

Kurzfassung zum Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr. 19491 N

Modellierung der schwindungsbedingten Verformungen während der Trocknung von Ziegelrohlingen

Hintergrund

Ziel und Ergebnis des Forschungsprojekts bestand darin, ein in der Ziegelindustrie eingesetztes Berechnungswerkzeug durch die Erweiterung trocknungsrelevanter Basisdaten dem realen Trocknungsprozess anzupassen und zu verbessern. Dazu wurde basierend auf dem Stand der Forschung in der Bodenmechanik/Geotechnik ein gekoppeltes hydraulisch-mechanisches Finite-Element-Modell erstellt, mit welchem der Trocknungsprozess für ausgewählte Materialien und Geometrien von Ziegelrohlingen berechnet wird und mittels Sensitivitätsanalyse die relevanten Einflussparameter (Materialparameter bzw. Prozessrandbedingungen wie Temperatur und relative Feuchte) zur Beurteilung der Rissgefährdung und Produktverzerrung identifiziert werden. Die im numerischen Modell identifizierten Parameter bzw. Kriterien werden in das vorhandene Berechnungswerkzeug ZiTro implementiert. Mittels des modifizierten Werkzeugs wird der Ziegelindustrie ermöglicht, den technologischen Trocknungsprozess so zu steuern, dass die Entstehung von Rissen und unerwünschten Verformungen in Abhängigkeit vom Trocknungsfortschritt vermieden werden.

Durchführung und Ergebnisse

Das gesetzte Forschungsziel erforderte einen hohen Aufwand an Untersuchungen, die durch die Beteiligung von zwei Forschungseinrichtungen dem Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) und der Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften (RUB) erbracht worden sind. Das Programm ZiTro berechnet die von den Trocknungsbedingungen abhängigen Schwindungsgradienten. Dabei stand die Frage „Welche maximalen Schwindungsgradienten materialabhängig zu Verformungen oder Rissen führen“ im Fokus der Arbeiten.

Die im Rahmen des Vorhabens ermittelten geotechnischen Kennwerte wie die Wasserbeladung, die Massesteife, die Fließ-, Ausroll- und Schrumpfgrenze sowie die Kationenaustauschkapazität dienen der Charakterisierung der keramischen Massen in ihrem plastischen bzw. bildsamen Verhalten. Diese Eigenschaften sind maßgebende Einflussfaktoren für das Verhalten der Formlinge zu Beginn der Trocknung, da durch die Duktilität eine geringfügige elastische Komponente vorliegt. In diesem Zustand können die durch trocknungsbedingte Wassergehalts- bzw. Schwindungsdifferenzen injizierten Spannungen noch elastisch abgebaut werden. Bei Überschreitung der duktilen Fähigkeiten ist unter bestimmten Spannungszuständen mit bleibenden plastischen Verzerrungen zu rechnen, die schon in einem frühen Trocknungsstadium Verformungen zur Folge haben. Solange die trocknenden Formlinge frei beweglich sind wird der Verformung keine Rissbildung überlagert. Dabei sind die Transporteigenschaften des Wassers innerhalb des noch feuchten Rohlings, die rohstoffseitig durch die Feuchteleitfähigkeit quantifiziert werden, eine maßgebliche Trocknungseigenschaft, die über den gesamten ersten Trocknungsabschnitt wirksam ist und der Beachtung geschenkt werden muss. Während das Auftreten von Trockenrissen schon in der Anfangsphase der Trocknung angelegt wird, erstreckt sich die Gefährdung von Verformungen bzw. Verzerrungen der Rohlinge bis zum Übergang in den zweiten Trocknungsabschnitt. Dabei sind die Kenntnisse über die

vom Wassergehalt abhängigen trocknungsrelevanten Eigenschaften maßgeblich. Im Einzelnen ist es die Feuchteleitfähigkeit, die sich mit abnehmenden Wassergehalt verringert. Parallel zum Wasserentzug wird jedoch die ertragbare Spannung durch die Erhöhung der Zugfestigkeit mit abnehmender Dehnung erhöht. Die Zugfestigkeit wird durch die Oberflächen- und Grenzflächenspannung des die Feststoffpartikel in Kapillaren und Haftbrücken verbindenden Wassers erbracht. Die Kapillar- und Krümmungsradien der Mikrooberflächen nehmen mit abnehmendem Wassergehalt ab, so dass die Zugfestigkeit während der Trocknung toniger Substanzen generell zunimmt. Die ermittelte Porengrößenverteilung der trockenen Rohlinge in Abhängigkeit vom Wassergehalt ist als veränderliche Rohlingeigenschaft anzusehen. Mit fortschreitendem Wasserentzug sinkt der mittlere Porenradius bis zum Schwindungsende. Dies korreliert mit steigenden Spannungen im Trocknungsfortschritt bei Abnahme der Duktilität (spannungsbedingte Dehnung). Die im unmittelbaren Zusammenhang mit der Zugfestigkeit stehende Saugspannung wird in der Nomenklatur der Bodenmechanik als die Energie bezeichnet, welche erforderlich ist, um einen Boden zu entwässern (d.h. zu trocknen). Trockenrisse und Verzerrungen (bleibende Verformung) können dann entstehen, wenn die ertragbare Zugfestigkeit der Rohlingsmasse durch die sich bei der Trocknung einstellenden Schwindungsgradienten lokal überschritten wird. Diese im ersten Trocknungsabschnitt auf den Formling bzw. Rohling einwirkenden Abläufe, bei dem der Wasserentzug über die Rohlingsoberfläche stattfindet, sind zur Vervollständigung des gesamten Trocknungsprozesses noch durch die im zweiten Trocknungsabschnitt stattfindenden Vorgänge zu ergänzen. In diesem Abschnitt findet die Trocknung durch Verdampfung des Wassers an der Oberfläche des sich in Richtung des Rohlingskerns wandernden Trocknungsspiegels statt, wobei die Dampfdiffusion in dem mit Poren durchzogenen wasserfreien Rohlingsgefüge geschwindigkeitsbestimmend ist.

Die mathematische Modellierung von Trocknern erzeugt neben den Eingangsgrößen einerseits tabellarisch aufgelistet die finalen Ergebnisse der Simulation und andererseits die veränderlichen wassergehaltsabhängigen Zustandsgrößen, deren zeitliche Verläufe bei der Berechnung grafisch geplottet werden.

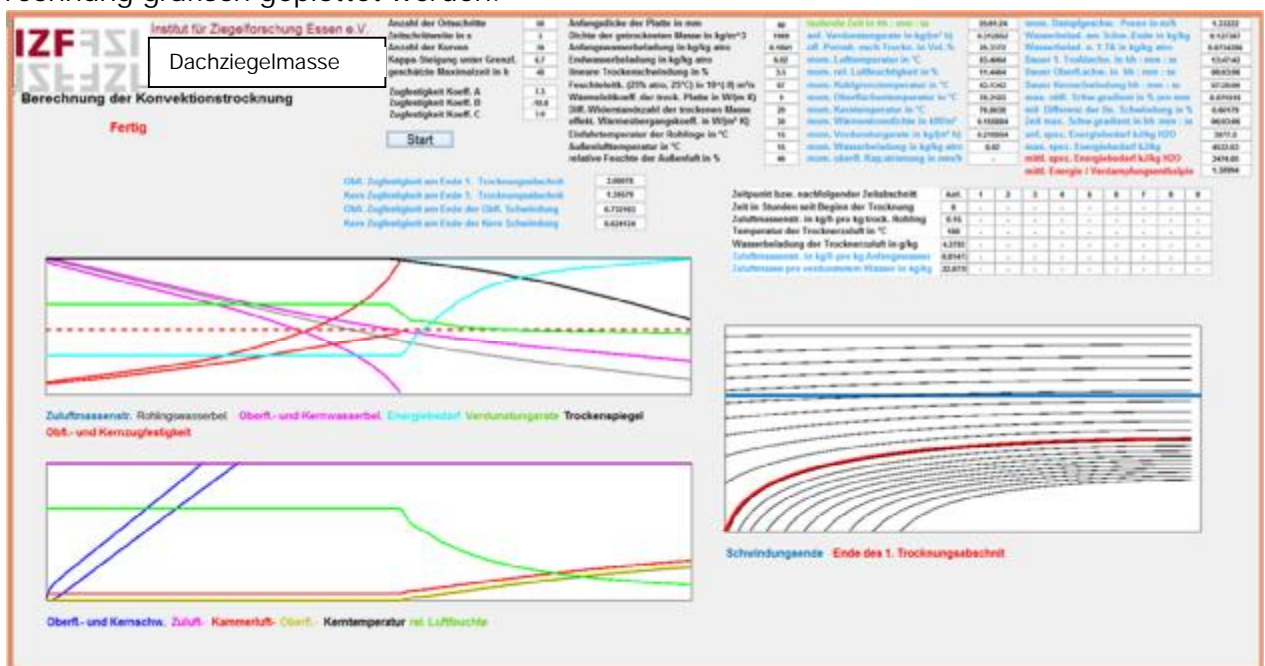


Abbildung 1: Screenshot der Ergebnisausgabe des Rechenprogramms ZiTro

Die Verläufe in Abbildung 1 beschreiben über die Gesamtzeit der Trocknung, also dem ersten und zweiten Trocknungsabschnitt die Feuchtegehalte innerhalb des Rohlings - separat für die Rohlingsoberfläche und den Rohlingskern, das Absinken der Wasserbeladung, die Wanderung des Trocknungsspiegels, die Temperatur, die ortsabhängige Schwindung und die Zugfestigkeit ggf. auch die Dehnung. Aus diesen Darstellungen lassen sich zu jedem Zeitpunkt der Simulation die sich bildenden Differenzen innerhalb des Rohlings herleiten, wobei die für die Beurteilung einer möglichen Rissbildung bzw. Verzerrung maßgeblichen Differenzen für neuralgische Punkte zahlenmäßig ausgewiesen werden. Ergänzend wird auch der mittlere spezifische Energiebedarf für die Trocknung und das Verhältnis der mittleren Energie zur Verdampfungsenthalpie des ausgetriebenen Wassers ausgewiesen. Insofern lässt sich auch mit Hilfe dieses Programmes der Einfluss rohstoffseitiger und/oder verfahrenstechnischer Optimierungsmaßnahmen auf den zu erwartenden Energiebedarf ableiten.

Eine Festlegung der für unterschiedliche Produkte (Materialeigenschaften) zulässigen maximalen Schwindungsgradienten zu Vermeidung von Verformungen und/oder Rissen ist mit diesem Programm unter dem Aspekt einer hinreichenden Genauigkeit jedoch nur bedingt möglich. Eine Abschätzung der die Trocknung und damit auch die Rissbildung bestimmenden Parameter ist jedoch aufgrund der simultan ausgewiesenen Ergebnisse gegeben, aus denen man Hinweise zu deren Vermeidung erhält. Hintergrund ist die Tatsache, dass im Falle von Verzerrungen bzw. Verkrümmungen partielle Prozesse im Rohling stattfinden, die auf die in unmittelbarer Nachbarschaft stattfindende Materialschwindung sowohl erhöhend als auch mindernd Einfluss nehmen. Insofern folgt die tatsächliche Schwindung, die in der Ergebnisdarstellung als scheinbare Schwindungen bezeichnet werden, nicht immer der nach dem Bourry-Diagramm in Abhängigkeit vom Wasserentzug ermittelten linearen Trockenschwindung. Beispiel dafür ist die Trocknung von flächigen Produkten, wie die von Dachziegeln, Fassadenplatten oder Riemchen, die auf sogenannten Formlingsträgern aufliegen, bei denen die Trocknung auf der nicht abgedeckten gegenüber der aufliegenden Seite eine zeitlich und örtlich begünstigte Trocknung erfährt und damit das Maß der finalen Schwindung maßgeblich beeinflusst wird. Zur Beschreibung der Risse und Verkrümmungen verursachenden Vorgänge werden im Schlussbericht Modelle aufgestellt.

Letztlich kann durch die Anwendung des so erstellten Berechnungstools das Auftreten von Verformungen und Rissen (Trockenbruch) im Rahmen von rohstoffseitigen und/oder verfahrenstechnischen Maßnahmen abgeschätzt und durch eine auf das Trocknungsverhalten abgestimmte verbesserte Trocknungssteuerung reduziert werden. In Folge dieser Anpassung wird der Trockenbruch herabgesetzt und der Trocknungsenergiebedarf abgesenkt, was insbesondere der KMU-dominierenden Ziegelindustrie zu Gute kommt.

Das IGF-Vorhaben 19491 N der Forschungsvereinigung Ziegelindustrie e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Es handelt sich um ein Forschungsprojekt der Forschungsgemeinschaft der Ziegelindustrie e.V. (FGZ), das vom Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) und von der Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften (RUB) durchgeführt wurde. (Schlussbericht vom 28.02.2021)