillairen met de geringste zuigspanning. Het waterfilmje op het oppervlak is dan verbroken en lucht dringt binnen in de oppervlakte-poriën, waardoor de klei lichter van kleur wordt (Knickpunt

vgl. KRISCHER; omslagpunt volgens ATTERBERG). Slechts het vast gebonden hygroscopisch water is dan nog aan het oppervlak van de droge gronddeeltjes gebonden.

Het droogfront verplaatst zich van het kleioppervlak naar binnen. Boven de mensci blijft verzadigde waterdamp aanwezig, die slechts door diffusie uit de kleimassa verdwijnt.

De ligging en de verplaatsingssnelheid van het droogfront hangt nu af van (vgl. KRISCHER 1940):

- a. de diffusiesnelheid van waterdamp in het droge deel,
- b. de warmtebeweging in het droge deel en
- c. de capillaire waterbeweging in het nog vochtige kleigedeelte.

ad a. De waterdampdiffusie in het droge kleigedeelte heeft veel langzamer plaats dan in de lucht, omdat de capillaire doorsneden klein zijn, terwijl zij bovendien meestal een grillig verloop hebben. Buitendien is het diffusieproces op zichzelf een langzaam verloopend proces: verevening van vochtpotentiaalverschillen geschiedt sneller in de vloeibare dan in de gasvormige phase (vgl. KRISCHER 1938, VAN DER HELD 1939, WOODRUFF 1941).

Voor de berekening van de waterdampdiffusie binnen de kleimassa gebruikt KRISCHER form. (9):

$$Q_D = - \frac{D}{\mu_y} \frac{P}{RT} \frac{1}{P - \pi} \frac{d\pi}{dx}$$

Voor de betekenis der letters zie men boven. Zoals aangeduid voert VAN DER HELD voor de berekening een schijnbare diffusiecoëfficiënt D_s in:

$$D_s = \frac{D}{\mu_y} = \frac{D \xi_0}{\bar{l}} \dots \dots \dots (25)$$

waarin ξ_0 = de som van de loodrechte capillairdoorsneden per oppervlakte-eenheid en \bar{l} = gemiddelde lengte van de capillairen tussen twee evenwijdige vlakken op onderlinge afstand van 1 cm. D_s geeft aan hoeveel water per tijdseenheid door een eenheid van oppervlak getransporteerd wordt bij een dampspanningsverhang = 1. Daar het poriënvolume V van de kleimassa gelijk is aan de som van de loodrechte capillairdoorsneden maal hun gemiddelde lengte, geldt:

$$\frac{D_s}{D} = \frac{V}{\bar{l}^2} = \frac{1}{\mu_y} \dots \dots \dots (26)$$

Voor zeer poreus materiaal is \bar{l} tussen twee parallele vlakken op onderlinge afstand van 1 cm ongeveer gelijk aan 1 cm. Voor zeer dicht materiaal met willekeurig verloopende (recht onderstelde) capillairen, leidde VAN DER HELD af, dat $\bar{l} \approx 2$ cm. De uitersten van μ_y zijn dus

$\frac{1}{V}$ en $\frac{4}{V}$. Bij bekend poriënvolume kunnen de grenzen van μ_y bepaald worden. De berekende waarden blijken overeen te stemmen met de experimenteel gevonden waarden voor μ_y (cf. KRISCHER en GÜRLING 1938). Zo werd voor een bepaalde baksteen gevonden $\mu_y = 9,3$. Daar D bij 18° ongeveer 0,09 is, volgt hieruit voor die baksteen:

$$D_s = \frac{0,09}{9,3} = 9,7 \times 10^{-3}$$

Voor de benaderende berekening van de droogsnelheid tijdens "falling rate" maken wij nu gebruik van het gegeven, dat de verdampingswarmte R gelijk is aan de hoeveelheid warmte van buiten af door het reeds droge gedeelte

getransporteerd (vgl. KRISCHER 1938, 1940 en VAN DER HELD 1939):

$$R D_s \frac{\gamma_w}{p - \pi} \frac{\pi_0 - \pi_1}{x} = \lambda \frac{T_1 - T_0}{x} \dots\dots\dots(27)$$

waarin π_0 de waterdampdruk aan het droogfront voorstelt,
 x = plaats van het droogfront,
 λ = warmtegeleidingscoëfficiënt,
 T_1 = luchttemperatuur,
 T_0 = temperatuur van het droogfront.

Het verdampingsproces tijdens "falling rate" wordt nu door VAN DER HELD in twee trappen verdeeld, n.l. van het droogfront naar het kleioppervlak en vanaf het kleioppervlak naar de vrije atmosfeer.

Voor de eerste trap geldt de diffusievergelijking:

$$W \frac{dx}{dt} = D_s \frac{\gamma_w}{p - \pi} \frac{\pi_0 - \pi_w}{x} \dots\dots\dots(28)$$

en voor de tweede trap:

$$W \frac{dx}{dt} = \chi f \frac{\gamma_w}{\gamma_p} (\pi_w - \pi_1) \dots\dots\dots(29)$$

waarin π_w = waterdampspanning aan het kleioppervlak,
 χ = dampoverdrachtscoëfficiënt $\approx 13,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{uur}$,
 f = correctiefactor voor χ , waarvan de grootte afhangt van de som van de capillaire doorsneden aan het kleioppervlak ($= \xi$). Voor $\xi < 0$ klein is $f \approx 2 \xi > 0 = \frac{2V}{\bar{l}}$.

Voor $\xi > 0$ groot is $f \approx 1$. VAN DER HELD neemt als benaderende waarde aan

$$f = \frac{2V}{\bar{l} + V}$$

Wanneer men in (28) en (29) $\frac{D_s}{W} \frac{\gamma_w}{p - \pi} = A$ stelt en $\frac{\chi f}{W} \frac{\gamma_w}{\gamma_p} = B$

stelt, dan levert een combinatie van deze vergelijkingen, waarbij π_w geëlimineerd wordt:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{AB (\pi_0 - \pi_1)}{A + Bx}$$

Integratie geeft:

$$\frac{B}{2} x^2 + Ax = AB (\pi_0 - \pi_1) t + C,$$

waarin de integratieconstante $C = 0$ (voor $t = 0$ is $x = 0$). Oplossing van de vierkantsvergelijking geeft:

$$x = -\frac{A}{B} \pm \sqrt{\frac{A^2}{B^2} + 2A(\pi_0 - \pi_1)t} \dots\dots\dots(30)$$

Met deze vergelijking kan de verplaatsing van het droogfront met de tijd beschreven worden. Voor de verdamping per oppervlakte-eenheid gedurende "falling rate" vindt men door differentiëren van (30) naar t :

$$w \frac{dx}{dt} = \frac{AW(\pi_0 - \pi_1)}{2\sqrt{\frac{A^2}{B^2} + 2A(\pi_0 - \pi_1)t}} \dots\dots\dots (31)$$

De hoeveelheid water, die in het "falling rate" stadium verdampt moet worden, is bekend uit het vochtgehalte van de krimpgrens (vgl. Hoofdstuk II). Uit de vorm van het te drogen product is x bekend (de dikte van de te drogen laag). Met verg. (31) kan nu bij benadering de droogtijd berekend worden.

WOODRUFF (1941) maakte een eenvoudiger berekening over het verband tussen de uitgedroogde laag en de tijd tijdens "falling rate" en kwam kwalitatief tot hetzelfde resultaat als VAN DER HEILD. Zij L de dikte van de droge laag en Q de verdampende waterhoeveelheid, dan is:

$$L = cQ \quad \text{ofwel} \quad Q = \frac{L}{c}$$

waarbij c een evenredigheidsfactor voorstelt. Voor de verdamping per tijdseenheid geldt:

$$\frac{Q}{t} = D_s \cdot k \cdot \frac{\pi_0 - \pi_w}{L} \quad (\text{zie ook verg. 28})$$

of, daar D_s , k en $\pi_0 - \pi_w$ bij benadering constanten voorstellen:

$$\frac{Q}{t} = \frac{K}{L}$$

Substitutie geeft: $\frac{L}{ct} = \frac{K}{L}$ ofwel $L^2 = K't$ (32)

In fig. 13 is L^2 uitgezet tegen de tijd, ontleend aan WOODRUFF, waaruit blijkt, dat het theoretisch gevonden verband experimenteel bevestigd werd. Verg. (32) is in wezen identiek met verg. (30).

ad b. De warmtebeweging in het reeds droge kleigedeelte verloopt geheel volgens de bekende wetten:

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) \dots\dots\dots (33)$$

waarbij a de temperatuurgeleidingscoëfficiënt voorstelt en x, y en z de rechthoekige coördinaten.

Boven werd reeds aangeduid, dat deze warmtestroom de verdampingswarmte van water aan het droogfront oplevert.

Na het bereiken van het omslagpunt stijgt de temperatuur van het droge kleigedeelte snel tot de luchttemperatuur (d.w.z. de temperatuur van de droge thermometer). Het nog vochtige deel wordt nu door geleiding wel iets opgewarmd, maar behoudt toch vrijwel de temperatuur van de natte thermometer. In fig. 14 en 15 is het verloop van de temperatuur met de tijd weergegeven voor 5 plaatsen binnen de drogende massa. Tevens blijkt het verschil, teweeggebracht door warmtetoevoer van boven of van onder de drogende massa (fig. ontleend aan KRISCHER 1940).

De temperatuur is van groot belang voor de droogsnelheid in het "falling rate" stadium. Hoe hoger deze is, des te steiler zal de dampspanningsgradiënt $\frac{d\pi}{dx}$ zijn, des te steiler ook de temperatuurgradiënt $\frac{dT}{dx}$ in tegengestelde richting. De verdampingsnelheid zal derhalve in dubbel opzicht toenemen (KRISCHER 1940).

ad c. De capillaire waterbeweging in het nog vochtige deel van de klei verloopt geheel, zoals beschreven in § 2, verg. (12). De waterstroming in poriën, kleiner dan $0,2 \mu$, verloopt echter volgens ingewikkelder wetten, waarop hier niet ingegaan wordt.

Gedurende het derde droogstadium wordt een deel van het hygroscopisch water van de kleicolloïden verdampt. Bij sommige kleien, n.l. montmorillonieethoudende, treedt o.a. volgens LAURITZEN (1948) nakrimp op, die een mogelijke oorzaak voor scheuringen vormt. Bij kaolienkleien ontbreekt deze nakrimp, hetgeen in overeenstemming is met de in hoofdstuk I beschreven structuur en eigenschappen.

§ 4. Droging door middel van inwendige warmtetoevoer.

Het gehele betoog van de vorige §§ heeft slechts betrekking op drogen van klei bij warmtetoevoer van buiten af, hetzij door overvloeiende warme lucht (in tunneldrogers etc.), hetzij door directe verhitting van de droogruimte ("hot-floor" drogers etc.).

De droging kan echter ook uitgevoerd worden door middel van inwendige warmtetoevoer, bijv. door Joulewarmte, waarbij het te drogen materiaal onder stroom gezet wordt, ofwel door verhitting in een hoogfrequent veld.

KRISCHER (1940) geeft van de droging van hout in een hoogfrequent veld een voorbeeld, waarvan de gegevens zijn weergegeven in een grafiek (fig. 16).

Uit de grafiek is af te leiden, dat de temperatuur van het materiaal snel tot 100° stijgt, binnenin even snel als buiten. De droogsnelheid bereikt daarbij haar maximale waarde. De temperatuur blijft vervolgens constant, totdat al het water verdampt is; wegens de warmteafgifte aan de omgeving en wegens de eraan onttrokken verdampingswarmte, blijft de temperatuur van het buitenoppervlak steeds iets lager dan de temperatuur in het binnenste. Wanneer wij de vochtverdeling tijdens het drogen in het materiaal nagaan (zie fig. 17), dan is het typerend, dat het vochtgehalte, van binnenuit naar de oppervlakte gaande, toeneemt (volgens KRISCHER het verschijnsel van de capillair-condensatie). Ten aanzien van de in het materiaal optredende spanningen betekent dit, dat aan de oppervlakte druk optreedt, in plaats van trek, zoals bij droging met uitwendige warmtetoevoer. Gevaar voor het optreden van krimp-scheuren bestaat bij deze droging derhalve principiëel niet.

§ 5. Samenvatting.

1. Het droogproces van klei omvat twee scherp gescheiden stadia, n.l. het "constant rate" en het "falling rate" stadium.
2. Tijdens constant rate is de droogsnelheid constant, onafhankelijk van het watergehalte. Het droogproces mag bij benadering beschreven worden als de verdamping van een vrij wateroppervlak, waarvoor verschillende vergelijkingen werden opgesomd. De verdamping is evenredig met het verschil tussen waterdampspanning van het klei-oppervlak en van de omringende lucht.
3. De krimp tijdens constant rate is gelijk aan het verdampt watervolume.
4. Voor een veilige droging moet de wateraanvoer uit het binnenste der kleimassa gelijk zijn aan de verdampende hoeveelheid. Een te steile vochtgradient is oorzaak van het optreden van krimpscheuren. De water-

beweging kan beschreven worden door de verg.

$$\frac{dP}{dt} = c \left(\frac{d^2P}{dx^2} + \frac{d^2P}{dy^2} + \frac{d^2P}{dz^2} \right) \text{ waarbij } c \text{ de capillaire}$$

geleidbaarheidscoëfficiënt voorstelt en P de hydrostatische druk van het water.

$$\frac{dP}{dt} \text{ is tijdens constant rate constant.}$$

5. Tijdens falling rate neemt de droogsnelheid af met de tijd. Het droogproces herleidt zich uitsluitend tot diffusie van waterdamp in de capillairen van de kleimassa en is te beschrijven met:

$$\frac{d\pi}{dt} = a_D \left(\frac{d^2\pi}{dx^2} + \frac{d^2\pi}{dy^2} + \frac{d^2\pi}{dz^2} \right), \text{ waarbij } a_D \text{ de dampspanningsoverdracht-coëfficiënt voorstelt en } \pi \text{ de dampspanning.}$$

6. De warmtebeweging in de kleimassa tijdens falling rate levert de verdampingswarmte aan het droogfront.
7. Bij droging met inwendige warmtetoevoer (bijv. in een hoogfrequent veld) treden geheel andere verschijnselen op dan bij droging met uitwendige warmte-toevoer, speciaal ten aanzien van de optredende trek- en drukspanningen. Krimpscheuring is hierbij uitgesloten.

Hoofdstuk IV.

DE FACTOREN, DIE VAN INVLOED ZIJN OP HET DROGEN VAN KLEI.

Het verloop van het droogproces wordt beïnvloed door

- intrinsieke droogfactoren, bepaald door de aard en eigenschappen van de klei, en vrijwel niet kunstmatig te variëren;
- extrinsieke droogfactoren, welke louter door kunstmatig ingrijpen tot stand komen en bepaald worden.

§ 1. Intrinsieke droogfactoren.

Tot de intrinsieke droogfactoren (vgl. HARMAN and PARMELEE, 1945, LONGENECKER 1943 en MACEY 1941-1942) behoren vooral de granulaire samenstelling van het materiaal, de aard van de organische en anorganische bodemcolloïden en de kationenbezetting van deze colloïden.

In het algemeen wordt door de granulaire samenstelling de poriënwidte, en daarmee de maximale stroomsnelheid van water in de gekneede klei, bepaald, zoals o.m. door BAVER betoogd wordt. Een uitzondering op deze regel vormen de keilemen, die zeer compact zijn ondanks een vrij groot gehalte aan zandfractie. In het algemeen geldt, dat, naarmate de zandfractie groter is, de waterbeweging en de verevening van vochtpoten-

tiaalverschillen sneller zal verlopen. Zoals bekend kan de granulaire samenstelling van de alluviale kleien op korte afstand grote verschillen vertonen, samenhangend met de wijze van sedimentatie. Recente uiterwaardkleien zijn over het algemeen iets meer uniform van granulaire samenstelling dan oude rivierkleien. Aeolische afzettingen (o.a. löss-lemen) zijn over grote uitgestrektheden eenvormig van granulaire samenstelling, residuaire kleigronden in het algemeen eveneens. In Nederland komt residuaire klei slechts voor in het tertiair, en is dus van praktisch geen betekenis.

Door LAURITZEN en STEWART (1941) en LAURITZEN (1948) werden enige waarnemingen gedaan over de invloed van het zandgehalte op het schijnbaar soortelijk volume ¹⁾ van drogende klei en klei-zand mengsels. Het bleek, dat de zandtoevoeging resulteerde in een verlaging van de krimprens. Omtrent de droogsnelheid wordt terloops opgemerkt, dat deze niet merkbaar beïnvloed werd door de zandtoevoeging. Hetgeen in overeenstemming is met de in hoofdstuk III vermelde theorie. De droogduur werd wel beïnvloed, doordat n.l. de zuivere klei een hoger initiaal watergehalte bezat dan de klei-zandmengsels. De auteurs lieten echter na cijfers hieromtrent te vermelden.

Over de invloed van de aard en de relatieve hoeveelheid humus en kleimineralen op de droogeigenschappen, werd in de eerste twee hoofdstukken reeds gesproken. Samenvattend moge het volgende opgemerkt worden:

m o n t m o r i l l o n i e t e n bezitten door hun grote affiniteit tot water en door het sterke micellaire krimp en zwelvermogen in het algemeen ongunstige droogeigenschappen. Deze kleien zijn uitermate plastisch, maar doordat het initiaal watergehalte van het groene product zeer hoog is, is de droogduur lang; de verevening van vochtverschillen heeft gewoonlijk slechts langzaam plaats, waardoor het gevaar voor scheurvorming groot is. De normale krimp is aanzienlijk, de restkrimp (residual shrinkage) eveneens, in overeenstemming met de roosterkrimp loodrecht op de 001 splitsvlakken. De dwarse sterkte van het droge product is zeer groot. Een langzame droging is geboden in verband met het gevaar voor scheurvorming.

i l l i e t e n bezitten een gering micellair krimp- en zwelvermogen, vaak gepaard aan een vrij grote affiniteit tot water. Doorgaans zijn het zeer plastische kleien, waarvan de droogeigenschappen vermoedelijk nauw samenhangen met de fijnheid van verdeling van de kleifractie. Zeer fijn disperse illiet met een relatief hoog gehalte aan deeltjes, kleiner dan $0,5 \mu$, bezit ongunstiger droogeigenschappen dan grof disperse illiet. Of grofdisperse illiet (deeltjesgrootte vooral $1 - 10 \mu$) identiek is met vergruizeld muscoviet, is nog niet opgehelderd; in fysieke eigenschappen lopen beide mineralen slechts weinig uiteen. De neiging tot het vormen van krimp-scheuren komt vooral voor bij fijn disperse illieten, daar de verevening van vochtverschillen hier slechts langzaam kan verlopen. Het initiaal watergehalte van het gevormde product is betrekkelijk hoog, echter lager naarmate de klei meer ijzer bevat. De normale krimp is meestal vrij aanzienlijk, de restkrimp is gering, terwijl de dwarse sterkte van het droge product meestal niet te wensen overlaat.

k a o l i n i e t e n bezitten een relatief geringe affiniteit tot water en vertonen geen micellaire krimp of zwel. Vooral grof kristallijne kaoliniet bezit uitstekende droogeigenschappen, maar de plasticiteit en de dwarse sterkte van het droge product laten te wensen over. Krimp-scheuren treden slechts zelden op en daar het initiaal watergehalte gewoonlijk

¹⁾ Het schijnbaar soortelijk volume is het volume van de gewichtseenheid grond.

laag is, verloopt de droging in betrekkelijk korte tijd. De droogsnelheid mag groot zijn. Naarmate de kaolinit fijner dispers is, stijgt het initiaal watergehalte, terwijl ook de verevening van vochtpotentiaalverschillen minder snel kan verlopen. Plastische, zeer fijn disperse kaolinit (z.g. china clay) kan ten aanzien van haar droogeigenschappen gelijkwaardig zijn aan een lichte illiet-montmorilloniet klei.

K w a r t s rijkdom in de fijne fracties maakt de klei voor vele keramische doeleinden aantrekkelijk. De droogeigenschappen zijn gunstig, daar het initiaal watergehalte gewoonlijk laag is, terwijl de toelaatbare droogsnelheid groot kan zijn. De normale krimp is gering, de restkrimp nihil, terwijl de dwarse sterkte in droge toestand niet te wensen overlaat. Kwartsrijke kleien zijn vrij zeldzaam.

Kleien met mengrooster-kleimineralen zijn vermoedelijk intermediair ten opzichte van de samenstellende componenten. Omtrent hun droogeigenschappen werden geen gegevens gevonden.

Door PETERSON is opgemerkt, dat kaolinitrijke kleien bij droging in de natuur steeds in betrekkelijk kleine aggregaten uiteenvallen (diameter tot 1 cm), terwijl de montmorilloniet- en illietrijke kleien gewoonlijk drogen in grotere aggregaten (pentagonen en hexagonen met diameter tot 40cm). Het humusgehalte en de kationenbezetting modificeren de grootte van deze aggregaten.

Door de h u m u s wordt de porositeit van de kleien gunstig beïnvloed. In humushoudende kleien verloopt de verevening van vochtpotentiaalverschillen sneller dan in humusvrije kleien, waardoor een betrekkelijk grote droogsnelheid toelaatbaar is. Door humus wordt de plasticiteit eveneens vergroot. Het initiaal watergehalte van het gevormde product is evenwel hoger dan bij humusvrije kleien, de droogduur derhalve langer. De dwarse sterkte van het droge product wordt door humus dikwijls verbeterd. Humushoudende kleien worden in het algemeen gemeden voor keramische doeleinden wegens de ongunstige invloed op de kwaliteit van het gebakken product.

De kationenbezetting bepaalt de mate van uitvlokking van de bodemcolloïden en daarmee de porositeit (poriënwiidte). De waterbeweging kan in geocoaguleerde kleien sneller verlopen dan in gepeptiseerde (vgl. LUTZ 1934) en bijgevolg kan de toelaatbare droogsnelheid van geocoaguleerd materiaal groter zijn dan van gepeptiseerd. Natriumbezetting doet klei peptiseren, magnesiumbezetting gewoonlijk eveneens. Ca- en H-bezetting doet klei coaguleren, evenals de bezetting met ionen van hogere valenties. Recente Rijnkleien (d.w.z. de uiterwaardklei van Rijn, Waal en IJsel) zijn steeds geocoaguleerd wegens de aanwezigheid van vrij CaCO_3 ; Maaskleien zijn veel minder geocoaguleerd. Oude rivierkleien (d.w.z. klei, die vóór de bedijking is afgezet) en oude zeekleien zijn gewoonlijk goeddeels gepeptiseerd. Voor zover deze kleien vrij ijzer bevatten, wordt de peptisatie tegengehouden, hetgeen de droogeigenschappen ten goede komt. IJzervrije oude rivierkleien bezitten gewoonlijk ongunstige droogeigenschappen. Oude lemen bevatten gewoonlijk veel vrij ijzer; door hun gunstige granulaire samenstelling, waardoor een gemakkelijke waterbeweging gewaarborgd is, bezitten zij goede droogeigenschappen.

Verschillende bentonieten bezitten van nature een natrium- of magnesiumbezetting. De plasticiteit van deze kleien is zeer groot, maar de droogeigenschappen zijn slecht. Langzame droging is geboden, terwijl het initiaal watergehalte hoog is. Calcium-bentonieten bezitten iets gunstiger droogeigenschappen, maar het initiaal watergehalte is eveneens aanzienlijk; normale krimp en restkrimp zijn belangrijk.

De mate van peptisatie en coagulatie van klei kan beïnvloed worden door bijmenging van zouten, waarvoor verwezen wordt naar § 2, sub h.

Bij een beoordeling van de intrinsieke droogeigenschappen is het nodig steeds drie aspecten te beschouwen, n.l.

- a. de toelaatbare droogsnelheid, door MACEY ook wel veilige droogsnelheid genoemd;
- b. het initiaal watergehalte van het gevormde product en
- c. de normale krimp en de restkrimp.

De factoren sub a en b bepalen de droogduur en daarmee gewoonlijk de uitgestrektheid van de droogruimte. Is de toelaatbare droogsnelheid zeer groot, zoals bijv. het geval is bij de grof kristallijne kaoliniet-kleien, dan levert de droging geen moeilijkheden op. Onder omstandigheden, waarbij de maximum toelaatbare droogsnelheid echter beperkt is, wordt de veilige droging vaak een probleem; vooral wanneer men de droogsnelheid niet in de hand heeft, zoals merendeels het geval is in de grofkeramische industrie, kan dan bij ongunstige weersomstandigheden (droge wind met grote snelheid) het percentage breuk en krimpscheuring aanzienlijk zijn.

Een grote restkrimp maakt klei voor bepaalde doeleinden ongeschikt.

Wanneer de intrinsieke droogeigenschappen van een bepaalde klei goed te noemen zijn, daarbij inbegrepen de waarde van de plasticiteit, wil dit zeggen, dat het bedrijf, dat deze klei exploiteert, steeds vóór ligt bij het bedrijf, dat werkt met klei met slechtere eigenschappen. Andere kwaliteitseigenschappen en bijv. economische factoren kunnen uiteraard het vestigen van klei-industrie op minder geëigende grondsoorten rechtvaardigen.

Over de prospectie van kleien ten aanzien van intrinsieke droogeigenschappen, werd in hoofdstuk II reeds gesproken; in de literatuur is hieromtrent weinig conclusiefs te vinden. Een bepaling van de granulaire samenstelling, het humusgehalte en het gehalte aan vrij ijzer wordt gewenst geacht, evenals een analyse van de aanwezige kleimineralen en van de kationenbezetting. Een bepaling van de plasticiteitsgrenzen, het initiaal watergehalte en de normale krimp, kan het gemakkelijkste geschieden volgens ATTERBERG.

§ 2. De extrinsieke droogfactoren.

Er bestaat een groot aantal mogelijkheden om het droogproces van buiten af te beïnvloeden. Allereerst zal van deze mogelijkheden een opsomming gegeven worden, waarna iedere factor afzonderlijk beschouwd wordt. Tot deze extrinsieke droogfactoren behoren:

1. de klei-water menging bij de vormpersing en het initiaal watergehalte;
2. de mate van coagulatie of peptisatie van het materiaal; zouttoevoeging;
3. de beïnvloeding van de porositeit door bijmenging van grove, niet-hygroscopische bestanddelen;
4. de ontluchting van de vormlingen;
5. de rijpingstijd van de vormlingen;
6. de vorm van het te drogen materiaal;
7. voorverhitting;
8. mechanische druk, uitgeoefend op het materiaal (ook trildruk);
9. de droogtemperatuur en de wijze van warmtetoevoer aan het te drogen materiaal;

10. de waterdampspanning van de lucht en de luchtdruk in de droogruimte;
11. de snelheid van de overvloeiende luchtstroom.

De factoren 1 t/m 6 hebben betrekking op de beïnvloeding van de in de vorige § besproken intrinsieke droogfactoren van de klei, terwijl de overige factoren door de gebruikte drooginrichting bepaald worden. De meeste publicaties over het droogprobleem behandelen slechts een of enige van de aspecten ervan; de publicatiereeks van WHITAKER (1939-1940) bestrijkt het gehele onderwerp, evenals de serie publicaties van MACEY (1937-1945). Minder volledig is de studie van BODIN en GAILLARD (1930-1933); in de voordrachten, gehouden op de symposia over drogen, gepubliceerd in Ind. Eng. Chem. 1937 en Chemisch Weekblad 1949, zijn eveneens een aantal belangrijke aspecten naar voren gebracht. Waardevolle literatuur is ook het jaarlijks referaat van FRIEDMAN in Ind. Eng. Chem. over de ontwikkeling van de droogtechniek.

De opgesomde factoren beïnvloeden ofwel de capillaire stroomsnelheid, ofwel de diffusiesnelheid van water en waterdamp, of beide. De veilige droogsnelheid (= maximum toelaatbaar waterverlies per tijdseenheid, zonder dat gevaar voor krimp-scheurvorming optreedt) kan derhalve in hoge mate gemodificeerd worden. Wanneer het er op aan komt de veilige droogsnelheid te verbeteren, is het echter nog niet gezegd, dat daarvoor steeds een kunstmatige drooginrichting nodig is. Bij droging onder natuurlijke omstandigheden blijft men echter steeds afhankelijk van de wisselvalligheid van de weersomstandigheden, waardoor nu eens de droging te langzaam, dan weer te snel geschiedt, in beide gevallen tot nadeel van de productie. In een kunstmatige drooginrichting, waar de droogpotential (= waterverzadigingsdeficit van de lucht) naar willekeur geregeld kan worden, is de veilige droging slechts een kwestie van perfectie der apparatuur.

Bij droging onder natuurlijke omstandigheden is het gewenst de veilige droogsnelheid zo groot mogelijk te maken, zodat zelfs extreme weersomstandigheden (droge, warme winden) geen aanleiding tot krimpscheuring kunnen zijn; zie de punten 1 t/m 5.

Bij kunstmatige droging spelen de eigenschappen van de kleisoort slechts een secundaire rol: de regeling van temperatuur, luchtstroom en waterdampspanning is hier primair.

ad 1.

De klei-watermenging bij de vormpersing; het initiaal watergehalte.

De homogene klei-water menging is een van de grootste problemen bij de kneding en vormpersing. WHITAKER (1939 1,3) heeft de aandacht gevestigd op het veelvuldig voorkomen van krimpscheuring tengevolge van een onvolledige homogenisatie van het klei-water mengsel. Wanneer in een geperste vorm stukken voorkomen met geringer watergehalte dan de omgeving, dan treedt bij droging ongelijkmatige krimp op: de vochtige gedeelten krimpen meer dan de drogere, zodat scheurvorming het gevolg is. Hetzelfde geldt, wanneer kleisoorten gemengd worden met verschillende granulaire samenstelling, zoals in het rivierkleigebied kan voorkomen. Bij onvolledige homogenisatie treedt ongelijkmatige krimp op tijdens drogen, met alle gevaren daaraan verbonden.

WHITAKER noemt de homogenisatie van het klei-water mengsel de eerste stap naar een veilige droging. Het zal daartoe in veel gevallen nodig zijn de gedolven klei niet rechtstreeks in de mengmolen en kneedmachine te verwerken, maar deze eerst enige tijd op een voorraadhoop te drogen te zetten. Hierdoor wordt bevorderd, dat het materiaal een gering en uniform vochtgehalte verkrijgt, waardoor later de watertoevoer in de meng- en kneedmachine niet telkens bijgeregeld hoeft te worden.

WHITAKER beveelt aan de droge klei van de voorraadhoop vóór de verwerking te vergruizelen in een maalinrichting of tussen walsen. Het droge, fijn vergruizelde materiaal kan gemakkelijker gehomogeniseerd worden dan de grote kleibrokken, die nu eens droog, dan weer vochtig zijn naar gelang zij ondiep of diep gedolven werden. Het fijn vergruizelde materiaal wordt daarna in een mengmolen gestort, waar het bevochtigd wordt. Om een zo gelijkmatig mogelijke bevochtiging te krijgen beveelt WHITAKER het gebruik van een sproeier met zeer fijne broes aan, in plaats van de gebruikelijke watertoevoer in een straaltje.

De bevochtiging van de klei moet tot boven de uitrolgrens gaan, maar moet steeds onder de kleefgrens blijven, zoals in Hoofdstuk II is uiteengezet. Het bewerkbaarheidstraject kan voor verschillende kleigronden nog vrij groot zijn (vgl. ook tabel 5); het is echter een overbodige belasting van de droger om de kleimassa te sterk te bevochtigen, bijv. tot omstreeks de kleefgrens. Het is derhalve belangrijk het initiaal watergehalte van het gevormde product zo laag mogelijk te houden, d.w.z. zo dicht mogelijk boven de uitrolgrens.

Van belang voor de droging is voorts de wijze, waarop het product gevormd wordt. CLAUSZ (1941) bespreekt het verschil in porositeit tussen een met de hand gevormd voorwerp en een machinaal geperst voorwerp. In het laatste geval komen minder grovere poriën voor dan in het eerste, waardoor de waterbeweging soms bemoeilijkt kan worden. WHITAKER (1940³) geeft een korte opsomming van de voor- en nadelen van de diverse gebruikelijke worm-persmachines en andere vormpersers. Voor de stenen-bakkerij schijnt de gewone wormpers nog het beste te voldoen.

Door HURSH en FILIPPI (1938) werd nagegaan of de wijze van afsnijden van de stenen invloed heeft op de droogeigenschappen. Daartoe werden vergeleken stenen, die resp. aan de zijkanten en aan de einden waren gladgesneden. De resultaten van hun experimenten zijn weergegeven in de fig. 18 en 19. De droogsnelheid is in beide gevallen vrijwel gelijk, zowel bij een relatieve luchtvochtigheid van 20% als bij 40%. In de stenen, die aan de einden glad waren gesneden trad echter krimpscheuring op in de proef met 20% relatieve luchtvochtigheid. De "side cut" stenen hebben een grotere veilige droogsnelheid dan de "end cut" stenen. Ook LONGEN-ECKER (1943) vermeldt, dat in vele fabrieken in de V.S. bij voorkeur "side-cut" wordt toegepast.

ad 2.

De mate van coagulatie of peptisatie van het materiaal; bijmenging van zouten.

Op de betekenis van de kationenbezetting voor coagulatie of peptisatie van de klei werd in § 1 reeds gewezen. Voor een veilige droging is het gewenst over een gecoaguleerde klei te beschikken, daar de verevening van vochtpotentiaalverschillen hierin sneller kan plaats vinden dan in gepeptiseerde klei; het initiaal watergehalte is bovendien lager (SCHURECHT, 1939).

McHENRY en SIEFERT (1941) gingen in een aantal proeven het effect van de kationenbezetting op de droogeigenschappen van N. Carolina kaoliniet en Tennessee ball clay na, waarbij de volgende conclusies getrokken konden worden (vgl. ook § 1):

1. H-klei droogde sneller onder gelijke omstandigheden dan de corresponderende Ca-, Na- of K-klei;
2. de krimp, veroorzaakt door het onttrekken van gelijke hoeveelheden water aan de klei, is onafhankelijk van de kationenbezetting.

Deze onderzoekers hebben ook het effect van soda toevoeging op de droogeigenschappen van Georgia kaoliniet onderzocht. Het bleek, dat

toevoeging in geringe hoeveelheden de droogeigenschappen verbeterde, terwijl grotere hoeveelheden dit gunstig effect weer teniet deden (zie fig. 20). De in fig. 20 weergegeven krimpcurven corresponderen met onderstaande cijfers:

curve	toegevoegde Na_2CO_3 in %	initiaal watergehalte in %	dry porosity %
1	0	16	39,4
2	10	6	31,2
3	20	14	33,4
4	40	18	34,0
5	60	21	35,1

Volgens WHITAKER (1939²) en SCHURECHT (1939) hebben sommige zouten, zoals Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 , en ook NaOH , de eigenschap om de plasticiteit van kleien te verlagen, terwijl andere stoffen, zoals $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en H_2SO_4 , de plasticiteit verhogen. SCHURECHT bereikte door toevoeging van Na_2CO_3 en Na_2SiO_3 , in hoeveelheden, variërend van 0,25 tot 1,0 %, een verlaging van het initiaal watergehalte met ongeveer 4 tot 30%; door de kalk of zuurtoevoeging werd het initiaal watergehalte verhoogd met ongeveer 10 tot 32%. Als de klei te vochtig is, kan zij derhalve op deze wijze bijgewerkt worden.

HAAS en RIES (1941) onderzochten de invloed van zuurtoevoeging op de droogtijd en droogsnelheid, en vonden daarbij, dat de droogtijd toenam, de droogsnelheid afnam (zie ook fig. 21 t/m 24). Zij verklaren dit door de kookpuntsverhoging en de dampdrukverlaging van water. Naarmate bij droging de zuurconcentratie toeneemt, doet de dampdrukverlaging zich meer gevoelen. Het effect was het meest uitgesproken in de H_2SO_4 -serie, het minst in de CH_3COOH -serie (fig. 24). Uiteraard gelden de verschijnselen van dampdrukverlaging en kookpuntsverhoging ook voor de toevoeging van zouten.

De grootste verbetering van de veilige droging wordt wel met Fe Cl_3 bereikt (vgl. BODIN en GAILLARD 1933, SCHURECHT 1939, SCHURECHT en McMAHON 1942 en KEITH 1941). Zoals in Hoofdstuk II vermeld is, heeft Fe Cl_3 een meervoudig effect op klei: a) de klei coaguleert, b) adsorbtieposities worden geblokkeerd, waardoor de adsorbtiecapaciteit afneemt en c) de klei wordt minder hydrofiel. Bovendien beïnvloedt ijzerchloride de kleur van het gebakken product. De veilige droging wordt door toevoeging derhalve bevorderd, hoewel niet in alle gevallen. Wanneer de klei van nature reeds ijzerrijk is, heeft de toevoeging geen noemenswaard effect, zoals WHITAKER opmerkt.

De zout- of zuurtoevoeging aan klei kan het beste geschieden, opgelost in het bevochtigingswater in de kneedmachine. De benodigde hoeveelheid dient voor iedere kleisoort experimenteel te worden bepaald. Grote zoutconcentraties zijn ongewenst en oneconomisch.

ad 3.

De beïnvloeding van de porositeit door bijmenging van grove, niet hygroscopische bestanddelen.

Door BODIN en GAILLARD (1930) werd een onderzoek hiernaar ingesteld. Zij konden de praktijkopvatting, dat zand- of chamotte-toevoeging de droogeigenschappen verbetert, bevestigen. De grofheid van het bijgemengde materiaal bleek van minder belang te zijn dan de bijgevoegde hoeveelheid. Voor de zeer slecht befaamde klei van PROVINS kon door bijmenging

met 10 gewichts % chamotte 20 - 60 (fractie 1,02 - 0,27 mm), de droogtijd van 155,6 uur op 22,5 uur teruggebracht worden. Bijmenging met 20 resp. 40 gewichts % chamotte 20-60 leidde tot een verkorting van de droogtijd tot resp. 16,6 en 14,2 uur.

De grofheid van de verdunning bleek van minder belang: bijmenging met 20 gewichts % chamotte 20 - 60 (fractie 1,02 - 0,27 mm) resp. 20 gewichts % chamotte 200 (fractie $<$ 0,08 mm) bleek ongeveer gelijkwaardig; de droogtijd beliep 16,6 resp. 16,1 uur. Bijmenging met 20 gewichts % chamotte 5 - 10 (fractie 5,0 - 2,0 mm) verkortte de droogtijd tot 12,6 uur.

De aard van de verdunning was belangrijk: chamotte bleek de klei de beste droogeigenschappen te geven, zand verdunning iets minder, krijt bijmenging nog minder. De droogtijden voor de menging met 20 gewichts % van deze materialen (fractie $<$ 0,08 mm) bedroegen resp. 16,1, 17,2 en 24,9 uur. Men vergelijkte fig. 25.

Door de bijmenging met grove bestanddelen wordt de porositeit van de klei verbeterd, terwijl het initiaal watergehalte van het gevormde product verlaagd kan worden; zie tabel 9. De krimprens (omslagpunt) daalt enigszins, maar onbetekenend weinig ten opzichte van de daling van het initiaal watergehalte (vgl. ook fig. 26, ontleend aan BODIN en GAILLARD). De droogtijd kan derhalve om beide redenen bekort worden.

FRECHETTE en PHILLIPS (1929) zijn in zoverre in tegenspraak met de resultaten van BODIN en GAILLARD, dat zij waarnamen, dat zandbijmenging wel een verlaging van het initiaal watergehalte betekende, maar geen verbetering van de porositeit. De droog s n e l h e i d zou derhalve niet opgevoerd mogen worden na bijmenging; de droog t i j d zou slechts kleiner worden door de vermelde verlaging van het initiaal watergehalte. FRECHETTE en PHILLIPS werkten met een zeer fijn colloïdale klei. Voor de steenfabricage aldaar werd een mengsel gebruikt van 60% klei, 25% leisteen-gruis en 15% steenpoeder; bij droging viel 40 - 50% af door het optreden van krimpscheuring.

PELLACINI (1929) vermeldt eveneens gunstige resultaten met zandbijmenging. In Italië is bijmenging gebruikelijk bij kleien met grotere krimp dan 8%. Een lineaire krimp van 4 - 5% wordt als gunstig beschouwd. Als bijmenging wordt wel toegepast: kwartszand, chamotte, gepoederde kool, cinters en zaagstof. Zaagstof en poederkool kunnen slechts in de grofkeramiek toegepast worden. De goedkoopste bijmenging is wel kalkvrij zand. ZENKOVICH (1931) beveelt eveneens bijmenging aan voor kleien met meer dan \pm 10% lineaire krimp.

De nadruk dient erop gevestigd, dat bijmenging slechts dan tot gunstig resultaat leidt, als de homogenisatie met de klei volledig is; anders zou het middel erger zijn dan de kwaal.

De experimenten van LAURITZEN 1948 en van LAURITZEN en STEWART (1947) over de invloed van klei-zandmenging op de droogeigenschappen werden reeds in § 1 genoemd.

ad 4.

De ontluchting van klei.

Ontluchting heeft ten doel de klei een grotere dichtheid te geven, waardoor zij in gebakken toestand voor bepaalde doeleinden beter bruikbaar is. De ontluchting is echter tevens van grote invloed op het droogproces.

Bij droging bij verhoogde temperatuur kunnen luchtinsluitingen in de vormling oorzaak zijn van het optreden van barstjes, die de steen bijv. weinig vorstresistent maken. Bij verhitting van de vormling zet n.l. de lucht sterk uit, en zoekt een uitweg. Ontlucht materiaal vertoont dit verschijnsel niet.

Ontluchting, gevolgd door plotselinge afschrikking, heeft

volgens GAREIS (1938) compressie van het materiaal tengevolge, met als resultaat betere droogomstandigheden. Door de plotselinge afschrikking slaat het buitenste laagje van de vormling dicht, zodat op de buitenkant van de steen een overdruk van 1 atm/cm^2 werkt. Ten opzichte van de droging werkt deze overdruk als een persdruk, die het water uit de vormling naar buiten perst; hoewel deze persdruk slechts gering is, zou de gunstige invloed ervan toch reeds merkbaar zijn.

WHITAKER (1939²) wijst erop, dat de ontluchting door het hele materiaal heen dezelfde moet zijn. Wanneer een klei-massa deels wel en deels niet ontluicht is, treden bij droging trekspanningen op, die tot scheuring kunnen leiden. Een goede ontluchting leidt tevens tot een grotere homogenisatie van het materiaal; niet ontluichte klei is steeds minder homogeen dan wel ontluichte, omdat er geen regelmaat in de verspreiding van de luchtinsluitingen zit. Ook om deze reden worden derhalve door ontluchting de droogeigenschappen van de klei verbeterd. GAREIS is van mening, dat door de ontluchting de aggregaatstructuren in de klei niet verdwijnen; voor een homogenisatie van de kleimassa op zichzelf is men daarom op andere middelen aangewezen.

Door ontluchting neemt de trekvastheid van het droge product toe, in de proeven van GAREIS met rond 11%.

ad 5.

De rijpingstijd van de vormlingen.

Dat de rijpingstijd van de vormlingen belangrijk is voor de droogeigenschappen, is reeds een oude praktijkervaring. MACEY (1938-'39 b) kon deze ervaring in een aantal proeven bevestigen; zijn resultaten zijn neergelegd in tabel 10.

Het is duidelijk, dat rijping van de vormlingen vóór het drogen een gunstige invloed heeft. Wanneer het vers gevormde product gedroogd wordt, treedt in vrijwel alle gevallen krimpscheuring op, terwijl een rijping van twee of drie weken vóór droging ongescheurde stenen oplevert (verg. tabel 10, proef 5, 13 en 15 en proef 6, 11 en 12). MACEY schrijft deze verbetering van de droogeigenschappen aan twee oorzaken toe, t.w.

- a. door rijping neemt de trekvastheid van de vormlingen toe;
- b. door rijping treedt geleidelijke verevening van vochtpotentiaalverschillen in de vormlingen op. Deze vochtpotentiaalverschillen, die veroorzaakt worden door een niet geheel volledige klei-water menging in de mengmolen en in de kneedmachine, zijn steeds oorzaak van ongelijkmatige krimp, waardoor scheuring optreedt. De rijping van de vormlingen bevordert m.a.w. de homogenisatie van het klei-water mengsel, een eerste voorwaarde voor veilig drogen.

Vooraf voor bedrijven, die stijve, weinig doorlatende en moeilijk mengbare kleien exploiteren, zal deze rijpingstijd van belang blijken te zijn. Een rijping van twee tot drie weken zal in de meeste gevallen voldoende zijn om de homogenisatie tot stand te brengen.

ad 6.

De vorm van het te drogen materiaal.

De vorm en de afmetingen van de vormlingen beïnvloeden in hoge mate de veilige droging. Het is algemeen bekend, dat grote blokken zeer moeilijk scheurvrij te drogen zijn, terwijl kleine aggregaten deze eigenschap niet vertonen.

Van MACEY (1937-'38, 1938-'39) zijn de meest systematische experimenten over de invloed van de vorm en afmetingen van de vormlingen op de droogeigenschappen bekend; hij gebruikte echter slechts één kleisoort, een "fireclay". Zes vormen werden vergeleken, n.l.

- a. normale steen 9 5/8" x 5" x 2 3/4", staande op de smalle rand;
- b. dezelfde steen, liggend op de grootste kant;
- c. vlakke plaat 18" x 18" x 1";
- d. kubus 6" x 6" x 6";
- e. kubus 9" x 9" x 9";
- f. kubus 12" x 12" x 12".

Bij de droogexperimenten werd de kleitemperatuur constant gehouden. Het initiaal watergehalte van de klei was 20%. Door regeling van de luchtsnelheid in de droger kon de droogsnelheid beïnvloed worden. Allereerst bepaalde MACEY nu de maximale veilige droogsnelheid; deze bleek voor de verschillende vormen resp. te bedragen (droogsnelheid in g waterverlies per uur per vierkante voet):

	a	b	c	d	e	f
>	60	57	50	55	19,5	9

Voor de kubi kon MACEY nu een betrekking afleiden tussen de lengte van de zijde en de maximale veilige droogsnelheid. De algemene vorm van deze betrekking moet luiden

$$\frac{1}{R} = A \cdot l^n \quad (34)$$

waarin R de maximale veilige droogsnelheid voorstelt

l = lengte van de ribbe

A = constante.

Voor l = 0 wordt de maximale veilige droogsnelheid oneindig groot, terwijl voor grote waarden van l de veilige droogsnelheid zeer klein wordt. Wanneer de betrekking gesteld wordt

$$\frac{1}{R} = A \cdot l^n, \text{ of logaritmisch}$$

$$-\log R = \log A + n \log l \quad (35)$$

kan MACEY de waarde voor n uit de weergegeven droogexperimenten bepalen. Grafisch bepaalt hij hieruit n = 2,6, zodat de betrekking wordt

$$\frac{1}{R} = A \cdot l^{2,6}$$

Voor deze waarde van n blijkt A inderdaad een constante te zijn, hetgeen een indirect bewijs voor de juistheid van de functie is. In onderstaand tabelletje is A berekend voor het boven vermelde droogexperiment:

lengte van de kubus	veilige droogsnelheid	$l^{2,6}$	constante A
l	R		= R x $l^{2,6}$
6"	55	105,5	5800
9"	19,5	302	5890
12"	9	640	5760

A blijkt inderdaad ten naaste bij constant te zijn.

Of de opgegeven betrekking voor alle kleisoorten geldt, is slechts experimenteel te bevestigen. Gegevens hieromtrent werden niet gevonden. Tevens zou het interessant zijn de betrekking tussen R en l, of eventueel tussen R en het totale buitenoppervlak, voor gewone steen-

vormen (prisma's) af te leiden. Ook hieromtrent bevat de literatuur onvoldoende gegevens.

Een analoge proef als boven besproken werd door MACEY in 1937-'38 gepubliceerd. De droogsnelheid en droogtijd van "fireclay" kubi van resp. 1, 2, 3, 4, 6 en 9 " ribbelengte werden vergeleken (vgl. fig. 27 t/m 29), waarvoor naar onderstaande cijfers verwezen wordt:

ribbelengte in inches	droogtijd, afgerond in uren	
	tot leer-harde toestand	tot 4% vochtgehalte
1	8	20
2	17	38
3	22	50
4	30	64
6	46	100
9	72	153

Tijdens constant rate bleek de verdampende waterhoeveelheid evenredig te zijn met het buitenoppervlak van de blokjes (zie fig. 29; in het horizontale beginstuk vallen alle droogkrommen vrijwel samen). Per oppervlakte eenheid wordt per tijdseenheid van alle blokjes dezelfde waterhoeveelheid verdampt. Dit is geheel in overeenstemming met de in Hoofdstuk III ontwikkelde zienswijze, waarbij de verdamping tijdens constant rate beschreven werd als een verdamping van een vrij wateroppervlak.

Naarmate het buitenoppervlak van de kubus dus groter is, is de verdamping per tijdseenheid, gerekend voor de gehele kubus, dus groter. Een grotere kubus heeft echter veel meer water te verdampen dan een kleine kubus; het buitenoppervlak is evenredig met l^2 , de inhoud met l^3 . De totale benodigde droogtijd neemt derhalve toe naarmate de kubus groter wordt. De kubus met ribbelengte 6" heeft bijv. een 4 x zo groot groot buitenoppervlak als de kubus met $l = 3"$ en zal derhalve als geheel 4 x zoveel water verdampen per tijdseenheid als deze. De inhoud, dus de totale te verdampen hoeveelheid water, is echter 8 x zo groot als bij de kubus met $l = 3"$. De totale benodigde droogtijd is daarom 2 x zo groot en derhalve evenredig met de ribbelengte. De gegeven cijfers vormen een bevestiging van deze opvatting.

Behalve MACEY deden ook BODIN en GAILLARD (1930) enige experimenten over de invloed van de steenafmetingen op de droging. De door hen gepubliceerde droogkrommen zijn weergegeven in de fig. 30 t/m 33. Onderstaande cijfers geven verkort hun resultaten weer:

steenafmeting in cm	droogtijd bij maximale veilige droogsnelheid in hr			
	Fresnes klei	Marseille klei	Fumel klei	Provins klei
6 x 12 x 24	124,2	69,1	8,8	> 200
3 x 12 x 24	25,5	13,2	2,3	?

De klei van Provins bezit uitermate slechte droogeigenschappen. Het is niet mogelijk gebleken het door MACEY gevonden verband tussen de afmetingen van de vormling en de droogtijd, op de experimenten van BODIN en GAILLARD toe te passen. De gegevens zijn hiervoor nog te schaars.

Tenslotte dient vermeld te worden, dat de droging van gecompliceerde vormen, zoals aardewerk, volgens veel ingewikkelder betrekkingen verloopt dan de droging van kubi of prismata. De in Hoofdstuk III afgeleide betrekkingen gelden dan ook slechts voor vlakke, gladde oppervlakken (vgl. VAN DER HELD, p. 118).

ad 7.

De invloed van voorverhitting van de vormlingen.

Onder voorverhitting (pre-heating) kan in de keramische literatuur tweeërlei verstaan worden, n.l. het doodbranden van de droge klei bij ongeveer 300 - 400°C, om plasticiteitseigenschappen te veranderen en het voorverhitten van de vormlingen tot ongeveer 50 - 100°C, teneinde de droogsnelheid te vergroten.

Van het eerste proces worden de mérites o.a. beschreven door FRECHETTE en PHILLIPS (1929), KEITH (1941) en ANONYMUS (1944). Door gedeeltelijke dehydratatie veranderen de adsorptieeigenschappen van de klei en daarmee ook de plasticiteit. Montmorilloniet, illiet, attapulgiel en halloysiet verliezen beneden 250°C n.l. reeds een deel van het kristalwater, kaolinitechter niet. Door deze gedeeltelijke vernietiging van de plasticiteit neemt het initiaal watergehalte van de vormlingen af, hetgeen dus een geringere krimp betekent. Voorverhitting bij te hoge temperatuur leidt tot algehele vernietiging van de plasticiteit en is derhalve ongewenst. Onderstaande gegevens, ontleend aan FRECHETTE en PHILLIPS, illustreren de invloed van voorverhitting:

voor-verhittings- temperatuur tijdsduur $\frac{1}{2}$ uur °C	plasticiteits- traject % water	droog- temperatuur °C	lineaire krimp %	opmerkingen
350	28	65	7,0	zeer veel breuk
350	28	65	6,5	idem
400	27	65	6,0	goed bewerkbaar; weinig breuk
450	26	65	6,0	vrijwel geen breuk
500	22	65	4,0	vrijwel geen breuk; te lage plasticiteit

Volgens ANONYMUS (1944) verdient het aanbeveling voorverhitting toe te passen bij alle kleien, die te plastisch zijn of die zeer fijn dispers zijn; vooral de 2 : 1 roostertype kleimineralen behoren hiertoe. Als voorverhittingsoven gebruikt hij een roterende trommel, waarin een temperatuur tussen 200 en 300 °C heerst.

De voorverhitting van de vormlingen, voordat de eigenlijke droging begint, is o.a. beschreven door STRAIGHT (1939), WHITAKER (1939), MACEY en WILDE (1943-'44) en KOEHLER (1944) en heeft ten doel de droogeigenschappen te verbeteren. Deze voorverhitting geschiedt steeds in lucht met zeer hoge relatieve vochtigheid ($\approx 95\%$), omdat anders de peripherie van de vormlingen dadelijk snel zou drogen, waarbij scheurvorming op zou treden. Het is van belang de vormlingen geheel dóór te warmen (vgl. KOEHLER) en daar klei een zeer laag warmtegeleidingsvermogen bezit, neemt de voorverhitting vrij lange tijd in beslag.

De voorverhittingstemperatuur mag volgens MACEY en WILDE en KOEHLER niet te hoog zijn. De vormling behoudt n.l. zijn vorm door de oppervlaktespanning van het water (zie ook hoofdstuk II). Daar deze oppervlaktespanning sterk afneemt bij temperatuurstijging, is het niet uitgesloten, dat deformatie van de vormlingen optreedt onder invloed van voorverhitting. Experimentele gegevens hieromtrent werden echter niet in de literatuur aangetroffen.

Indien de voorverhitting van de vormlingen de droogeigenschappen verbetert, verdient het wellicht aanbeveling het plasticiteitswater, dat

in de mengmolen en in de kneedmachine wordt toegevoegd, als heet water toe te voegen. Het kneden van klei met heet water heeft niet alleen een snellere en volledige bevochtiging tengevolge, maar vergemakkelijkt bovendien de homogenisatie van het mengsel; buitendien is de kleimassa reeds direct volledig doorwarmd. Daar de soortelijke warmte van droge klei ongeveer 0,22 cal bedraagt, die van water ongeveer 1 cal, kan derhalve ook bij toevoeging van betrekkelijk geringe hoeveelheden heet water, een vrij hoge vormlingstemperatuur bereikt worden. Een onderzoek van de mogelijkheden op dit gebied is gewenst.

MACEY en WILDE hebben in een aantal experimenten aangetoond, dat de maximum toelaatbare droogsnelheid toeneemt onder invloed van voorverhitting. Hun resultaten zijn neergelegd in tabel 11 en 12 en in fig. 34.

Doordat voorverwarming van de vormlingen de homogenisatie van het klei-water mengsel sterk bevordert (de viscositeit van water daalt bij temperatuurstijging, waardoor de waterbeweging in de klei vergemakkelijkt en de verevening van vochtpotentialaverschillen versneld wordt), heeft zij hetzelfde effect op de droogeigenschappen als de rijping.

Door STRAIGHT (1939) is een inrichting voor de uitvoering van voorverwarming beschreven, gekoppeld aan een type kanaaldroger.

ad 8.

De invloed van mechanische druk op de droogeigenschappen (ook trildruk).

Door mechanische druk kan water uit klei geperst worden. In de grondmechanica (vgl. KRYNINE 1941, TERZAGHI 1944) is dit een bekend verschijnsel; ook linnengoed-mangel berust op hetzelfde principe. MACEY (1941-1942) en SCHURECHT en LAMPMAN (1937 a, b en c) hebben de invloed van druk op het drogen van klei onderzocht, terwijl ook WESTMAN (1932) en ook MEL-LOR (1933) dit onderwerp bestudeerden. Toepassing van druk op drogende vormlingen bevordert een regelmatige krimp, waarbij geen gevaar voor het optreden van krimpscheuren bestaat.

Door WESTMAN (1932) en MACEY (1941-1942) zijn apparaten beschreven, waardoor kleiblokken belast kunnen worden met persdrukken tot 2900 kg/cm^2 . Bij de persing van kleiblokken bleek, dat de wateronttrekking vooral gedurende de eerste minuten plaats had (zie fig. 35); volgens MACEY heeft het geen zin kleiblokken langer dan 20 min te persen; hij verzuidde echter afmetingen op te geven.

Tussen de toegepaste druk en het rest-vochtgehalte van de klei bestaat volgens MACEY een exponentiële relatie, bijv.

$$P = \alpha e^{-\beta M} \dots\dots\dots (36)$$

waarin P de toegepaste persdruk en M het vochtgehalte voorstellen; e is het grondtal van de natuurlijke logaritmie, α en β zijn constanten, die van de kleisoort afhangen (zie tabel 7, waarin de door MACEY bepaalde constanten vermeld zijn). Men vergelijk ook Hoofdstuk III.

Naarmate de druk toeneemt, neemt het restvochtgehalte dus af. Bij persdroging zal voor iedere kleisoort de relatie tussen P en M vastgesteld moeten worden, m.a.w. de constanten α en β . Uiteraard kan persdroging in het beste geval slechts gaan tot de krimpgrens; alleen de z.g. constant rate periode zal erdoor overbrugd kunnen worden. Persdroging van klei wordt in de praktijk in enkele gevallen toegepast.

SCHURECHT en LAMPMAN (1937) gingen de invloed van kleine persdrukken op de droging na. Deze kleine persdrukken komen in de praktijk veelvuldig voor, bijv. door stapeling van stenen in de droogruimte; de onderste stenen staan onder grotere persdruk dan de bovenste en dit heeft tengevolge, dat de onderste stenen betere droogcondities hebben dan de bo-

venste. In een geval met stenen van Georgia kaoliniet was de droogsnelheid van de onderste 58% hoger dan van de bovenste. In fig. 36 t/m 38 zijn enige droogkrommen van SCHURECHT en LAMPMAN gereproduceerd. Dat de verdampingssnelheid tijdens constant-rate onder invloed van uitwendige druk toeneemt, is niet geheel begrijpelijk en wordt door MACEY ontkend; de droogtijd wordt slechts bekort door het feit, dat vloeibaar water uit de massa geperst wordt, zodat dit water niet nog via de dampfase verwijderd behoef te worden.

MELLOR (1933) heeft erop gewezen, dat een regelmatige krimp tijdens het drogen bevorderd wordt door het materiaal aan trillingen bloot te stellen. Vermoedelijk treedt onder invloed van trillingen een snellere verevening van vocht-potentiaalverschillen in de klei op, waardoor een gelijkmatige contractie kan optreden.

ad 9.

De droogtemperatuur en de wijze van warmtetoevoer aan de vormlingen.

Bij de behandeling van de factoren, die van invloed zijn op het droogproces, zijn we nu gekomen tot de droogfactoren in engere zin, die n.l. door de drooginrichting bepaald worden: temperatuur, wijze van warmtetoevoer, luchtdruk, waterdampdruk en luchtsnelheid.

De invloed van de temperatuur op het drogen van klei is velerlei:

- a. bij constante luchtdruk en relatieve luchtvochtigheid neemt het waterverzadigingsdeficit van de lucht toe bij stijging van temperatuur en af bij daling van temperatuur. Bij het dauwpunt wordt het waterverzadigingsdeficit gelijk aan nul, d.w.z. waterdamp condenseert. Hoe groter derhalve het verschil is tussen droogtemperatuur en dauwpunt van de lucht, des te groter is ook het drogend vermogen van die lucht;
- b. bij afnemende luchtdruk wordt het kookpunt van water verlaagd, een principe, waarop vacuümdroging berust. Zo bedraagt bij 760 mm kwikdruk de kooktemperatuur van water 100°C, bij 17,5 mm kwikdruk echter slechts 20°C (zie ook ad 10.). Geringe temperatuursverhoging heeft bij toepassing van droging onder verlaagde luchtdruk dus een toeneming van het verzadigingsdeficit van de lucht tengevolge;
- c. de verzadigde waterdampspanning is sterk van de temperatuur afhankelijk (zie o.m. Internat. Crit. Tables). Bij gelijkblijvende luchtdruk en relatieve luchtvochtigheid heeft dit tengevolge, dat de dampspanningsgradiënt tussen het drogend oppervlak en de omringende lucht groter wordt, derhalve ook de verdamping. Temperatuursverhoging van de vormlingen, bijv. door voorverwarming, vergroot derhalve de droogsnelheid. Dit geldt voor de constant rate periode. Om het effect van verhoogde temperatuur tijdens falling rate te kennen, kan gebruik gemaakt worden van de formule van THOMSON:

$$P_D = P_S e^{-\frac{2\alpha}{r\gamma_w R_D T}} \dots\dots\dots(37)$$

waarin:

- P_D = de waterdampspanning boven de menisci in de capillairen;
- P_S = de verzadigde waterdampspanning bij de temperatuur T;
- α = de oppervlaktespanning van water bij de temperatuur T;
- r = de straal van de capillairen.

overige symbolen als in Hoofdstuk III.

Bij temperatuursverhoging neemt P_S toe, evenals de e-macht. P_D nadert daarbij tot P_S , hetgeen dus betekent, dat de waterdampspanningsgradiënt

toeneemt en daarmee ook de droogsnelheid.

- d. de diffusiecoëfficiënt D in formule (5), Hoofdstuk III, is een functie van de temperatuur: naarmate de temperatuur stijgt, neemt de diffusiecoëfficiënt toe. Dit betekent tijdens constant rate een grotere diffusie van waterdamp van het verdampend oppervlak naar de omringende lucht.

Tijdens falling rate wordt gerekend met de schijnbare diffusiecoëfficiënt D_s (zie Hoofdstuk III form. (10)), welke een functie is van D , en welke dus evenals D van de temperatuur afhankelijk is.

- e. Tenslotte is de viscositeit van het water in de kleiporiën sterk van de temperatuur afhankelijk, overeenkomstig de wet van POISEUILLE (Hoofdstuk III, form. (19)). η bedraagt bij 0°C 1,7921 centipoises, bij $20,2^\circ\text{C}$ 1,0000 cp en bij 100°C 0,2838 cp (cf Internat. Crit. Tables). Daar de capillaire stroomsnelheid omgekeerd evenredig is met de viscositeit, neemt deze dus toe bij temperatuurstijging. Dit betekent, dat verevening van vochtpotentiaalverschillen (of vochtgradiënten volgens MACEY) in de kleimassa sneller en gemakkelijker plaats vindt bij hogere, dan bij lagere temperatuur. Zoals in Hoofdstuk III gezien werd, zijn juist deze vochtgradiënten in het materiaal de oorzaak van scheurvorming. Drogen bij verhoogde vormlings-temperatuur voorkomt derhalve de vorming van krimpscheuren.

Doordat vochtgradiënten bij verhoogde temperatuur snel evenend worden, kan het waterverlies aan het kleioppervlak ongestraft vergroot worden. De maximale veilige droogsnelheid wordt derhalve groter naarmate de temperatuur stijgt, zodat de droogtijd bekort kan worden. MACEY (1938-'39) heeft er echter de aandacht op gevestigd, dat dit niet betekent, dat de temperatuur daarom willekeurig opgevoerd mag worden, ter vergroting van de droogsnelheid. Volgens hem heeft iedere kleisoort een optimale droogtemperatuur, waarbij de veilige droogsnelheid haar maximum bereikt (zie fig. 39). Men vergelijk ook de gegevens in tabel 10. De verklaring van dit verschijnsel zit gedeeltelijk in de hieronder te bespreken temperatuurafhankelijkheid van de oppervlaktespanning van water.

- f. De oppervlaktespanning van water is sterk van de temperatuur afhankelijk. Zoals in Hoofdstuk II gezien werd, is de oppervlaktespanning van water de feitelijke bindende kracht, die de vormling zijn vorm doet behouden. Naarmate nu de temperatuur stijgt, neemt de oppervlaktespanning af en daarmee ook de dwarse sterkte van de vormlingen; bij verhoogde temperatuur vloeit de plastische kleimassa gemakkelijk uit, hetgeen uiteraard ongewenst is. Bij droging bij verhoogde temperatuur dient het initiaal watergehalte daarom klein te zijn. Beter is het het plasticiteitswater in de mengmolen en kneedmachine als heet water toe te voegen (vergelijk ook ad 7, van deze §). Het hier besproken nadeel geldt uiteraard slechts tijdens de constant rate periode.
- g. Indien in de vormlingen luchtinsluitingen voorkomen, heeft temperatuursverhoging vaak een ongunstige uitwerking. De lucht zet n.l. sterk uit, zodat blazen kunnen ontstaan of zodat de vormlingen open barsten.

De keuze van de droogtemperatuur is in hoge mate een kwestie van warmte-economie. De hoeveelheid warmte, benodigd om een bepaalde hoeveelheid water te verdampen, is vrijwel hetzelfde of men bij hoge of bij lage temperatuur werkt. De verdampingswarmte van water van 10°C bedraagt 590,4 cal per g, bij 100°C 539,55 cal per g. Het drogend vermogen van de lucht is echter zeer sterk van de temperatuur afhankelijk: 1 m^3 normale lucht kan bij 10°C 9,3 g water bevatten, bij 30°C 30,0 g water, bij 60°C 178,2 g water. D.w.z., dat bij lage temperatuur een veel grotere hoeveelheid lucht nodig is om een bepaalde massa te drogen dan bij hoge tempera-

tuur. De droging bij lage temperatuur kost derhalve veel meer tijd dan bij hoge temperatuur, terwijl ook om andere, bovengenoemde redenen de droogtijd langdurig is; vgl. ook WHITTAKER (19406).

Nauwkeurige droogproeven, waarbij de invloed van de temperatuur op de droogsnelheid van klei werd onderzocht, zijn slechts weinig gepubliceerd. De mededelingen van MACEY (1937-1938, 1943-1944) en van HURSH (1938) zijn vrijwel de enige nauwkeurige voorbeelden. MACEY (1937-1938) vond een scherpe correlatie tussen de droogsnelheid en het temperatuursverschil tussen droge en natte thermometer. Bij droging bij constante temperatuur neemt de kleimassa de natte-bol-temperatuur aan van de omgevende lucht. In fig. 40 is de aangeduide correlatie afgebeeld. Het temperatuursverschil droge-natte bol werd door MACEY dan ook veelvuldig gebruikt als een maat voor de droogsnelheid; men heeft het voordeel, dat temperatuurmetingen zeer eenvoudig zijn.

In fig. 41 zijn enige droogkrommen, ontleend aan het werk van HURSH en FILIPPI (1938), afgebeeld. Bij constante luchtvochtigheid heeft temperatuurstijging een vergroting van de droogsnelheid tengevolge. In de figuur is ook de invloed van verandering van de luchtvochtigheid weergegeven.

Behalve de temperatuur, is ook de wijze van warmtetoevoer aan het materiaal van invloed op de droging. KRISCHEER deed hierover enige experimenten, waarvoor verwezen wordt naar fig. 14 en 15. Bij de opstelling van fig. 14 is de richting van de warmtebeweging tegengesteld aan die van de waterdamp-afvoer, terwijl bij fig. 15 beide bewegingen gelijk gericht zijn. Het verschil hiertussen is, dat in het tweede geval capillair-condensatie optreedt tijdens de droging, waardoor een regelmatigere krimp optreedt dan in het eerste geval. De vochtgradiënt is groter in het eerste geval dan in het tweede geval, de kans op krimpscheuring derhalve eveneens.

Warmtetoevoer van onder af, zoals o.a. toegepast in de "hot floor" drogers, zou daarom te verkiezen zijn boven warmtetoevoer van boven af.

Op het onderscheid tussen de normale warmtedroging en de hoogfrequent droging werd reeds op het eind van Hoofdstuk III gewezen. Bij hoogfrequente droging is krimpscheuring uitgesloten. Men vergelijkte fig. 16.

Tijdens falling rate wordt de droogsnelheid bepaald door de oppervlaktenspanning van de nu sterk gekromde watermenisci. De waterdampspanning boven de menisci wordt hierdoor gedrukt, hetgeen een geringe droogsnelheid betekent (vgl. ook Hoofdstuk III). Temperatuurverhoging heeft verlaging van de oppervlaktenspanning tengevolge, dus toeneming van de waterdampspanning. Om de droogsnelheid tijdens falling rate te vergroten, is temperatuurverhoging de aangewezen weg (cf. MACEY 1937-1938).

ad 10.

De waterdampspanning van de lucht en de luchtdruk in de droogruijnte.

De drijfkraft van het droogproces is het verschil van de verzadigde waterdampspanning boven het verdampende oppervlak en de waterdampspanning van de omringende lucht. Voor drogende klei bevestigde MACEY (1937-1938) experimenteel het rechtlijnig verband tussen de droogsnelheid en het verschil van de verzadigde waterdampspanning \mathcal{P}_w (bij de natte-bol-temperatuur) en de partiële waterdampspanning van de lucht \mathcal{P}_1 (zie fig. 42). Deze relatie geldt tijdens constant rate.

Om de droogsnelheid tijdens constant rate te beïnvloeden, behoeft men derhalve slechts \mathcal{P}_w of \mathcal{P}_1 te veranderen. Boven werd gezien, dat beide grootheden sterk van de temperatuur afhankelijk zijn.

Uit fig. 42 kan op ieder tijdstip de droogsnelheid per oppervlakte-eenheid afgelezen worden. Daar π_w en π_1 met de droge en natte bol-temperatuur samenhangen, volgens de vergelijking [†])

$$\pi_w - \pi_1 = B.P (T - T_n) \dots \dots \dots (38)$$

waarin $B = 6,6 \times 10^{-4}$

P = barometerstand in mm Hg

B.P = constant voor een gegeven droogproces

T = droge bol temperatuur

T_w = natte bol temperatuur

kan de droogsnelheid dus op ieder moment afgelezen worden uit het verschil (T - T_n).

MACEY en WILDE (1943-'44) hebben de boven aangeduide wetmatigheid verder gebruikt bij de berekening van de droogsnelheid van stenen en vlakke platen. Voor stenen van North Staffordshire fireclay (afmeting van de vormlingen 9 3/4" x 5 1/16" x 2 13/16"; initiaal watergehalte 22-27%) werd de betrekking gevonden:

$$Q = 0,5 (\pi_w - \pi_1)$$

waarin Q de droogsnelheid van de gehele steen voorstelt, dus g water per uur per steen.

Voor rechthoekige platen (afmeting van de vormling 19 1/2" x 13" x 3 1/4"; initiaal watergehalte 22-23%) geldt de betrekking

$$Q = 2,33 (\pi_w - \pi_1)$$

Q stelt hierin de droogsnelheid van het gehele blok voor. π_w en π_1 worden steeds in mm Hg uitgedrukt.

Wanneer het initiaal watergehalte van de vormlingen bekend is, kan met behulp van dergelijke empirische relaties gemakkelijk de droogtijd van de constant rate periode berekend worden. Het werk van MACEY is op dit gebied het meest vooruitstrevend.

Opgemerkt dient echter, dat in drooginrichtingen, waar luchtcirculatie wordt toegepast en waarbij de stenen van begin tot eind allengs in aanraking komen met lucht van geringere waterdampspanning (droging in tegenstroom; kanaal- en tunneldrogers), de gegeven berekeningen niet toegepast kunnen worden.

In sommige gevallen geeft men de voorkeur aan het werken met relatieve vochtigheden in plaats van met partiële waterdampdrukken. Omrekening van π_1 in termen van relatieve vochtigheid leert dan, dat de droogsnelheid even goed beschreven kan worden als een lineaire functie van de relatieve vochtigheid, ofwel het waterverzadigingsdeficit van de lucht bij een bepaalde temperatuur. Hiervoor zij verwezen naar het werk van MACEY (1937-'38).

Tijdens falling rate is de droogsnelheid eveneens afhankelijk van de partiële waterdampdruk van de lucht; de relatie is echter veel ingewikkelder dan tijdens constant rate en wij zullen er hier aan voorbijgaan. Temperatuurverhoging is het krachtigste middel om hierbij de droogsnelheid te vergroten, zoals MACEY (1941-'42) opmerkt.

De invloed van de luchtdruk op de droogsnelheid berust op het verschijnsel, dat het kookpunt van water verlaagt bij drukverlaging en wel volgens de door MOSER opgestelde empirische betrekking

[†]) volgens WHIPPLE, geciteerd bij MACEY (1937-'38).

$$t = 100,00 + 0,03687 (P - 760) - 0,000022 (P - 760)^2 \dots (39)$$

waarin t de kooktemperatuur in $^{\circ}\text{C}$ voorstelt en P de luchtdruk.

Door deze kookpuntsverlaging verdampt water onder verlaagde druk sneller dan onder normale druk, alles beschouwd bij dezelfde droogtemperatuur. Op dit principe berust de vacuümdroging.

De relatie van de waterdampdiffusie met de luchtdruk volgt uit formule (5), Hoofdstuk III. Onder verlaagde druk neemt de diffusie toe (vgl. ook VAN DER HELD).

ad 11.

De snelheid van de overvloeiende luchtstroom.

In Hoofdstuk III werden een aantal empirisch afgeleide formules gegeven (zie pag. 24 en 25) over de afhankelijkheid van verdamping en luchtsnelheid. Daar de verdamping tijdens constant rate beschreven kan worden als de verdamping van een vrij wateroppervlak, kunnen deze zelfde formules hier toegepast worden.

In de meeste drooginrichtingen waar hete lucht circuleert, wordt het niet economisch geacht de luchtsnelheid al te zeer op te voeren; men zoekt het liever in snelheden tot ± 3 m per sec, waarbij de lucht juist voldoende in beweging is om een snelle diffusie te bevorderen. Het waterverzadigingsdeficit tracht men zo groot mogelijk te maken, door n.l. de luchttemperatuur te verhogen, zodat men met een betrekkelijk kleine hoeveelheid warme lucht de gehele droging kan uitvoeren (WHITAKER, 1940⁵). De aandacht wordt door alle auteurs (SCHMIDT, WHITAKER, MACEY, LONGENECKER, etc.) erop gevestigd, dat de lucht vooral t u s s e n de drogende vormlingen stroomt. De afstand tussen de wand van de droger en de vormlingen moet daarom zo klein mogelijk zijn. WHITAKER (1940⁵) heeft erop gewezen, dat persing van de drooglucht door de droger beter is dan zuiging. Persing bevordert de turbulentie, terwijl zuiging vooral laminaire luchtstroming in het leven roept.

Droging in stilstaande lucht geschiedt altijd langzamer dan in luchtstroming, omdat de waterdampspanningsgradiënt van het wateroppervlak naar de omringende lucht allengs verkleint naarmate de droging voortschrijdt.

Tijdens falling rate heeft de luchtsnelheid een volkomen ondergeschikte betekenis voor de droogsnelheid.

1/2 h s drogen

§ 3. Samenvatting.

1. Bij de bespreking van de factoren, die van invloed zijn op het verloop van het droogproces, is gebleken, dat slechts een gering aantal experimenten conclusieve betekenis hebben. Het gebrek aan toepassing van van het ceteris paribus principe bij de proefopzet doet zich scherp gevoelen, niettegenstaande het feit, dat een vrij groot aantal droogproeven gepubliceerd werd. Getracht werd een overzicht van de bereikte resultaten te geven.
2. De factoren, die het droogproces beïnvloeden, werden verdeeld in intrinsieke en extrinsieke. Tot de intrinsieke droogfactoren behoren granulaire samenstelling, aard en relatieve hoeveelheid van de bodemcolloïden en de kationenbezetting. Tot de extrinsieke droogfactoren behoren de vormpersing en klei-water menging, de mate van coagulatie of peptisatie van de klei, de zand- en zoutbijmenging, de ontluchting, de rijpingstijd, de vorm, de voorverwarming, de mechanische druk, de temperatuur, de waterdampspanning, de luchtdruk en de luchtsnelheid.

3. De invloed en relatieve belangrijkheid van deze factoren werd nagegaan aan de hand van literatuurgegevens. Het bleek, dat de droogei-genschappen van kleien belangrijk verbeterd kunnen worden, ook zon-der toepassing van kunstmatig drogen. Een s n e l l e droging kan echter slechts bereikt worden als de droogfactoren in engere zin (temperatuur, luchtvochtigheid, luchtdruk en lichtsnelheid) naar wille-keur veranderd kunnen worden.
4. In bepaalde gevallen is een berekening van de droogsnelheid tijdens de constant rate periode mogelijk.

Hoofdstuk V.

VOORBEELDEN VAN HET DROGEN VAN KLEI IN DE PRACTIJK.

§ 1. Inleiding.

In het vorige hoofdstuk werd gezien, dat door de drooginrich-ting de droogfactoren in engere zin bepaald worden, t.w. temperatuur, re-latieve luchtvochtigheid, luchtdruk en windsnelheid. Voor het drogen van klei in de praktijk zijn nu een aantal drogers in gebruik, waarmede deze factoren min of meer beheerst kunnen worden en die te herleiden zijn tot de volgende typen:

1. in de grofkeramiek is vooral de n a t u u r l i j k e d r o g i n g gebruikelijk, waarbij de droogsnelheid van de weersomstandigheden af-hangt, en dus noch constant, noch regelbaar is;
2. k a m e r d r o g e r s, waarbij gedroogd wordt in afgesloten, air-conditioned kamers;
3. k a n a a l d r o g e r s; de droogruimte is verdeeld in een aantal kamers, waarin verschillende droogomstandigheden gehandhaafd kunnen worden door een systeem van air-conditioning. De vormlingen doorlopen achtereenvolgens deze kamers. Kanaaldrogers houden het midden tussen kamer- en tunneldrogers;
4. t u n n e l d r o g e r s, waarin het materiaal zich voortbeweegt on-der een tegenstroom van lucht;
5. "h o t f l o o r"-d r o g e r s, een bijzondere vorm van kamerdrogers, met warmtetoevoer van beneden uit;
6. r o t e r e n d e d r o g e r s, waarbij vormlingen op draaiende ta-fels in air-conditioned ruimten gedroogd worden;
7. v a c u u m d r o g e r s;
8. i n f r a r o o d d r o g e r s, waarbij infra-rood licht als warmte-bron fungeert;
9. h o o g f r e q u e n t d r o g e r s, waarbij de warmte uit diëlec-trische verliezen van een hoogfrequent veld ontstaat;

10. droging boven chemiealiën;

11. persdrogers, waarbij het "constant rate" water uit de klei geperst wordt.

Drooginrichtingen van het type 1 t/m 5 worden in de keramiek het veelvuldigst gebruikt; drogers van het type 6 en 11 minder, terwijl drogers van het type 7 t/m 10 slechts in proefopstellingen gebruikt worden.

In dit hoofdstuk zullen wij aan de hand van de literatuur enige ervaringen met de bovengenoemde typen drooginrichtingen vermelden. Gegevens omtrent de kosten en de efficiency van kunstmatige drogers zijn echter uiterst schaars in de literatuur vermeld. Wel worden door enige onderzoekers belangrijke vergelijkende waarnemingen gepubliceerd, o.m. betreffende de warmte-economie van diverse drogers.

De natuurlijke droging zal in het onderstaande niet nader besproken worden; de voor- en nadelen ervan worden bekend verondersteld, evenals de in de praktijk toegepaste maatregelen om de nadelen zoveel mogelijk te beperken (vgl. ANONYMUS, 1938, 1941 en 1943). Om onder natuurlijke omstandigheden de veilige droging te bevorderen, kunnen uiteraard ook de droogeigenschappen van de kleien verbeterd worden, bijv. volgens in het vorige hoofdstuk aangegeven wegen.

§ 2. Warmtebronnen.

Droging (behalve volgens type 11) is een verdampingsproces en kost derhalve warmte. Deels wordt de verdampingswarmte, die voor water ongeveer 560 cal per g bedraagt, onttrokken aan de kleimassa, die daarbij afkoelt, deels wordt zij onttrokken aan de omringende lucht. Om een bepaalde hoeveelheid water te verdampen is een bepaalde hoeveelheid warmte nodig. Naarmate het initiaal watergehalte per vormling groter is, stijgt ook de voor droging benodigde warmtehoeveelheid en omgekeerd. Zoals in hoofdstuk IV § 2 ad 9 gezien werd, is de benodigde warmtehoeveelheid vrijwel onafhankelijk van de droogtemperatuur of van de overige droogomstandigheden; slechts het watergehalte bepaalt de benodigde warmtehoeveelheid.

Voor de praktijk wil dit zeggen, dat het bij kunstmatig drogen vrijwel dezelfde warmte kost, ongeacht of bij hoge of lage temperatuur gedroogd wordt. Daar nu de droging bij hogere temperatuur veel sneller en veiliger kan geschieden (behoudens de in Hoofdstuk IV genoemde afwijkingen), dan bij lage temperatuur, geniet nu dát droogproces de voorkeur, waarin de toegevoegde warmte zo economisch en zo volledig mogelijk verbruikt wordt.

Een eerste vraagpunt is daarbij de te gebruiken warmtebron.

In de keramische industrie beschikt men in het algemeen over de volgende warmtebronnen (vgl. ZEHNER, 1940, BEACH 1942, SCHOLZ 1942 en FORBES 1947):

- a. verse stoom; is in het algemeen voor drogers weinig economisch;
- b. afgewerkte stoom; deze warmtebron wordt als de goedkoopste beschreven, maar is op steenfabrieken meestal niet aanwezig;
- c. hete rookgassen; zijn in de meeste gevallen onbruikbaar bij directe toepassing, wegens de vele bijmengsels, o.a. SO₂ damp;
- d. afkoelingswarmte van de oven;
- e. stralingswarmte van de oven;
- f. directe verhitting van de droogruimte.

De warmtebronnen sub a, e en f worden in de Engelse literatuur radiated heat genoemd; sub b, c en d, waste heat. In het algemeen is waste heat uiteraard het goedkoopste, omdat deze anders toch verloren zou gaan; volgens verschillende auteurs is echter bij droging met waste heat veel meer lucht nodig dan bij radiated heat (vgl. LONGENECKER 1943 en WHITAKER 1940), voornamelijk omdat in dit laatste geval de lucht beter geconditioneerd kan worden.

SACHSE (1943) heeft in een belangrijke publicatie berekeningen gemaakt over het gebruik van de koelwarmte van een ringoven en van de warmte van afgewerkte stoom, voor droogdoeleinden. *) Volgens deze auteur is de koelwarmte van de oven alleszins toereikend om vormlingen te drogen; de bruikbaarheid van afgewerkte stoom hangt af van de ter beschikking staande hoeveelheid.

De hete rookgassen worden meestal niet direct voor droogdoeleinden gebruikt, maar indirect. Men leidt deze gassen door pijpen, onder of door de droogruimte, waarbij de straalwarmte van de pijpen als warmtebron dienst doet; door STRAIGHT (1929, 1939) en HUMMEL en TWELL (1940) werden dergelijke procédés voorgesteld. Direct contact tussen hete rookgassen en het drogende materiaal, kan slechts daar overwogen worden, waar aan het eindproduct weinig kwaliteitseisen gesteld worden. Het verdient ook dan echter de voorkeur een brandstof met laag zwavelgehalte te gebruiken in verband met corrosie van de droger door het ontstaan SO₂.

Volgens FORBES (1947) zal een economisch gebruik van de afgewerkte warme lucht van de ovens (hetzij rookgassen, hetzij de koelwarmte) in de toekomst de belangrijkste warmtebron zijn. Verse stoom is een zeer kostbare warmtebron, afgewerkte stoom een zeer goedkope, maar is slechts op sommige fabrieken aanwezig.

Het gebruik van de stralingswarmte van de oven of van directe verhitting van de droogruimte wordt in sommige gevallen toegepast, o.a. in "hot-floor" drogers en in sommige tunnel- en kanaaldrogers. HEBENSTREIT (1943) beschreef een droeginrichting, met gebruik van straalwarmte van de oven, in een aardewerk- en porceleinfabriek in SEBRING, Ohio.

ROTH (1939) onderzocht het thermisch rendement van verschillende drogers bij directe verhitting en verkreeg daarbij de volgende uitkomsten:

soort droger	werkelijk warmteverbruik in kcal	theoretisch warmteverbruik in kcal	thermisch rendement in %	% nuttig verbruikte lucht
droogafdelingen	3150	670	21	78
kamerdroger	1500	720	48	97,8
kanaaldroger	1100	680	62	93,5

Volgens deze gegevens zou de kanaaldroger derhalve bij directe verhitting het grootste thermisch rendement opleveren.

FORBES (1947) vermeldt waarnemingen omtrent het kolenverbruik van verschillende drogers bij directe verhitting. De "stoves" (type kanaaldroger) gebruiken 400 - 600 kg kolen voor de droging van 1000 stenen, de kamerdroger 200 - 300 kg en de tunneldroger 150 - 200 kg kolen per 1000 stenen; de meest efficiënte luchtsnelheid bleek 1,5 - 3,0 m/sec te bedragen.

LONGENECKER (1943) vermeldt, dat een door hem gebruikte direct verwarmde droger (type kamerdroger) 150 - 300 kg kolen per 1000 stenen verbruikt.

*) Het verdient aanbeveling dergelijke warmte-economische berekeningen ook voor Nederlandse industrieën uit te voeren.
keramische

Verschillende aspecten omtrent het nuttig gebruik van de ter beschikking staande warmtebronnen worden nog naar voren gebracht in de volgende publicaties: ANONYMUS (1938 en 1944), BEACH (1942), CLAUSZ (1942), KINLEY en ROBINSON (1938), KOEHLER (1944), KRAUSE (1937), STACEY en MATZEN (1925), WILSON en SKINNER (1937).

§ 3. Enige in de literatuur beschreven drooginrichtingen.

K a m e r d r o g e r s.

In dit type drogers worden de (stilstaande) vormlingen omspoeld met warme lucht met een bepaalde relatieve vochtigheid. Soms gaat aan de droging een voorverwarming van de vormlingen vooraf met warme lucht van zeer hoge relatieve vochtigheid; deze voorverwarming moet geleidelijk gaan, daar anders water condenseert op de nog koude vormlingen. Door de lage warmteoverdrachtscoëfficiënt neemt de voorverwarming van de vormlingen een aanzienlijke tijd in beslag.

KIRKPATRICK (1927) beschreef de kamerdrooginstallatie van de KANSAS CITY TERRA COTTA and FAIENCE COMP. TERRA COTTA wordt gedroogd in twee aangrenzende kamers met 9 x 15 m vloeroppervlak en een capaciteit van 20 ton droog materiaal. De verwarming van de drooglucht geschiedt met stoom, terwijl door 3 ventilatoren in het plafond voor afvoer van vochtige lucht gezorgd wordt. De droogtijd voor 20 ton bedroeg voor een initiaal watergehalte van resp. 5 - 10%, 10 - 15% en 15 - 20% : 40, 48 en 60 uren (relatieve vochtigheid 40 - 50%, luchttemperatuur $\pm 61^{\circ}\text{C}$). Gasverwarming van de drooglucht zou volgens deze onderzoeker goedkoper zijn dan stoomverwarming.

SIMPSON (1933-1934) beschrijft een overeenkomstige kamerdroger voor aardewerk, waarbij gedeeltelijke recirculatie van de lucht wordt toegepast. De luchttemperatuur is bij het begin ca 55°C om geleidelijk op te lopen tot ca 89°C , de relatieve vochtigheid bedraagt bij het begin ca 5%. De droogtijd voor borden bedroeg 90 min (30 min voor constant rate, 60 min voor falling rate).

THOR (1942) geeft een vrij uitvoerige beschouwing over de efficiency van kamerdrogers, vergeleken met kanaaldrogers; het droogvermogen van kamerdrogers zou meer dan twee maal zo groot zijn als van kanaaldrogers. Ook SCHOLZ (1942) houdt zich uitvoerig bezig met de nuttige prestatie van kamerdrogers.

Volgens ROTH (1939) bedraagt het thermisch rendement van kamerdrogers rond 48%. Volgens ervaringen van KRAUSE (1937), GOSKAR (1937 - 1938) en ROTH (1939) voldoen kamerdrogers voor de meeste doeleinden het beste van alle drogers. Met waste heat als warmtebron kost het drogen bovendien slechts weinig.

BODIN en GAILLARD (1930) beschrijven een kleine proefdroger van het type kamerdroger.

H o t - f l o o r d r o g e r s.

MACEY en WILDE (1943-1944) vergeleken de kamerdroger met de hot-floor (vgl. ook tabel 11 en 12). Het verschil tussen deze typen is, dat in het eerste geval de warme lucht verhittingsbron is voor de vormlingen, terwijl in het tweede geval de warmte vanaf de warme vloer door geleiding getransporteerd wordt in de opgestapelde vormlingen. Door MACEY en WILDE werd een proefopstelling van een hot-floor droger beschreven.

De maximale veilige droogsnelheid in kamerdrogers (met voorverhitting) is groter dan in hot-floor drogers. De laatstgenoemde zijn echter veel goedkoper in het gebruik. KOEHLER (1944) heeft hierover een andere mening en zegt, dat hot-floor drogers inefficiënt zijn, duur in construc-

tie en veel te log; voor continu werk zouden deze drogers ongeschikt zijn, vooral als het kleingoed betreft.

K a n a a l d r o g e r s e n t u n n e l d r o g e r s .

In deze drogers bewegen de vormlingen zich in een richting, tegengesteld aan de windrichting (z.g. tegenstroomprincipe). Bij de ingang van de droogruimte stroomt lucht, die vrijwel met waterdamp verzadigd is en hier is de droogsnelheid van de vormlingen dus zeer gering; aan het eind van de tunnel of het kanaal, waar de droge, hete lucht ingeperst wordt, is de droogsnelheid maximaal.

Een kanaaldroger is in principe hetzelfde als een tunneldroger, alleen is de tunnel hierbij door tussenschotten en sluizen in diverse afdelingen gesplitst.

De vormlingen worden gewoonlijk op lorries geplaatst, die zich langzaam voortbewegen in de droger. Belangrijke factoren in dit type drogers zijn: de lengte van de tunnel of het kanaal, de snelheid van de luchtstroom en de snelheid van de lorries. Door WHITAKER (1940) worden deze factoren in verband gebracht met de gewenste droogsnelheid. In fig. 43 is schematisch een tunneldroger afgebeeld met de aanduiding van enige punten, die de aandacht verdienen.

1. Wanneer de vormlingstemperatuur hier ter plaatse lager is dan het dauwpunt van de lucht, treedt condensatie op; condensatie kan voorkomen worden door de luchtsnelheid op te voeren door de luchttemperatuur te verhogen, door de tunnel te verkorten etc.
2. Onvoldoende capaciteit van de ventilatoren doet de luchtstroom hier stagneren.
3. Wanneer een zuigventilator gebruikt wordt, volgt de luchtstroom vanaf dit punt de bovenwand en zijwanden van de tunnel. Wanneer de lucht niet meer t u s s e n de vormlingen doorstroomt, drogen slechts de buitenste vormlingen op de lorries; de droging van de in het midden opgestelde vormlingen begint dan pas op dit punt, ongeveer op de helft van de tunnellenge.
4. Warme lucht, met kleine hoeveelheden hier ter plaatse ingebracht, zou onmiddellijk opstijgen naar de bovenwand van de droger en van daar naar het koude einde bewegen. Het gebruik van krachtige persventilatoren is daarom gewenst, zodat grote hoeveelheden hete lucht tegelijkertijd in de droger en tussen de vormlingen door geperst kunnen worden.
5. Wanneer de droging van de binnenste vormlingen op de lorries geen gelijke tred heeft gehouden met de buitenste vormlingen, gaat het water in de eerstgenoemde hier ter plaatse koken. De temperatuur van de ingebrachte lucht bedraagt ongeveer 170 - 200°C. Door gebruik van een groter luchtvolume (grotere luchtsnelheid) kan de temperatuur verlaagd worden, zodat dezelfde droogsnelheid aangehouden kan worden.
6. De ruimte tussen vormlingen en boven- en zijwanden moet zo klein mogelijk gehouden worden (maximaal 5 om); anders volgt de luchtstroom do weg van de minste weerstand, zodat zij o v e r het materiaal stroomt in plaats van er tussen door. Door het ophangen van canvas-gordijnen kan de luchtweerstand in deze ruimten vergroot worden. ANONYMUS (1929) beschrijft een tunneldroger, in gebruik bij de steenfabrieken van Fiske en Co. In 5 tunnels worden in 8 à 9 uur 45.000 stenen gedroogd; de droogtijd per steen bedraagt 3 uur. De temperatuur bij de luchtinlaat bedraagt 110 - 150°C; er wordt een systeem van lucht-inpersing toegepast, waarbij de lucht zig-zag door de droger beweegt. Per

steen wordt 285 g water verdampt.

BURSCH (1940) beschrijft het drogen van dakpannen in een tegenstroom tunneldroger. De binnentredende lucht heeft een temperatuur van 75 - 80°C, de uittredende lucht 35 - 40°C, terwijl dan de relatieve vochtigheid 75% bedraagt. Veel verder kan men met deze droger niet gaan, daar anders de temperatuur van het binnenkomende materiaal beneden de dauwpuntstemperatuur van de uittredende lucht komt te liggen, zodat condensatie op de vormlingen optreedt.

LONGENECKER (1943) vermeldt, dat voor tunneldrogers de temperatuur bij de inlaat 110°C kan bedragen als het stenen betreft, in sommige gevallen zelfs tot 200°C; bij droging van drainbuizen en dakpannen mag de temperatuur 65 - 80°C bedragen. Over relatieve luchtvochtigheid wordt niets vermeld.

GARVE (1941) bespreekt een aantal verbeteringen van tunneldrogers, zoals geforceerde luchtturbulentie door het plaatsen van verticale schotten en het voorkómen van luchtstroming over de vormlingen in plaats van t u s s e n de vormlingen. Ook WHITAKER (1940) behandelt uitvoerig verbeteringen van de tunneldroging.

EVERLY (1941) beschrijft de wijze, waarop tunneldrogers geconditioneerd kunnen worden; ook voor niet-keramisch materiaal kan dit type droger gebruikt worden. WILSON en SKINNER (1937) geven voorbeelden van de doorrekening van tunneldrogers in de praktijk; men vergelijk hiervoor ook de publicatie van SPINGLER (1943), met de kritiek van THOR (1943).

Over een kanaaldroger voor dakpannen heeft SCHNELL (1942) een en ander medegedeeld. Per 1000 dakpannen zou slechts 16 kg kolen benodigd zijn.

Voor kanaal- en tunneldrogers raadplege men verder de publicaties van ROTH (1939), ANONYMUS (1938), WHITAKER (1940); ROBINSON (1939), KOEHLER (1944), HEBENSTREIT (1943) en STACEY en MATZEN (1925).

I n f r a - r o o d d r o g e r s .

Speciaal voor het drogen van kleingoed wordt door verschillende auteurs infra-rood als warmtebron aanbevolen. HEPNER (1945) deed een uitvoerig onderzoek naar de bruikbaarheid van deze methode; volgens deze auteur is de infra-rood droger eenvoudiger van constructie dan de andere drogers, terwijl de bedrijfskosten gering zijn. De droogsnelheid is een functie van de stralingsintensiteit, die wederom afhankelijk is van het aantal gebruikte lampen en van de afstand lamp - vormlingen. Voor een veilige droging is het noodzakelijk de stralingsintensiteit per eenheid van oppervlak van de vormlingen constant te houden.

GAULD, EVANS en FLANNIGAN (1945) ontwierpen een tunneldroger met infra-rood als warmtebron. Borden, kopjes etc. konden hierin in 10 - 12 min gedroogd worden. Ook WILLIAMS-GARDNER (1943-'44) beschrijft de mérites van de infra-rood droger voor porcelein en aardewerk. Voor infra-rood drogers vergelijk men nog de publicatie van ANONYMUS (1945).

De literatuur over p e r s d r o g e r s is zeer beperkt; men raadplege hiervoor MACEY (1941-1942) en WILLIAMS-GARDNER (1943-1944). Ongetwijfeld verdient deze methode nader onderzocht te worden op bruikbaarheid, daar zij veel voordelen heeft boven de droging door verdamping.

R o t e r e n d e d r o g e r s .

Roterende drogers (z.g. rotary driers) worden vooral gebruikt voor het drogen van klei en zand in ongevormde toestand. Omtrent deze drogers is zeer weinig bekend. WHITTEMORE (1939) bepaalde het thermisch rendement van een roterende droger, in gebruik bij de Roanoke-Webster Brick Comp., en vond hiervoor een waarde van 70%. Het ligt derhalve wel hoger dan dat van een kamerdroger.

Voor v a c u u m- en h o o g f r e q u e n t d r o g e r s raadplege men de rapporten T.A. 237 en T.A. 236 van de Algemene Technische Afdeling T.N.O., die over deze onderwerpen handelen.

COX (1938) deed een weinig geslaagde poging om d r o g i n g b o v e n c h e m i c a l i ë n te introduceren, speciaal voor klein-goed. Een langzame droging is gegarandeerd met weinig of geen kans op krimp-scheuring. De praktijk stond echter afwijzend tegenover deze methode.

De doorrekening van drogers is een noodzakelijke bezigheid. Men raadplege hiervoor de publicaties van SPINGLER (1943), SACHSE (1943), THOR (1943), WILSON en SKINNER (1937), WHITTEMORE (1939), ROTH (1939), SCHOLZ (1942) en ANONYMUS (1940), waarin enige voorbeelden worden behandeld. Zeer belangwekkend is de publicatie van CLAUSZ (1942), waarin een aantal typen drogers wordt vergeleken (zie tabel 13).

Tenslotte moge opgemerkt worden, dat de apparatuur voor het meten en registreren van droogcondities in vele gevallen gebrekkig lijkt; verschillende door meteorologen gebruikte instrumenten voor het meten van natte en droge-bol-temperatuur, van relatieve vochtigheid, van luchtsnelheden etc., voldoen vermoedelijk beter en zullen een nauwkeurige proefopzet ten goede komen.



LITERATUURLIJST.

- Andrews, A.J.: Ceramic tests and calculations 1947.
Anonimus: Rev. des Mat. de Constr. et de Trav. Publ. 151 B '29.
Anonimus: Brick & Clay Record 104, No. 2, 16 '44.
Anonimus: Tonind. Zeitung 67, 166 '43.
Anonimus: Tonind. Zeitung 62, 961 '38.
Anonimus: Tonind. Zeitung 62, 1038 '38.
Anonimus: Tonind. Zeitung 64, 494 '40.
Anonimus: Ceramic Industry 30 No. 2, 46 '38.
Aron, J.: Trans. Cer. Soc. 32, 513 '32-'33.
Baumeister, G.H.: Tonind. Zeitung 64, 270 '40.
Baver, L.D.: J. Am. Soc. Agron. 22, 935-948 1930 en 703-708 1930.
Baver, L.D.: Soil physics 2nd ed. 1948.
Beach, D.B.: Ceramic Age 40, 177 '42.
Blottefiere, R. de: Rev. de Mat. de Constr. et de Trav. Publ. 245 B, '29.
Bodin, M.V. en Gaillard, M.P.: Rev. de Mat. de Constr. et de Trav. Publ. 23 B,
65 B, 83 B, '30.
Bodin, M.V. en Gaillard, M.P.: Céramique 36, 29 '33.
Bradley, W.F.: Am. Mineral 25, 405-410, 1940.
Brusch, J.: Tonindustrie Zeitung 64, 93, '40.
Casselmann, E.J.: J.A.C.S. 10, 59, '27.
Clausz, R.: Tonindustrie Zeitung 66, 382, '42.
Cox, P.E.: Ceramic Industry 30 No. 6, 30, '38.
Edelman, C.H.: Landb.k. Tijdschrift 49, 358-377, '37.
Edelman, C.H.: Rev. d. Verres et silicates industr. 12, 1-4-'48.
Edelman, C.H. en Favejée, J.Ch.: Z. Krist. (A) 102, 417-431, '40.
Everly, G.B.: Ceramic Age 38 No. 3, 72, '41.
Favejée, J.Ch.L.: Z. Krist. (A) 101, 259-270, '39.
Favejée, J.Ch.L.: Meded. Keram. Inst. T.N.O. No. 2, '44.
Favejée, J.Ch.L.: Landbouwk. Tijdschrift 61, '49.
Fréchette, H. en Philips, J.E.: J.A.C.S. 12, '29.
Gardner, W en Chatelain, J.: Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 11, 100-102, '46.
Gareis, F.: Ber. d. deutsch. Ker. Ges. 19, 396-408, '38.
Garve, T.W.: Bull. Am. Cer. Soc. 20 No. 4, 117, '41.
Gauld, E., Evans, B.B. en Flamingan, A.M.: Bul. Am. Cer. Soc. 24 No. 2, 62, '45.
Getter, R.F. en Wadleigh, W.H.: J.A.C.S. 10, 925, '27.
Goskar, T.A.: Trans. Cer. Society 37, 62 '37-'38.
Grim, R.E.: J. Geol. 50, 276-290, '42.
Haas, H. en Ries H.: Ber. Deutsch. Ker. Ges. 22, 265, '41.
Haines, W.B.: Journ. Agr. Sci. 14, '24 en 15, '25, 529-535.
Harman, C. en Parmelee, J.A.: Cer. Soc. 28, 110-118, '45.
Hebenstreit, H.C.: Cer. Ind. 40 No. 3, 50, '43.
Helbig, M.: Die Verdunstung des Wassers aus dem Boden. Handb.d. Bodenlehre
VI, 221-241.
Held, E.F.M. v.d.: Vacantie leergang vr. verwarm. techn. 115, '39.
Hepner, L.H.: Bull. of the Am. Cer. Soc. 24 No. 11, 415, '45.
Hermite, L.P.: Lab. d. Bat. et d. trav. publ. Circulaire, serie F No. 37, '47.
Henry E.C. en Siefert A.C.: J.A.C.S. 24 No. 9, 279, '41.
Holdridge, D.A.: Proc. Int. Cer. Congr. 1948.
Hummel, R. en Twell, R.: Bull. Am. Cer. Soc. 19, 434, '40.
Hursh, K.K. en Filippi, C.R.: Bull. Am. Cer. Soc. 17, 206, '38.

> Forbes, N.: Ceramic Age 50 No. 4, 223, '47.

- Jackson, M.L. en Mackie, W.Z. en Pennington, R.P.: Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 11, 57-63, '46.
- Jacob, A.: Soil Research 8, '42.
- Jacob, A. en Loofmann, H.: Bodenk. u. Pflanzenern. 21/22 (66/67), 666-672, 1940.
- Journier, E. en Perrier, J.: C.R. Acad. Sci. 227, 839-841, '48.
- Keith, W.P.: Ceramic Age 38 No. 1, 9, '41.
- Kelley, W.P.: J. of Geol. 50, 307-319, '42.
- Kelley, W.P., Jenny, H. en Browns, A.M.: Soil Sci. 41, 259-274, '36.
- Kinley, J.M. Mc. en Robinson R.R.: J.A.C.S. 21, 104, '38.
- Kirkpatrick, F.H.: J.A.C.S. 10, 469, '27.
- Koehler, W.A.: Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 40, 575, '44.
- Kohnke, H.: Soil. Sc. Soc. of Am. Proc. 11, 64-66, '46.
- Krause, H.: Ker. Rundschau 45, 412, '37.
- Krischer, O. von: Z.V.D.I. Beih. Verf. techn. 1938.
- Krischer, O.: Z.V.D.I. Beih. Verfahrenstechn. 17, '40.
- Krischer, O. en Görling, P.: Z.V.D.I. Beih. Verfahrenstechn. 140, '38.
- ~~X~~ Lauritzen, C.W.: Soil Sci. 65, 155-181, '48.
- Lauritzen, C.W. en Stewart, A.J.: Soil Sci. Soc. of Am. Proc. 6, 113-116, '41.
- Longenecker, H.L.: Brick and Clay Rec. 102 No.2, 26, '43.
- Lutz, J.F.: Missouri Agr. Exp. Sta. Res. Bull. No.212, '34.
- Macey, H.H.: Trans. Cer. Soc. 33, 92, '33-'34.
- Macey, H.H.: Trans. Cer. Soc. 41, 73, '41-'42.
- Macey, H.H.: Trans. Cer. Soc. 38, 469, '38-'39.
- Macey, H.H.: Trans. Cer. Soc. 38, 464, '38-'39.
- Macey, H.H.: Trans. Cer. Soc. 37, 131, '37-'38.
- Macey, H.H.: Proc. Phys. Soc. 52, 625, '40.
- Macey, H.H. en Hind, S.R.: Trans. Cer. Soc. (zie proefdr.) 36, 433, '37.
- Macey, H.H. en Wilde, F.G.: Trans. Cer. Soc. 43, 93, '43-'44.
- Marshall, C.E.: J. Phys. Chem. 46, 1077-1090, '42.
- Marshall, C.E.: Z. Krist. (A) 91, 433-449, '35.
- Mellor, J.W. Trans. Cer. Soc. 32, 455, '32, '33.
- Meyer, M.W.: J. Res. Nat. Bur. Stand. 13, 245, '34.
- Nagelschmidt, G.: Imp. Bur. Soil Sc. Techn. Comm. No.42, '44.
- Navias, L.: J.A.C.S. 12, 305, '29.
- Nichols, M.L.: Agr. Eng. 12, 259-264, '31.
- Nichols, M.L. en Baver, L.D.: Proc. 2nd Int. Congr. Soil Sci. 6, 175-188, '30.
- Norton, F.H.: Refractories 2nd ed. '42.
- Pellacini, Alb.: Corrière Ceram 10, 97-99, '29.
- Ricke, R. en Geith, J.: Ber. d. deutsch. Ker. Ges. 12, 556-595, '31.
- Roborgh, R.H.J.: A study on the nature of clay (Diss. Wag.) 1935.
- Roth, H.: Ber. der deutsch. Ker. Ges. 20, 427, 457, '39.
- Russell, J.C.: Am. Soil Survey Assoc. Bull. 9, 10-22 en 100-112, '28.
- Sachse, H.E.: Tonind. Zeitung 67, 193, '43.
- Schachtschabel, P.: Landw. Jahrb. 91, 355-368, '42.
- Schmidt, C.: Tonind. Zeitung 66, 439, '42.
- Schnell, W.: Tonind. Zeitung 66, 199, '42.
- Scholz, F.: Tonind. Zeitung 66, 306, '42.
- Schurecht, H.G. en Lampman, C.M.: J.A.C.S. (3 art.) 20, 266, '37.
- Schurecht, H.G. en Mahon, J.F. Mc.: J.A.C.S. 25 No.14, 422, '42.
- ~~X~~ Krynine, A.: Soil Mechanics, 1941.

- Shaw, B.T.: J. Phys. Chem. 46, 1032-1043, '42.
Shaw, B.T. en Humbert, R.P.: Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 6, 146-149, '41.
Siefert, A.C. en Henry E.C.: J.A.C.S. 30, 37-48, '47.
Simpson, T.: Trans. Cer. Soc. 33, 85, '33-'34.
Spingler, K.: Tonind. Zeitung 65, 355, '41.
Spingler, K.: Tonind. Zeitung 67, 55, '38.
Sprenger, J.J.I.: Toepassingen der grondmech. op de droogtechn. T.N.O.
Rapport '48.
Stacey, A.E. en Matzen, H.B.: J.A.C.S. 8, 525, '25.
Straight, H.R.: J.A.C.S. 12, '29.
Straight, H.R.: Bull. Am. Cer. Soc. 18 No.11, 427, '39.
Terzaghi, C. v.: Publ. roads 7, 153-162, '26.
Terzaghi, C. v.: Theoretical Soil mechanics London-New York 1944.
Thor, P.: Tonind. Zeitung 66, 322, '42.
Thor, P.: Tonind. Zeitung 64, 494, '40.
Westman, H.E.R.: J.A.C.S. 12, 584, '29.
Whitaker, L.R.: Brick and Clay Rec. 95 No.5, 14, '39.
Whitaker, L.R.: " " " " 95 No.6, 17, '39.
Whitaker, L.R.: " " " " 96 No.2, 24, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 96 No.3, 18, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 96 No.4, 19, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 96 No.5, 23, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 97 No.1, 27, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 97 No.2, 26, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 97 No.3, 30, '40.
Whitaker, L.R.: " " " " 97 No.4, 27, '40.
Whittemore, J.W.: Bull. Am. Cer. Soc. 18, 367, '39.
Williams-Gardner, A.: Trans. Brit. Cer. Soc. 43, 37, '43-'44.
Williamson, W.O.: Research 1, 363-368, '48.
Woodruff, C.M.: Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 6, 120-125, '41.
Zehner, G.: Tonind. Zeitung 64, 579, '40.
Zenkovich, F.A.: Keram. Steklo. 7, 46-50, '31.
Zunker, F.: Das Verhalten des Bodens zum Wasser. Hdb.d.Bodenlehre VI, 66-220.

TABEL 1.

DE INVLOED VAN DEELTJESVORM EN -GROOTTE
OP HET SOORTELIJK OPPERVLAK.

deeltjes- vorm	afmetingen	aantal deeltjes	totaal volume	soortelijk opp. per 1 cm ³
bol	r=0,6204 cm	1	1 cm ³	4,836 cm ²
	r=1 μ	1,91x10 ¹²	1 cm ³	31416 cm ²
kubus	h=1 cm	1	1 cm ³	6 cm ²
	h=1 μ	10 ¹²	1 cm ³	6x10 ⁴ cm ²
schijf	h=0,1 cm, r=1,728 cm	1	1 cm ³	21,121 cm ²
	h=1 μ , r=56,42 cm	1	1 cm ³	2x10 ⁴ cm ²
	h=100 m μ , r=178,4 cm	1	1 cm ³	2x10 ⁵ cm ²

TABEL 2.

QUALITATIEVE VERGELIJKING VAN DE MINERALOGISCHE
SAMENSTELLING VAN VERSCHILLENDE BODEMFRACHTIES.

kleisoort	>50 μ	mineralen, aanwezig in de diverse fracties		
		50 - 5 μ	5 - 1 μ	< 1 μ
Putnam klei (MARSHALL 1935)		veldspaten muscoviet kwarts	veldspaten muscoviet kwarts materiaal, intermediair tussen veldspa- ten en kleimi- neralen	kleimineralen intermediair materiaal
Rothamsted klei (MAR- SHALL 1935)		veldspaten muscoviet	kwarts muscoviet kleimineralen intermediair materiaal	kleimineralen
Carbonische klei (MAR- SHALL 1935)		kwarts veldspaten glauconiet halloysiet	kwarts veldspaten kleimineralen ohloriet ?	kleimineralen
Hedel-klei (VAN BAREN 1935)	kwarts veldspaat	kwarts muscoviet veldspaat	muscoviet kwarts (veldspaat)	(kleimineralen)
Echt-klei (VAN BAREN 1935)	kwarts	kwarts muscoviet	muscoviet (kwarts)	(kleimineralen)
Rijn-uter- waard klei (VAN BAREN 1935)	kwarts	kwarts muscoviet	muscoviet kwarts	(kleimineralen)

TABEL 3.

DE BETREKKING TUSSEN WATERGEHALTE EN AFSTAND
VAN OO1 SPLIJTVLAKKEN VAN MONTMORILLONIET.
(HOFMANN UND BILKE)

watergehalte in g per 100 g droge montmorilloniet	afstand der splits- vlakken in A
10,0	11,25
13,9	12,1
19,5	13,4
24,2	14,6
29,5	15,1
36,3	15,6
41,8	15,7
59,0	17,8

TABEL 4.

BEVOCHTIGINGSWARMTE EN HYGROSCOPICITEIT VAN
ENIGE KLEIMINERALEN.

mineraal	adsorptie capaciteit, m.aeq./100 g	bevochtigings- warmte, cal/g	hygroscopici- teit, gew. %	bevochtigings- warmte, hygroscoop.
montmorillo- niet	80 - 100	17,0	21,5	0,79
montmorillo- niet-beidel- liet		15,0	20,1	0,75
beidelliet	60 - 80	13,8	18,1	0,76
beidelliet- halloysiet		11,7	15,5	0,75
halloysiet	40 - 50	5,9	6,1	0,96

TABEL 5.

CONSISTENTIEWAARDEN VOLGENS ATTERBERG

VAN ENIGE KLEIEN.

Aanduiding	vloei-grens	kleef-grens	uitrol-grens	omslagpunt	bewerkbaarheid	plasticiteit	surplus	fractie $< 2 \mu$ in %
Maasklei, Oss	69	52	29	20	23	40	- 17	53
Rijnwaterwaard, Wageningen	37	33	23	8	10	14	- 4	36
Jonge zeeklei, Goes	32	26	22	9	4	10	- 6	24
Löss, Margraten	29	52	20	8	32	9	+ 23	8
Oude zeeklei, Winsum	44	34	23	10	11	21	- 10	49
Kaoliniet, Siantar	45	51	41	14	10	4	+ 6	54
Kaoliniet, handelsprod.	48	50	33	14	17	15	+ 2	73
Montmorilloniet, Wyoming	149	90	71	37	19	78	- 59	94
Bentoniet handelsprod.	88	57	49	30	8	39	- 31	80
Halloysiet, Suriname	46	43	29	11	14	17	- 3	51
Beidelliet, Putnam	30	-	24	-	-	6	-	37 [⊕])
" "	42	-	23	-	-	19	-	53 [⊕])
" "	57	-	28	-	-	29	-	70 [⊕])
" "	70	-	30	-	-	40	-	87 [⊕])
Kaoliniet, humushoudend	43	-	37	-	-	6	-	29
Kaoliniet, humusvrij	26	-	20	-	-	6	-	29
Kwartsmeel	14	∞	13	7	∞	1	+∞	-

⊕) fractie $< 5 \mu$

TABEL 6.

DE MINERALOGISCHE SAMENSTELLING VAN ENIGE
NEDERLANDSE KLEIEN (ONTL. AAN FAVEJEE,
1939).

klei	kwarts	kaolien	montmorilloniet	mica	totaal
Biesbosch (N.B.)	18 - 21	5 - 6	3 - 4	28 - 31	54 - 62
Echt (L.)	15 - 18	5 - 6	7 - 9	23 - 27	50 - 60
Hedel (N.B.)	11 - 13	5 - 6	3 - 4	32 - 36	51 - 59
Rijnslib	6 - 8	5 - 6	2 - 3	28 - 31	41 - 48
Camerig (L.)	10 - 12	sp.	42 - 50	25 - 28	77 - 90
Eindhoven (leem)	16 - 19	6 - 7	0	51 - 58	73 - 84
Zeeslib	8 - 10	6 - 7	4 - 5	27 - 30	45 - 52
Bellingwolde (Gr.)	29 - 34	9 - 11	5 - 6	27 - 30	70 - 81

TABEL 7.

WAARDEN VOOR α , β , ν EN ρ IN DE FORMULES $P = \alpha e^{-\beta M}$ EN $C = \nu e^{\rho M}$.

ONTLEEND AAN MACEY (1941-'42).

Monster No	Herkomst	α	β	ν	ρ
Bentoniet	Onbekend	$3,03 \times 10^8$	0,053		
	Baksteenkleien en fireclays				
32 B	Bedfordshire	$2,76 \times 10^{10}$	0,266	$1,58 \times 10^{-16}$	0,281
B.G.	Belgische fireclay	$1,24 \times 10^{10}$	0,282		
22/40	Bedfordshire	$4,20 \times 10^{10}$	0,296		
21/40	Bedfordshire	$5,23 \times 10^{10}$	0,304		
31	Bedfordshire	$1,74 \times 10^{11}$	0,331	$1,42 \times 10^{-15}$	0,210
Etrurisch marmer	North Staffs	$8,91 \times 10^9$	0,355		
26	Somerset	$1,85 \times 10^{11}$	0,374	$3,68 \times 10^{-16}$	0,315
6/250	Stourbridge	$4,11 \times 10^{11}$	0,402	$2,45 \times 10^{-16}$	0,323
7/250	Stourbridge	$1,01 \times 10^{12}$	0,420		
6/100	Stourbridge	$2,92 \times 10^{11}$	0,445		
B.R.	Belgische fireclay	$2,12 \times 10^{11}$	0,483		
7/40		$7,86 \times 10^{11}$	0,493		
7/8		$7,34 \times 10^{11}$	0,512	$2,61 \times 10^{-17}$	0,500
13/40	Leeds	$1,10 \times 10^{11}$	0,521		
St.St.	Stourbridge	$1,03 \times 10^{13}$	0,552	$1,12 \times 10^{-17}$	0,506
19/40	S.Lancashire	$3,79 \times 10^{11}$	0,559		
7/40 + 0,25% HCl		$3,46 \times 10^{12}$	0,565		
28	Stourbridge fireclay	$3,71 \times 10^{12}$	0,565	$3,03 \times 10^{-17}$	0,463
3	Stourbridge fireclay	$9,15 \times 10^{11}$	0,570	$2,02 \times 10^{-17}$	0,583
4/40	Scotts fireclay	$1,05 \times 10^{11}$	0,645		
27	Stourbridge fireclay	$2,08 \times 10^{11}$	0,660	$3,23 \times 10^{-16}$	0,578
B.	North Staffs	$3,42 \times 10^{12}$	0,673		
30 D	Leeds	$3,24 \times 10^{11}$	0,699	$8,96 \times 10^{-17}$	0,584
29	Stourbridge	$8,24 \times 10^{12}$	0,706	$9,12 \times 10^{-18}$	0,650
30 C	Stourbridge	$3,72 \times 10^{11}$	0,720	$1,08 \times 10^{-16}$	0,608
30 B	Stourbridge	$3,46 \times 10^{11}$	0,728	$6,45 \times 10^{-17}$	0,652
30 A	Stourbridge	$5,49 \times 10^{11}$	0,783	$1,74 \times 10^{-17}$	0,780
P.X.X.	Ballclays				
	handelsproduct	$2,44 \times 10^{14}$	0,516		
34	"	$1,12 \times 10^{15}$	0,552	$6,79 \times 10^{-19}$	0,459
M.T.A.	"	$4,77 \times 10^{15}$	0,565		
B.B.	"	$5,58 \times 10^{16}$	0,614		
33	"	$3,66 \times 10^{17}$	0,650	$5,86 \times 10^{-20}$	0,475
	Chinaclays				
	fijnste fractie	$3,08 \times 10^{11}$	0,227		
36	handelsproduct	$4,12 \times 10^{13}$	0,433	$3,15 \times 10^{-18}$	0,480

TABEL 8.

WAARDEN VOOR n EN r VOOR KLEI N^o. 7. $S = 44,25$.

ONTLEEND AAN MACEY (1941-'42).

doorlatendheids- coëfficiënt C	watergehalte M in %	$r \times 10^{-5}$	$n \times 10^{11}$
5,07	25,5	1,394	1,176
4,395	24,9	1,308	1,314
3,959	24,05	1,238	1,434
3,405	23,5	1,173	1,574
2,774	22,65	1,072	1,84
2,253	21,90	0,976	2,17
1,642	21,20	0,944	2,85
1,040	20,45	0,678	4,29
0,642	19,75	0,54	6,61

TABEL 9.

DE INVLOED VAN BIJMENGING VAN CHAMOTTE, ZAND EN KRIJT OP HET INITIAAL WATERGEHALTE, DE KRIMP EN DE POROSITEIT VAN PROVINS KLEI.

ONTLEEND AAN BODIN EN GAILLARD, 1930.

aanduiding van het mengsel	initiaal watergehalte in %	lineaire krimp %	droge porositeit in %
Provins klei zuiver	51,0	9,1	33
Provins klei + 10% chamotte 20-60 ^{x)}	39,0	7,5	32
+ 20% chamotte 20-60	34,2	6,5	30,5
+ 40% chamotte 20-60	27,5	5,2	27,6
+ 20% zand 200	39,7	8,0	28,3
+ 20% chamotte 200	37,0	6,7	32,7
+ 20% zand 20-60	39,0	7,8	31,2
+ 20% krijt 200	49,0	9,0	34,7

x) deze cijfers duiden zeefmaten aan: 20-60 = fractie tussen 1,02 en 0,27 mm
200 = fractie kleiner dan 0,08 mm.

TABEL 10.

DE INVLOED VAN DE RIJPINGSTIJD EN DE DROOGSNELHEID OP DE DROOGEIGENSCHAP-
PEN VAN "FIRECLAY".

ONTLEEND AAN MACEY (1938-'39 b).

proef no.	rijpings- tijd in dagen	lucht temp. °C	dauwpunt v.d. lucht °C	droogsnelheid in g per uur per steen	opmerkingen
1	0	28	22	14	goed
2	onb. x)	47	30	60	krimpscheuren
3	onb.	32	25	21	goed
4	onb.	32	23	27	goed
5	21	37	24	44	goed
6	0	40	24	41-54	sterk gescheurd
7	onb.	63	53	58	sterk gescheurd
8	onb.	63	54	46	sterk gescheurd
9	onb.	63	56	44	gescheurd
10	0	61	56	32	gescheurd
11	14	47	35	54	goed
12	42	47	30	66	goed
13	0	37	24	41	sterk gescheurd
14	1	32	23	27	goed
15	14	37	24	45	goed
16	16	47	35	52	kleine scheurtjes

x) onb. = onbekend.

TABEL 11.

DE INVLOED VAN VOORVERWARMING VAN DE VORMLINGEN OP DE DROOGEIGENSCHAPPEN

VAN NORTH STAFFORDSHIRE FIRECLAY.

ONTLEEND AAN MACEY EN WILDE (1943-'44).

VOORVERWARMINGSTEMP. = GEBRUIKTE LUCHTTEMP.

proef no.	lucht- temp. °C	dauwpunt °C	droogsnelheid in g per uur per steen	opmerkingen
in kamer- droger met voorverwar- ming v.d. vormlingen				
1	60	25	> 60	gescheurd
2	60	30	62	gescheurd
3	60	35	> 60	gescheurd
4	55	33	> 60	gescheurd
5	50	33	35,8	goed
6	50	31	44,5	goed
7	50	29	46,6	kleine scheurtjes
8	50	27	48,7	kleine scheurtjes
in kamer- droger zon- der voorver- warming				
9	40	25	23,4	kleine scheurtjes
10	38	25	21,8	goed.

MAXIMALE VEILIGE DROOGSNELHEID VAN N. STAFFORDSHIRE FIRECLAY.

ONTLEEND AAN MACEY EN WILDE (1943-'44) (VGL. TABEL 11).

In kamerdroger met voorverwarming v.d. vormlingen	45 g/uur/steen.
In kamerdroger zonder voorverwarming	22 g/uur/steen.
In hotflood-droger met ventilator-circulatie	28 g/uur/steen.
In hotflood-droger zonder ventilator-circulatie	20 g/uur/steen.

TABEL 13

VERGELIJKING VAN DE CAPACITEIT, HET WARMTEVERBRUIK
EN DE BEDRIJFSKOSTEN VAN ENIGE DROOGINRICHTINGEN
(ONTLEEND AAN CLAUSZ, 1942).

Type drooginrichting met kenmerken.	dagproductie in stuks	watergehalte per vormling, kg	kcal benodigd om 1 kg water te verdampen.	kW, benodigd voor 1000 kg verdampt water.	kosten voor vöörverwarming van 1000 vormling in R.M.	stroomverbruik in R.M.°/oo	bedrijfskosten voor verwarming en stroom in RM per 1000 vorml.
1. Kamerdroger, gelijkvloers; overdag afgewerkte stoom, 's nachts verse stoom; zonder ventilator.	7540	1,08	2112	-	9,72	-	9,72
2. Kamerdroger boven de oven; overdag en 's nachts afgewerkte plus verse stoom, met extra verwarming; zonder ventilator.	18570	1,23	784	-	1,14	-	1,14
3. Kamerdroger, gelijkvloers; overdag afgewerkte stoom plus luchtverhitting (ovenwarmte); met ventilator.	16800	0,54	1764	22,2	1,86	1,21	3,07
4. Kamerdroger, gelijkvloers; overdag afgewerkte stoom, 's nachts ovenwarmte; met ventilator.	12000	0,44	1838	15,0	-	0,66	0,66
5. Kamerdroger boven de oven; luchtverhitting door de ovenwarmte; met ventilator.	21580	0,953	1727	14,5	6,36	1,38	7,74
6. Kamerdroger boven de oven; afkoelingswarmte v.d. oven; met ventilator.	9100	0,86	1121	14	-	1,20	1,20
7. Kamerdroger boven de oven; overdag afgewerkte stoom, 's nachts gedeeltelijk verse stoom; geen ventilator.	32000	0,43	1160	-	0,60	-	0,60
8. Kamerdroger, gelijkvloers; overdag afgewerkte stoom plus ovenwarmte; met ventilator.	23000	0,90	1708	9,4	1,2	0,94 (0,47) ⁺	2,16 (1,67) ⁺

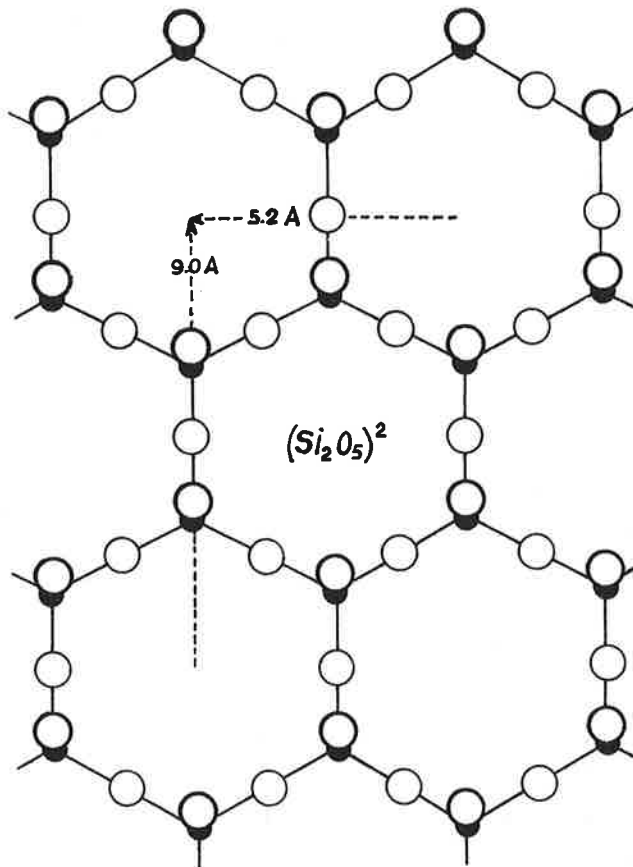
TABEL 13 (Vervolg)

9. Kamerdroger gelijkvloers; ovenwarmte en rookgassen; met ventilator.	20000	0,60	1330	26,6	-	1,35	1,35
10. Kamerdroger, gelijkvloers als boven, maar met overdrukventilator.	15000	0,90	830	30,0	-	2,70	2,70
11. Kamerdroger gelijkvloers; ovenwarmte plus aparte luchtverhitting; overdruk ventilator.	20000	0,65	1200	33,0	0,90	2,14	3,04
12. Kamerdroger gelijkvloers; afgewerkte stoom plus verse stoom, overdruk ventilator.	15000	0,85	2000	22,0	1,0	1,87	2,87
13. Als 12; voor kleine pannen.	8000	0,60	2080	47,0	1,10	2,82	3,82
14. Kanaaldroger; directe verwarming met ovenwarmte; met ventilator	20000	0,60	1140	26,0	1,00	1,56	2,56
15. Kanaaldroger; afgewerkte stoom plus ovenwarmte; met zuig- en persventilatoren.	40000	0,90	1060	36,0	-	3,24	3,24
						(1,62) ⁺	(1,62) ⁺

+) met eigen electriciteitsopwekking.

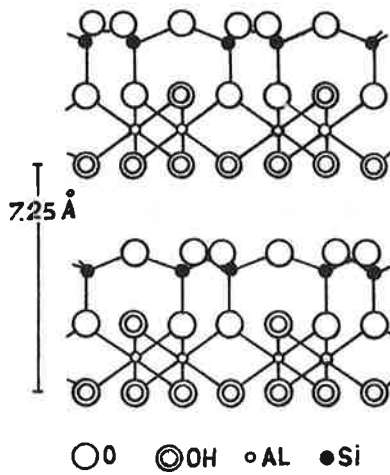
De kosten in deze tabel omvatten geen afschrijvingskosten, reparaties en bedieningskosten.

FIG. 1



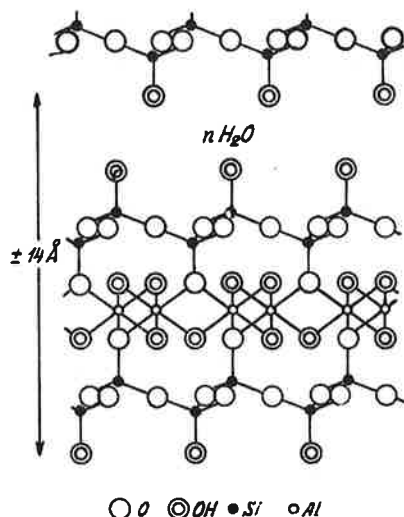
Si_2O_5 ROOSTER, BESTAANDE UIT GEKOPPELDE SiO_4 TETRAËDERS.
(ZWARTE BOLLEN=Si, WITTE BOLLEN=O)

FIG. 2



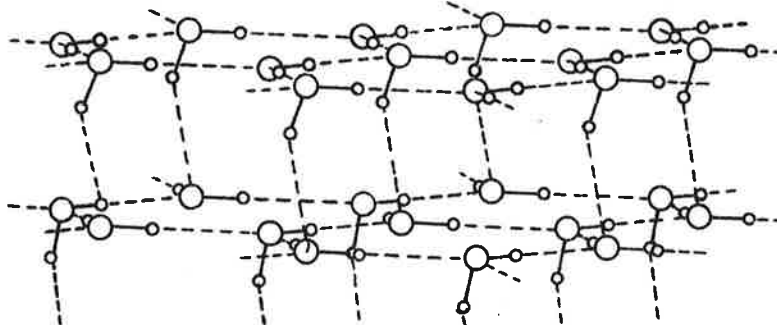
DE KRISTALSTRUCTUUR VAN KAOLINIET.

FIG.3



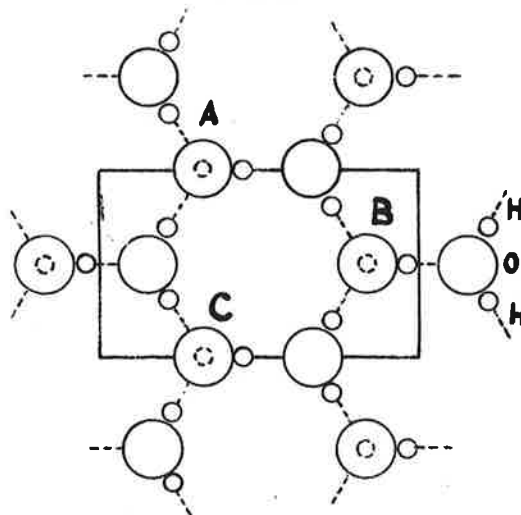
DE KRISTALSTRUCTUUR VAN MONTMORILLONIET VOLGENS EDELMAN AND FAVEJEE 1940.

FIG.4a



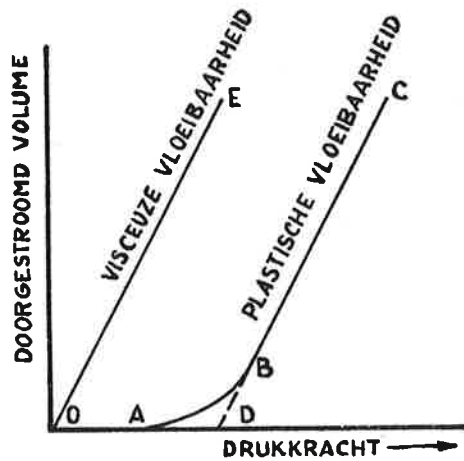
DE RANGSCHIKKING VAN H_2O DIPOLEN IN DE U CONFIGURATIE.
(UIT BRADLEY AND GRIM 1948)

FIG.4b



SUPERPOSITIE VAN DE U CONFIGURATIE VAN WATER OP HET MONTMORILLONIET-ROOSTER, NAAR HENDRICKS AND JEFFERSON 1938. BIJ A, B EN C ZIJN DE WATERSTOFATOMEN VAN HET WATER MET DE HYDROXYLGROEPEN VAN HET MONTMORILLONIETROOSTER GEKOPPELD.

FIG.5



PLASTOMETRISCHE WAARNEMING AAN EEN VISCEUZE VLOEISTOF EN AAN EEN PLASTISCHE STOF (BLAIR EN CROWTHER) O A = YIELD VALUE

FIG. 6 b

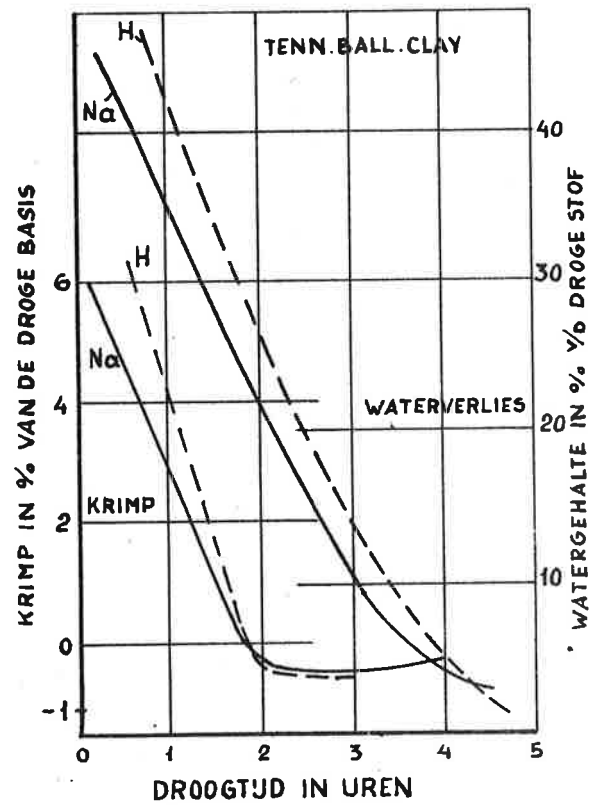
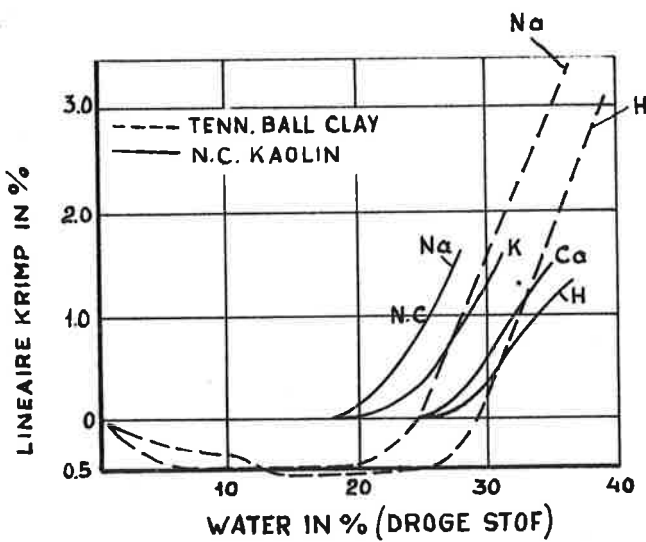
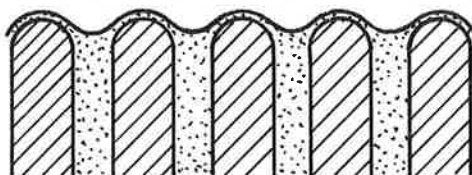


FIG. 6 a



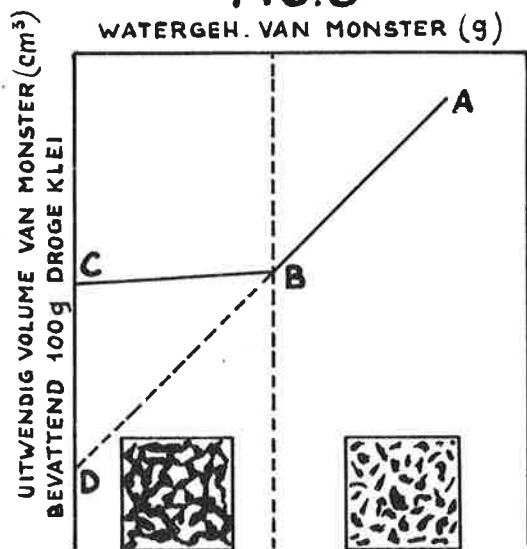
DE INVLOED VAN DE KATIONBEZETTING OP DE DROGING EN KRIMP VAN BALL CLAY EN KAOLIEN (HENRY EN SIEFERT 1941)

FIG.7



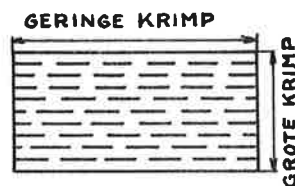
HOLLE - BOLLE MENISCI OP EEN POREUS, VOCHTIG OPPERVLAK. (SCHEMATISCH)

FIG.8



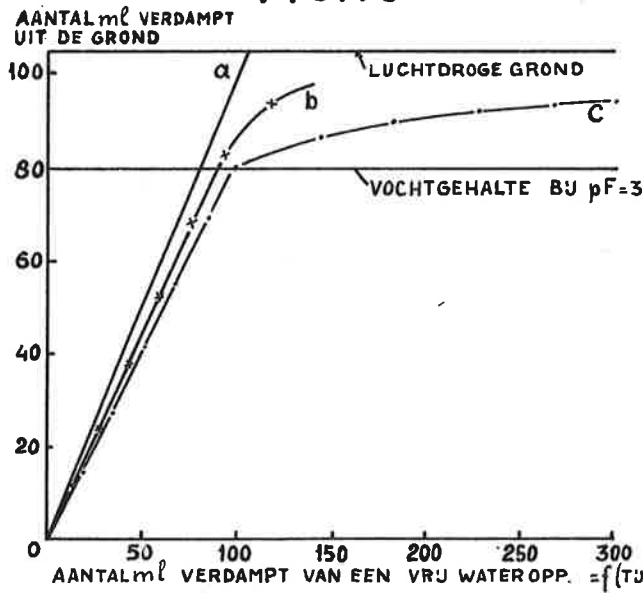
SCHEMATISCHE VOORSTELLING $\frac{1}{10}$ KRIMP VAN KLEI. LANGS AB IS DE VOLUME VERANDERING GELIJK $\frac{1}{10}$ VERDAMPTE VOLUME WATER. LANGS BC TREEDT NAKRIMP OP. DE LIGGING VAN PUNT C HANGT AF $\frac{1}{10}$ PORIËNVOLUME

FIG.9



DE KRIMP VARIEERT $\frac{1}{10}$ RICHTING. DE GEORIËNTEERDE PLAATVORMIGE DEELTJES WORDEN IN DE RICHTING $\frac{1}{10}$ GROOTSTE KRIMP GESCHIEDEN DOOR DE DIKSTE WATERFILMS

FIG. 10



VERDAMPINGSCURVEN VAN EEN VRIJ WATEROPPERVLAK (α) KLEI BIJ WINDSTILTE (b) EN VAN DEZELFDE KLEI IN EEN LUCHTSTROOM (c) (WOODRUFF. 1941) PUTNAM KLEI

FIG. 11

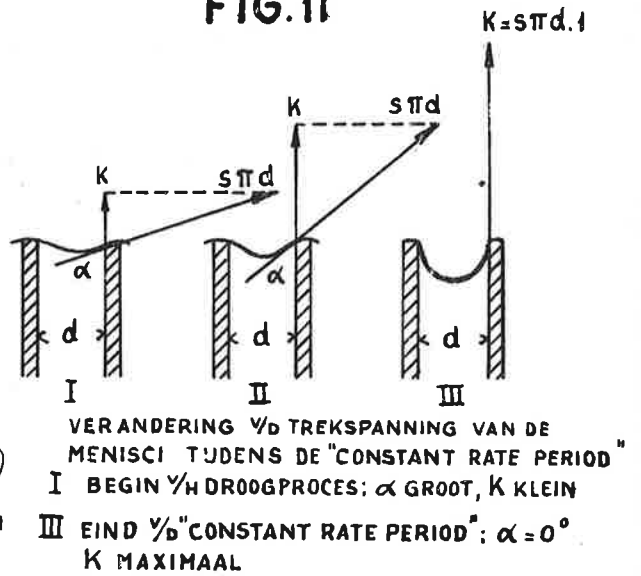


FIG. 12

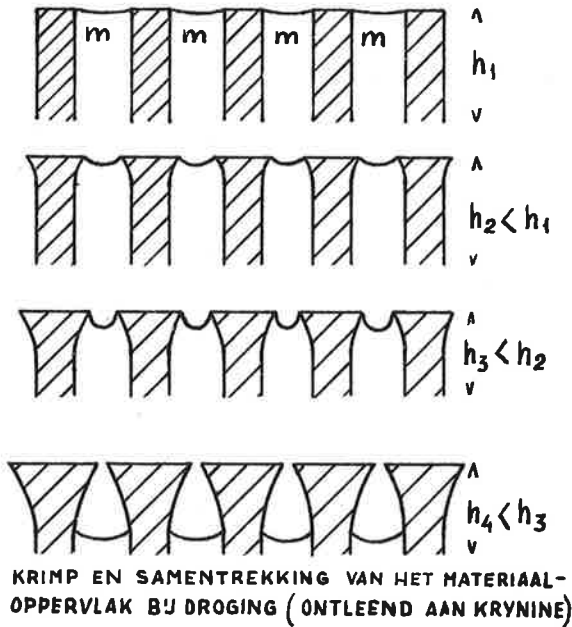


FIG. 13

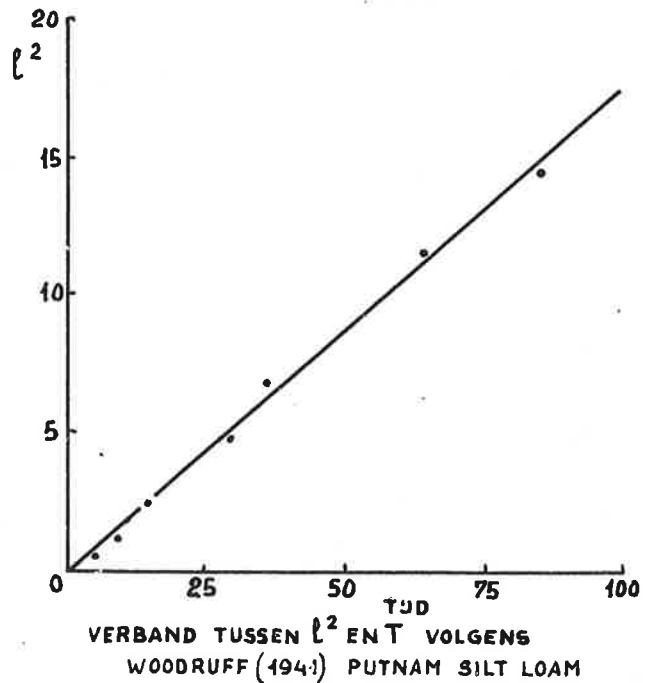


FIG.14

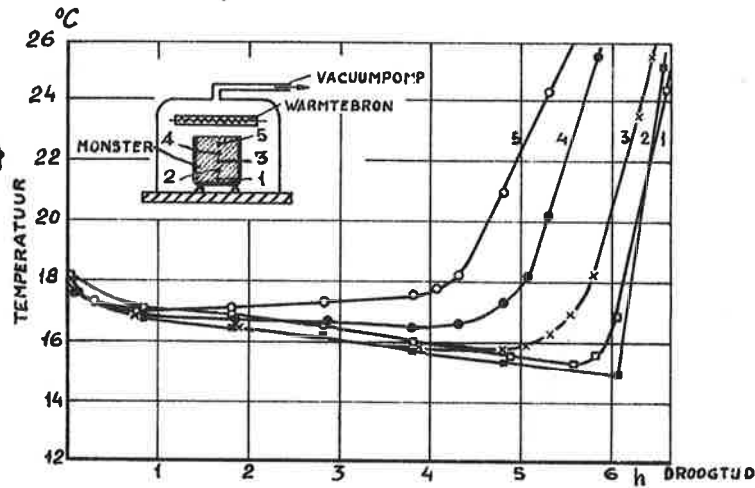


FIG.14 EN 15 HET TEMPERATUURVERLOOP EN HET VERLOOP DER DROGING $\frac{1}{2}$ E GROF-CAPILAIRE MASSA, IN AFHANKELIJKHEID $\frac{1}{2}$ PLAATS VAN DE WARMTBRON. HET VERBAND TUSSEN DROOGTIJD $\frac{1}{2}$ TEMP. IS WEERGEGEVEN VOOR 5 PLAATSEN BINNEN HET MONSTER. FIG.14 WARMTBRON BOVEN HET TE DROGEN OBJECT. FIG.15 WARMTBRON ONDER HET OBJECT.

FIG.15

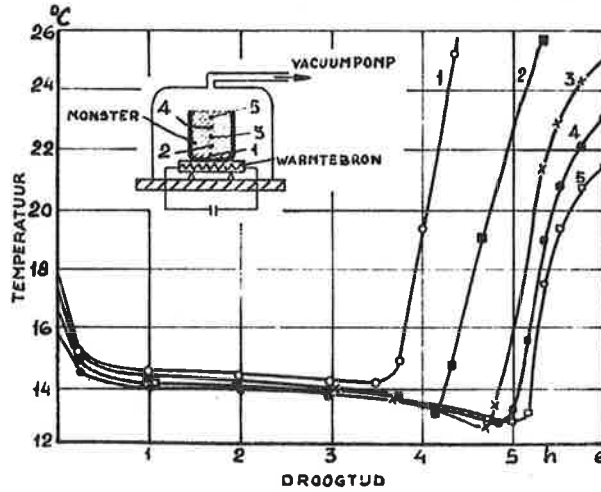
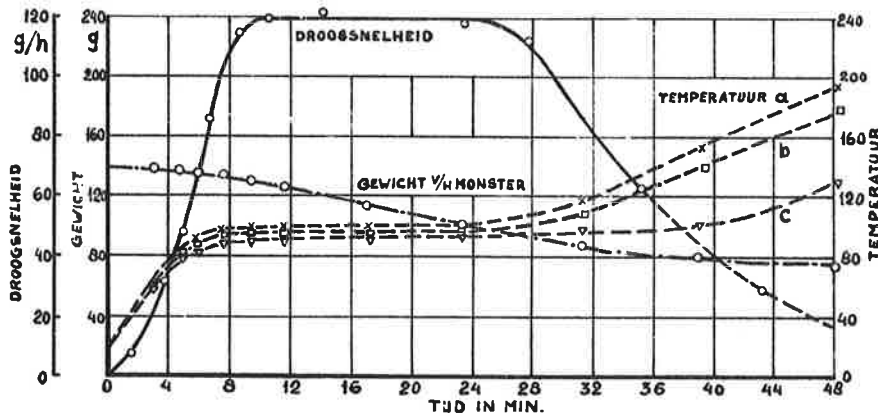
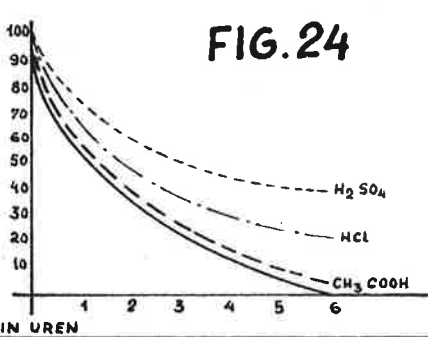
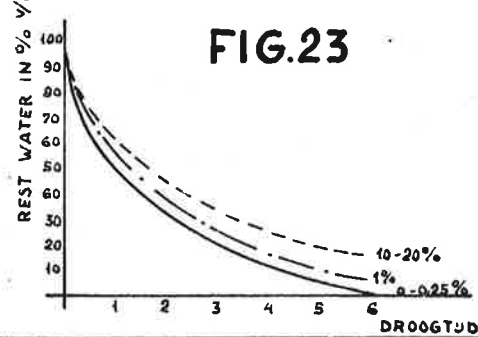
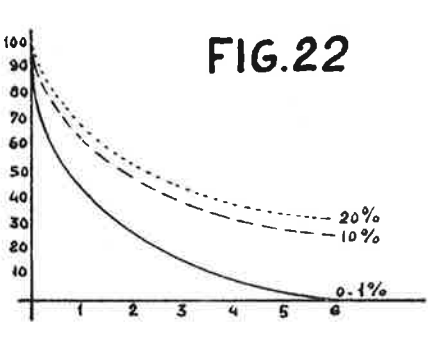
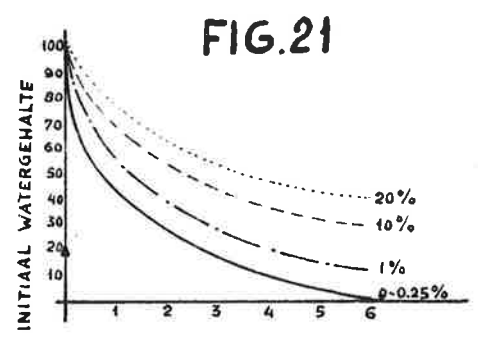
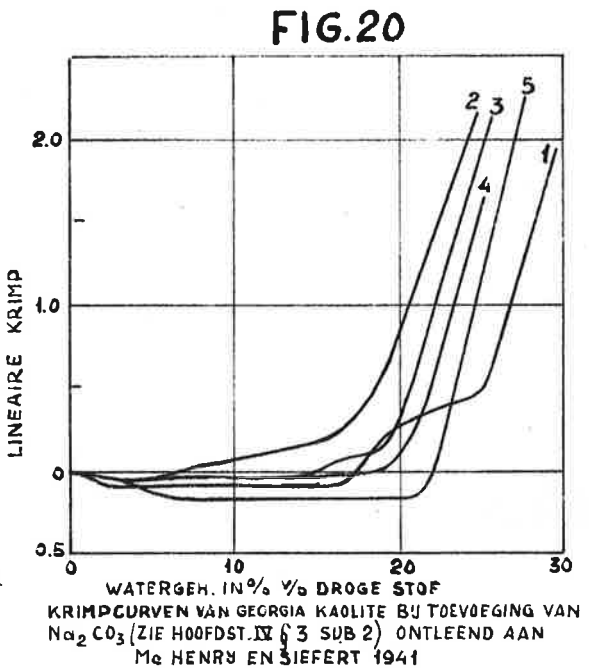
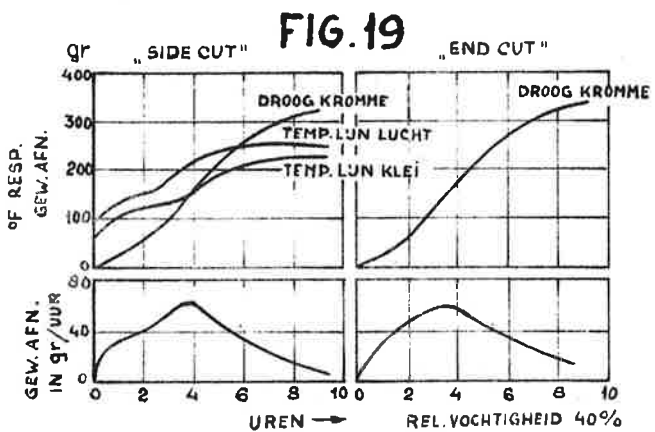
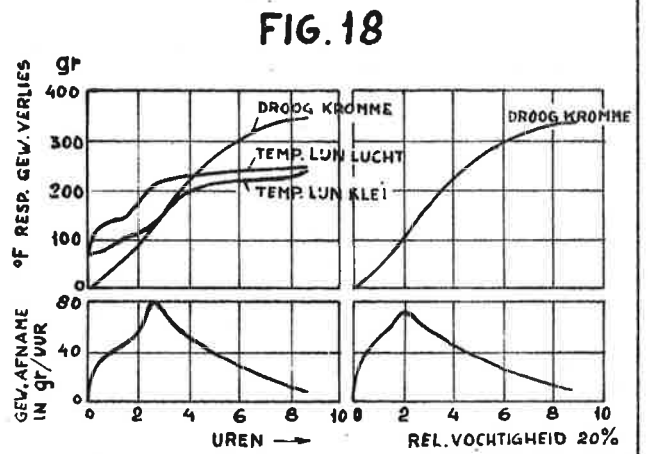
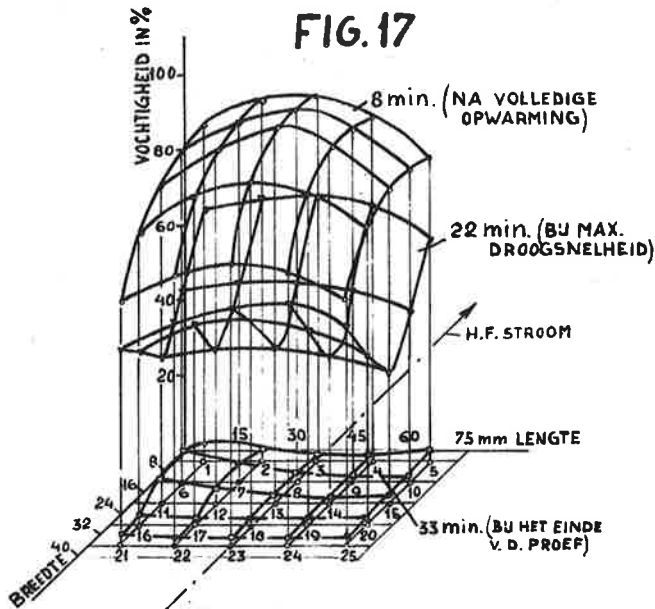


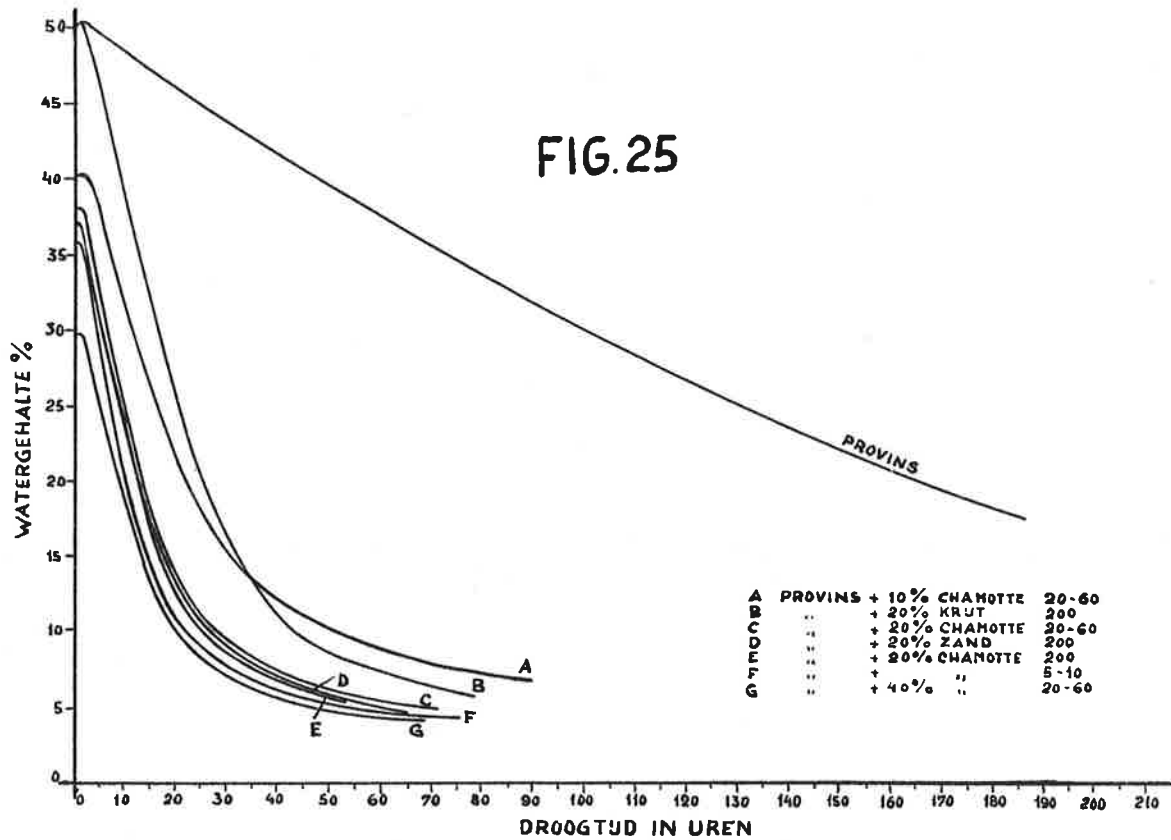
FIG.16



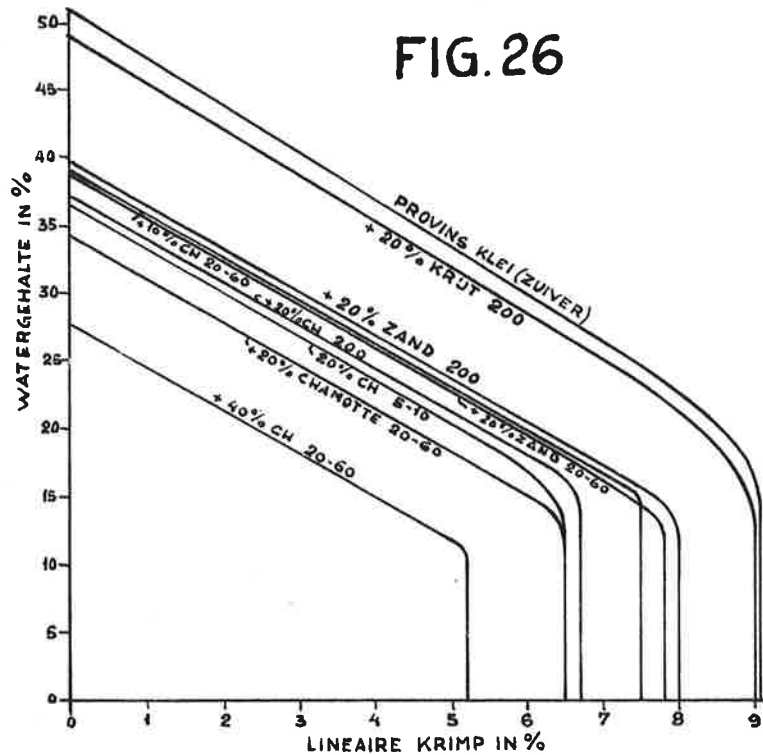
HET VERLOOP $\frac{1}{2}$ DROGING VAN HOUT, BIJ INWENDIGE WARMTETOEVOER, DOOR MIDDEL VAN HOOGFREQUENTVERBITTING

- a TEMPERATUURVERLOOP IN HET MIDDEN VAN HET HOUTMONSTER
- b " " OP 1cm DIEPTE IN HOUT
- c " " AAN DE RAND VAN HET HOUTMONSTER





DROOGCURVEN VAN PROVINS KLEI MET VERSCHILLENDE TOEVOEGINGEN



DROOGCURVEN VOLGENS BIGOT VAN PROVINS KLEI MET VERSCHILLENDE TOEVOEGINGEN

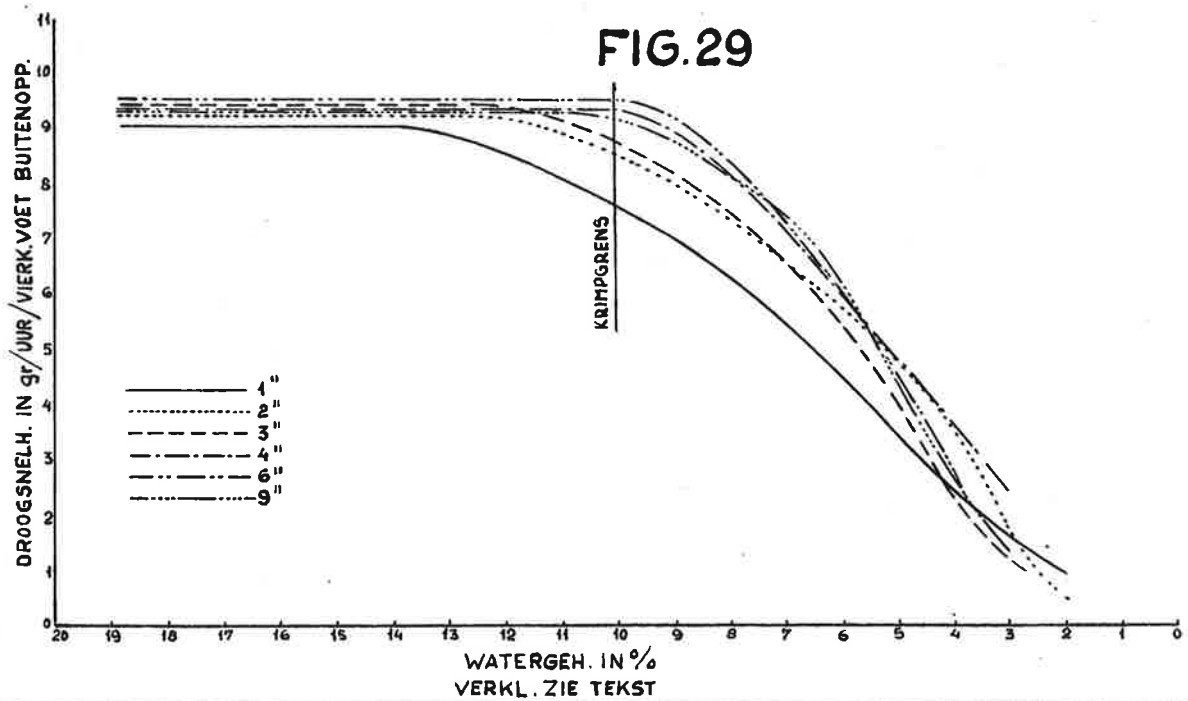
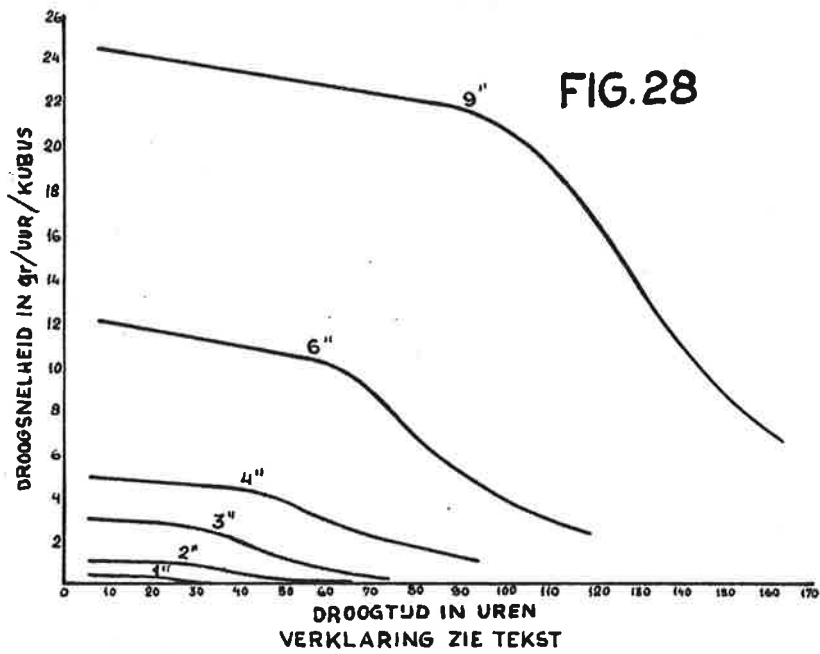
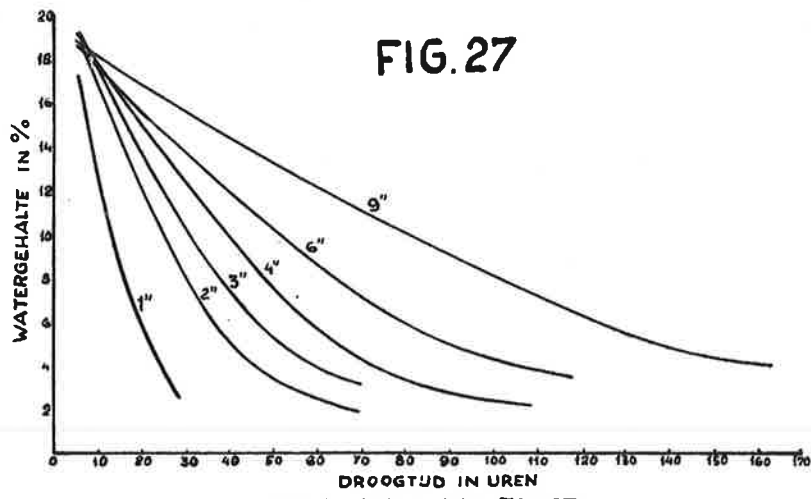


FIG.30

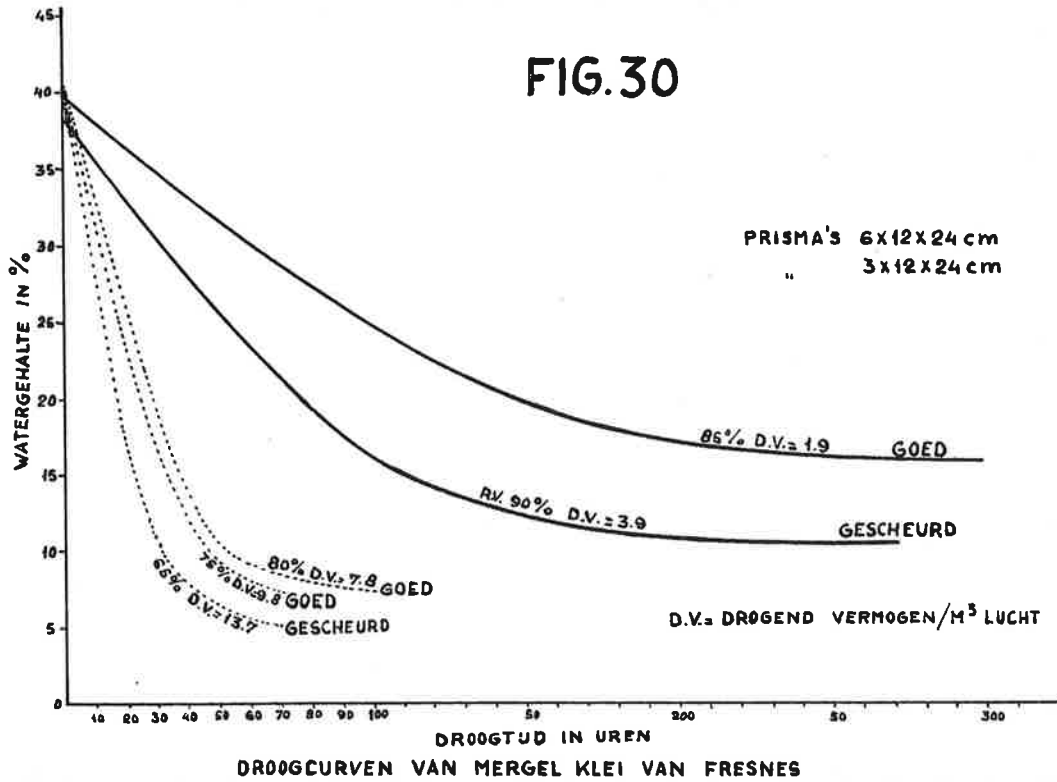


FIG.31

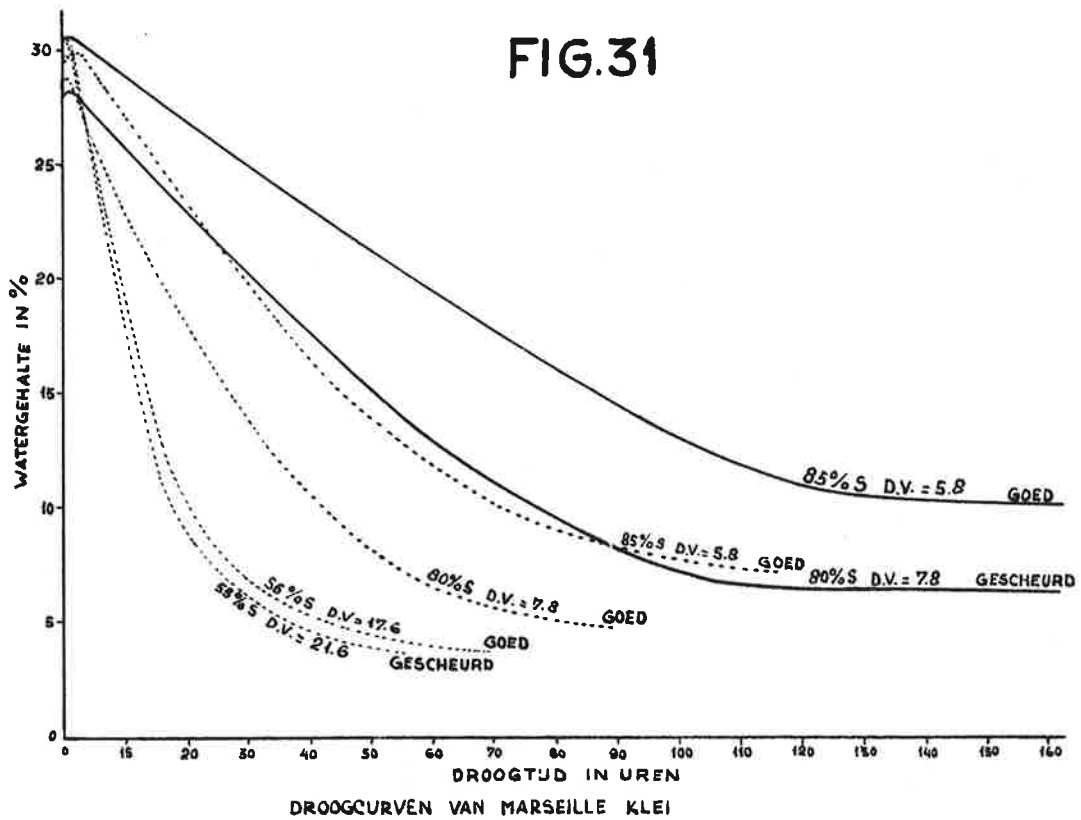


FIG.32

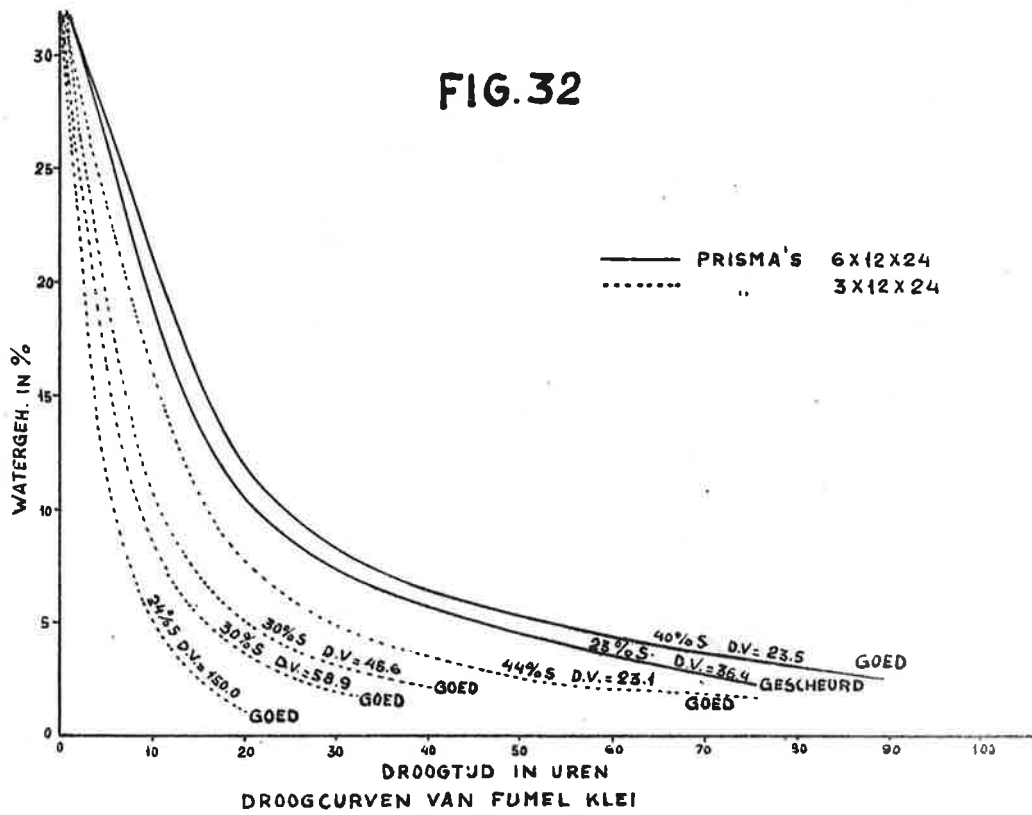


FIG.33

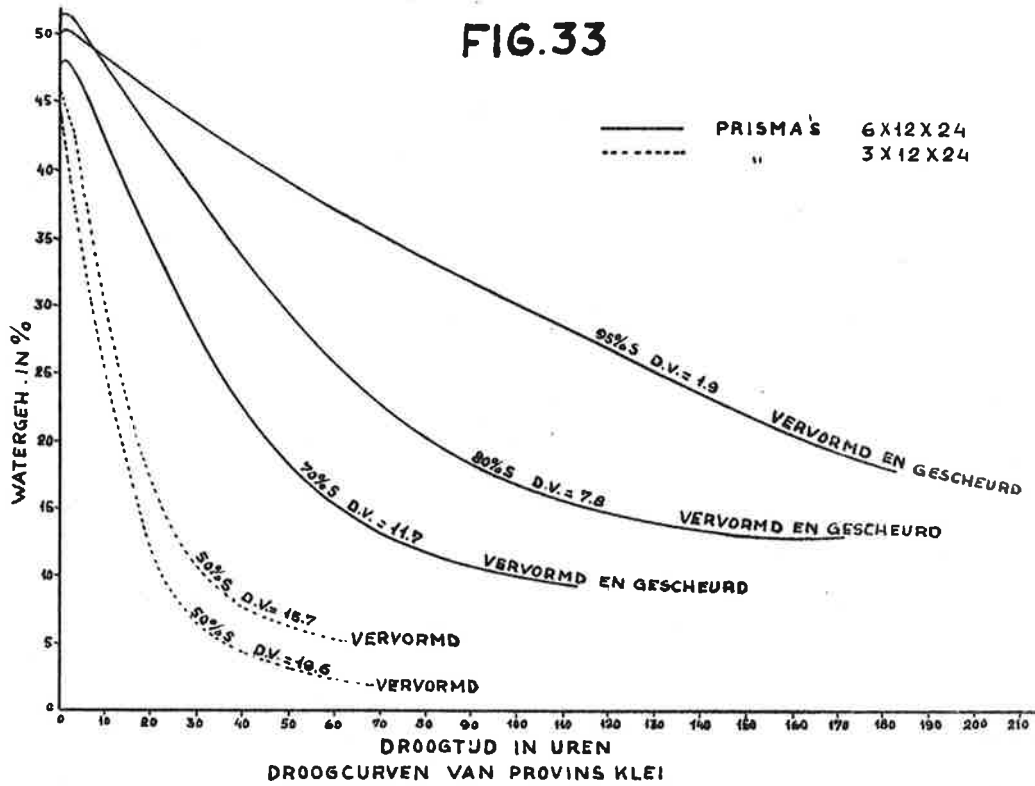
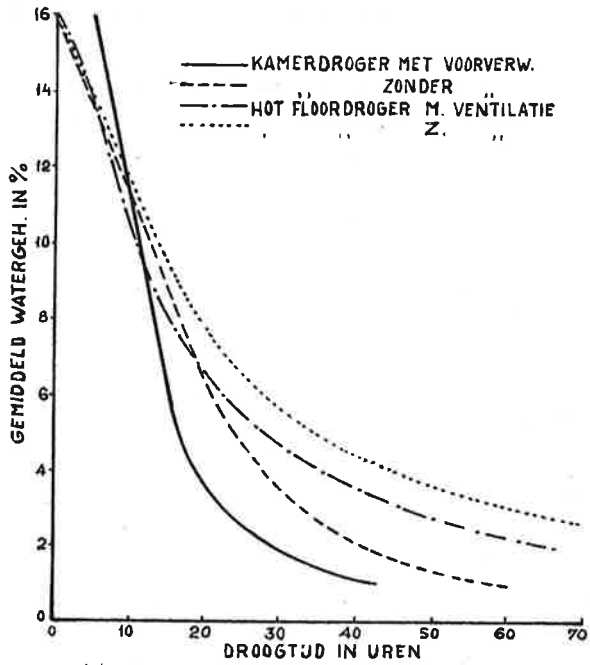
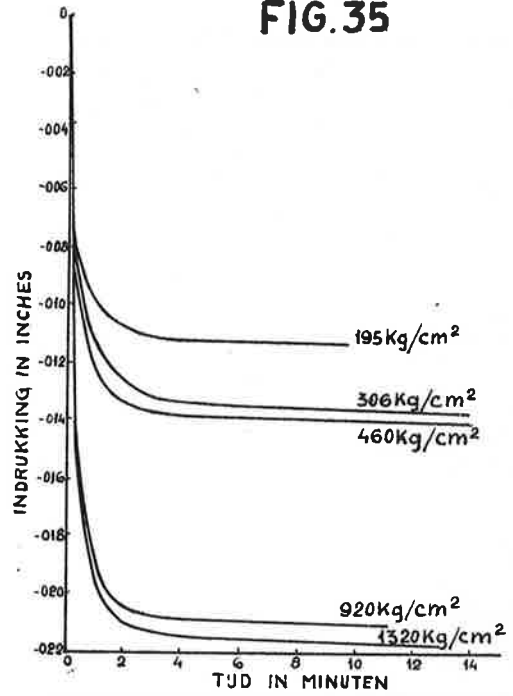


FIG.34



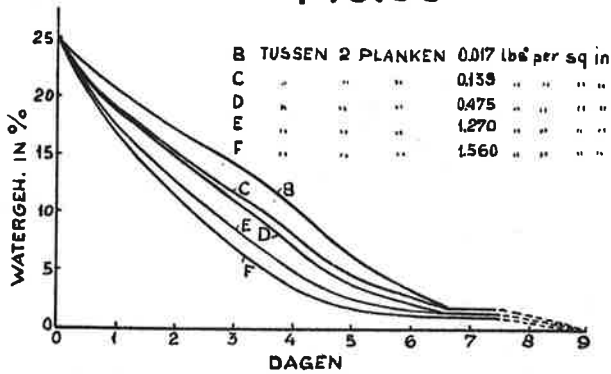
MAX. VEILIGE DROOGSNEELH. VOOR FIRECLAY STENEN, GEDROOGD VOLGENS 4 METHODEN.

FIG.35



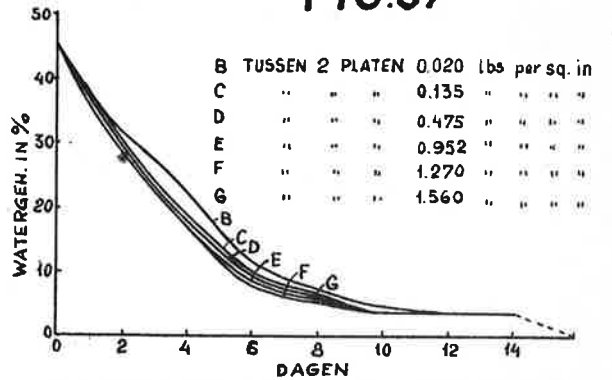
DE INVLOED VAN PERSDRUKKING OP HET VOCHTGEH. (INDRUKKING) VAN FIRECLAY

FIG.36



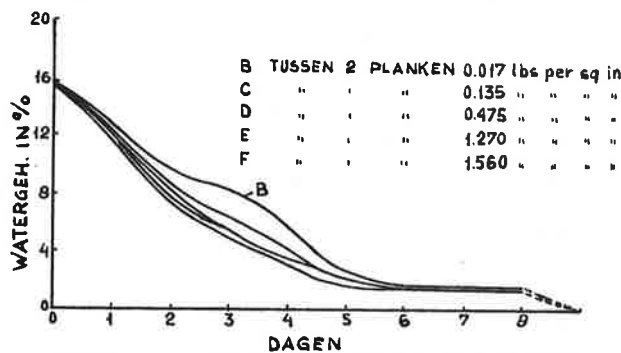
DE DROGING VAN GEORGIA KAOLINIET ONDER INVL. VAN KLEINE PERSDRUKKEN. (DROOGTEMP. 110°C)

FIG.37



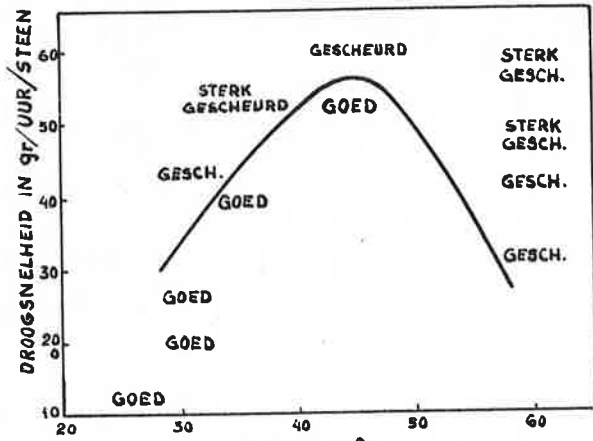
DE DROGING VAN KENTUCKY BALL CLAY ONDER INVL. VAN KLEINE PERSDRUKKEN (DROOGTEMP. 110°C)

FIG.38



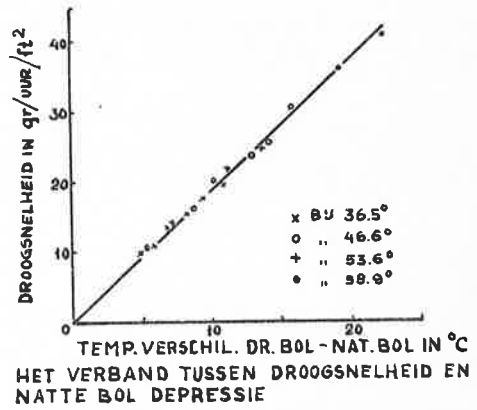
DE DROGING VAN BINGHAMTON KLEI ONDER INVL. VAN KLEINE PERSDRUKKEN (DROOGTEMP. 110°C)

FIG.39



HET VERBAND TUSSEN DROOGTEMP. EN MAX. VEILIGE DROOGSNELHEID 1/2 FIRECLAY. ONTL. AAN MACEY (1938-'39).

FIG.40



HET VERBAND TUSSEN DROOGSNELHEID EN NATTE BOL DEPRESSIE

FIG.41

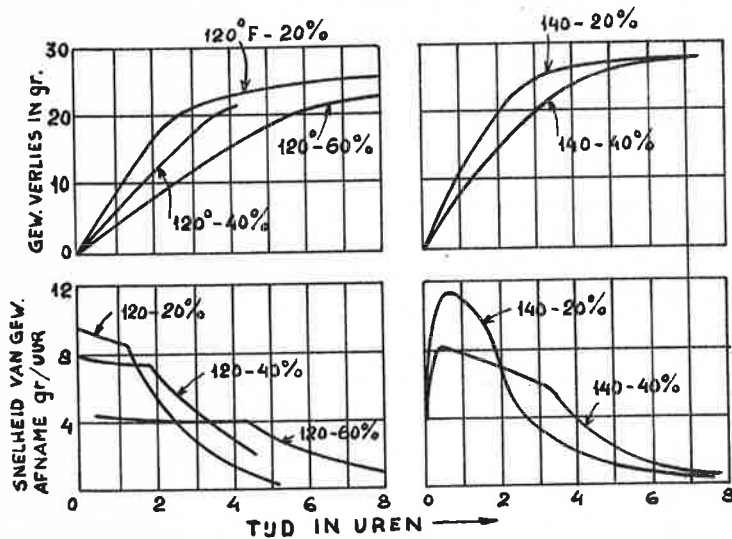
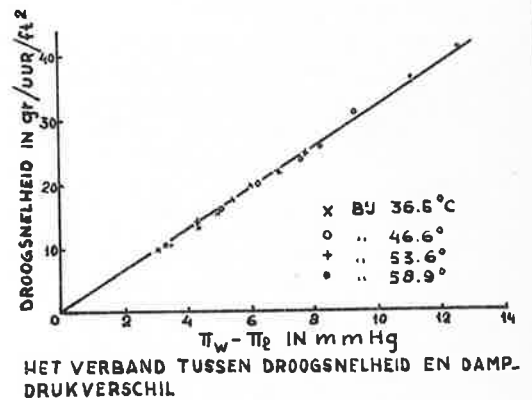


FIG.42



HET VERBAND TUSSEN DROOGSNELHEID EN DAMP. DRUKVERSCHIL

FIG.43

