



Abguss von Aluminiumschmelze in eine Form aus bentonitgebundenem Sand auf der GIFA 2019. Bentonitsande gehören zu den bedeutendsten Formstoffen in Gießereien.

Nasszugfestigkeitsprüfungen in der Neutronenradiografie

Bentonitgebundene Formsande gehören aufgrund ihrer Umweltfreundlichkeit und Wiederverwendbarkeit zu den wichtigsten Formstoffen in Gießereien. Es liegt daher nahe, das Verhalten und die Eigenschaften dieser Formsande genau zu untersuchen. Im durchgeführten Forschungsprojekt wurden die Nasszugfestigkeiten von Formstoffproben in Echtzeit während einer Durchstrahlung mit Neutronen gemessen. Dabei konnten auch der Riss abgebildet und die lokalen Wassergehalte ermittelt werden.

VON KORBINIAN SCHIEBEL, GUNTRAM JORDAN, WOLFGANG SCHMAHL, MÜNCHEN, ANDERS KAESTNER, VILLIGEN, SCHWEIZ, BURKHARD SCHILLINGER, GARCHING UND SANDRA BÖHNKE, MARL

Niedrige Partikel- und Gasemissionen beim Gießen und häufige Wiederverwendbarkeit machen bentonitgebundenen Formsand zu einem umweltfreundlichen und nachhaltigen Formstoff. Trotz aller bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen ist jedoch nicht völlig geklärt, in welcher Art und

Weise die Bindefähigkeit des Formsands und daher auch das kumulative Verhalten im Formstoffzyklus beeinflusst werden. Ein umfassendes Verständnis dieser Zusammenhänge könnte aber ganz wesentlich dazu beitragen, die Effizienz und Produktivität dieses ressourcenschonenden Formstoffs zu steigern.

Formstoffeigenschaft Zugfestigkeit

Die mechanischen Eigenschaften von bentonitgebundenem Formsand hängen unter anderem von der Zusammensetzung des Bentonits, dem Wassergehalt und der Temperatur ab. Beim Gießen entsteht ein Temperaturgradient im Formstoff. Dadurch wird Wasser, das in metallabgewandten Bereichen verdampft, in metallabgewandte Bereiche transportiert, wo es kondensiert. Mit der Zeit verlagert sich dieser Transportprozess zunehmend vom heißen Metall weg. Die Wärme- und Feuchtigkeitsgradienten führen daher zu wandernden Zonen mit unterschiedlichen Eigenschaften [1]. So weist die metallabgewandte Kondensationszone wegen der hohen Feuchte eine verminderte Zugfestigkeit auf, während in der heißen Trockenzone aufgrund thermischer Ausdehnung eine erhöhte Druckspannung herrscht. Das Zusammenspiel von verminderter Zugfestigkeit und erhöhter Druckspannung kann zu Gussfehlern führen. Wie groß die Gefahr für das Auftreten von Fehlern bei einem gegebenen Formsand ist, lässt sich über die Nasszugfestigkeit des Formstoffes abschätzen [1]. Die Nasszugfestigkeit ist daher eine der Schlüsseleigenschaften, die die Qualität eines Formstoffs beschreiben.

In feuchteuntersättigten, ungebundenen, körnigen Materialien (z.B. reiner Quarzsand ohne Bentonit) basiert die Zugfestigkeit hauptsächlich auf der Kapillarkraft [z. B. 2-4]. Diese verhält sich im Allgemeinen umgekehrt proportional zur Feuchte sättigung des Porenraums, da sich die Kapillarbrücken bei zunehmendem Wassergehalt zunehmend vereinigen und somit die Gesamtzahl der Kapillarbrücken und die Zugfestigkeit abnehmen.

In bentonitgebundenen Formstoffen sind die Ursachen und Abhängigkeiten der Zugfestigkeit jedoch deutlich komplexer. Neben den Kapillarkräften spielen weitere Kräfte wie z.B. elektrochemische Doppelschichtkräfte eine wesentliche Rolle [z. B. 5-7]. Auch eine Vorhersage des Wassergehalts im Porenraum ist sehr schwierig, da Wasser unter anderem auch in den Zwischenschichten der Tonminerale des Bentonits eingelagert werden kann. Ist die Feuchte im Porenraum konstant, so nimmt die Zugfestigkeit des Formstoffs mit zunehmender Temperatur ab [z. B. 8,9]. Da aber beim Gießen durch die Verdampfung in den heißen Formstoffbereichen laufend Wasser in die metallabgewandte Kondensationszone transportiert wird, bleibt die Feuchte in der Kondensationszone nicht konstant, sondern nimmt,

genauso wie die Temperatur, kontinuierlich zu. Beide Faktoren schwächen die Zugfestigkeit zunehmend. Ist schließlich der Siedepunkt erreicht, leisten die Kapillarkräfte keinen bedeutenden Beitrag mehr zur Zugfestigkeit. Die jetzt noch verbleibende Festigkeit ist im Wesentlichen auf Kationen-Brücken zwischen den Tonmineralen zurückzuführen, die die Quarzkörner des Formsands umgeben. Bei der sich anschließenden zunehmenden Austrocknung, spielen zementierende Präzipitate eine wachsende Rolle für die Gesamtfestigkeit des Formstoffes.

Modelle zum Bindungsverhalten

Warum welcher Formsand welche Zugfestigkeit an welcher Stelle in welchem Moment hat, ist bis heute nicht ausreichend geklärt. Klar ist, dass die Stelle schwächster Zugfestigkeit in einem Bereich zu suchen ist, in dem sowohl der Wassergehalt als auch die Temperatur hoch sind. Eine genaue räumliche und zeitliche Bestimmung der Stelle setzt aber zu jedem Zeitpunkt eine exakte Kenntnis über die Kopplung des wärmegetriebenen Feuchtetransports mit den lokal herrschenden Zugfestigkeiten voraus.

Modelle zum wärmegetriebenen Feuchtetransport in Formsanden oder in porösen Medien, die bis zu einem gewissen Grad mit bentonitgebundenen Formsanden vergleichbar sind, berücksichtigen neben Verdampfung und Kondensation auch die konduktive und die konvektive Wärmeleitung und unterscheiden vier Zonen mit unterschiedlicher Transportcharakteristik [1,10-13]:

- > die Trockenzone ($T > 100\text{ °C}$),
- > die Verdampfungszone (abnehmender Wassergehalt, $T > 100\text{ °C}$),
- > die Kondensationszone (zunehmender Wassergehalt, $T < 100\text{ °C}$),
- > die Außenzone (vom Guss unbeeinflusst).

In der Trockenzone findet die Wärmeleitung weitgehend konduktiv über die festen Phasen statt, während sie in der Verdampfungs- und der Kondensationszone zusätzlich durch den Transport von Dampf im offenen Porenraum erfolgt.

Wärme und Dampf führen zu einer weiteren Komplikation in bentonitgebundenen Formstoffen, denn sie verursachen teils reversible, teils irreversible Alterationen der Tonminerale. Dies beeinflusst die Stabilität der Kationen-Brücken, die neben den Kapillarkräften für die Festigkeit des Formstoffs verantwortlich sind. Die genauen Mechanismen sind nicht vollständig geklärt. Insbesondere die Auswir-

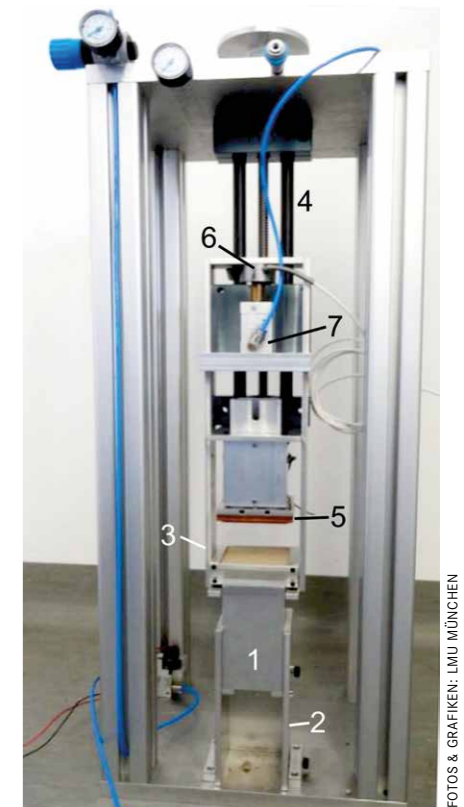


Bild 1: Neutronenstrahlkompatible Nasszugfestigkeitsprüfapparatur für Formsande: (1) quadratischer Prüfkörperbehälter, (2) Prüfkörperaufnahme, (3) Zuggestänge mit Haken zum Aufbau einer Zugspannung am Prüfkörperkopf, (4) mechanisch betriebene Spindel zur Grobpositionierung des Zuggestänges, (5) Stirrheizung, (6) Drucksensors, (7) pneumatischer Druckzylinder.

kungen von niedertemperaturierten Dampfbehandlungen und von Temperaturen bis ca. 500 °C werden uneinheitlich bewertet [14-20]. Bei Temperaturen über ca. 500 °C wird schließlich die Struktur der Tonminerale und damit ihre Bindefähigkeit zunehmend irreversibel zerstört [19, 21, 22].

Untersuchung der Zugfestigkeit

Auf Basis dieser Ausgangslage war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, Antworten zu finden auf die Fragen, wann, wo und unter welchen Bedingungen es zu einem Bindungsverlust im Formstoff kommt. Dazu wurden Nasszugfestigkeitsexperimente während einer Durchstrahlung mit Neutronen durchgeführt. Die Durchstrahlung ermöglicht eine zeitabhängige Messung lokaler Wassergehalte [23, 24]. Daher kann mit diesen Experimenten nicht nur die Nasszugfestigkeit quantifiziert werden, sondern auch der Wassergehalt im Zugfestigkeitsprüfkörper am Abrissort zum Abrisszeitpunkt gemessen werden.

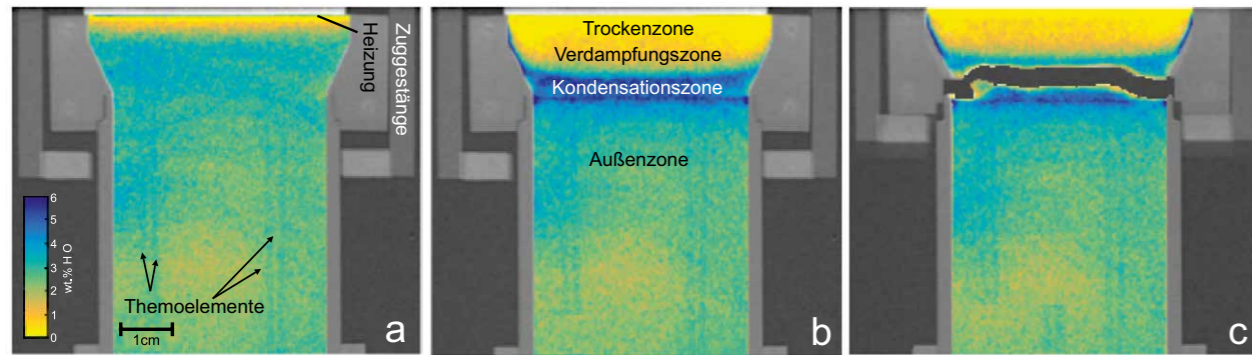


Bild 2: (a) Neutronenradiografie des Probenkörpers unmittelbar nach Aufsetzen der Heizplatte ($T = 310 \text{ }^\circ\text{C}$) auf der Kopfseite des Probenoberteils. Das Zuggestänge hat noch keinen Kontakt zum Probenoberteil. Die Feuchte des Formsandes wurde aus den Neutronentransmissionswerten berechnet und farbcodiert. (b) Probenkörper unmittelbar vor dem Aufbau einer Zuglast. Die vier verschiedenen Feuchte zonen sind deutlich zu erkennen. (c) Erste Radiografie nach dem Bruch des Probenkörpers. Am Rand des Probenbehälters befindet sich die Rissfläche an der Trennstelle zwischen oberem und unterem Probenbehälter. Zur Mitte des Probenbehälters hin biegt die Rissfläche nach oben ab und verläuft an der Grenze zwischen Verdampfungszone und Kondensationszone. (Abbildung modifiziert aus [28])

Gleichzeitig vorhandene Temperatursensoren ermitteln zudem das Temperaturprofil im Prüfkörper. Die Experimente wurden an der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching (ANTARES, [25]) und an der Schweizer Spallationsneutronenquelle (SINQ) des Paul Scherrer Instituts in Villigen (ICON, [26]) durchgeführt.

Nasszugfestigkeitsexperimente in der Neutronenradiografie

Die Anwendung von Neutronenstrahlung setzt eine vollständig fernbedienbare Festigkeitsprüfapparatur aus geeigneten Materialien voraus (Bild 1). Die Prüfapparatur wird zunächst in der Neutronenstrahlkammer aufgebaut und justiert:

- > Die Medien- und Fernsteuerverbindungen werden angeschlossen.
- > Der quadratische Prüfkörperbehälter (1) aus Aluminium wird ausgebaut, auf den Kopf gestellt, mit Formsand (92 Gew.-% Quarzsand, 8 Gew.-% Na-Bentonit aus Wyoming, verschiedene Wassergehalte) gefüllt und mit einem Druck von 1 MPa verdichtet. Thermoelemente (nicht abgebildet) werden in den Prüfkörper auf definierte Positionen geschoben und am Boden verschraubt. Anschließend wird der Prüfkörper wieder zurückgedreht und in die Prüfkörperaufnahme (2) eingebaut.
- > Die Haken des Zuggestänges (3), das über eine mechanisch betriebene Spindel (4) bewegt werden kann, werden unter dem Kopfteil des Prüfkörpers positioniert. Die Stirnheizung (5) wird auf $310 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgeheizt.
- > Start der Datenaufnahme der Thermoelemente und des Drucksensors (6).

- > Die Neutronenstrahlkammer wird verlassen und verschlossen.
- > Bildaufnahme und Neutronenbestrahlung werden gestartet.
- > Per Fernauslösung wird die Heizung auf den Prüfkörperkopf aufgesetzt. Nach einer definierten Haltezeit wird die Lastrampe des pneumatischen Druckzylinders (7) gestartet, der über das Zuggestänge eine zunehmende Zugspannung auf das Kopfteil des Prüfkörpers ausübt.
- > Die Zugfestigkeit des Prüfkörpers wird vom Drucksensor gemessen.
- > Abschließend erfolgt eine mehrstündige Abklingphase der radioaktiven

Strahlung, die durch die Neutronenaktivierung entstanden ist.

Die während der Nasszugfestigkeitsprüfung aufgenommenen Radiografien bestehen zunächst nur aus den mit einem Detektor gemessenen Intensitäten der Neutronentransmission durch den Prüfkörper. Diese Intensitäten werden über verschiedene Kalibrierungen, Korrekturen und Normierungen in quantitative Wassermengen transformiert [27] und dann z.B. mit Falschfarbenbildern zur Darstellung der momentanen Feuchteverteilung im Prüfkörper genutzt (Bild 2).

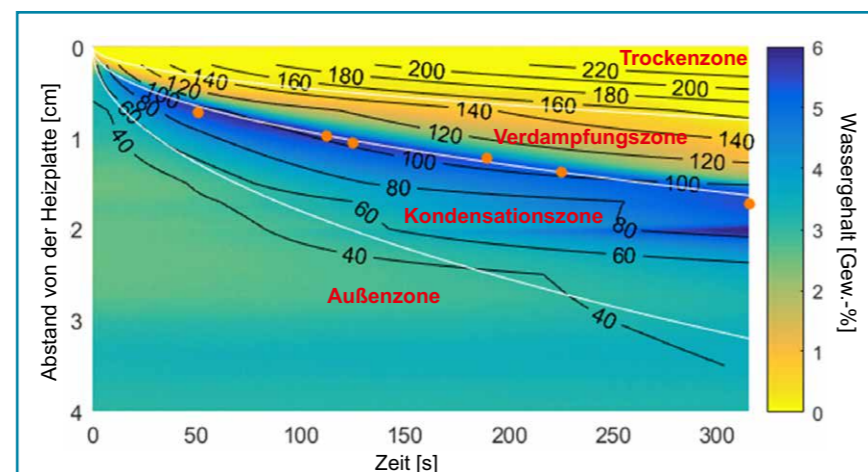


Bild 3: Zeitlicher Verlauf des Wassergehalts und der Temperatur (Isothermen in $^\circ\text{C}$) entlang den mittleren vertikalen Profillinien durch einen Prüfkörper. Ungefähr 2 cm unterhalb der Heizplatte befindet sich die Trennstelle zwischen oberem und unterem Probenbehälter. An dieser Trennstelle erfolgt eine etwas schnellere Kondensation des Dampfes, die in der Abbildung ab einer Heizdauer von ca. 200 s sehr gut zu erkennen ist. Die roten Punkte geben die Positionen der Bruchflächen in korrespondierenden Experimenten an. (Abbildung modifiziert aus [27])

Auswirkungen des wärmegetriebenen Feuchtetransports

In den Nasszugfestigkeitsexperimenten wurde spätestens alle zwei Sekunden eine neue Radiografie vom Prüfkörper aufgenommen. Anschließend wurde in jeder einzelnen Radiografie der lokale Wassergehalt des Sandes entlang einem vertikalen Profil in der Mitte des Prüfkörpers berechnet. Die Wassergehalte dieser Profillinien wurden farbcodiert und die Linien aller Aufnahmen eines Experiments nebeneinander angeordnet. Auf diese Weise ergibt sich eine Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Wasserkinematik im Prüfkörper während der Nasszugfestigkeitsprüfung (Bild 3). Nimmt man auch den zeitlichen Temperaturverlauf, der aus den Messwerten der Thermoelemente im Prüfkörper folgt, in das Diagramm auf, wird zusätzlich zur Wasserkinematik auch die Wärme kinematik anschaulich.

Der Verlauf des Wassergehalts mit der Zeit zeigt, dass die Verdampfung des Wassers im Formstoff unmittelbar nach dem Kontakt mit der Heizplatte beginnt. Der Dampf kondensiert im direkt benachbarten kühleren Prüfkörperbereich. Mit voranschreitender Zeit entsteht im Bereich der Heizplatte die Trockenzone, an die sich nach unten die Verdampfungszone, die Kondensationszone und die Außenzone anschließen. Die Grenzen zwischen den Zonen sind definierbar:

- > Die Grenze zwischen Außen- und Kondensationszone kann an dem Punkt festgelegt werden, an dem der initiale Wassergehalt um mehr als 1 % überschritten wird.
- > Die Grenze zwischen Kondensations- und Verdampfungszone ist durch das Feuchtemaximum definiert.
- > Die Grenze zwischen Verdampfungs- und Trockenzone liegt an dem Punkt, an dem die Feuchte weniger als 1 % über der Endfeuchte liegt.

Der zeitliche Verlauf dieser experimentell gemessenen Grenzpositionen kann sehr gut mit einer Wurzelfunktion angepasst werden:

$$y_{\text{Grenz}} = q\sqrt{t}$$

In Bild 3 sind diese angepassten Wurzelfunktionen als weiße Linien eingefügt. Aus den Wurzelfunktionen können nun die Ausbreitungskonstanten q der jeweiligen Zonengrenzen eines Experiments berechnet werden [27]. Dadurch kann in verschiedenen Sand-Bentonit-Mischungen die Wasserkinematik mit der Nasszugfes-

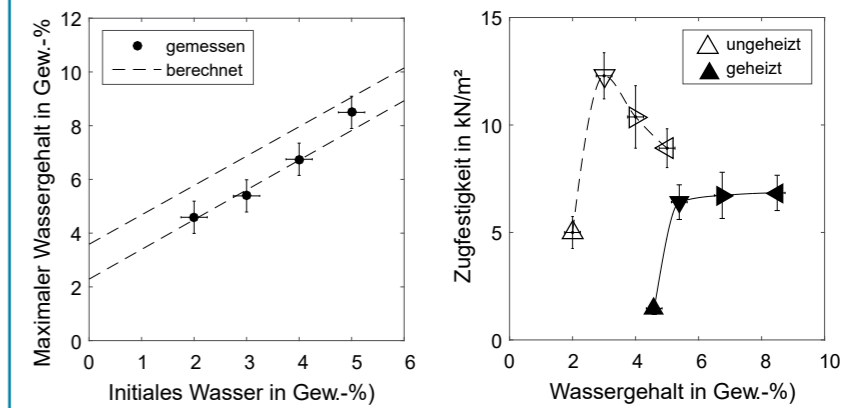


Bild 4: a) Maximaler auftretender Wassergehalt im Prüfkörper bei der Nasszugfestigkeitsprüfung, aufgetragen gegen den initialen Wassergehalt im noch ungeheizten Formsand. Der berechnete Zusammenhang basiert auf einer Wärmekapazität von 0,84 bzw. 1,26 kJ/kg K für die untere bzw. obere Gerade. b) Zugfestigkeiten der ungeheizten feuchten Formsande (offene Dreiecke) und die dazugehörigen (geheizten) Nasszugfestigkeiten, aufgetragen über dem Wassergehalt an der Bruchstelle (Dreiecke mit gleicher Orientierung gehören zu den gleichen Sanden). (Abbildung modifiziert aus [27])

tigkeit quantitativ verglichen werden (s.u.).

Der Ort des maximalen Wassergehalts, das heißt die Grenze zwischen Verdampfungs- und Kondensationszone, korreliert in allen Experimenten mit der 100-Grad-Isotherme. Werden die Risspositionen aus gleichparametrisierten Experimenten in das Diagramm aufgenommen (rote Punkte in Bild 3), zeigt sich eine Übereinstimmung von Rissposition und maximalem Wassergehalt. Diese Übereinstimmung ist unabhängig von der initialen Feuchte der verwendeten Grünsande. Mit zunehmender initialer Feuchte nimmt jedoch der maximale Wassergehalt zu (Bild 4a), weil die größeren initialen Wassermengen im Sand größere Wärmesenken darstellen, die mehr Kondensation ermöglichen.

Die Zugfestigkeiten (mit und ohne Heizvorgang) der Formsande zeigen eine komplexe Abhängigkeit vom initialen Wassergehalt (Bild 4b). Die ungeheizte Zugfestigkeit nimmt zunächst mit zunehmendem Wassergehalt stark zu, um dann bei steigender Feuchtesättigung im Porenraum auf einen Wert von ca. 8 kN/m^2 abzunehmen. Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit anderen Autoren [8, 29, 30]. Werden die Formsande geheizt, bildet sich ein Feuchtemaximum bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ aus, in dem sich stets die Bruchzone entwickelt. Die Nasszugfestigkeiten dieser Feuchtemaxima liegen generell unter den zugehörigen ungeheizten Zugfestigkeiten, nehmen mit der initialen

Feuchte zunächst stark zu und bleiben dann weitgehend konstant bei ca. 6 kN/m^2 .

Die Ergebnisse der Experimente widersprechen teilweise anderen Autoren [8], die angenommen haben, dass die Sättigung innerhalb der Kondensationszone der Hauptgrund für das Bruchverhalten im Formstoff ist. Der Wassergehalt übt über die Anzahl der Kapillaren zwar einen wichtigen Einfluss auf die Zugfestigkeit aus, aber nicht den alleinigen. Die hier erzielten Ergebnisse zeigen klar, dass die Zugfestigkeit durch die temperaturbedingte Schwächung der Kapillarkräfte stärker beeinflusst wird. Der schwächste Punkt im Sand ist daher durch den Wassersiedepunkt gegeben, an dem die Kapillarkräfte zusammenbrechen. In der angrenzenden Verdampfungszone steigt die Festigkeit wieder an, weil Ausfällungen aus dem verdampfenden Porenwasser eine zunehmend zementierende Wirkung entfalten.

Auswirkungen von Hitze und zyklischer Wiederverwendung

Mit der Prüfapparatur wurden nun die Eigenschaften von Formsanden untersucht, die mehrfach einer Temperatur von $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgesetzt waren oder einer einmaligen Behandlung bei zunehmend heißen Temperaturen unterzogen wurden:

- > mehrfach ausgesetzten Proben wurden zyklisch über 24 h im Trockenschrank bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet, mit 3 Gew.-% Wasser rückgefeuchtet,

10 Minuten gemischt und 24 h luftdicht gelagert. Auf diese Weise wurden Chargen mit 13, 22 und 25 Zyklen hergestellt.

- > Die einmalig hitzevorbehandelten Proben, die 3 Gew.-% Wasser enthielten, wurden im Muffelofen bei 225 °C, 330 °C, 390 °C, 435 °C, 540 °C, 645 °C oder 750 °C über 24 h erhitzt, mit 3 Gew.-% Wasser rückgefeuchtet, 10 Minuten gemischt und 24 h luftdicht gelagert.
- > Als Referenz dienten Proben, die einmal bei 120 °C über 24 h getrocknet, mit 3 Gew.-% Wasser rückgefeuchtet, 10 Minuten gemischt und 24 h luftdicht gelagert wurden. Diese einmalige Behandlung der Referenzproben bei 120 °C ist für eine definierte Formsandfeuchte unverzichtbar.

Die Untersuchungen der zyklisch vorbehandelten Formstoffproben zeigten, dass sowohl die Position der Bruchfläche im Feuchtemaximum als auch die Nasszugfestigkeit keine signifikante Abhängigkeit von der Anzahl der Zyklen aufweisen (Bild 5a). Demgegenüber zeigten die hitzevorbehandelten Formsande eine Abnahme der Nasszugfestigkeit bis hin zum völligen Verlust (Bild 5b). Die in den Radiografie-Sequenzen gemäß Gleichung 1 bestimmten Ausbreitungskonstanten der Zonengrenzen zeigen ein ähnliches Verhalten. Während die Konstanten mit zunehmender Zykluszahl weitgehend unverändert blieben (Bild 5c 1-3), führte eine Wärmebehandlung über 330 °C zu einer vergleichsweise deutlichen Zunahme der Ausbreitungskonstanten (Bild 5d 1-3).

Da die Position der geringsten Zugfestigkeit bei allen Proben mit einer Vorbehandlungstemperatur unter 645 °C im Feuchtemaximum bei 100 °C liegt, kann die Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit nicht Ursache für die beobachteten Eigenschaftsänderungen der Formsande mit einer Vorbehandlungstemperatur zwischen 225 °C und 645 °C sein. Darüber hinaus waren auch die Porosität und der absolute Feuchtegehalt an der Rissfläche unabhängig von der Vorbehandlung [28]. Die Ursache der Festigkeitsabnahme ist daher in der Stabilität der Kationen-Brücken zwischen den Tonmineralen zu suchen, denn diese bestimmen nach dem weitgehenden Verschwinden der Kapillarkräfte die Zugfestigkeit des Formsandes ganz wesentlich. Da alle Proben nach der Vorbehandlung stets auf 3 Gew.-% Wasser rückgefeuchtet wurden, kann die Abnahme der Stabilität dieser Brücken letztlich nur durch eine Alteration der Tonminerale verursacht worden sein.

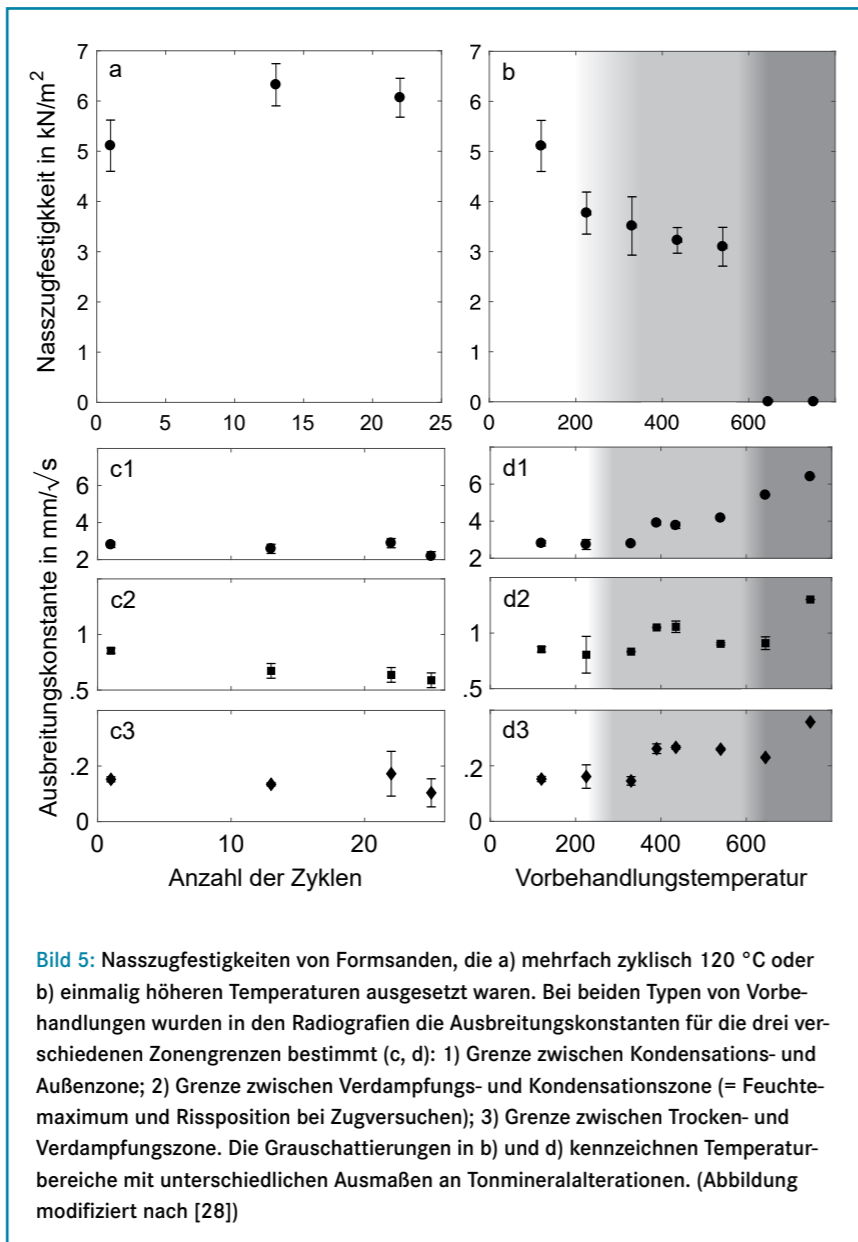


Bild 5: Nasszugfestigkeiten von Formsanden, die a) mehrfach zyklisch 120 °C oder b) einmalig höheren Temperaturen ausgesetzt waren. Bei beiden Typen von Vorbehandlungen wurden in den Radiografien die Ausbreitungskonstanten für die drei verschiedenen Zonengrenzen bestimmt (c, d): 1) Grenze zwischen Kondensations- und Außenzone; 2) Grenze zwischen Verdampfungs- und Kondensationszone (= Feuchtemaximum und Rissposition bei Zugversuchen); 3) Grenze zwischen Trocken- und Verdampfungszone. Die Grauschattierungen in b) und d) kennzeichnen Temperaturbereiche mit unterschiedlichen Ausmaßen an Tonmineralalterationen. (Abbildung modifiziert nach [28])

Bei Temperaturen zwischen 225 °C und 330 °C konnte eine Beeinträchtigung der Integrität der Tonminerale nur indirekt bestätigt werden. Untersuchungen mit dem Neutronendiffraktometer zeigten bei diesen Tonmineralen lediglich eine leicht geweitete Kristallstruktur gegenüber den Tonmineralen des Referenzformsandes [28]. Die Veränderungen der Ausbreitungskonstanten der Proben mit einer Vorbehandlungstemperatur über 330 °C (Bild 5d) korrelieren hingegen mit einer deutlich messbaren Alteration der Tonminerale. DTA/TG-Untersuchungen dieser Proben zeigten bei Temperaturen über 330 °C einen deutlichen Masseverlust der Tonminerale [28]. Dieser Masseverlust könnte auf eine Abgabe fest gebundenen Wassers oder auf einen frühen Verlust von Hydroxylgruppen zurückzuführen sein [19, 20], obwohl eine Dehydroxylation cisvakanten Montmorillonits nicht unter

600 °C stattfinden sollte [22]. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu betonen, dass die Tonminerale bei Vorbehandlungstemperaturen unter 645 °C immer noch schwellfähig blieben [28]. Dies deutet auf insgesamt nur kleine bis moderate Alterationen hin, nicht aber auf eine völlige Umwandlung dieser Minerale. Letztere erfolgt aber bei einer Vorbehandlungstemperatur ≥ 645 °C, die zum Verlust der messbaren Zugfestigkeit führt.

Schlussfolgerungen und Perspektiven

Die Neutronenradiografie ist eine leistungsfähige Methode, um den Ort der schwächsten Zugfestigkeit und die Wasserkinematik im Formsandprüfkörper in situ und quantitativ zu messen. Erstmals konnte zuverlässig bestimmt werden, dass die Rissfläche am Feuchtemaximum

liegt, das mit der 100-Grad-Isotherme korreliert. An dieser Stelle weist die Zugfestigkeit durch die inverse Korrelation von Temperatur und Kapillarkraft ein Minimum auf. Die Ergebnisse widersprechen daher der Annahme, dass die Rissfläche innerhalb der Kondensationszone zu finden wäre [8, 31, 32].

Nach einer Hitzevorbehandlung der Formsande traten erste Alterationen schon bei Temperaturen von 225 °C auf und sind wahrscheinlich Folge kleinster Beeinträchtigungen der strukturellen und kompositorischen Integrität der Tonminerale. Mit zunehmender Temperatur tritt eine weitere irreversible Verschlechterung der Bindequalität auf bis hin zum völligen Verlust messbarer Zugfestigkeit.

Zwischen Referenzformsand und 22-Zyklen-Formsand konnten keine signifikanten Eigenschaftsänderungen festgestellt werden. Die durch die Vorbehandlung verursachten Effekte waren bei dieser Anzahl von Zyklen noch nicht stark genug, um zu einer substantiellen Verminderung der Formsandqualität zu führen. Zu beachten ist, dass die Maximaltemperatur in den hier durchgeführten Zyklen bei 120 °C lag. Ob die Anzahl der Zyklen ohne merkliche Eigenschaftsänderung im Temperaturintervall zwischen 100 °C und 120 °C größer ist, ist gegenwärtig unbekannt. Auch wenn bei Ca-Montmorillonit schon bei Temperaturen über 90 °C von einem Auftreten irreversibler Dehydratation berichtet wurde [33], ist es naheliegend anzunehmen, dass unter 100 °C eine wesentlich höhere Anzahl von Zyklen erreicht werden kann, ohne dass es zu einer merklichen Eigenschaftsänderung des Formsandes kommt.

Die hier präsentierten Ergebnisse sind eine Übersetzung zusammenfassender Auszüge folgender Publikationen der Autoren:

- Schiebel K., Jordan G., Kaestner A., Schillinger B., Böhnke S., Schmahl W.W. (2018): Neutron radiographic study of the effect of heat-driven water transport on the tensile strength of bentonite-bonded moulding sand. *Transport in Porous Media*, 121, 369–387. DOI: 10.1007/s11242-017-0968-z.

- Schiebel K., Jordan G., Kaestner A., Schillinger B., Georgii R., Hess K.-U., Böhnke S., Schmahl W.W. (2018): Effects of heat and cyclic reuse on the properties of bentonite-bonded sand. *European Journal of Mineralogy*, 30, 1115–1125. DOI: 10.1127/ejm/2018/0030-2784.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG (GZ JO 301/5-1) für die finanzielle Unterstützung des Projekts. Darüber hinaus gilt unser Dank Dr. Robert Georgii, Dr. Erika Griesshaber und Dr. Kai-Uwe Hess für die Untersuchungen am Neutronendiffraktometer und am Rasterelektronenmikroskop sowie für die Thermoanalyse.

Weitere Informationen:

Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München, Prof. Dr. Guntram Jordan, Theresienstr. 41, 80333 München, 089 2180 4353; jordan@lmu.de, www.geowissenschaften.lmu.de.

Paul Scherrer Institut, Dr. Anders Kaestner, www.psi.ch.

Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Technische Universität München, Dr. Burkhard Schillinger, www.ph.tum.de.

Imerys, Sandra Böhnke, www.imerys-additivesformetallurgie.com

Literatur:

- [1] Giesserei 51 (1964), S. 634-641.
- [2] Physica A 339 (2004), Nr. 1-2, S. 7-15.
- [3] Langmuir 21 (2005), Nr. 24, S. 10992-10997.
- [4] Amer. Mineral. 95 (2010), Nr. 10, S. 1493-1499.
- [5] J. Geotech. Geoenviron. Eng. 133 (2007), Nr. 2, S. 144-154.

- [6] J. Geotech. Geoenviron. Eng. 141 (2015), Nr. 4, 04014122.
- [7] Can. Geotech. J. 35 (1998), Nr. 2, S. 194-205.
- [8] Giesserei 3 (1961), S. 157-193.
- [9] US Patent 3,159,018 (1964).
- [10] Metallurgical Trans. B 17 (1986), Nr. 4, S. 903-911.
- [11] Giessereiforschung 29 (1977), Nr. 1, S. 41-46.
- [12] Amer. Foundry Soc. Prog. 11-28 (2011), S. 1-5.
- [13] J. Heat Transfer 105 (1983), Nr. 3, S. 485-492.
- [14] Nature 318 (1985), S. 50-52.
- [15] Clays Clay Minerals 62 (2014), Nr. 3, S. 188-202.
- [16] Appl. Clay Sci. 4 (1989), Nr. 3, S. 279-292.
- [17] Phys. Chem. Earth 32 (2007), Nr. 8, S. 780-788.
- [18] Clays Clay Minerals 43 (1995), Nr. 6, S. 718-731.
- [19] Clays Clay Minerals 47 (1999), Nr. 5, S. 591-604.
- [20] Amer. Mineral. 102 (2017), Nr. 5, S. 1073-1090.
- [21] Clays Clay Minerals 59 (2009), Nr. 1, 104-114.
- [22] Thermochim. Acta 462 (2007), Nr. 1-2, S. 80-88.
- [23] Clays Clay Minerals 61 (2013), Nr. 2, S. 133-140.
- [24] Giesserei 100 (2013), Nr. 9, S. 24-29.
- [25] J. Large-Scale Res. Fac. 1 A17 (2015), S. 1-4.
- [26] Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 659 (2011), Nr. 11, S. 387-393.
- [27] Transp. Porous Med. 121 (2018), S. 369-387.
- [28] Eur. J. Mineral. 30 (2018), S. 1115-1125.
- [29] J. Eng. Mech. 135 (2009), Nr. 12, S. 1410-1419.
- [30] Water Resources Res. 46 (2010), Nr. 5, W05515.
- [31] Campbell, J.: Complete Casting Handbook. 1st Edition. Elsevier, 2011.
- [32] Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 311 (1984), S. 391-409.
- [33] Amer. Mineral. 92 (2007), Nr. 7, S. 994-1006.

Stampfschablonen · Einschmelzzyylinder

A. FENGLER
Hermann Uhlmann
Maschinen- und
Waagenbau GmbH
Hasseröder Straße 6

38855 Wernigerode
Tel. 039-137632201
Fax 039-137605865

**AAGM Anleuer
Gießereimaschinen GmbH**

Gewerbehof 28 · D-79441 Boplingen
Tel. +49 (0) 78 82 78 80 37-0
Fax. +49 (0) 78 82 78 80 37-10
E-Mail info@aagm.de · Web www.aagm.de