

## Krimp en spanningen tijdens drogen van kleien

**Citation for published version (APA):**

Ketelaars, A. A. J., Coumans, W. J., & Kerkhof, P. J. A. M. (1997). Krimp en spanningen tijdens drogen van kleien. *KGK, Tijdschrift voor Klei, Glas en Keramiek*, 4, 16-18.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1997

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Krimp en spanningen tijdens drogen van kleien



WETENSCHAP



A.A.J. Ketelaars



W.J. Coumans



P.J.A.M. Kerkhof

## Auteurs

**Dr.ir. A.A.J. Ketelaars**, promoveerde in 1992 aan de TU Eindhoven op het drooggedrag van deformeerbare systemen, met speciale aandacht voor kleimaterialen. In een tweetal publicaties in dit tijdschrift wordt een beknopt overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten en conclusies, die uit dit promotieonderzoek zijn voortgekomen. De eerste publicatie is reeds verschenen en handelde over de kinetiek van het droogproces en beperkte zich tot kleien met een laag vochtgehalte, waarbij geen krimp optreedt. Deze tweede publicatie beschouwt ook kleien met een hoog vochtgehalte, waarbij het optreden van krimp, deformaties en mechanische spanningen -als gevolg van het droogproces- aan bod komen.

**Dr.ir. W.J. Coumans** is Universitair Hoofd-Docent op het gebied van droogprocessen.

**Prof. dr.ir. P.J.A.M. Kerkhof** is hoogleraar Scheidingstechnologie en Transport Verschuifingen.

Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Scheikundige Technologie, Laboratorium voor Scheidingstechnologie en Transport Verschuifingen, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven.

Internet: <http://www.tcp.chem.tue.nl>, E-mail: [tgtcjc@chem.tue.nl](mailto:tgtcjc@chem.tue.nl)

## Samenvatting

Tijdens drogen van kleivormingen treedt bij voldoende hoge beginvochtgehaltes krimp op. Nadat het vochtgehalte gedaald is tot onder de zgn. krimprens blijft het volume van de kleivormingen constant en ontwikkelt zich bij verder drogen een poreuze structuur. Dit artikel geeft aan in hoeverre het noodzakelijk is om bij het modelleren van het drooggedrag met deze krimp rekening te houden. Ook wordt aandacht besteed aan het optreden van mechanische spanningen in het materiaal tijdens drogen. Deze spanningen ontstaan als gevolg van vochtprofielen in het materiaal, welke leiden tot inhomogene krimp.

## Summary

Green clay products with a sufficiently high initial moisture content will show shrinkage at the beginning of a drying process. At lower moisture contents, the volume will remain nearly constant and consequently a porous material will be built up. This article shows to what extent shrinkage should be incorporated in the modelling of the drying behaviour. Furthermore, attention is paid to the mechanical stresses in the material, which are caused by inhomogeneous shrinkage due to moisture profiles.

## 1. Inleiding

In het eerste deel van dit artikel is uitvoerig ingegaan op de kinetiek van het droogproces van kleien. Daarbij werd de krimp niet meegenomen. Voor kleien is dit geoorloofd beneden een bepaald vochtgehalte, de zgn. *krimprens*. In de praktijk echter is het initieel vochtgehalte zo hoog dat wel degelijk krimp optreedt. Dit heeft verstrekkende gevolgen voor het droogproces, vooral met betrekking tot de opbouw van spanningen in het materiaal gedurende het drogen en de daaruit voortvloeiende deformaties. In de theorievorming dient bij het opstellen van de diffusievergelijking met deze complicaties rekening te worden gehouden. In dit artikel zal eerst besproken worden hoe dit moet gebeuren en wat de consequenties zijn voor de berekende droogcurven. Vervolgens zullen voor een eenvoudige situatie de spanningen in de klei tijdens het droogproces berekend worden.

## 2. Invloed van Krimp op de Droogkinetiek

Zoals reeds toegelicht in de vorige publicatie (Ketelaars e.a., 1997) luidt de diffusievergelijking voor niet-krimpende vlakke lagen:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( D \frac{\partial \rho_w}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Voor niet-krimpende lichamen met een willekeurige geometrie en waarin het droogproces 3-dimensionaal is, kan de diffusievergelijking worden genoteerd als:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot D \vec{\nabla} \rho_w \quad (2)$$

Daar in bovenstaande formulering gekozen is voor een gefixeerd coördinatenstelsel, zullen deze vergelijkingen goed voldoen voor niet-krimpende materialen. Echter, voor krimpende materialen zoals klei met vochtgehaltes boven de krimprens, zal de vaste stof in dit coördinatenstelsel gaan bewegen. Ook de randen van het materiaal veranderen van plaats. Vergelijking (2) kan zodanig omgeschreven worden, dat het krimpgedrag van het systeem wat explicieter zichtbaar wordt:

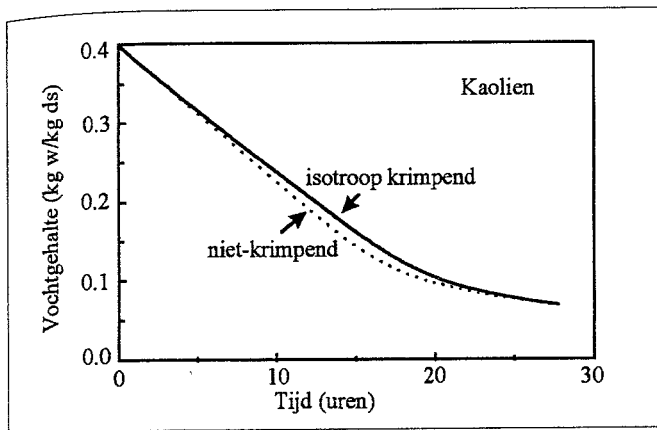
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v}_s \cdot \vec{\nabla} u = \frac{1}{\rho_s} \vec{\nabla} \cdot \rho_s D \vec{\nabla} u \quad (3)$$

Hierin is  $\vec{v}_s$  de snelheid waarmee de vaste stof beweegt als gevolg van krimp. Het vochtgehalte  $u$  in deze vergelijking wordt uitgedrukt in kg water/kg droge stof, dus  $u = \rho_w / \rho_s$ . Gemakkelijk valt nu te zien dat voor niet-krimpende materialen ( $\vec{v}_s = 0$  en  $\rho_s = \text{constant}$ ) vergelijking (3) weer over gaat in vergelijking (2).

Voor een niet-krimpend systeem komt vergelijking (2) in beeld en deze is relatief gemakkelijk numeriek oplosbaar. Bij krimpende systemen is vergelijking (3) van toepassing en de numerieke oplossing hiervan vereist een niet geringe wiskundige inspanning. Bij klei moeten wij ons realiseren dat dit materiaal tijdens een droogproces zowel krimp als niet-krimp gedrag vertoont, zodat ook hier de meer algemene vergelijking (3) gekozen dient te worden voor de beschrijving van het drooggedrag.

Nu doemt de vraag op in hoeverre het nu verschil maakt of de droogkinetiek van een materiaal wordt berekend op basis van een diffusiemodel waarin krimp is meegenomen of niet. Om op bovenstaande vraag een antwoord te geven zijn diverse simulaties uitgevoerd. Ter illustratie zal hier het 3-dimensionale drooggedrag van een blok Kaolien klei behandeld worden. Als voorbeeld is gekozen voor het dro-

gen van een kubus van 10x10x10 cm met een initiële droog-snelheid  $3.10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . De resultaten zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 1:

- Vergelijking van twee krimpmodellen voor Kaolien-klei (isotrope krimp en niet-krimp) op basis van de berekende droogcurven voor een 3-dimensionaal droogproces.

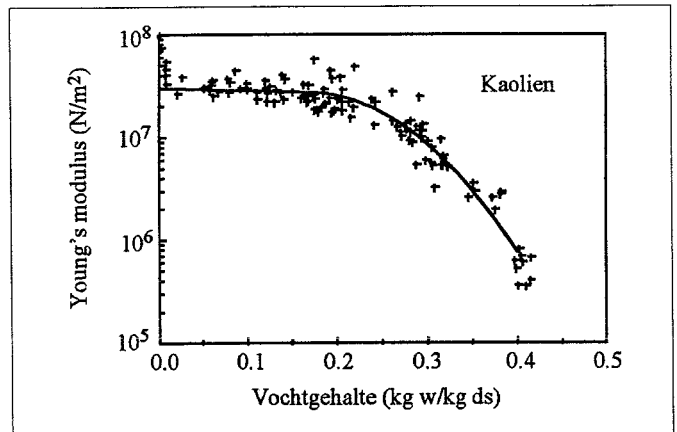
Er zijn simulaties uitgevoerd waarbij niet-krimp gedrag is verondersteld en simulaties waarin is aangenomen dat het materiaal isotroop krimpt. Afgezien van vervormingen t.g.v. spanningen zal een goed gemengde klei een dergelijk isotroop gedrag vertonen. In Figuur 1 valt duidelijk waar te nemen dat de droogcurve voor isotrope krimp in het begin van het droogproces afwijkt van die voor het niet-krimpende geval. Dit wordt veroorzaakt door de afname van het oppervlak van de kubus t.g.v. krimp. Na langere droogtijden (meer dan 20 uur) komen beide curven weer samen. Blijkbaar is er hier sprake van een compenserend effect m.b.t. de afname van het oppervlak in het krimpende geval. Dit laatste komt doordat de diffusieafstand in een niet-krimpende kubus groter is dan in een krimpende kubus, waardoor het diffusieproces langzamer zal verlopen. Deze grotere diffusieafstand wordt relatief belangrijk in de laatste fase van het droogproces, waar de droogsnelheid voornamelijk bepaald wordt door interne diffusielimitering. Voor de praktijk betekent dit het volgende: is men alleen geïnteresseerd in de berekening van droogcurven en droogtijden, dan kan de bijdrage van isotrope krimp verwaarloosd worden en kan dus gebruik gemaakt worden van numeriek relatief eenvoudigere modellen. Is men daarentegen geïnteresseerd in de berekening van spanningen en vervormingen tijdens het droogproces, dan dient de krimp wel degelijk in rekening te worden gebracht. Dit zal in het volgende nader worden toegelicht.

### 3. Mechanische Spanningen Tijdens Droogproces

Zoals in het voorgaande is aangetoond is het effect van isotrope krimp op de droogcurve gering. Een belangrijk gevolg van krimp is echter het optreden van mechanische spanningen in het materiaal en dientengevolge kunnen scheuren en breuken ontstaan. Deze krimp-effecten zijn in veel praktische gevallen doorslaggevend bij het kiezen van de toegestane condities van het droogproces. Meestal betekent dit dat er niet "te snel" gedroogd mag worden. Om de kwalificatie "te snel" iets beter te kunnen kwantificeren is er onderzoek gedaan naar het ontstaan van spanningen tijdens het drogen van kleien.

In een drogende kleivorming zal in het algemeen een ingewikkelde 3-dimensionale spanningstoestand heersen. De beschrijving van dit fenomeen wordt verder bemoeilijkt door het complexe reologische gedrag van klei en de enorme afhankelijkheid van de materiaaleigenschappen van het vochtgehalte: plastisch en slap bij hoog vochtgehalte tot bros en sterk bij laag vochtgehalte. Als voorbeeld van dit laatste is in Figuur 2 de Young's modulus van Kaolien klei gegeven als

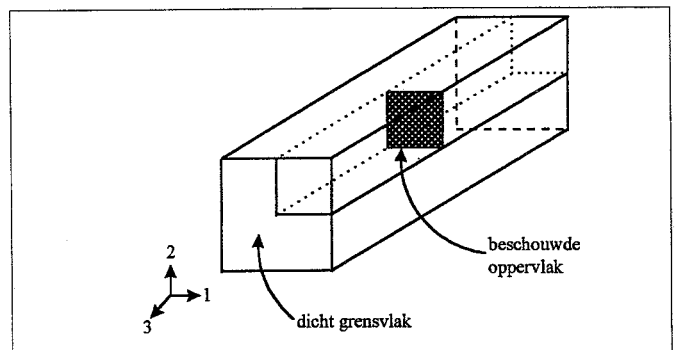
functie van het vochtgehalte. De Young's modulus komt overeen met de helling in het spannings-rek diagram. In dit geval is er b.v. een factor 100 verschil tussen de Young's modulus bij het initiële vochtgehalte en bij zeer lage vochtgehalten.



Figuur 2:

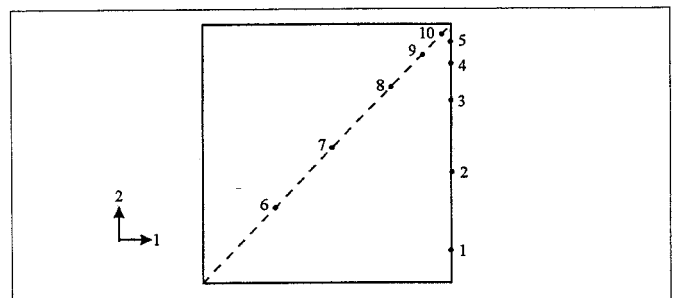
- Young's modulus van Kaolien-klei als functie van het vochtgehalte.

Afgezien van de vochtafhankelijkheid van de materiaaleigenschappen zijn er nog diverse redenen om in eerste instantie te kiezen voor een simpele benadering van de beschrijving van de spanningsopbouw tijdens het drogen van klei. De belangrijkste zijn het gebruik van geometrisch lineaire modellen en ont koppeling van spanningen, krimp en drooggedrag. Dit laatste houdt in dat eerst de vochtprofielen berekend worden op basis van een niet-krimp kinetiek model, waarna vervolgens in een aparte berekening de spanning tijdens het droogproces wordt berekend. Als voorbeeld volgt nu een spanningsberekening aan een kleivorming. In Figuren 3a en 3b is een schets gegeven van de situatie. Als we veronderstellen dat de invloed van de randen zich niet doet gelden in het midden van de baksteen dan kunnen we het gearceerde vlak beschouwen als een 2-dimensionale situatie.



Figuur 3a:

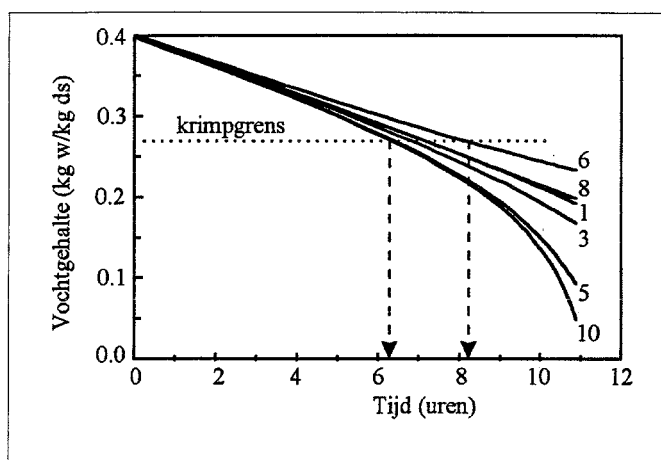
- Schematische voorstelling van de geometrie van de kleivorming, zoals gebruikt bij de numerieke berekening van de spanningen.



Figuur 3b:

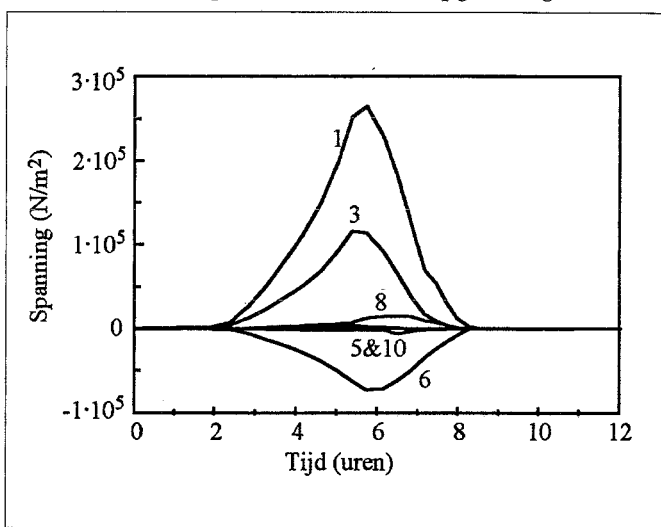
- Genummerde posities in het gearceerde oppervlak van Figuur 3a.

Op de gearceerde doorsnede zijn diverse punten 'bekeken' tijdens het droogproces. In Figuur 3b zijn deze punten aangegeven en in Figuur 4 is aangegeven hoe in deze punten het vochtgehalte verloopt tijdens het droogproces.



Figuur 4:  
 ■ Vochtgehalte als functie van tijd op diverse posities in het gearceerde vlak, zoals is aangegeven in Figuur 3.

In Figuur 4 is een horizontale lijn getrokken bij een vochtgehalte van 0.27 kg w/kg ds. Voor deze Kaolien-klei is dit het vochtgehalte bij de krimpgrens, dus geen krimp bij lagere vochtgehaltes. Te zien valt dat na iets meer dan 8 uur in het gehele materiaal het vochtgehalte onder de krimpgrens is gekomen.



Figuur 5:  
 ■ Het verloop van de spanning als functie van tijd, weergegeven voor de posities zoals aangeduid in Figuur 3.

In Figuur 5 zijn de berekende spanningen in bovengenoemde posities weergegeven, ervan uitgaande dat het materiaal zich lineair-elastisch gedraagt. Hoewel dit natuurlijk een belangrijke vereenvoudiging is van het werkelijke gedrag van de klei, levert het toch een aantal interessante waarnemingen en conclusies op.

Als eerste valt op dat er gedurende de eerste 2 uur van het droogproces geen spanningen in het materiaal ontstaan. Dit wordt veroorzaakt door relatief vlakke vochtprofielen in combinatie met lage waarden van de Young's modulus. Pas na 2 uur beginnen er zich vochtprofielen te ontwikkelen en is de Young's modulus dusdanig gestegen dat een spanningsopbouw begint te ontstaan. We zien dat de spanning het grootst is in punt 1, d.i. het midden van een vlak van de kleivorming, dus niet de rand! Dit komt omdat, vanuit symmetrie-overwegingen, er aan twee kanten aan dit midden ge-

trokken wordt door het krimpende buitenoppervlak van de kleivorming. Hoewel de vochtgradiënten in de rand van de kleivorming groter zijn, is hier voldoende ruimte voor de klei om zich aan te passen aan de vervorming. Daar waar die ruimte er niet is, dus in het midden van een vlak, zal de hoogste spanning optreden. We zien tevens dat deze spanning een rekspanning is, hetgeen te begrijpen is als we bedenken dat de buitenkant meer "wil" krimpen dan de binnenkant toe kan staan; de buitenkant bevindt zich daardoor a.h.w. in een opgerekte toestand. Daarentegen zal dus de binnenkant onder druk komen staan. Ook dit is te zien in Figuur 5 aan de lijn voor punt 6.

Na iets meer dan 8 uur zijn alle spanningen verdwenen, dit komt overeen met het feit dat dan de gehele baksteen zich onder de krimpgrens bevindt en dat we een elastisch gedrag verondersteld hebben. In werkelijkheid zal, t.g.v. blijvende deformatie als gevolg van plastisch gedrag, er een spanningsomkering plaatsvinden: de buitenkant komt onder druk te staan ('het jasje is te groot geworden') en de binnenkant onder rekspanningen. Voor de praktijk betekent dit dat het gevaar voor scheurvorming niet geweken is. Aangezien klei voornamelijk zal bezwijken onder rekspanning, volgt hieruit dat in het begin van het droogproces scheurvorming op zal treden aan het oppervlak; aan het eind van het droogproces is er kans op scheurvorming in het inwendige van de kleivorming.

#### 4. Conclusies

Voor de berekening van droogcurven van kleivormingen hoeft geen rekening te worden gehouden met het krimpgedrag en kan dus gebruik gemaakt worden van een relatief eenvoudig diffusiemodel voor een star systeem. Echter voor de berekening van vochtprofielen en de daarmee samenhangende mechanische spanningen is het absoluut noodzakelijk dat krimpgedrag in de modellering wordt meegenomen. Alhoewel deformaties als gevolg van mechanische spanningen klein zijn t.o.v. de volumeafname door de krimp zelf, kunnen zij wel leiden tot scheurvorming en breuk van de kleivorming.

In het begin van het droogproces zullen breuk en scheurvorming eerder optreden in het midden van de vlakken aan de buitenzijde omdat hier de rekspanningen het hoogste worden.

Nadat het vochtgehalte gedaald is tot onder de krimpgrens, treedt een spanningsomkering op en zal het binnenste van de vorming eerder bezwijken.

#### 5. Literatuur

Ketelaars, A.A.J., *Drying of deformable media; kinetics, shrinkage and stresses*, Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, December 1992.

A.A.J. Ketelaars, W.J. Coumans, P.J.A.M. Kerkhof, *Karakterisering van droogkinetiek van klei via vochtprofielen en droogcurven*, Klei Glas & Keramiek nr. 3, 1997.

#### 6. Symbolenlijst

D	diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
r	plaatscoördinaat in gefixeerd coördinatensysteem	[m]
t	tijd	[s]
u	vochtgehalte	[kg w/kg ds]
$\vec{v}_s$	snelheid van vaste stof	[m/s]
$\epsilon$	specifieke porositeit	[m <sup>3</sup> /kg ds]
$\rho_w$	vochtconcentratie	[kg w/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	vaste stof concentratie	[kg ds/m <sup>3</sup> ]

#### Dankbetuiging

Dit onderzoek, dat is uitgevoerd in samenwerking met de afdeling grofkeramiek van TNO-TPD te Eindhoven, is mogelijk gemaakt door financiële ondersteuning van NOVEM, KNB en NeDaCo.