

Diploma Thesis

Experimental investigations on clay roof tile materials as basis for performance predictions by means of numerical simulations

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchungen an Dachziegeln als Basis numerischer Simulationen zur Vorhersage der Tragfähigkeit

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Valentin Senk, BSc

Matr.Nr.: 01325833

unter der Anleitung von

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Kiefer, BSc**

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Josef Füssl**

Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/202, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2020



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Für die Entstehung und Vollendung dieser Arbeit gilt mein besonderer Dank allererst Thomas Kiefer, welcher diese hauptverantwortlich betreut hat. Mit Blick auf seine verantwortungsbewusste und gewissenhafte Persönlichkeit sowie den zahlreichen Gesprächen und Diskussionen reifte in mir der Gedanke einer Abschlussarbeit am Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen. Für die zahlreichen Hinweise, Literaturangaben, den akribisch genauen Korrekturen und den vielen Stunden an investierter Zeit - besonders in der Endphase der Arbeit - bin ich ihm außerordentlich dankbar.

Josef Füssl danke ich für die Möglichkeit einer so interessanten wie vielfältigen Diplomarbeit nachgehen zu können. Durch die Kontaktvermittlung mit der Fa. Wienerberger und der Initiierung der anfänglichen Besprechungskreise konnte der Rahmen sowie eine klare Zielsetzung für die Arbeit abgesteckt werden.

Ein herzliches Dankeschön gilt, Im Besonderen und stellvertretend für die Fa. Wienerberger, Gottfried Früh, welcher mir im experimentellen Teil der Arbeit mit seiner Expertise und Hilfsbereitschaft stets zur Seite stand. Der Fa. Wienerberger sei zudem für die Bereitstellung der räumlichen, personellen und materiellen Ressourcen gedankt, ohne welche die Arbeit in diesem Ausmaß nicht hätte entstehen können. Danke an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit an das tolle Team; Andreas Jäger, Wolfgang Gaggl, Catalin Benea, Florian Jäger sowie den vielen hilfsbereiten Labormitarbeitern.

Ohne die Unterstützung vieler lieber Menschen, Freunde, Familie und Studienkollegen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich möchte mich bei all jenen bedanken, die mich im Laufe meines Studiums begleitet und in diesem Lebensabschnitt stets unterstützt haben. Für die Zeit in der letzten Phase des Studiums sei insbesondere Hansi und Johanna gedankt, welche trotz ihrer räumlichen Distanz immer ein offenes Ohr für mich hatten. Danke auch hier meiner Schwester Caroline.

Zu guter Letzt und im Gedenken an meine Eltern möchte ich auch ihnen danken. Erst durch ihre großzügige Unterstützung wurde eine erfolgreiche schulische sowie studentische Laufbahn möglich.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Obwohl Ziegel als Baumaterial seit Tausenden von Jahren genutzt werden, beruhen Neuentwicklungen in der Ziegelindustrie immer noch größtenteils auf den Erfahrungen kompetenter Ingenieure und Facharbeiter, denn auf einem soliden, physikalisch fundiertem Wissen über die Zusammenhänge zwischen Materialzusammensetzung, Brenntemperatur, Dichte und mechanischen Eigenschaften. Für eine Verbesserung des Ressourcen- und Energieeinsatzes im Produktionsprozess ist, insbesondere im Hinblick auf die Optimierung von Ziegelgeometrien, eine Identifikation solcher Zusammenhänge wesentlich. In der Dachziegelherstellung stellt der Rohstoff Ton zudem einen signifikanten Anteil der Produktkosten dar - eine Massenreduzierung bei gleichzeitiger Erhaltung der Ziegelqualität ist daher von zentraler Bedeutung. Ein bedeutendes Instrument zur Strukturoptimierung solcher Dachziegelgeometrien bildet hierfür die Finite Elemente Methode.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die für Finite Elemente Simulationen notwendige, umfangreiche Charakterisierung von Materialparametern, welche für genaue numerische Simulationen unabdingbar sind. Dazu wurden an Probekörpern unterschiedlicher Brenntemperaturen die Dichte und Wasserabsorption bestimmt, Biegezug- und Ultraschallversuche durchgeführt und an komplexen Dachziegelgeometrien erste μ CT-Bilder erstellt. Die Fülle an erhaltenen Daten erlaubt die Bestimmung deutlicher Korrelationen zwischen unterschiedlichen Materialkonstanten, wobei ein durch den Extrusionsprozess richtungsabhängiges Materialverhalten vorherrscht. Die ermittelten Daten an den unterschiedlichen Probekörpern wurden in einem weiteren Abschnitt Biegezugversuchen an ganzen Ziegeln gegenübergestellt und die ermittelten Bruchspannungen mit jenen der Probekörper sowie jenen aus FE-Simulationen an einfachen und komplexen Geometrien verglichen. Ein Designkonzept bestehend aus Identifikationsversuchen, einem 3D Simulationstool und Verifikationsexperimente konnte somit erstmals vorgestellt werden. Grundlegende Zusammenhänge zwischen den für die Simulation notwendigen Materialparametern sowie deren Anwendung in FE-Modellen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Dachziegeln wurden darin ausführlich beschrieben.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Although bricks have been used as a building material for thousands of years, new developments in the brick industry are still largely based on the experience of competent engineers and skilled workers, rather than on a safe, physically based knowledge of the links between material composition, firing temperature, density and mechanical properties. In order to improve the efficiency in the use of resources and energy consumption in the production process, it is essential to identify such relationships, particularly with regard to the optimization of brick geometries. In the roof tile industry the use of clay materials also represents a significant share of the product costs - a reduction in mass while maintaining the remaining tile quality is therefore a major topic. The finite element method offers an important instrument for optimizing the structure of such roof tile geometries.

Essential for precise numerical simulations is the extensive characterisation of material parameters, which represents the main focus of this work. For this purpose, test specimens fired at different temperatures were prepared, where the density and water absorption were determined and bending and ultrasonic tests were carried out. Also first μ CT-images were created on complex roof tile geometries. The abundance of received data allows the determination of clear correlations between the different material constants, whereby an anisotropic material behavior due to the extrusion process prevails. The received data of different test specimens were set in contrast to bending tests on whole roof tiles and the determined flexural strengths were compared with those of the test specimens and those from finite element simulations on simple and complex geometries. A design concept of identification tests, a 3D simulation tool and verification experiments could therefore be presented for the first time. Consequently this work describes in detail fundamental relationships between the material parameters required for numerical simulations and their application on FE-Models to determine the load capacity of roof tiles.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Motivation	10
1.2	Methodik	10
1.3	Herstellungsbedingte Anisotropie im Dachziegel	11
2	Materialcharakterisierung & untersuchte Ziegel	13
2.1	Rohstoff	13
2.2	Untersuchte Ziegel und Probenumfang	14
2.2.1	Vorversuche	15
2.2.2	Hauptversuche an Probekörpern der Wiener Tasche	18
2.2.3	Versuche an ungeschnittenen Dachziegeln	22
2.3	Bestimmung der Dichte und der Wasserabsorption	23
2.4	Zusammenhang zwischen Dichte und Wasseraufnahme	26
2.5	Zusammenhang zwischen Dichte und Brenntemperaturen	26
2.6	μ CT Messungen zur Bestimmung der Dichteverteilung	28
3	Ultraschallversuche zur Bestimmung des E-Moduls	30
3.1	Korrelationen der ermittelten Materialkonstanten mit der Materialdichte	32
4	3-Punkt-Biegeversuche zur Bestimmung des E-Moduls und der Biegezugfestigkeit	35
4.1	Versuchsaufbau	35
4.2	Berechnungen zur Versuchsdurchführung	37
4.2.1	Bruchspannung und Querschnittswerte der längsgeschnittenen Ziegelproben	39
4.2.2	Bruchspannung und Querschnittswerte der quergeschnittenen Ziegelproben	40
4.2.3	Berechnung des statischen E-Moduls	41
4.3	Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche	43
4.3.1	Charakterisierung des Materialverhaltens.	43
4.3.2	Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche	43
4.3.3	Zusammenhang zwischen Dichte und statischem E-Modul	44
5	Biegeversuche an Dachziegeln	46
5.1	Versuchsaufbau	46
5.2	Verfälschung des Verschiebungsweges durch die Gummistreifen	47
5.3	Versuche am Taschenziegel	48
5.4	Versuche am Landdach Verschiebeziegel	50
6	FE-Simulationen	53
6.1	FE-Simulationen an der Wiener Tasche	53
6.1.1	Geometrie	53
6.1.2	Materialeigenschaften und Randbedingungen	53
6.1.3	Netzgenerierung und Elementstypen	54
6.1.4	Ergebnisse der Simulationen an der Wiener Tasche	55

6.2	FE-Simulation am Landdach Verschiebeziegel	57
6.2.1	Geometrie	57
6.2.2	Materialeigenschaften und Randbedingungen	57
6.2.3	Netzgenerierung und Elementstypen	58
6.2.4	Ergebnisse der Simulationen am Landdach Verschiebeziegel	58
7	Ergebnisse & Interpretation	61
7.1	Vergleich der E-Module aus den Ultraschall- sowie Biegeversuchen	61
7.1.1	Potentielle Fehlerquellen	63
7.2	Vergleich der Biegeversuche und der FE-Simulationen an der Wiener Tasche	64
7.3	Vergleich der FE-Simulationen am Landdach Verschiebeziegel und der Wiener Tasche	65
8	Diskussion	67
A	Messergebnisse der Hauptversuche	77
A.1	Zusammenstellung der Messergebnisse der Hauptversuche	77
A.2	Last-Verschiebungsdiagramme der 3-Punkt-Biegeversuche	82
B	Messergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche an ganzen Ziegeln	115
B.1	Messergebnisse der Taschenziegel des Werkbrandes	115
B.1.1	Last-Verschiebungsdiagramme der Taschenziegel des Werkbrandes	117
B.2	Messergebnisse der Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur	122
B.2.1	Last-Verschiebungsdiagramme der Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur	123
B.3	Messergebnisse der Landdach Verschiebeziegel	126

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Ziegel stellen seit Jahrtausenden einen der langlebigsten Baustoffe im Bauwesen dar. Begünstigt wurde dies durch die weit verbreitete Verfügbarkeit des Ausgangsmaterials, seine Dauerhaftigkeit, seine thermische Speicherwirkung und die optimale Regulierung des Feuchtigkeitshaushalts. Diese Eigenschaften qualifizieren den Ziegel zwar als nachhaltigen Baustoff, dennoch muss im Zuge der Debatte um einen nachhaltigeren und bewussteren Umgang unserer Gesellschaft mit natürlichen Ressourcen alles versucht werden, um den gerade bei hoch gebrannten Ziegelprodukten notwendigen Energieeinsatz auf ein Minimum zu reduzieren. Die Herausforderung der Ziegelindustrie besteht damit in der Entwicklung effizienterer Produktionsprozesse bei gleichzeitiger Wahrung der Produktqualität. Eine solche kann durch die Optimierung von Ziegelgeometrien mittels numerischer Simulationen auf Basis einer umfassenden Materialcharakterisierung gelingen. Durch eine solche Optimierung reduziert sich nicht nur der Energieaufwand während des Brennprozesses, sondern auch der Rohstoffbedarf pro Fertigungseinheit, welcher einen signifikanten Anteil an den Produktionskosten darstellt. Die Identifikation und Bestimmung aller für einen solchen Simulationsprozess notwendiger Materialparameter stellt damit die Grundlage und Motivation der vorliegenden Arbeit dar.

Experimentelle Untersuchungen sollen zu einer umfangreichen Materialcharakterisierung der Dachziegel und der verwendeten Ausgangsstoffe führen. Neben der Biegefestigkeit, welche als maßgebender Einflussparameter eine wesentliche Rolle spielt, müssen weitere Materialeigenschaften und deren Zusammenhänge ermittelt werden. Dies betrifft insbesondere tonabhängige Beziehungen zwischen Brenntemperatur, Dichte und Steifigkeit. Da solche Zusammenhänge in bisherigen Forschungsarbeiten nur spärlich untersucht wurden und stark vom Rohmaterial abhängig sind, sollen die hier ermittelten Parameter eine Basis für Modellvorhersagen komplexer Ziegelgeometrien bilden.

1.2 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit werden mehrere Dachziegel unterschiedlicher Geometrie untersucht. Dazu werden aus jedem der Dachziegel mehrere kleinere Probekörper herausgeschnitten, um lokale Inhomogenitäten, welche durch den Produktionsprozess hervorgerufen werden, erfassen zu können (wie beispielsweise Unterschiede in der Dichte, etc.). Zudem findet die Probekörperpräparation unter Beachtung der Verteilung und Ausrichtung der Tonmineralien [8][47] in unterschiedlichen Richtungen am Ziegel statt. In Vorversuchen werden dabei die notwendigen Schritte der Probenpräparation festgelegt, die Messergebnisse der Hauptversuche dienen als Grundlage für nachfolgende Finite Elemente Simulationen, mit welchen die Strukturantwort des gesamten Ziegels unter Berücksichtigung der komplexen Dachziegelgeometrie berechnet wird.

Nach Vorbereitung der Probekörper werden dazu deren Dichte sowie ihre Wasseraufnahmefähigkeit bestimmt. Anschließend folgt die Bestimmung des dynamischen E-Moduls anhand von Ultraschallversuchen sowie des statischen E-Moduls mittels 3-Punkt-Biegeversuchen. Nach Ermittlung dieser Werte werden einfache Ziegelformen mittels FE-Modellierung analysiert und weitere Untersuchungen an komplexen Formen durchgeführt. Eine Verifizierung an ganzen Ziegeln soll die Ergebnisse vergleichbar machen und mögliche Abweichungen erörtern. Neben dem genannten Ablauf werden auch μ CT Scans durchgeführt, welche Aufschluss über Inhomogenitäten im Material geben sollen. Die grundsätzliche Vorgehensweise zum Ablauf ist in Abb. 1.1 dargestellt.

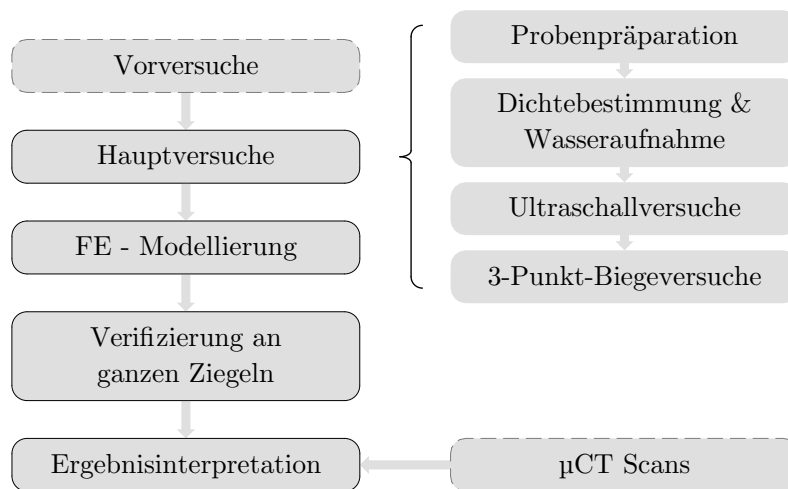


Abb. 1.1: Ablaufdiagramm der Arbeit

1.3 Herstellungsbedingte Anisotropie im Dachziegel

Das Ausgangsmaterial in der Dachziegelherstellung besteht typischerweise aus tonhaltigem Lehm mit einem hohen Anteil an Tonmineralien, wie Kaoliniten, Illiten und Muskoviten. Die plattenförmige Kristallstruktur dieser Mineralien äußert sich durch ausgeprägte anisotrope Eigenschaften betreffend Wärmeausdehnung, Wärmeleitung und Elastizitätsmodul [8][15]. Messbare richtungsabhängige Eigenschaften der Ziegel auf makroskopischer Ebene lassen sich nachweislich auf die Orientierung der Tonmineralien auf mikroskopischen Ebenen zurückführen.

Für die Ausrichtung der Mineralien ist der Herstellungsprozess von wesentlicher Bedeutung. Der Rohstoff wird, nach einem Aufbereitungsprozess durch verschiedene Einrichtungen, wie Beschicker, Walzwerken und Sumpfhäuser, in die Strangpresse eingeleitet. Hier wird der Ton durch das Mundstück einer Strangpresse extrudiert, wodurch die Formgebung des Ziegels erreicht wird (siehe Abb. 1.2a).

Dieser Extrusionsprozess beeinflusst maßgeblich die späteren Eigenschaften der Dachziegel, da durch die Schichtung der Tonmineralien eine klare Ausrichtung derselben induziert wird (siehe Abb. 1.2b bzw. [18, S. 209-231]). Anisotrope Eigenschaften stranggepresster Ziegel unterscheiden sich demnach deutlich in zwei Richtungen [47]; in Extrusionsebene (in Abb. 1.2 gekennzeichnet durch die x-y-Ebene), sowie senkrecht zu dieser (z-Richtung). Die Ziegel können somit durch orthotropes Materialverhalten beschrieben werden. Neben der Ausrichtung der Tonmineralien führt der Extrusionsprozess für die Dachziegel erfahrungsgemäß auch zu Entmischungen in der

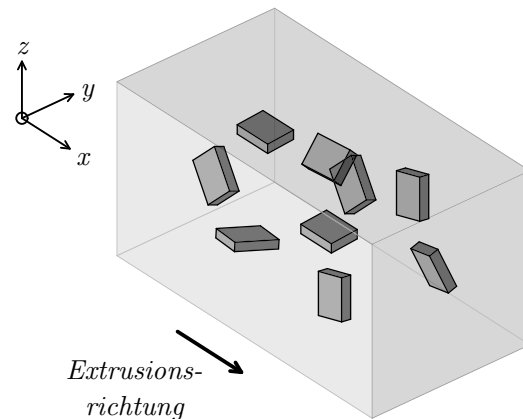
Korngrößenverteilung. Größere Teilchen wandern in Richtung der Oberfläche, während in der Mitte tendenziell kleinere Partikel zu finden sind.

Bei Dachziegeln komplexerer Geometrie (etwa Pressdachziegeln mit Ringfalz) wird die Ausrichtung der Tonminerale durch einen weiteren Produktionsschritt, dem Pressvorgang mittels Revolverpresse, verändert. Die Strangpresse erfüllt hier nur noch den Zweck der „Vorportionierung“, die Formgebung selbst erfolgt in der Revolverpresse. Dadurch wird nicht nur eine Änderung der Ausrichtung der Tonminerale hervorgerufen, sondern durch die unterschiedliche Druckverteilung über den Ziegel (in Abhängigkeit der Geometrie) werden auch homogenere und inhomogenere Bereiche induziert. Zudem weisen einzelne, gepresste Ziegelgeometrien Lunkerbildungen auf. Tendenziell führen höhere Pressdrücke zu höheren Anisotropien. Untersuchungen zur Anisotropie gepresster Keramiken finden sich beispielsweise in [23][44].

Nach der Formgebung erfolgt die Trocknung der Ziegel in einem Durchlauftrockner saisonabhängig zwischen 24 h–48 h bei rund 80 °C–90 °C und danach der Brennvorgang im Tunnelofen bei einer Dauer von 24 h–48 h. Dabei können hohe Brenntemperaturen aufgrund von Umbildungen der Tonminerale zu einer abnehmenden Ausprägung des anisotropen Materialverhaltens führen [8].



(a) Extrusion einer Ziegelgeometrie im Werk der Fa. Wienerberger



(b) Schematische Darstellung zur Ausrichtung der Tonminerale nach [8][24][47]

Abb. 1.2: Extrusionsprozess und daraus entstehende Ausrichtung der Tonminerale

Kapitel 2

Materialcharakterisierung & untersuchte Ziegel

2.1 Rohstoff

Weltweit unterscheiden sich die Rohstoffe für Dachziegelmischungen aufgrund der geologischen Entstehungsgeschichte der Tongruben fast durchgehend; auch in Abbaustätten selbst ist die mineralogische Zusammensetzung aufgrund der Sedimentationsprozesse oftmals heterogen. Da die Zusammensetzung und Mikrostruktur der Ausgangsstoffe eine wesentliche Rolle für die Materialeigenschaften darstellen, ist eine Vergleichbarkeit mit untersuchten Tonen aus der Literatur daher oftmals schwierig.

Der Hauptbestandteil des in dieser Arbeit untersuchten Ausgangsmaterials ist ein feinkalkfreier, rotbrennender Ton mit einem Tonmineralgehalt (Körner $< 2\ \mu\text{m}$) von etwa 40 %. Rohstoffanalysen am gegebenen Standort der Fa. Wienerberger zeigen eine grobe Unterteilung in etwa $\frac{2}{3}$ trocknungsunempfindliche (Kaolinite, Illite) und $\frac{1}{3}$ trocknungsempfindliche Tone (Smektite). Der Quarzanteil liegt zwischen 30 %–38 % und der Anteil an Feldspat bei rund 17 % [16].

Die zwei dominierenden Tonschichten der Tongrube sind in Abb. 2.1 dargestellt. Links (Abb. 2.1a) ist eine gelbe bis braune schluffig-sandige Matrix (magerer Ton), rechts (Abb. 2.1b) sind feinere, „fettere“ Tonlagen der Grube zu erkennen. Am Standort werden daraus getrennte Halden aus „Fett- und Magertonen“ angelegt. Eine laufende Angleichung des Mischungsverhältnisses beider Halden im Werk garantiert eine gleichmäßige Korngrößenverteilung und führt schließlich zu optimalen Eigenschaften betreffend Wasseraufnahme, Frostbeständigkeit, Formbeständigkeit und einer ausreichenden Festigkeit.

Um eine Vergleichbarkeit des in dieser Arbeit untersuchten Materials möglich zu machen, wurden sämtliche betrachtete Dachziegel aus einer Charge mit zeitlich und örtlich möglichst geringem Abstand entnommen. Die Ausgangsmaterialien der so zur Prüfung kommenden Ziegel stehen in gleichem Mischungsverhältnis.



(a) Braune schluffig-sandige „magere“ Tonlagen



(b) Graue, feine „fette“ Tonlagen

Abb. 2.1: Untersuchte Rohstoffe für die Ziegelerstellung aus der Grube aus [16]

2.2 Untersuchte Ziegel und Probenumfang

Es kommen drei verschiedene Dachziegelarten zur Untersuchung. Sie betreffen:

1. Biberschwanzziegel für die Vorversuche
2. Taschenziegel für die Identifikationsversuche an Ziegelscherben sowie für die Verifikationsversuche an ganzen Ziegeln
3. Landdach Verschiebeziegel für Verifikationsversuche an ganzen Ziegeln

Der Biberschwanzziegel und der Taschenziegel (Wiener Tasche) sind unverfalzte, gerade Strangdachziegel [42]. Sie werden nach der Extrusion mittels Strangpresse mit einem Draht abgeschnitten und gelangen danach über Förderanlagen in Tranchen direkt in den Durchlauftrockner. Der Biber und die Tasche unterscheiden sich lediglich durch die Form ihrer Endausbildung voneinander. Der Taschenziegel zeichnet sich durch einen geraden, der Biberschwanzziegel durch einen runden Schnitt aus. Der Landdach Verschiebeziegel stellt im Gegensatz zu den Strangdachziegeln eine komplexere Form dar. Es handelt sich dabei um einen sogenannten Pressdachziegel [42], seine endgültige Formgebung erfolgt nach der Extrusion mittels Strangpressverfahren durch die Revolverpresse. Die in der Arbeit untersuchten Dachziegelvarianten sind in Abb. 2.2 dargestellt. Aus den Strangdachziegeln werden einzelne Probekörper geschnitten, während die Landdach Verschiebeziegel im Ganzen geprüft werden. In einem ersten Schritt kommen Vorversuche zur Anwendung, um die Art und Vorgehensweise der Probenpräparation festzulegen. Dabei werden 12 Probekörper untersucht. Für die Hauptversuche werden in Summe 132 präparierte Probekörper geprüft, zur Verifizierung werden ungeschnittene Dachziegel herangezogen. Ein Überblick der untersuchten Ziegel und Probekörper findet sich in Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Überblick des Probenumfangs der untersuchten Scherben

„Zeitpunkt“	Anzahl	Beschreibung
Vorversuche	12 Stück	<i>präparierte Probekörper aus Biberschwanzziegel in unterschiedlichen „Schleifgraden“, siehe Abb. 2.4 auf Seite 16.</i>
Hauptversuche	132 Stück	<i>präparierte Probekörper aus Taschenziegel in unterschiedlichen Brenntemperaturen, siehe Abb. 2.10 auf Seite 22.</i>
Großversuche	68 Stück	<i>Prüfung ganzer Ziegel: Taschenziegel in unterschiedlichen Brenntemperaturen sowie Landdach Verschiebeziegel.</i>



(a) Biberschwanzziegel



(b) Taschenziegel



(c) Landdach Verschiebeziegel

Abb. 2.2: Untersuchte Dachziegelarten aus [49]

2.2.1 Vorversuche

Geometrische Unebenheiten an Ziegelprüfkörpern führen an Punkten der Lasteintragung zu Spannungsspitzen und damit verbundenen lokalen Effekten, die Messunsicherheiten nach sich ziehen. Zudem ist die für die Auswertung der Ergebnisse maßgebende Geometrie nicht mit der notwendigen Präzision bestimmbar, was sich in zusätzlichen Messungenauigkeiten äußert. Die Probekörper werden daher an Ober- und Unterseite geschliffen, wobei der Schleifprozess bei hoch gebrannten keramischen Werkstücken mit einer vergleichsweise hohen Härte durch den damit verbundenen Zeitaufwand sowie den hohen Verschleiß an Schleifmaterial auf das notwendige Minimum reduziert wird.

Um die Machbarkeit und die Vorgehensweise zur Probenherstellung, sowie die Qualität der daraus resultierenden Ergebnisse, besser abzuschätzen, kommen Vorversuche zur Anwendung. In diesem Abschnitt wird dabei kurz auf die wesentlichen Punkte eingegangen, welche sich hauptsächlich auf die Art der Probenpräparation beziehen.

In den Vorversuchen wird mit Biberschwanzziegeln aus der Produktionsstätte Gleinstätten gearbeitet, aus welchen Probekörper in Längsrichtung (=Extrusionsrichtung) herausgeschnitten wurden. In Abb. 2.3 ist die Unterteilung und Schnittführung am Ziegel dargestellt. Die Wahl der Dimensionen richtet sich dabei nach dem Aufbau des Biegeprüfgeräts und den zur Verfügung stehenden Prüfutensilien (genauere Erläuterungen hierzu sind in Kapitel 2.2.2 sowie Kapitel 4.1 zu finden). In Summe kommen für die Vorversuche drei Biberschwanzziegel, aus denen je vier Probekörper geschnitten werden, zur Untersuchung.

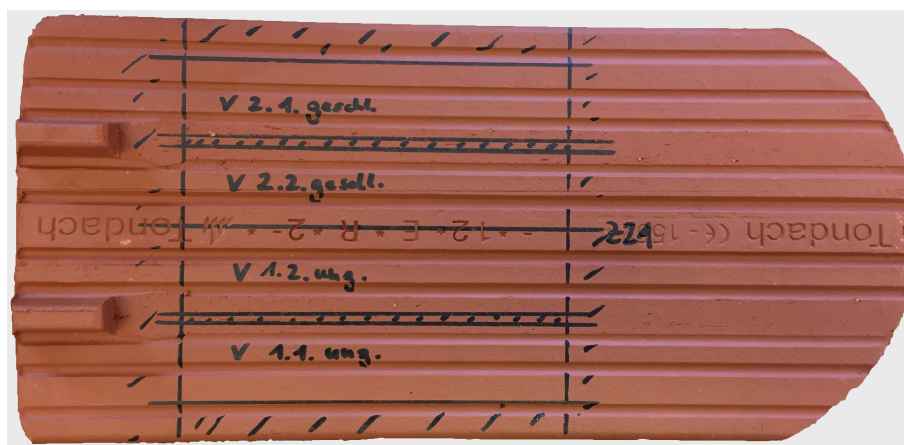


Abb. 2.3: Biberschwanzziegel samt Markierungen an der Unterseite zur Probekörperunterteilung im Zuge der Vorversuche

Die herausgeschnittenen 12 Probekörper werden nach drei unterschiedlichen Varianten der Probenpräparation untersucht, welche sich hinsichtlich des Grades des Schleifens voneinander unterscheiden. Dabei wird zwischen „ungeschliffenen“, „angeschliffenen“ und „ganz geschliffenen“ Proben unterschieden, siehe Tab. 2.2. Weiters zeigt Abb. 2.4 die verschiedenen Schleifgrade anhand des Bruchquerschnitts nach der Durchführung erster Biegeversuche.

Betrachtet man die Ergebnisse für den statischen E-Modul, so zeigt ein Vergleich der Varianten anhand von Biegeversuchen, dass die ungeschliffenen Probekörper aufgrund ihrer rauen Oberflächenstruktur - und der damit möglichen Eintragung von Punktlasten an den Auflagen - unzuverlässige und weit gestreute Daten liefern (vgl. Tag. 2.3). Die Variante des „Anschleifens“ an Ober- und Unterseite der Proben liefert weitaus bessere Ergebnisse, wobei hier die noch verbleibenden Kerben herausgerechnet werden. Da das komplette Abtragen der Kerben

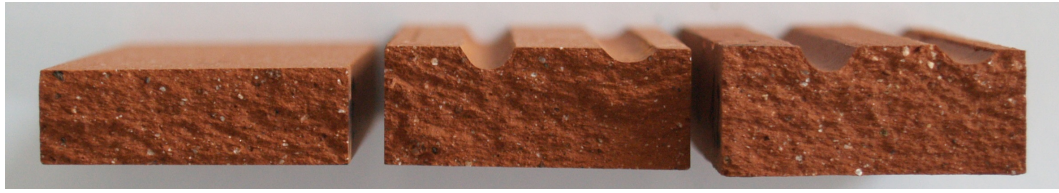


Abb. 2.4: Probenquerschnitte im Vergleich: ganz geschliffene, angeschliffene sowie ungeschliffene Probekörper

Tab. 2.2: Unterscheidung nach der Art der Probenpräparation

Variante	Bezeichnung	Beschreibung
1	ungeschliffen	<i>Herausschneiden der Probekörper am Nassschneider (Seitentrennmachine) ohne weitere Bearbeitung.</i>
2	angeschliffen	<i>Zusätzliches Abtragen von ca. einem Millimeter Material an Ober- sowie Unterseite der Proben mithilfe der Schleifmaschine.</i>
3	ganz geschliffen	<i>Vollständiges Abschleifen der Kerben an der Unterseite der Proben, um einen rein quaderförmigen Körper zu erhalten.</i>

an der Unterseite der Proben einen unverhältnismäßig hohen Mehraufwand in der Herstellung bedeuten würde, werden für die Hauptversuche in Abschnitt 2.2.2 die Ziegel lediglich angeschliffen.

Die Ergebnisse der Biegezugprüfungen zeigen in Bezug auf die errechneten Biegezugfestigkeiten σ_b keinen signifikanten Einfluss der Probekörperpräparationen. Weder weichen die Mittelwerte in größerem Maße voneinander ab, noch zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen Standardabweichung und Schleifgrad (siehe Tab. 2.3). Anders verhält es sich bei der Messung des E-Moduls: hier ist eine klare Zunahme des Mittelwerts mit zunehmenden Schleifgrad erkennbar, auch die signifikante Abnahme der Standardabweichungen zeigt die bessere Qualität der Ergebnisse für geschliffene Probekörper. Weiters wurden standardmäßig die Sorptionseigenschaften und die Dichte der Ziegel vor dem Anschliff bestimmt, die Ergebnisse sind in Tab. 2.4 zusammengestellt.

Tab. 2.3: Erste Ergebnisse der Vorversuche zur Entscheidung der Art der Probenpräparation.

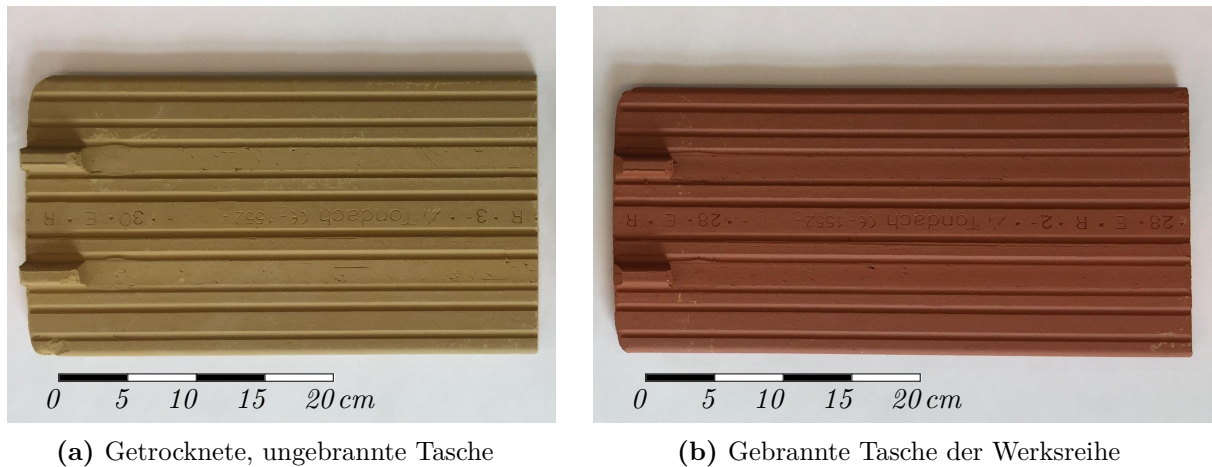
Variante	Biber Nr.	Probe	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
ungeschliffen	2	V1-1	20152	19.97
	2	V1-2	14819	18.44
	1	V1-3	18170	18.57
	1	V1-4	15855	18.34
			17249 (± 2389)	18.83 (± 0.77)
angeschliffen	2	V2-1	22784	20.26
	2	V2-2	22498	19.58
	3	V2-3	22809	19.83
	3	V2-4	20079	16.98
			22043 (± 1317)	19.16 (± 1.48)
ganz geschliffen	3	V3-1	24155	19.64
	3	V3-2	22876	19.64
	1	V3-3	23943	20.01
	1	V3-4	24233	19.89
			23802 (± 629)	19.80 (± 0.19)

Tab. 2.4: Dichte ρ und Wasseraufnahme WA_{24h} der untersuchten Ziegel

Biber Nr.	WA_{24h} [%]	ρ [g/cm ³]
1	5.97	2.115
2	5.38	2.139
3	6.21	2.104

2.2.2 Hauptversuche an Probekörpern der Wiener Tasche

Für die Hauptversuche kommen Taschenziegel zur Anwendung, welche sich einzig durch einen geraden Schnitt am Ende von Biberschwanzziegeln unterscheiden. Um im Zuge der Arbeit auch Korrelationen betreffend Brenntemperaturen, Dichte und Steifigkeiten ableiten zu können, werden neben der Prüfung von im Werk gebrannten Ziegel auch eigens im Labor gebrannte untersucht. Ein Taschenziegel der Werksreihe ist in Abb. 2.5b abgebildet. Für die Brände im Labor werden die Grünkörper (getrocknete, ungebrannte Taschenziegel), siehe Abb. 2.5a, aus derselben Charge verwendet. Sie werden in ihrer Länge gekürzt, damit sie in den im Labor zur Verfügung stehenden Kammerofen passen. Der Brennvorgang führt zu einer Schwindung von rund 4–4,5 %, was Abb. 2.5 erkennen lässt.



(a) Getrocknete, ungebrannte Tasche

(b) Gebrannte Tasche der Werksreihe

Abb. 2.5: Untersuchte Taschenziegel der Hauptversuche: Ein Vergleich der ungebrannten und gebrannten Tasche zeigt ein deutliches Schwinden in Querrichtung.

Die Wahl der Brenntemperaturen für die Laborbrände fällt auf Bereiche, für welche nach Erfahrungen der Fa. Wienerberger aufgrund des Sinterprozesses günstige Materialeigenschaften zu erwarten sind. Um ein möglichst breites Spektrum abzubilden, werden in weiterer Folge noch Proben mit besonders niedrigen beziehungsweise hohen Temperaturbereichen untersucht. So sollen auch etwaige sprunghafte Änderungen in den Zusammenhängen aus Temperatur, Dichte und Steifigkeit sichtbar gemacht werden.

Die Bestimmung der Brenntemperaturen der Ziegel erfolgt im Werk anhand sogenannter Bullersringe. Sie dienen der Überwachung der Ofenleistung sowie der Qualitätssicherung, um die präzise Feuerung der Keramiken zu gewährleisten. Die Bullersringe erfahren dabei den gleichen Wärmeeintrag, wie die Dachziegel. Ihr Schrumpfen hängt von einer Kombination aus Brenntemperatur, Befeuerrate, Ofenatmosphäre und Einweichzeit ab [33]. Anhand des Durchmessers der Ringe kann dann über Tabellen die mittlere Brenntemperatur ermittelt werden [32] - und somit die Brenntemperatur der Dachziegel.

Um die Ziegel aus dem Werk mit jenen im Labor vergleichen zu können, werden die Ringe auch hier eingesetzt. Je 5 Stück Ziegel werden im Laborofen gleichzeitig gebrannt. Dabei sind die Taschen mittels Abstandhaltern übereinander gestapelt und auf jeder der Scherben wird mittig ein Bullersring platziert, um den Temperaturgradienten im Laborofen berücksichtigen zu können. Jeder Ziegel erhält so eine zugewiesene Brenntemperatur. Für die Probenherstellung konnten so jene mit geringer Streuung herangezogen werden. Die Bezeichnung der Probekörpersets erfolgt dann anhand des Mittelwerts der Brenntemperaturen der verwendeten Taschen. Abb. 2.6 zeigt

einen geschrumpften Bullerring und den Kammerofen samt Abstandhaltern, in denen die Taschen der Laborreihen gebrannt wurden.

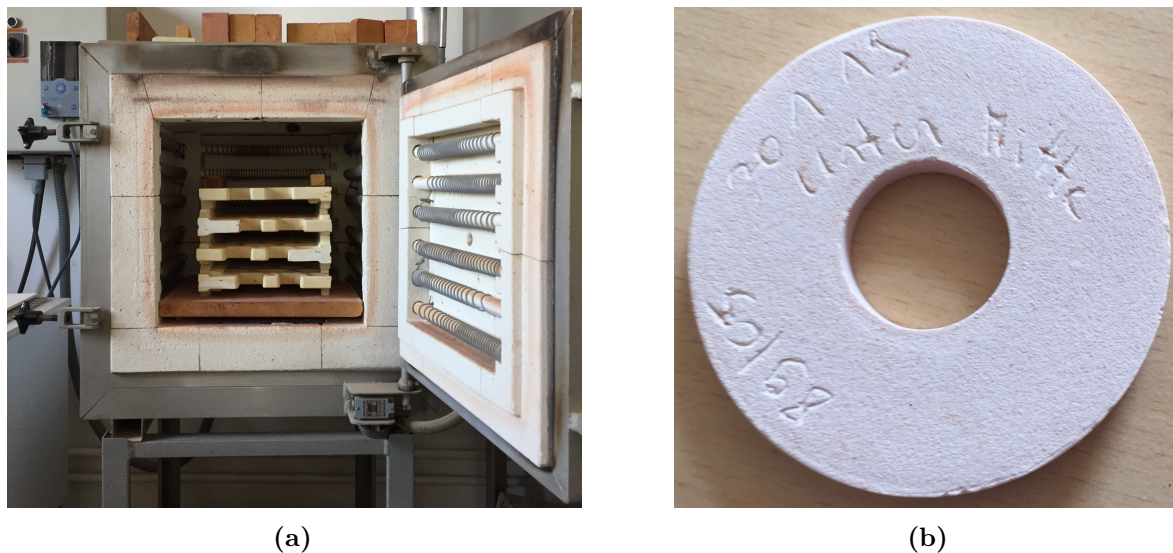


Abb. 2.6: (a) Kammerofen und (b) Bullerring zur Bestimmung der Brenntemperatur im Ziegel

Die in den Vorversuchen festgelegte Vorgehensweise zur Probenpräparation nach der Variante des „Anschleifens“ wurde für die serienmäßige Produktion der Hauptversuche übernommen und fortgeführt. Die Wahl der Abmessungen der Probekörper orientiert sich primär am Prüfaufbau der 3-Punkt-Biegeversuche gemäß Kap. 4 und beträgt in etwa:

- L/B/H = 170/30-35/10-14 mm (vgl. Abb. 2.9)

bei einem Auflagerabstand der Prüfvorrichtung von 150 mm. Für die Hauptversuche werden aus einem Ziegel je 4 Probekörper hergestellt. Je Prüfpunkt* werden 3 Ziegel verwendet und somit in Summe je 12 Proben angefertigt. Da durch den Herstellungsprozess der Extrusion eine transversal isotrope Dichte- beziehungsweise Steifigkeitsverteilung [8][47] zu erwarten ist, werden Proben längs sowie quer zur Extrusionsrichtung ausgeschnitten, siehe Abb. 2.8.

Um einheitliche Probekörper zu erhalten, wurde bei den in Längsrichtung geschnittenen Ziegeln in besonderem Maße darauf geachtet, dass die zwei Kerben so symmetrisch wie möglich an der Unterseite der Proben verlaufen. Auch für die Kerben der querschnittenen Probekörper liegt eine diesbezügliche Symmetrie vor. Die so präparierten Probekörper sind in Abb. 2.9 samt ihren Abmessungen dargestellt.

*Ein Prüfpunkt entspricht einer Probenreihe gleicher Brenntemperatur und Richtung.

Für die Hauptversuche kommen in Summe 132 Probekörper zur Untersuchung. Für eine klare Zuordnung der einzelnen Probekörper erfolgt eine Bezeichnung gemäß Schema in Abb. 2.7.

$$\begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ \boxed{Z} & \boxed{01} & - \boxed{L} & \boxed{01} \end{array}$$

Abb. 2.7: Probekörperbezeichnung

1. A-I (Z): Ziegel gleichen Brandes im Laborofen bzw. „Z“ für Werksbrand
2. 01-05 (06): Durchnummerierung der Ziegel gleichen Brandes
3. L, Q: Probekörper längs bzw. quer zur Extrusionsrichtung geschnitten
4. 01-04: 4 Probekörper je Ziegel; Reihenfolge der Nummerierung gemäß Abb. 2.8

Tab. 2.5 zeigt eine Zusammenstellung aller 132 untersuchten Proben. Hierbei ist anzumerken, dass eine vollständige Probenpräparation der Scherben mit einer Brenntemperatur von 1086 °C nicht mehr möglich war. Aufgrund der zunehmenden keramischen Sinterung und der damit einhergehenden deutlichen Verdichtung der Scherben [41] konnte der Schleifprozess mit bestehenden Mitteln nicht mehr durchgeführt werden. Eine beim Schleifvorgang entstehende Funkenbildung machte die zunehmende Vitrifizierung* der Scherben in diesem Temperaturbereich besonders deutlich.

In Abb. 2.10 sind weiters alle Probekörper, geordnet nach der Brenntemperatur, dargestellt. Der Einfluss der Temperatur ist hier bereits am deutlich differenzierten Farbverlauf zu erkennen.

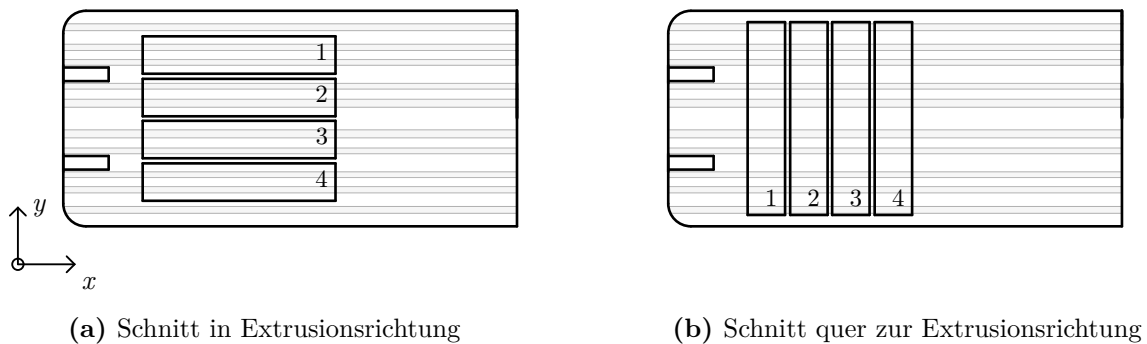


Abb. 2.8: Schnittführung pro Tasche: je 4 Probekörper längs beziehungsweise quer zur Extrusionsrichtung geschnitten

*Vitrifizierung ist die Umwandlung eines Gemisches an Materialien in ein nichtkristallines, amorphes Material (Glas) [46].

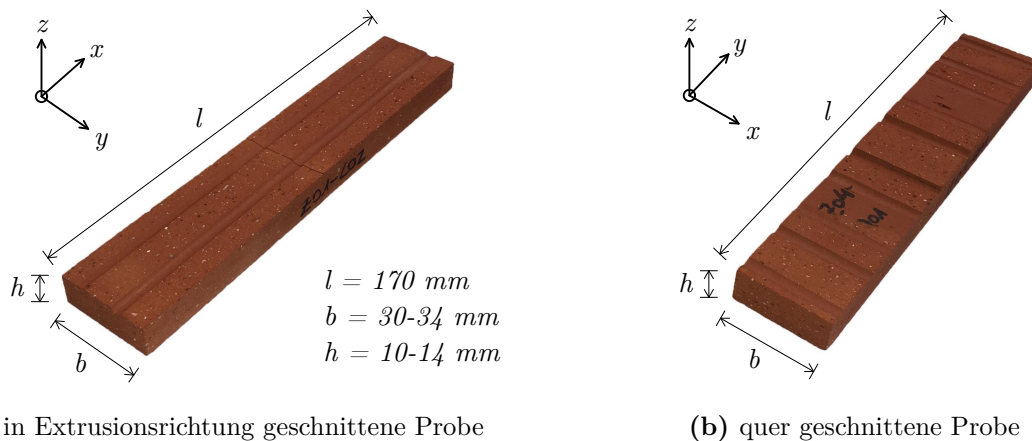


Abb. 2.9: Herausgetrennte Probekörper samt Definition der Abmessungen und des Koordinatensystems: x = Extrusionsrichtung, y = Querrichtung, z = Dickenrichtung

Tab. 2.5: Übersicht der untersuchten Probekörpern in den Hauptversuchen

Brenntemperatur*	Anzahl Proben	Ziegelbezeichnung	Beschreibung / Anmerkung
946 °C	12x längs	D02, D03, D04	<i>Zus. Proben am unteren Rand des Temperaturbereichs.</i>
984 °C	12x längs	C03, C04, H01	<i>Kontrollpunkt zum Werksbrand</i> <i>„Werksbrand“ bzw. „Werksreihe“</i>
1002 °C	12x quer	C01, H03, H04	
	12x längs	B02, B04, F01	
1006 °C	12x quer	B01, F03, F04	
	12x längs	Z01, Z02, Z03	
1032,5 °C	12x quer	Z04, Z05, Z06	
	12x längs	A02, E02, E04	
1055 °C	12x quer	A04, E01, E03	
	12x längs	I01, I03, I04	<i>Zus. Proben am oberen Rand des Temperaturbereichs.</i>
1086 °C	12x längs	G02, G03, G04	<i>Anschleifen aufgrund von Funkenbildung nicht mehr möglich.</i>

*Arithmetisches Mittel der verwendeten Ziegel; indirekte Messung der Brenntemperatur mittels Bullersringen (vgl. Abb. 2.6b)

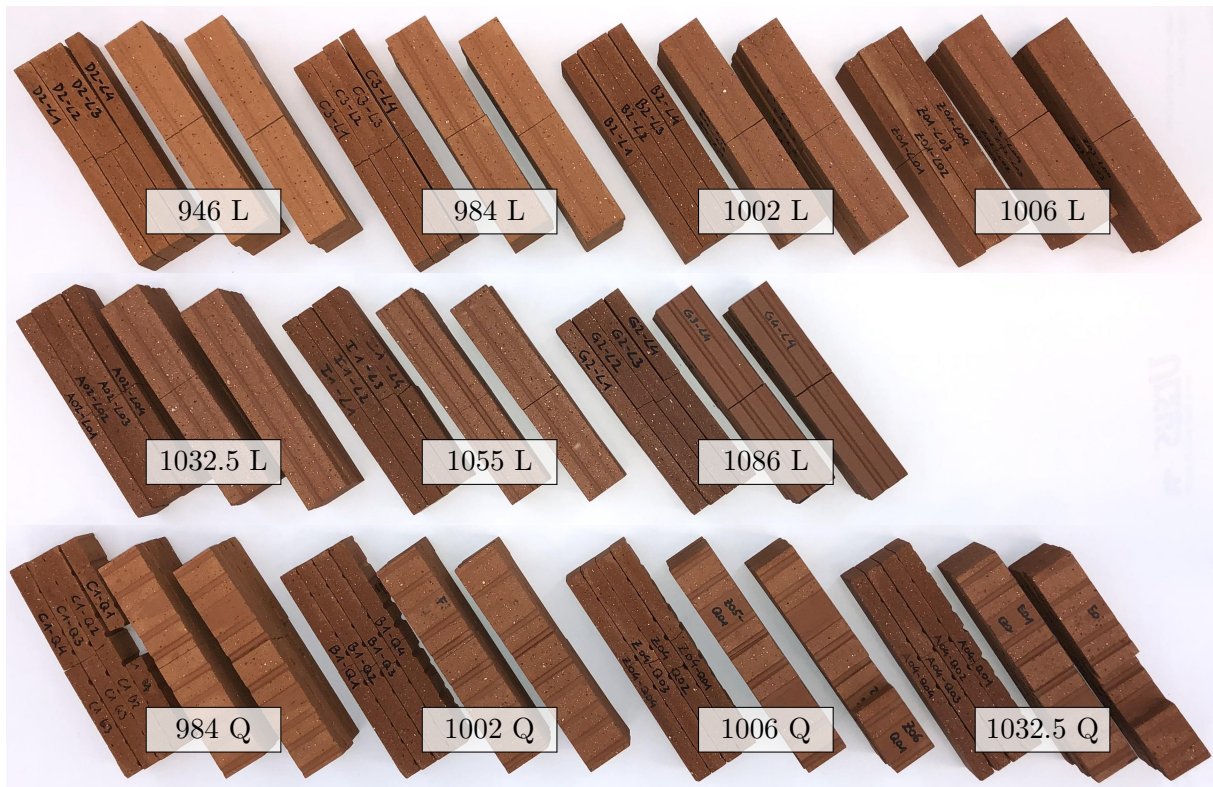


Abb. 2.10: Alle 132 untersuchten Probekörper samt ihrer Reihenbezeichnung. An den Proben kann man den deutlich differenzierten Farbverlauf aufgrund der unterschiedlichen Brenntemperaturen erkennen.

2.2.3 Versuche an ungeschnittenen Dachziegeln

Zur Verifikation der Untersuchungen an den Probekörpern und der Finite-Elemente-Berechnungen kommen Versuche an ganzen Dachziegeln zur Anwendung. Die Durchführung derselben erfolgt dabei im Werk in Gleinstätten und ist in Kap. 5 näher erläutert. Der Prüfumfang enthält:

- 25 Taschenziegel des Werkbrandes
- 18 im Labor gebrannte Taschenziegel verschiedener Brenntemperaturen
- 25 Landdach Verschiebeziegel des Werkbrandes

Die Taschenziegel des Werksbrandes (1006 °C) entstammen derselben Charge an Ziegeln, welche auch zur Probekörperpräparation der Hauptversuche herangezogen wurden. Die 18 im Labor gebrannten Taschenziegel entsprechen jenen übrig gebliebenen Taschen, welche nicht mehr zur Herstellung von Proben verwendet wurden. Ihre ermittelten Brenntemperaturen reichen von 946 °C–1095 °C und werden zusätzlich im Zuge der Großversuche untersucht.

Die Entnahme der Landdach Verschiebeziegel erfolgte im Werk an fünf unterschiedlichen Stellen des Tunnelofens. Entsprechend ihrer Lage kann ihnen eine Brenntemperatur gemäß den nächstgelegenen Bullersringen zugewiesen werden. Sie reicht von 1008 °C–1022 °C.

2.3 Bestimmung der Dichte und der Wasserabsorption

Im Zuge der Hauptversuche wird nach der Probenpräparation die Wasseraufnahmefähigkeit sowie die Dichte der Proben bestimmt. Die dafür notwendigen Arbeitsschritte sind in Abb. 2.11 dargestellt.

Die Probekörper werden nach der Bearbeitung im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz für etwa 24 h bei 110 °C gelagert und danach wird die Trockenmasse ermittelt. Mit der Lagerung der Proben in einem Behälter mit demineralisiertem* Wasser liegt nach etwa 24 h eine Wassersättigung vor. Mit der dann möglichen Bestimmung der Feuchtmasse kann der Grad der Wasserabsorption in Massen-% angegeben werden.

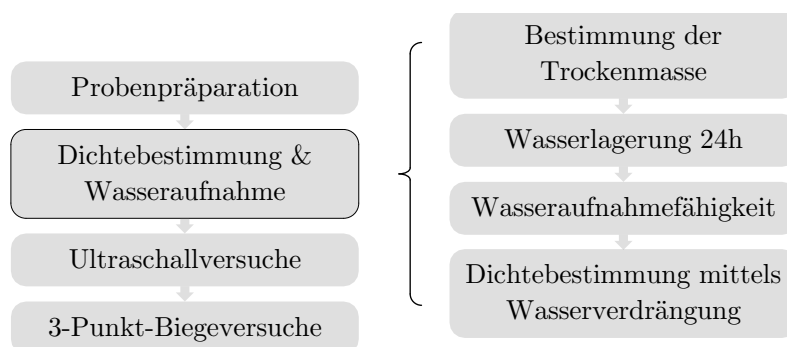


Abb. 2.11: Ablauf zur Bestimmung der Dichte und der Wasserabsorption

Da entlang der Unterseite der Probekörper Kerben verlaufen und somit eine komplexe Probengeometrie vorliegt, wird zur Dichte- beziehungsweise Volumenbestimmung das Verfahren der hydrostatischen Wägung [27] angewandt. Hier muss darauf geachtet werden, dass der Ziegel während des Versuchs kein Wasser absorbiert, was zu einer Verfälschung der Volumenbestimmung führen würde. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2.12 dargestellt.

Das Verfahren der hydrostatischen Wägung beruht auf dem Prinzip der Wasserverdrängung. Dazu wird die Masse des Probekörpers an der Luft sowie die Differenz der Wägung des Wasserbehälters nach Eintauchen der Probe bestimmt. Die Differenz ergibt die Masse des verdrängten Wassers. Bei bekannter Dichte $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ können somit die Volumina der Probekörper bestimmt werden. Im Detail wird dabei wie folgt vorgegangen:

1. Aufbau einer Hilfsvorrichtung zur Auflage und gleichmäßigem Eintauchen der Probekörper
 - Vorrichtung mit Hebel zum Eintauchen der Proben
 - Dabei ist auf eine leichte Neigung der Auflagefläche zu achten, um eine Luftblasenbildung unterhalb der Probekörper zu vermeiden.
2. Füllen des Behälters mit demineralisiertem Wasser
3. Austarieren der Waage bei eingetauchtem Draht bis zur Markierung
4. Die Probekörper werden direkt nach der Wasserlagerung entsprechend Abb. 2.12 gewogen, um ein weiteres Aufsaugen von Wasser durch die Proben auszuschließen.

*Demineralisiertes Wasser, auch deionisiertes Wasser, ist Wasser, von welchem die in ihm gelösten Salze mittels Ionenaustausch entfernt werden [29].

5. Die so ermittelte Masse in [g] an der Waage entspricht direkt dem Volumen des verdrängten Wassers in [cm³] und somit dem Volumen des Probekörpers.

Die Dichte*, auf welche sich die nachfolgenden Berechnungen und Diagramme beziehen, wird schlussendlich wie folgt berechnet:

$$\rho = \frac{m_{\text{trocken}}}{V_{24h}} \quad \text{in} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2.1)$$

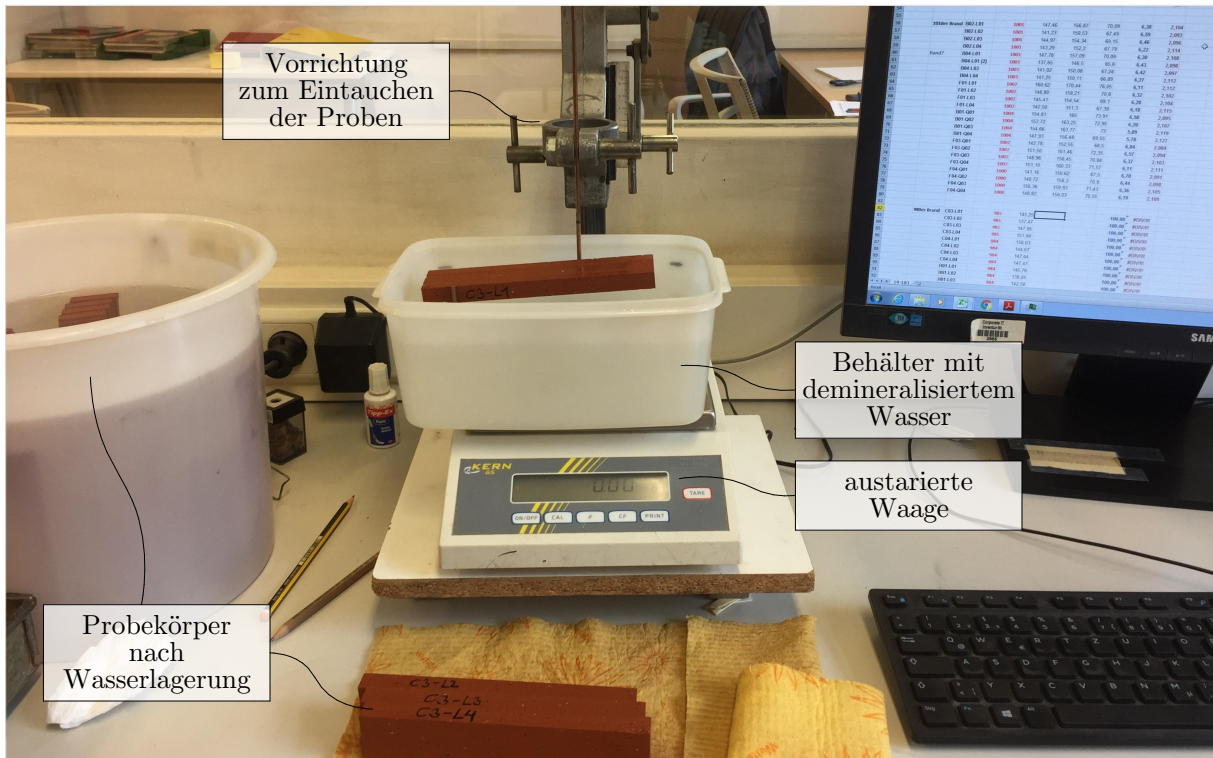


Abb. 2.12: „Unterwasserwägung“ im Labor zur Volumenbestimmung

Die erhaltenen Daten aus der oben beschriebenen Versuchsdurchführung sind in Tab. 2.6 zusammengefasst. Es handelt sich dabei um die Mittelwerte der Reihen samt deren Standardabweichungen. In Anhang A.1 finden sich dazu sämtliche Messergebnisse. Wie der Tab. 2.6 zu entnehmen ist, sinkt mit steigender Brenntemperatur die Wasseraufnahmefähigkeit, während die Dichte zunimmt. Entsprechende Korrelationen werden auf den nachfolgenden Seiten (Abb. 2.14a sowie Abb. 2.14b auf Seite 27) behandelt.

Betrachtet man für die längs zur Extrusionsrichtung geschnittenen Proben die Rand- und Mitbereiche unabhängig voneinander, können weiters feine Unterschiede in der Dichteverteilung festgestellt werden. Diese Tendenzen sind genauso für die Wasseraufnahmefähigkeit zu erkennen, wie Tab. 2.7 zeigt. Die getrennte Betrachtung der Probenreihen setzt sich aus je 6 Stück Probekörper zusammen. Dabei ist zu erkennen, dass für sie fast immer geringere Standardabweichungen als bei Betrachtung einer gesamten Reihe vorhanden sind. Die Zusatzkürzel „1,4“ und „2,3“ in Tab. 2.7 stehen für die Probekörper am Rand beziehungsweise jene in der Mitte. Die Daten zeigen eine Zunahme der Dichte in Richtung der Ränder der Taschen, siehe Abb. 2.13a. Weiters ist auch bei den quer zur Extrusionsrichtung geschnittenen Probekörper eine tendenzielle Zunahme

*Entspricht einer Nettorohdichte bzw. Trockenrohichte analog zum Nettovolumen nach EN 772-3 [39].

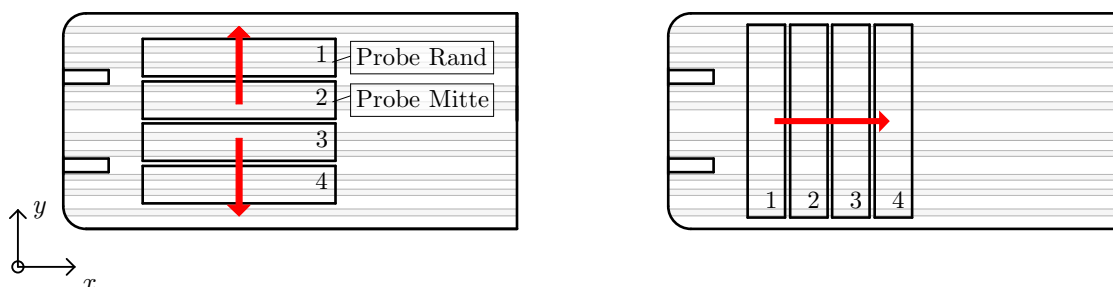
der Dichte in Richtung der Mitte des Ziegels zu erkennen. Ein diesbezüglicher Trend ist aus den Tabellen A.1 - A.4 aus Anhang A ableitbar, siehe Abb. 2.13b.

Tab. 2.6: Wasseraufnahme und Dichte für die unterschiedlichen Probenreihen

Probenreihe	Wasseraufnahme WA_{24h} [%]	Dichte ρ [g/cm^3]
946 L	10.530 (± 0.074)	1.972 (± 0.005)
984 L	8.657 (± 0.069)	2.025 (± 0.006)
1002 L	6.331 (± 0.133)	2.105 (± 0.007)
1006 L	6.135 (± 0.087)	2.117 (± 0.007)
1032.5 L	4.290 (± 0.113)	2.202 (± 0.009)
1055 L	3.355 (± 0.124)	2.248 (± 0.008)
1086 L	2.447 (± 0.086)	2.275 (± 0.007)
984 Q	8.669 (± 0.313)	2.022 (± 0.008)
1002 Q	6.337 (± 0.319)	2.104 (± 0.012)
1006 Q	5.617 (± 0.391)	2.139 (± 0.017)
1032.5 Q	4.101 (± 0.221)	2.208 (± 0.010)

Tab. 2.7: Wasseraufnahme und Dichte bei getrennter Betrachtung der längsgeschnittenen Proben in Rand- und Mittenbereiche

Probenreihe	Wasseraufnahme WA_{24h} [%]		Dichte ρ [g/cm^3]	
	Rand (1,4)	Mitte (2,3)	Rand (1,4)	Mitte (2,3)
946 L	10.485 (± 0.073)	10.575 (± 0.043)	1.977 (± 0.001)	1.967 (± 0.001)
984 L	8.631 (± 0.074)	8.683 (± 0.058)	2.030 (± 0.001)	2.019 (± 0.002)
1002 L	6.244 (± 0.095)	6.418 (± 0.108)	2.111 (± 0.004)	2.098 (± 0.004)
1006 L	6.138 (± 0.095)	6.132 (± 0.087)	2.123 (± 0.003)	2.111 (± 0.004)
1032.5 L	4.240 (± 0.111)	4.341 (± 0.097)	2.210 (± 0.006)	2.195 (± 0.005)
1055 L	3.256 (± 0.066)	3.455 (± 0.077)	2.255 (± 0.003)	2.241 (± 0.004)
1086 L	2.370 (± 0.038)	2.524 (± 0.028)	2.281 (± 0.003)	2.269 (± 0.003)



(a) Zunehmende Dichte in Richtung der Ränder

(b) Zunehmende Dichte in Richtung der Mitte

Abb. 2.13: Dichteverteilung im Ziegel aufgrund der Anordnung der Probekörper

2.4 Zusammenhang zwischen Dichte und Wasseraufnahme

In Abb. 2.14a ist der Zusammenhang zwischen Dichte und Wasserabsorption dargestellt. Die im Diagramm gefüllten Datenpunkte stellen die längsgeschnittenen Probekörper dar (Kürzel „L“), jene ohne Füllung die quer zur Extrusionsrichtung geschnittenen (Kürzel „Q“).

In der Darstellung sind sämtliche Datenpunkte der 132 Probekörper enthalten. Für den betrachteten Bereich von 946 °C–1055 °C lässt sich, mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.9972$, ein quadratischer Zusammenhang zwischen Dichte und Wasseraufnahme erkennen. Der starke Abfall der Sorptionsfähigkeit bei Proben mit einer Brenntemperatur von 1086 °C lässt sich auf die zunehmende Vitrifizierung des amorphen Teils, sowie damit entstehende geschlossene Porenräume [17][20] zurückführen. Zudem tragen vermutlich auch die nicht abgeschliffenen - und aufgrund der hohen Temperaturen - geschlosseneren Oberflächen (siehe Kap. 2.2.2 Seite 20) der Probekörper der 1086 L-Reihe zu einer geringeren Wasseraufnahme bei [41].

2.5 Zusammenhang zwischen Dichte und Brenntemperaturen

Genauso wie in Kap. 2.4 lassen sich auch für die Brenntemperaturen, im Bereich zwischen 984 °C–1055 °C, deutliche Beziehungen zur Dichte herstellen. Abb. 2.14b illustriert die ermittelten Korrelationen. Für die genannte Bandbreite ist die Abhängigkeit zwischen Brenntemperatur und Dichte durch eine quadratische Funktion, mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.9741$, beschreibbar.

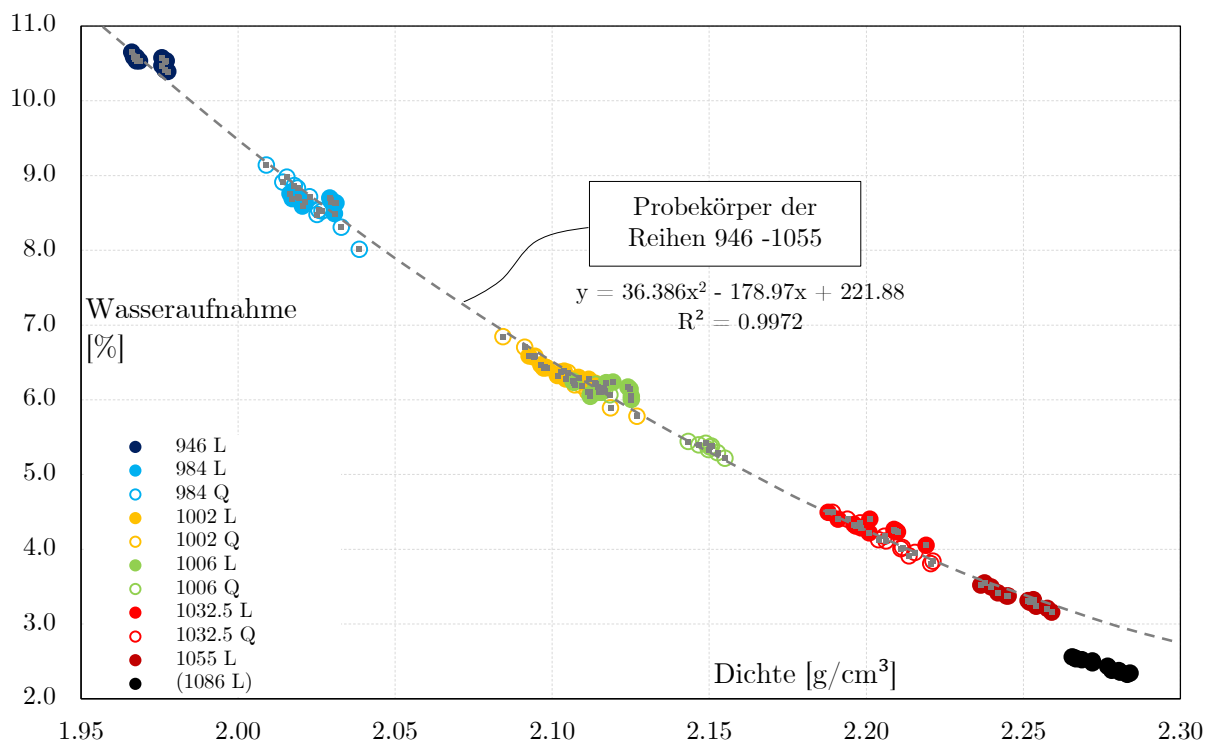
Die Probekörper der Reihe 946 L zeigen eine, im Verhältnis zur Temperatur, langsamere Zunahme der Dichte. Dies lässt auf den beginnenden Sintervorgang im gegebenen Temperaturbereich schließen. Die Datenpunkte der 1086 L-Reihe deuten wiederum auf die zunehmende Verglasung der Probekörper hin, wodurch sich die Dichte aufgrund der schon sehr geringen Porosität einem oberen Limit annähert.

Erweitert man die Abhängigkeiten um die Proben der Reihen 946 L und 1086 L, kann ein Vergleich mit den Sinterstadien nach [45, S. 316] und den entsprechend typischen Verdichtungsverläufen, in Abhängigkeit zur Brenntemperatur, gezogen werden.

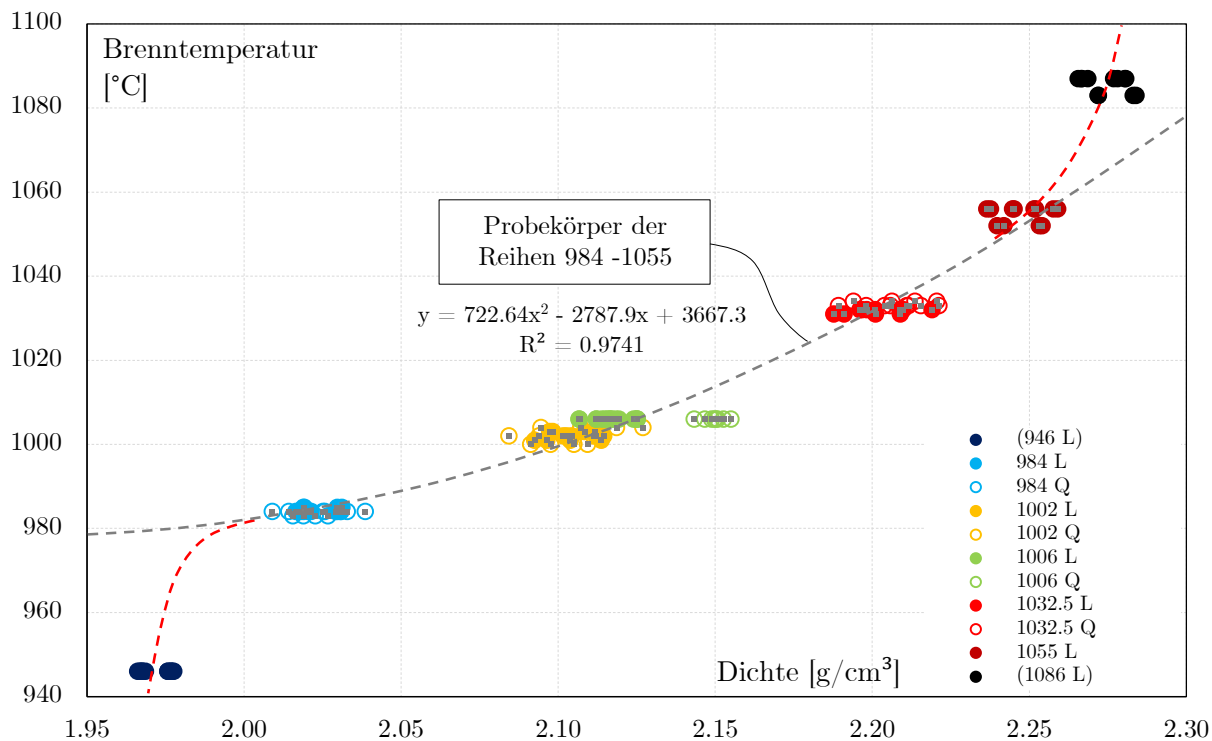
Zudem gibt die Dilatometrie*, neben der Bestimmung des temperaturabhängigen Dehnungsverhaltens, Aufschluss über die Sintereigenschaften [52] eines Materials. Dilatometeranalysen der Fa. Wienerberger [16] an ähnlichen Tonmischungen desselben Abbauortes zeigen jedenfalls vergleichbare Temperaturen für die Anfangs- und Endphase des Sinterprozesses. Die rot strichlierten Linien in Abb. 2.14b deuten die Erweiterungen eines den Daten und der Literatur entsprechenden realistischen Sinterverlaufs an.

Sämtliche Daten zur Brenntemperatur, Dichte und Wasseraufnahme sind in Anhang A in Tab. A.1 - A.4, ab Seite 78, zusammengestellt.

*Die Dilatometrie bestimmt die in Abhängigkeit der Temperatur auftretenden Dimensionsänderungen von Materialien, beispielsweise hervorgerufen durch thermische Dehnung [31, S.148-150].



(a) Dichte und Wasseraufnahmefähigkeit



(b) Dichte und Brenntemperaturen

Abb. 2.14: Korrelationen von Wasserabsorption und Brenntemperaturen zur Dichte

2.6 μ CT Messungen zur Bestimmung der Dichteverteilung

Mittels Strangpresse extrudierte, geometrisch einfach beschreibbare Ziegelformen sind bezüglich der Dichteunterschiede leicht zu charakterisieren [9]. Dazu kann beispielsweise ein Computertomographiescan über die Dicke des extrudierten Ziegelscherbens erstellt werden, wobei die erhaltene Grauwertverteilung direkt mit der Dichte korreliert. Im Gegensatz zu einfachen Geometrien stellt die Bestimmung der Dichteunterschiede bei komplexen Dachziegelgeometrien, welche nach dem Extrusionsprozess mittels Revolverpresse in ihre endgültige Form gebracht werden, eine größere Herausforderung dar [8][47].

Eine Möglichkeit zur Einschätzung der Inhomogenitäten und Dichteunterschiede im Ziegelkörper liegt in bildgebenden Verfahren wie der Computertomographie. Für eine erste Charakterisierung wird im Zuge der Arbeit ein Landdach Verschiebeziegel betrachtet, von welchem besonders komplexe Bereiche untersucht werden. In Abb. 2.15 sind dazu jene drei Bereiche markiert, bei denen aufgrund großer Verformungen durch den Umformungsprozess mittels Revolverpresse die größten Änderungen bei der Ausrichtung der Tonmineraleien bzw. der Dichteverteilung zu erwarten sind. Sie werden mit einer Ziegelschneidmaschine herausgetrennt und mittels Micro-Computer-Tomographie (μ CT100, Scanco, Schweiz) untersucht.

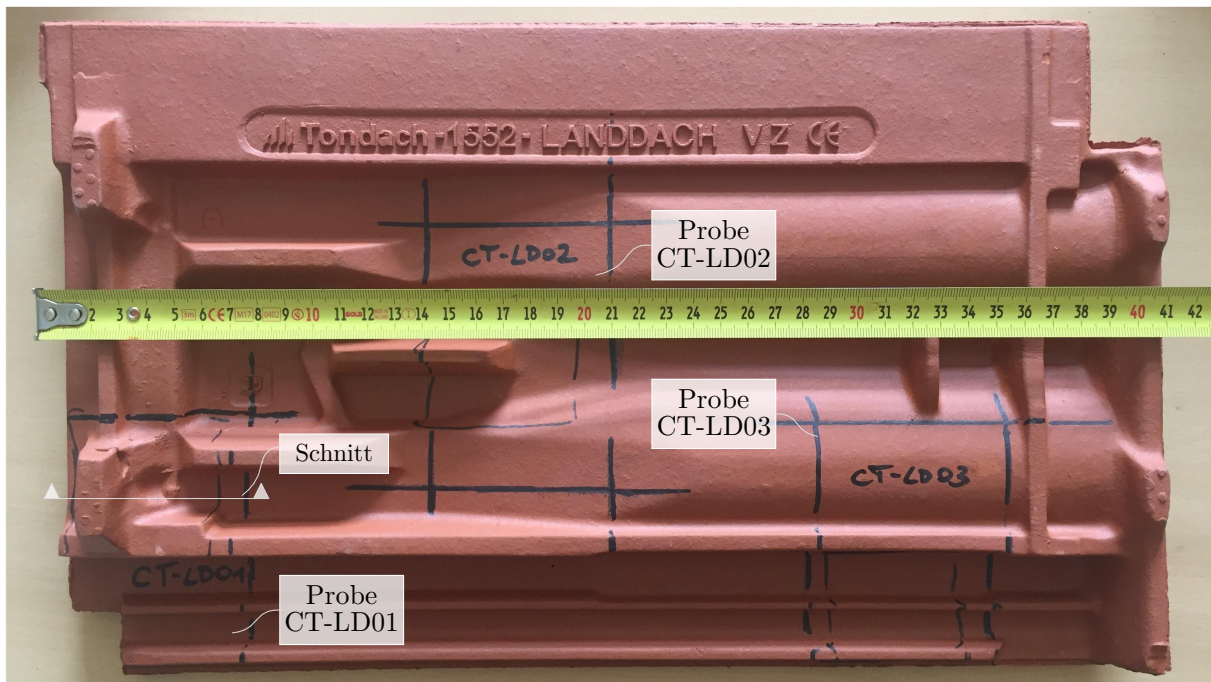


Abb. 2.15: Unterseite eines Landdach Verschiebeziegels samt Markierungen für die zu untersuchenden Probekörper für die μ CT

Die μ CT liefert hochauflösende, räumliche Bilder. Ausschnitte anhand der Probe *CT-LD01* sind in Abb. 2.16 dargestellt. Für die hier gezeigten Darstellungen wurde die Schnittführung rund um die Einhängenase* gewählt, da in diesem Bereich aufgrund besonders großer Verformungen während des Pressvorgangs besondere Auffälligkeiten zu erwarten sind.

*Die Einhängenase ist ein vorstehendes Teil auf der Unterseite des Dach- oder Formziegels, welche das Einhängen an der Deckunterlage erlaubt, die im Allgemeinen aus Latten besteht [37].

Der untersuchte Ziegel weist einen großen Hohlraum auf, welcher vermutlich durch Luft einschüsse beim Pressvorgang entstanden ist. Die Entwicklung des Hohlraums längs zur Nase ist anhand der oberen drei Bilder in Abb. 2.16 deutlich zu erkennen. Eine nachträgliche Begutachtung der Probe führte auch alsbald zu einer unbeabsichtigten Zerstörung der schmalen Tonfläche, wodurch der Hohlraum auch mit dem freien Auge sichtbar wird.

Ein weiterer, allerdings gewünschter, Hohlraum ist im unteren, mittleren Bild dargestellt. Es zeigt eines der zwei am Ziegel befindlichen Befestigungslöcher[†] (Nagellocher).

Bei den weiß dargestellten Punkten handelt es sich um Quarzkristalle von einer Größe mit bis zu 2 mm. Deutlich und mit freiem Auge sind auch die unterschiedlichen Grautöne im Bild zu erkennen. Sie deuten auf signifikante Dichteunterschiede innerhalb des Probekörpers hin. Hohe Grauwerte, das heißt dunkle Bereiche, bedeuten einen hohen Anteil an Microporen [22] und somit geringere Dichten. Niedrige Grauwerte deuten folglich auf höhere Dichten.

Bei einer Beurteilung der Dichteverteilung (und in weiterer Folge Steifigkeitsverteilung) sind jedoch auch die Bildstörungen durch Ringartefakte[‡] zu beachten. Eine verdeutlichte Darstellung dieser konzentrischen Kreise ist in Abb. 2.16 rechts unten zu sehen. Neben den ringförmigen Artefakten sind auch kleine, streifenförmige Artefakte rund um einige Quarzkörner zu erkennen.

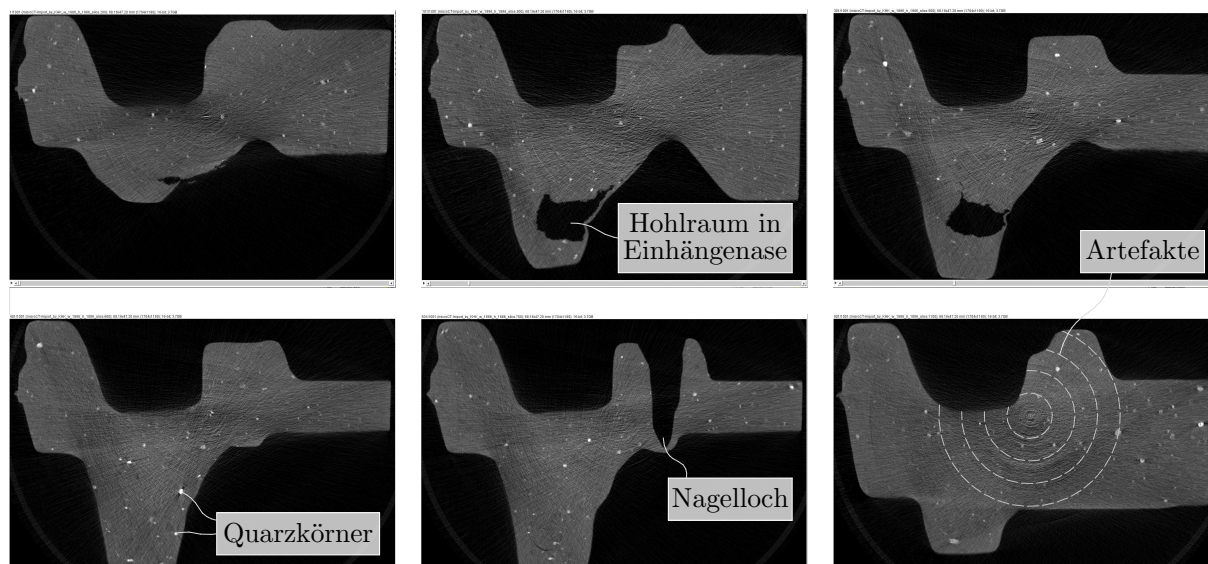


Abb. 2.16: μ CT-Bilder anhand des Probekörpers *CT-LD01*

[†]Das Befestigungsloch ist eine durchgehende oder geschlossene Öffnung, die ohne den Ziegel zu beschädigen, durchstoßen werden kann, um den Ziegel mechanisch an der Deckunterlage zu befestigen [37].

[‡]Artefakte sind Bildfehler, die durch die Art der Rekonstruktion (meist gefilterte Rückprojektion) entstehen. Eine Über- oder Unterschätzung von Schwächungskoeffizienten stört die Bildqualität [10, 365 ff.].

Kapitel 3

Ultraschallversuche zur Bestimmung des E-Moduls

Vor der zerstörenden Prüfung der Proben werden anhand von Biegeversuchen Ultraschallmessungen durchgeführt. Neben der Bestimmung des dynamischen E-Moduls können hier auch Querdehnungszahlen ermittelt werden. Aufgrund der beinahe stabähnlichen Probengeometrie werden die Probekörper nur in ihrer Längsrichtung untersucht, da hier aufgrund der größten Abmessung höhere Messgenauigkeiten zu erwarten sind. An den kurzen Seiten der Proben (b , h - vgl. Abb. 2.9 auf Seite 21) können hier weniger aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Die Bedingung zur Trennung der Längenskalen* kann aufgrund der kurzen Seiten nicht mehr eingehalten werden. Da jedoch die Proben längs sowie quer zur Extrusionsrichtung geschnitten wurden, können für zwei Richtungen des Ziegels Steifigkeiten ermittelt werden. Unter Annahme transversal-isotropen Materialverhaltens können somit die Eigenschaften in der isotropen Ebene beschrieben werden. Zur Ermittlung der Steifigkeiten der einzelnen Probekörper wurde somit, aufgrund der alleinigen Messung in Längsrichtung je Probekörper, vereinfachend isotropes, linear elastisches Materialverhalten angenommen. Mithilfe von Glg. (3.1) und Glg. (3.2) können zwei unabhängige Materialkonstanten (E, ν) je Probekörper ermittelt werden. Sie sind abhängig von den Wellengeschwindigkeiten in transversaler und longitudinaler Richtung v_t, v_l , sowie der Dichte ρ des Materials:

$$E = \frac{\rho v_t^2 (3v_l^2 - 4v_t^2)}{v_l^2 - v_t^2} \quad (3.1)$$

$$\nu = \frac{v_l^2 - 2v_t^2}{2(v_l^2 - v_t^2)} \quad (3.2)$$

Abb. 3.1 zeigt die wesentlichen Elemente des Aufbaus der Ultraschallversuche. Sie beinhalten Pulsgeber, Probekörper, Pulsempfänger, Signalverstärker und Oszilloskop. Der Pulsgeber erzeugt Ultraschallsignale, die durch den Probekörper bis zum Pulsempfänger laufen. Mithilfe des Oszilloskops können die empfangenen Signale visualisiert werden. Abb. 3.2 zeigt beispielhaft anhand des Probekörpers *E04-L04* eine solche Visualisierung. Im Bild beschrieben sind jeweils die Ankunft der Longitudinalwellen am Pulsempfänger, die Ankunft der Transversalwellen am Pulsempfänger, sowie deren totale Laufzeiten.

Um das durch den Pulsgeber erzeugte Signal möglichst verlustfrei in den Probekörper und von dort in den Pulsempfänger übertragen zu können, muss ein möglichst vollflächiger Kontakt vorliegen. Dazu muss bei der Probenpräparation darauf geachtet werden, eine möglichst ebene Kontaktfläche zu erreichen. Des Weiteren kann Honig als Kontaktmittel die Übertragung des Ultraschallsignals wesentlich verbessern [28]. Um bei offenporigen Materialien das Eindringen des

*Die Skalentrennungsbedingung nach Kohlhauser [28] besagt, dass das representative Materialvolumen (RVE) beträchtlich größer als die größte Heterogenität und die Wellenlänge beträchtlich größer als das RVE sein muss.

Honigs in den Probekörper zu verhindern, wird der auf die Messköpfe aufgebrachte Honig mit einer Frischhaltefolie vom Probekörper getrennt. Bei der dabei ermittelten Laufzeit handelt es sich somit um die totale Laufzeit t_{tot} zwischen Pulsgeber - Honig - Frischhaltefolie - Probekörper - Frischhaltefolie - Honig - Pulsempfänger. Der Beitrag zur Gesamtlaufzeit des Signals, welcher durch diesen Versuchsaufbau bedingt ist, wird von der Gesamtlaufzeit abgezogen. Dieser Anteil wird anhand eines Aufbaus ohne Probekörper ermittelt. Die Laufzeit des Signals durch Pulsgeber und -empfänger, Honig und Frischhaltefolien beträgt $t_0 = 310$ ns.

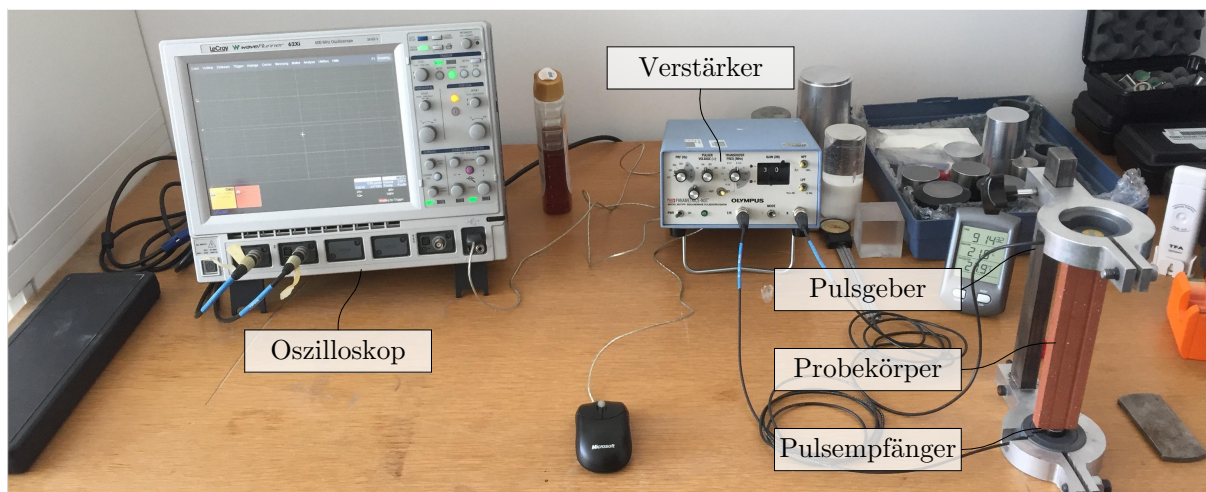


Abb. 3.1: Aufbau und Elemente der Ultraschallversuche

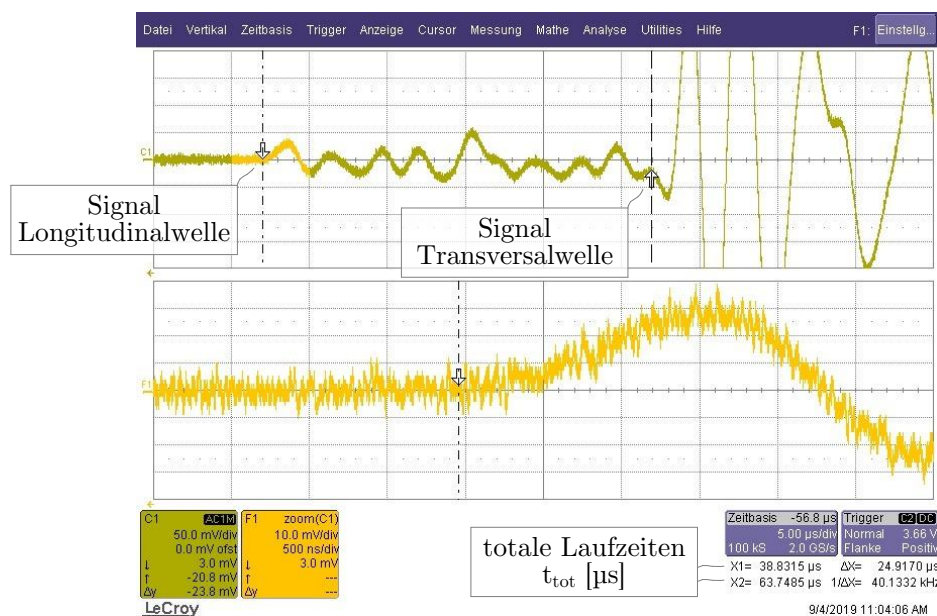


Abb. 3.2: Signalverlauf am Oszilloskop am Beispiel der Probe *E04-L04*

In Tab. 3.1 sind die ermittelten Werte der Messreihen, bestehend aus je 12 Probekörpern, durch das arithmetische Mittel samt Standardabweichung angegeben. Sämtliche Daten sind in Anhang A in Tab. A.1 - A.4, ab Seite 78, gelistet.

Tab. 3.1: Querdehnungszahl und dynamischer E-Modul

Probenreihe	Querdehnungszahl ν [-]	dyn. E-Modul E_{dyn} [N/mm ²]
946 L	0.186 (± 0.014)	21762 (± 175)
984 L	0.191 (± 0.016)	25469 (± 281)
1002 L	0.196 (± 0.014)	31390 (± 209)
1006 L	0.189 (± 0.014)	32439 (± 389)
1032.5 L	0.192 (± 0.013)	37911 (± 423)
1055 L	0.200 (± 0.007)	40612 (± 442)
1086 L	0.196 (± 0.009)	43839 (± 482)
984 Q	0.067 (± 0.008)	22039 (± 691)
1002 Q	0.091 (± 0.002)	28100 (± 1053)
1006 Q	0.088 (± 0.010)	30621 (± 1124)
1032.5 Q	0.112 (± 0.008)	34962 (± 765)

3.1 Korrelationen der ermittelten Materialkonstanten mit der Materialdichte

In Abb. 3.3 ist der dynamische E-Modul in Abhängigkeit der Dichte dargestellt, wobei dieser in Abhängigkeit von der Materialrichtung gegeben ist. Der dynamische E-Modul der Probenreihen in Querrichtung ist zwischen 5,6%–13,5% kleiner als jener in Längsrichtung. Das Diagramm zeigt daher 2 voneinander getrennt betrachtete lineare Korrelationsfunktionen („Probekörper längs“ und „Probekörper quer“), wobei ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0.99$ erreicht wird.

Auch die Zusammenhänge betreffend der Querdehnungszahl und der Dichte zeigen richtungsabhängige Eigenschaften auf. Daher werden sie für die Darstellung in Abb. 3.4a getrennt in „in Extrusionsrichtung“ und „quer zur Extrusionsrichtung“ betrachtet.

Die Querdehnungszahlen der Probenreihen in Längsrichtung weisen, in ihrer Gesamtheit und über alle Brenntemperaturen hinweg, kaum Abhängigkeiten zur Dichte auf. Sie bewegen sich beinahe unabhängig von der Brenntemperatur bei Werten zwischen $\nu = 0.168 - 0.216$. Für die Probenreihen höherer Dichte beziehungsweise höherer Brenntemperatur wird jedoch die Streuung für die Querdehnungszahlen etwas geringer.

Deutliche Unterschiede der gemessenen Querdehnungszahlen zeigen sich allerdings zwischen den mittig aus den Dachziegeln geschnittenen Probekörpern und jenen, die am Rand des Ziegels herausgeschnitten wurden (siehe Abb. 3.4b, vgl. Lage im Ziegel Kap. 2.3, S. 25, Abb. 2.13). Die Probekörper am Rand des Ziegels, bezeichnet mit den Stellen „1, 4“, weisen eine höhere Querdehnungszahl (und Dichte) auf, als jene in der Mitte des Ziegels, bezeichnet mit den Stellen „2, 3“, auf. Mit zunehmender Brenntemperatur ist dieser Unterschied jedoch weniger ausgeprägt. Die Annahme einer abnehmenden Ausprägung anisotropen Materialverhaltens wird bestätigt durch Bourret [8], welche durch Umbildungen der Tonminerale bei höheren Temperaturen erklärt werden kann.

Für die Probekörper, welche quer zur Extrusionsrichtung geschnitten wurden, kann mit ausreichender Genauigkeit eine gute lineare Abhängigkeit zwischen Querdehnungszahl und Dichte angenommen werden. Mit zunehmender Dichte nähern sich die Querdehnungszahlen der Proben quer zur Extrusionsrichtung jenen der Proben der Längsrichtung an. Die Werte sind mit Größenordnungen von $\nu = 0.053 - 0.079$ für Proben der Reihe 984 Q bis $\nu = 0.099 - 0.124$ für Proben der Reihe 1032.5 Q jedoch weitaus geringer, als jene der längsgeschnittenen.

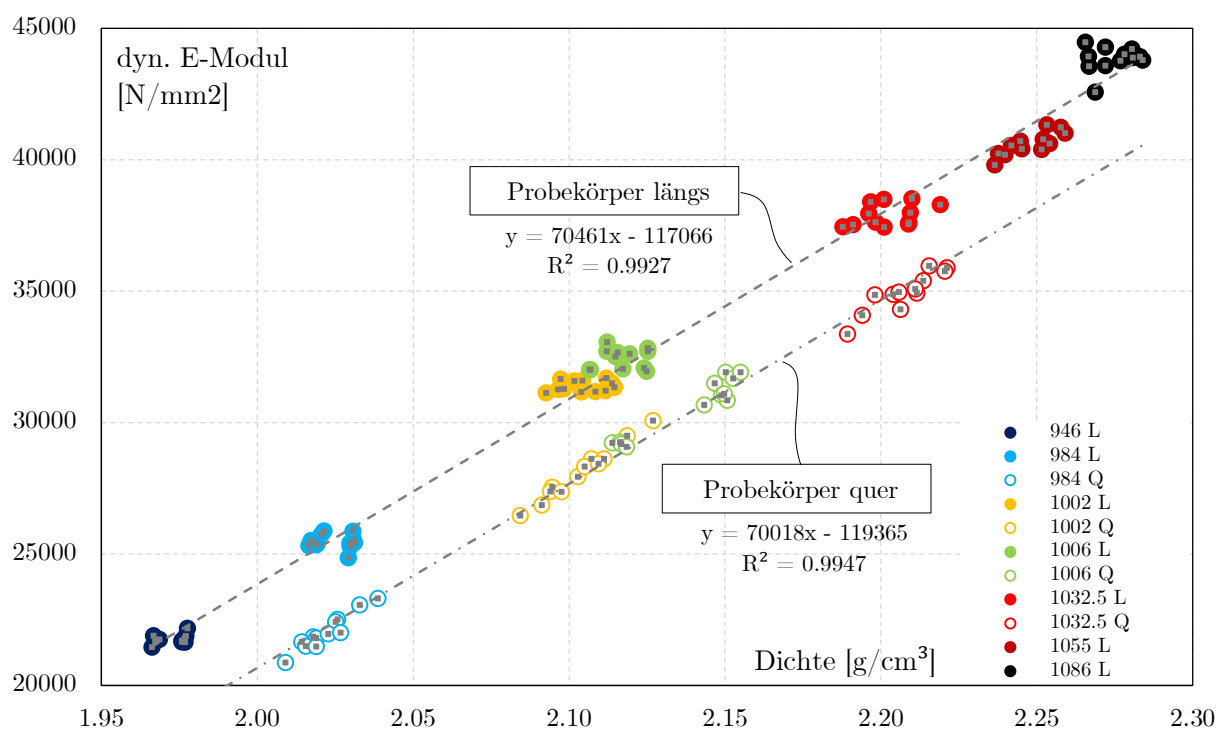
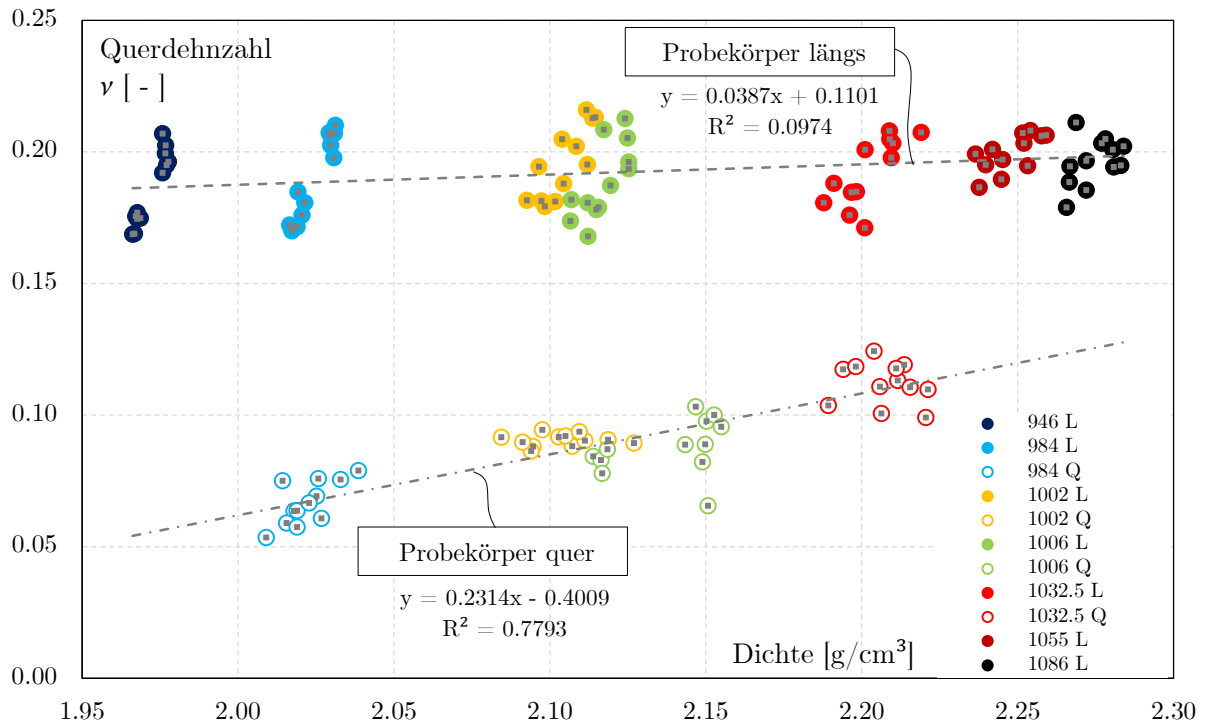
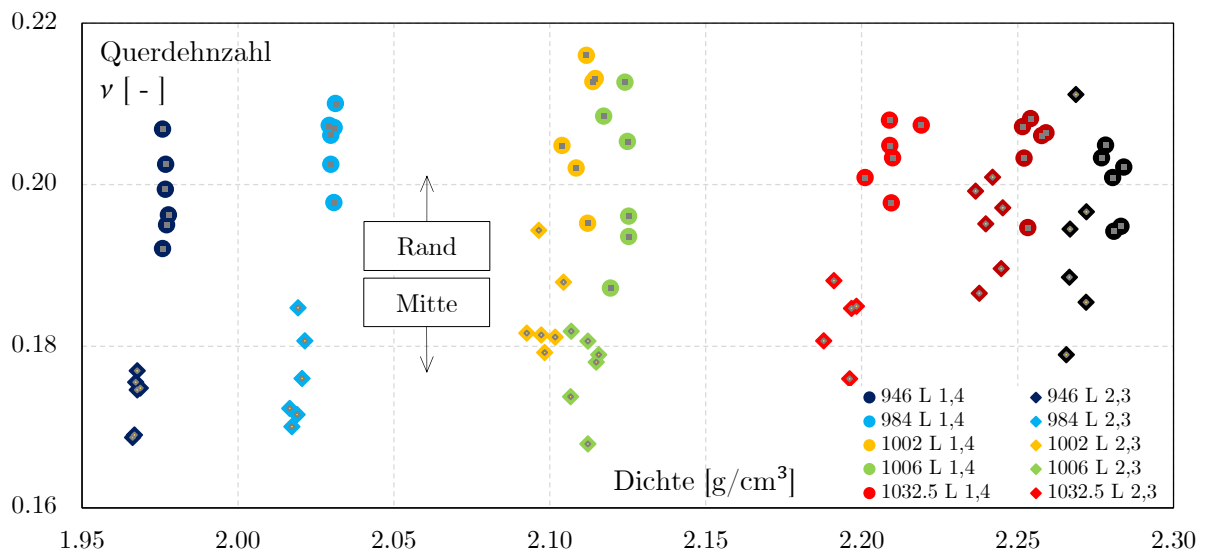


Abb. 3.3: Dynamischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Dichte



(a) Querdehnungszahl in Abhängigkeit von der Dichte



(b) Vergrößerter Ausschnitt der längsgeschnittenen Probekörper

Abb. 3.4: Zusammenhänge der Querdehnungszahlen in Abhängigkeit der Dichte

Kapitel 4

3-Punkt-Biegeversuche zur Bestimmung des E-Moduls und der Biegezugfestigkeit

4.1 Versuchsaufbau

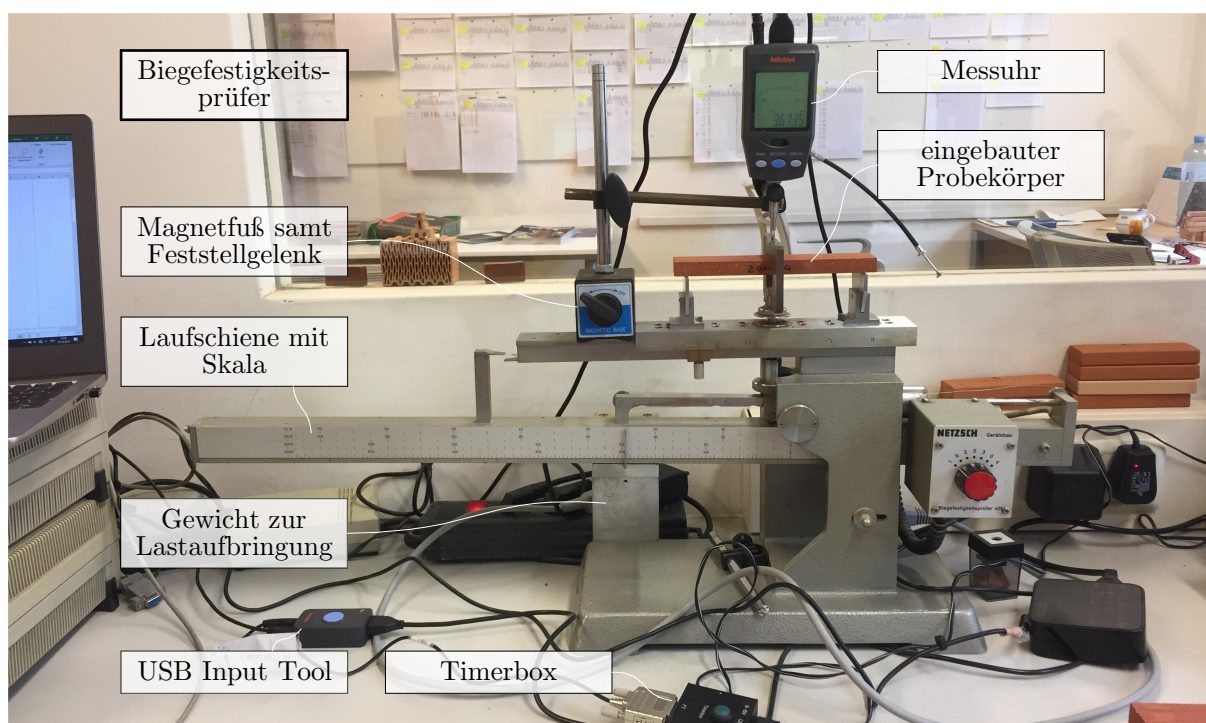


Abb. 4.1: Wesentliche Elemente des Versuchsaufbaus für die 3-Punkt-Biegeversuche

Abb. 4.1 zeigt einen Biegefestigkeitsprüfer, welcher um eine Messuhr erweitert wurde, um neben der Biegefestigkeit auch die Durchbiegung und somit den E-Modul ermitteln zu können. Nachfolgend sind die wesentlichen Elemente des Versuchsaufbaus beschrieben.

Netzsch Biegefestigkeitsprüfer

Die 3-Punkt-Biegeversuche werden an einem Netzsch Biegefestigkeitsprüfer durchgeführt. Er beruht auf dem Prinzip einer Laufgewichtswaage, welche elektronisch angetrieben wird. Das im Bild zu sehende (Gegen-)Gewicht fährt an einer Schiene entlang, was zu einer gleichmäßigen Lastaufbringung in der Mitte des zu prüfenden Probekörpers führt. Für die Versuche wird die am Gerät niedrigst einstellbare Geschwindigkeit der Lastaufbringung mit 4 N/s gewählt.

Statisches System und Einbau der Probekörper

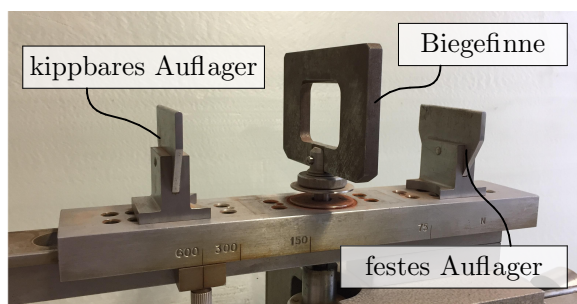
Die Anordnung der austauschbaren Biegeauflager kann am Gerät in 25 mm-Schritten frei gewählt werden. Die maximal einstellbare Prüfkraft liegt bei 600 N. Anhand dieser Vorgaben, sowie der beschränkenden Breite des Rahmens zur Lasteinbringung (siehe *Biegefinne* in Abb. 4.2a), wurde die Probengeometrie gemäß Kap. 2.2.2 gewählt.

Die Längsabmessungen l der zu prüfenden Probekörper betragen somit rund 170 mm, der Auflagerabstand L für die Versuchsdurchführung wird einheitlich mit 150 mm festgelegt.

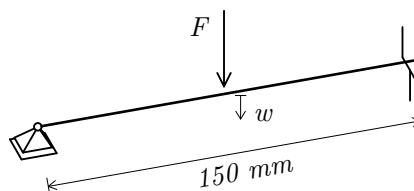
Abb. 4.2a zeigt das System zur Lasteinbringung am Biegefestigkeitsprüfer. Das linke Auflager ist quer kippbar, das rechte Auflager fest. Die Biegefinne, welche zur Lasteintragung dient, ist ein Aluminiumrahmen mit einem Innendurchmesser von 35 mm. Die Probekörper werden innerhalb des Rahmens mit den Kerben nach oben weisend eingebaut. Eine minimale Vorspannung, in Abb. 4.1 erkennbar durch die geneigte Laufschiene, dient dazu, möglichen Verschiebungen oder ungleichmäßigen Lastaufbringungen vorzubeugen. Fährt das Gewicht entlang der Laufschiene, zieht der Rahmen nach unten.

Die gegebene Konstellation entspricht einem statischen System nach Abb. 4.2b mit vertikaler Lasteinleitung in der Mitte des stabähnlichen Probekörpers. Das kippbare Auflager und die quer bewegliche Biegefinne gewähren eine gleichmäßige Kraftübertragung, während das feste Auflager etwaige minimale Torsionsmomente aufnimmt.

Nach Bruch der Probe stoppt die Messung und an der Skala der Laufschiene kann, durch den am Gewicht befestigten Zeiger, die Bruchlast abgelesen werden.



(a) Auflager und Biegefinne



(b) Zugehöriges statisches System

Abb. 4.2: Detail zur Lasteinleitung am Biegefestigkeitsprüfer sowie statisches System zur Berechnung der Steifigkeiten und Bruchspannungen

Erweiterung durch einen digitalen Wegaufnehmer (Messuhr)

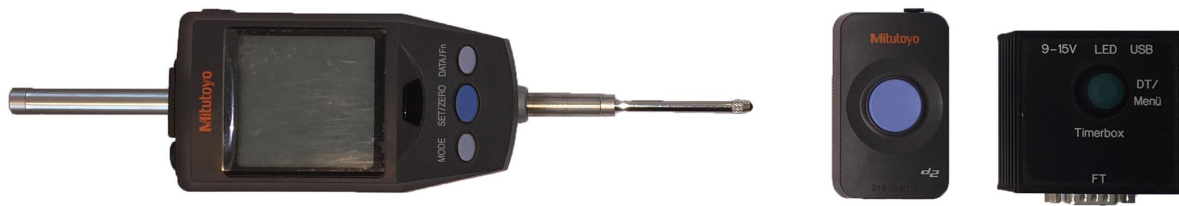
Durch die Erweiterung des Prüfgeräts mit einem digitalen Wegaufnehmer lässt sich die Durchbiegung w in der Mitte des Probekörpers ermitteln. Die digitale Messuhr wird durch einen Magnetfuß samt Feststellgelenk am Biegefestigkeitsprüfer befestigt. Zusätzlich wird die lotrechte Lage der Achse mithilfe eines Kreuzlinienlasers überprüft und gegebenenfalls vor Versuchsdurchführung korrigiert.

Die eingesetzte Messuhr *Mitutoyo Digital Messuhr ID-H, 543-561D* besitzt eine Auflösung von $0.5 \mu\text{m}$ und eine sehr hohe Genauigkeit bei einem maximal zulässigen Anzeigefehler von $\pm 1.5 \mu\text{m}$ [34]. Sie ist in Abb. 4.3a dargestellt.

Datenaufzeichnung mittels Timerbox & USB Input Tool

Weiters wird, dargestellt in Abb. 4.3b, noch folgendes Zubehör zur Datenaufzeichnung beziehungsweise Datenübertragung benötigt:

- Timerbox: Zeichnet den an der Messuhr aufgenommenen Verschiebungsweg im Sekundentakt auf und gibt ihn an das USB Input Tool weiter.
- USB Input Tool: Eingabegerät, durch welches die Daten an den PC übertragen werden. Die erhaltenen Rohdaten können so über eine Software weiter bearbeitet werden.



(a) Digitaler Wegaufnehmer der Fa. Mitutoyo

(b) USB Input Tool & Timerbox

Abb. 4.3: Messeinrichtungen zur Aufnahme des Verschiebungsweges w beim 3-Punkt-Biegeversuch

4.2 Berechnungen zur Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung wird der Verschiebungsweg in mm/s erfasst. Mit Kenntnis der Lastaufbringungsrate von 4 N/s sowie der abgelesenen Bruchlast konnten für sämtliche Proben Lastverschiebungsdiagramme analog zu Abb. 4.4 erstellt werden. Die Kraft-Verschiebungslinien zeigen im Allgemeinen ein deutlich linear elastisches Materialverhalten bis zum Sprödbbruch der Proben, was ein charakteristisches Materialverhalten für Keramiken [45, S. 390] darstellt. Unebenheiten an den Probekörpern können, insbesondere in der ersten Hälfte des Versuches, zu Lastumlagerungen und somit zu lokalen Unstetigkeiten beziehungsweise Knicken in den Last-Verschiebungslinien führen. Für die Berechnung des E-Moduls in Abschnitt 4.2.3 wird daher das letzte Drittel im Last-Verschiebungsdiagramm, mit den Kraft- sowie Verschiebungsdifferenzen ΔF und Δw , herangezogen. Im Diagramm ist weiters die Bruchlast und die zugehörige maximale Durchbiegung in der Mitte des Probekörpers dargestellt.

Nach dem Bruch der Probekörper wurden mittels Messschieber die Abmessungen am Bruchquerschnitt sämtlicher Proben aufgenommen. Sie dienen zur Berechnung der Querschnittswerte. Dabei wird zwischen den längs- und quergeschnittenen Proben unterschieden, da sie (an der Bruchstelle) unterschiedliche Querschnittsformen aufweisen. Die aufgenommenen Abmessungen am Bruchquerschnitt sind nachfolgend aufgelistet und in Abb. 4.5b dargestellt.

- Höhen am Rand: h_1, h_4
- Querschnittsbreite: b
- Höhen unterhalb der Kerben der längsgeschnittenen Querschnitte: $h_{2,L}, h_{3,L}$
- Breiten der Kerben der längsgeschnittenen Probekörper: $b_{EU,1}, b_{EU,2}$

- Höhen am Rand (bei Bruch in der Kerbe) bei querschnittenen Probekörpern: $h_{2,Q}$, $h_{3,Q}$

Abb. 4.5 zeigt die Querschnittsgeometrie an der Bruchstelle des Probekörpers sowie ihre idealisierte Form zur Berechnung. Die nachfolgenden Berechnungsschritte in Kap. 4.2.1-3 dienen der Ermittlung des E-Moduls sowie der Biegezugfestigkeit und werden getrennt nach der Richtung der Probekörper betrachtet.

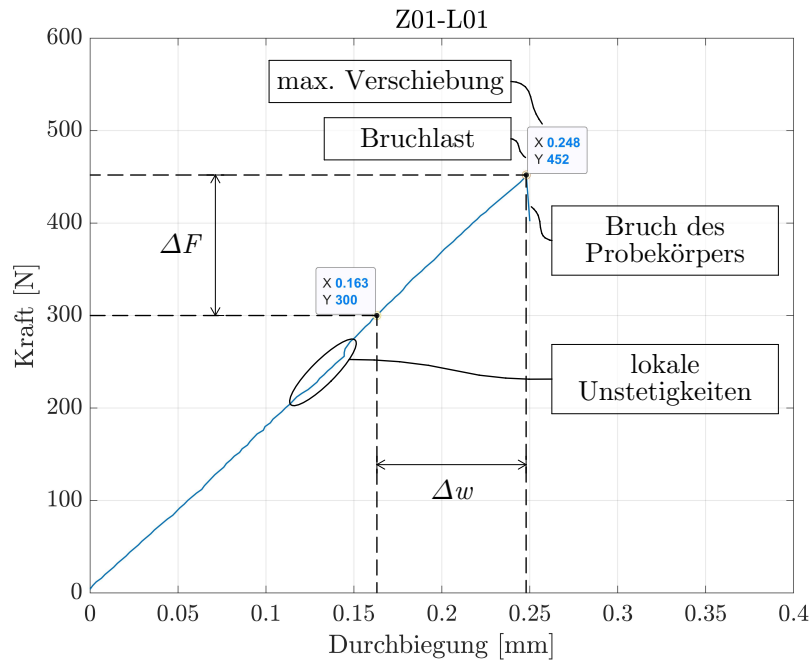


Abb. 4.4: Last-Verschiebungsdiagramm am Beispiel des Probekörpers Z01-L01.

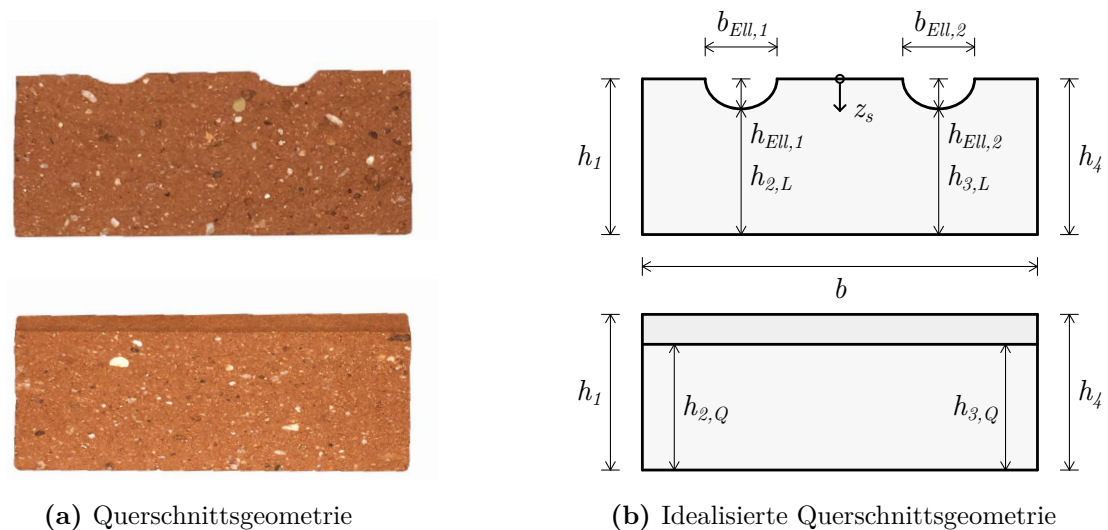


Abb. 4.5: Querschnittsgeometrien der Probekörper an der Bruchstelle und deren Bezeichnungen. Oben: in Längsrichtung des Ziegelscherbens geschnittene Probekörper. Unten: in Querrichtung des Ziegelscherbens geschnittene Probekörper.

4.2.1 Bruchspannung und Querschnittswerte der längsgeschnittenen Ziegelproben

Der Ermittlung der Querschnittswerte liegt die Annahme eines idealisierten Querschnitts nach Abb. 4.5b (oben) zugrunde. Dabei bleiben mögliche Einflüsse aus Asymmetrien, wie eine Verdrehung der Hauptträgheitsachsen, unberücksichtigt. Weiters werden die zwei Einkerbungen durch halbe Ellipsen approximiert.

Die mittlere Höhe des Probekörpers h ergibt sich zu:

$$h = \frac{h_1 + h_4}{2}. \quad (4.1)$$

Für die Berechnung der halben Ellipsenhöhen folgt somit:

$$h_{EU,1} = \frac{h_1 + h_4}{2} - h_{2,L} = h - h_{2,L}, \quad h_{EU,2} = \frac{h_1 + h_4}{2} - h_{3,L} = h - h_{3,L}. \quad (4.2)$$

Trägheitsmomente von Rechteck und Ellipsen, auf die Oberkante des Querschnitts (z^* : $z = 0$) bezogen, lauten:

$$I_{y,Rechteck}^* = \frac{b \cdot h^3}{3}. \quad (4.3)$$

$$I_{y,Ellipse,1}^* = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{b_{EU,1}}{2} \cdot h^3, \quad I_{y,Ellipse,2}^* = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{b_{EU,2}}{2} \cdot h^3. \quad (4.4)$$

Damit lautet das gesamte Trägheitsmoment um die Bezugsachse:

$$I^* = I_{y,Rechteck}^* - I_{y,Ellipse,1}^* - I_{y,Ellipse,2}^*, \quad (4.5)$$

Zur Berechnung des Steiner-Anteils bezogen auf die Trägheitshauptachsen wird der Schwerpunkt wie folgt ermittelt:

$$z_s = \left[\frac{h}{2} \cdot b \cdot h - \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot h_{EU,1} \cdot \pi \cdot \frac{h_{EU,1} \cdot b_{EU,1}}{4} - \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot h_{EU,2} \cdot \pi \cdot \frac{h_{EU,2} \cdot b_{EU,2}}{4} \right] / \left[b \cdot h - \pi \cdot \frac{h_{EU,1} \cdot b_{EU,1}}{4} - \pi \cdot \frac{h_{EU,2} \cdot b_{EU,2}}{4} \right]. \quad (4.6)$$

Das Gesamtträgheitsmoment I_y bezogen auf die Hauptachsen lautet:

$$I_y = I^* - z_s^2 \cdot A_{ges}. \quad (4.7)$$

Die Proben werden mit den Kerben nach oben eingebaut. Ihre Biegezugfestigkeit σ_b ergibt sich mit der Bruchlast F_b und des Auflagerabstandes L wie folgt:

$$\sigma_b = \frac{F_b \cdot L}{4 \cdot I_y} \cdot (h - z_s). \quad (4.8)$$

4.2.2 Bruchspannung und Querschnittswerte der quergeschnittenen Ziegelproben

Die quer ausgerichteten Kerben der Probekörper haben einen Einfluss auf die Durchbiegung und den Bruchmechanismus (vgl. nachfolgend Kap. 4.3.1) der Proben. Die komplexe Geometrie gestaltet daher die Ermittlung von Querschnittswerten und somit die Berechnung der Steifigkeiten schwierig.

Der Bruch der Proben erfolgt im Versuch entweder in der Mitte oder in der nächstgelegenen Kerbe des untersuchten Probekörpers, wie Abb. 4.6a und Abb. 4.8b verdeutlichen. Deswegen werden, wie oben beschrieben, die Höhen in der Mitte h_1 , h_4 sowie jene in der Kerbe $h_{2,Q}$, $h_{3,Q}$ aufgenommen.

Ihre mittleren Höhen ergeben sich zu:

$$h_{min} = \frac{h_{2,Q} + h_{3,Q}}{2}, \quad h_{max} = \frac{h_1 + h_4}{2}. \quad (4.9)$$

Die Berechnung der Bruchspannung beziehungsweise der Biegezugfestigkeit σ_b erfolgt anhand der tatsächlichen, gemittelten Höhe am Bruchquerschnitt mit h_{min} oder h_{max} aus Glg. (4.9):

$$\sigma_b = \frac{M}{I} \cdot z = \frac{F_b \cdot L^3}{\frac{b \cdot h^2}{6}}. \quad (4.10)$$

Gleichung (4.10) gilt dabei streng genommen nur für Querschnitte mit konstanten Querschnittsabmessungen (bzw. konstanten Trägheits- respektive Widerstandsmomenten). Da eine solche aufgrund der quer zur Querschnittsachse verlaufenden Kerben allerdings nicht gegeben ist, wird zur Berechnung des Trägheitsmoments eine effektive Höhe des Querschnitts errechnet, wobei die Höhen h_{min} und h_{max} Grenzwerte darstellen.

Aus h_{min} ergibt sich ein unterer, aus h_{max} ein oberer Grenzwert für das Trägheitsmoment:

$$I_{min} = \frac{b \cdot h_{min}^3}{12}, \quad I_{max} = \frac{b \cdot h_{max}^3}{12}. \quad (4.11)$$

Ein effektives Trägheitsmoment I_{eff} muss, genauso wie der gesuchte E-Modul E_{ges} , zwischen diesen Werten liegen:

$$I_{min} < I_{eff} < I_{max} \quad \rightarrow \quad E_{max} > E_{ges} > E_{min}. \quad (4.12)$$

Um eine systematische und konsequente Vorgehensweise zur Ermittlung der E-Module aller quergeschnittenen Proben zu ermöglichen, wird eine effektive Höhe h_{eff} eingeführt, mit welcher die Probekörper als Quader approximiert werden. Sie ist in Abb. 4.6b dargestellt und liegt ebenso zwischen h_{min} und h_{max} :

$$h_{min} < h_{eff} < h_{max}. \quad (4.13)$$

Für die Ermittlung einer zur Berechnung notwendigen effektiven Höhe h_{eff} werden zwei Ansätze verfolgt:

1. Die FE-Modellierung eines Probekörpers bei bekannter Verschiebung und Bruchlast führt direkt zum gesuchten E-Modul des nachmodellierten Körpers.
2. Aus den Daten der Ultraschallversuche kann das Verhältnis der dynamischen E-Module E_{dyn} in Längs- und in Querrichtung miteinander verglichen werden. Mit der Überlegung,

dass die E-Module der Biegeversuche E_{stat} in einem ähnlichen Verhältnis zueinander stehen müssen, kann aus ihnen auf die statischen E-Module der quergeschnittenen Probekörper geschlossen werden.

Abb. 4.7 zeigt einen der Probe $C01-L01$ exakt nachmodellierten Körper. Mithilfe der bekannten Bruchlast und der Maximalverschiebung (den Last-Verschiebungsdiagrammen aus Anhang A.2 zu entnehmen) wird der E-Modul direkt ermittelt. Tab. 4.1 verdeutlicht die Unterschiede der dynamischen E-Module längs- sowie quergeschnittener Probekörper aus Kap. 3.

Aus beiden Betrachtungen geht hervor, dass die E-Module der quergeschnittenen Proben in etwa 90 % der längsgeschnittenen beträgt. Legt man die Beobachtungen aus den E-Modulen mittels eines Korrekturfaktors ρ auf die effektive Höhe h_{eff} um, so ergibt sie sich wie folgt:

$$h_{eff} = \rho \cdot h_{max} \quad \text{mit} \quad \rho = 0.93 - 0.96, \quad (4.14)$$

und das effektive Trägheitsmoment wird berechnet durch:

$$I_{eff} = \frac{b \cdot h_{eff}^3}{12}. \quad (4.15)$$

4.2.3 Berechnung des statischen E-Moduls

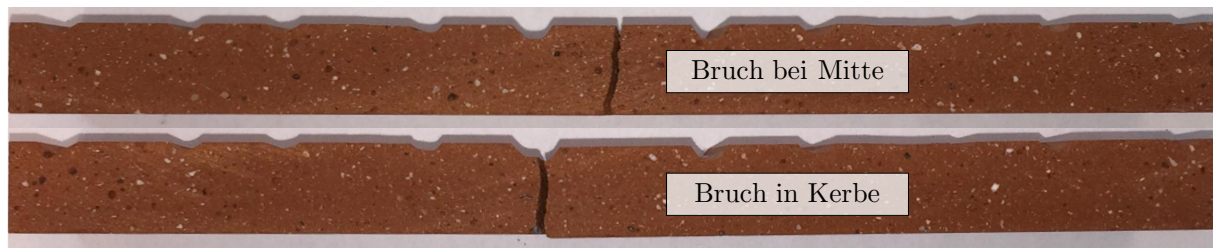
Mit den aus Kap. 4.2.1 und Kap. 4.2.2 erhaltenen Querschnittswerten kann schließlich der E-Modul bestimmt werden. Anhand des Kraft-Verschiebungs-Diagramms wird jeweils das oberste Drittel des linear-elastischen Bereichs zur Berechnung des E-Moduls herangezogen, wie Abb. 4.4 auf S. 38 anhand der Kraftdifferenz ΔF und der Verschiebungsdifferenz Δw verdeutlicht.

Der E-Modul ergibt sich für die längsgeschnittenen Proben zu:

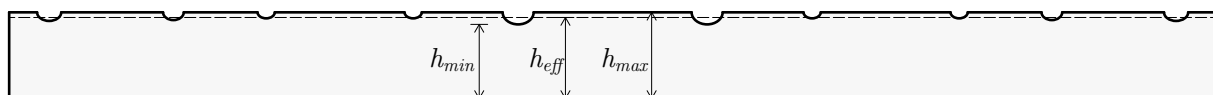
$$E_{stat,längs} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta w}, \quad (4.16)$$

und für die quergeschnittenen Proben zu:

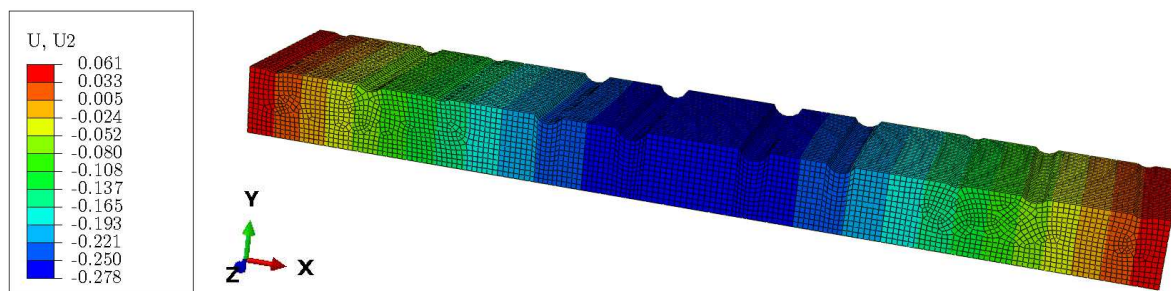
$$E_{stat,quer} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I_{eff} \cdot \Delta w}. \quad (4.17)$$



(a) Bruch in der Mitte sowie Bruch in der Kerbe des Probekörpers



(b) Effektive Höhe zur Ermittlung des Trägheitsmoments

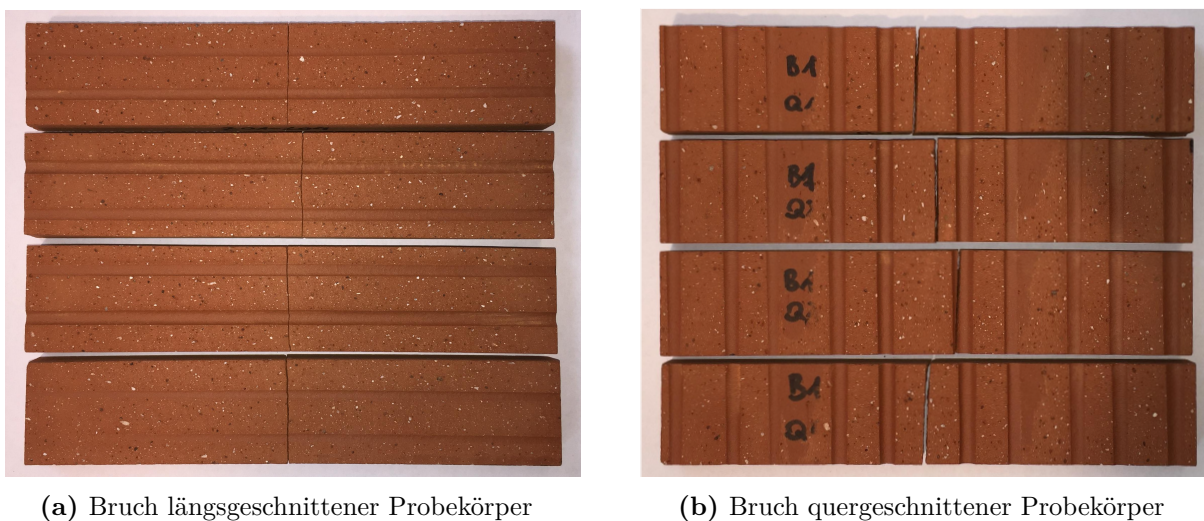
Abb. 4.6: Seitenansicht quergeschnittener Probekörper: Ermittlung der effektiven Höhe h_{eff} **Abb. 4.7:** FE-Modell des Probekörpers *C01-Q01* zur Bestimmung des E-Moduls. Dargestellt ist die Durchbiegung des Probekörpers.**Tab. 4.1:** Verhältnis der dynamischen E-Module aus den Ultraschallmessungen

Proben längs	E_{dyn} [N/mm ²]	Proben quer	E_{dyn} [N/mm ²]	$E_{quer}/E_{längs}$ [%]
984 L	25469 (±281)	984 Q	22039 (±691)	86.5
1002 L	31390 (±209)	1002 Q	28100 (±1053)	89.5
1006 L	32439 (±389)	1006 Q	30621 (±1124)	94.4
1032.5 L	37911 (±423)	1032.5 Q	34962 (±765)	92.2

4.3 Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche

4.3.1 Charakterisierung des Materialverhaltens.

Die Probekörper zeigen im Zuge der Biegeversuche ausgeprägte Sprödbrüche ohne Vorankündigung, was sich auch in den Last-Verschiebungsdiagrammen (vgl. Anhang A.2) durch deutlich linear-elastisches Materialverhalten äußert. Der Bruch der längsgeschnittenen Probekörper erfolgt meist in unmittelbarer Nähe der Lasteinleitung und verläuft nahezu parallel und lotrecht zu ihr, siehe Abb. 4.8a. Bei den quergeschnittenen Proben führt der an den Kerben bestehende schlankere Querschnitt oftmals zum Versagen. 54% der Proben brechen in, beziehungsweise unmittelbar neben den Kerben, beispielhaft zu erkennen anhand der dritten Probe in Abb. 4.8b, sowie in Abb. 4.6a.



(a) Bruch längsgeschnittener Probekörper

(b) Bruch quergeschnittener Probekörper

Abb. 4.8: Zerstörte Probekörper nach den 3-Punkt-Biegeversuchen

4.3.2 Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche

In Tab. 4.2 sind die ermittelten Festigkeiten σ_b und Steifigkeiten E_{stat} der Reihen, bestehend aus je 12 Probekörpern, durch das arithmetische Mittel samt deren Standardabweichung angegeben. Sämtliche Daten, sowie die Last-Verschiebungsdiagramme, sind in Anhang A, ab Seite 78, zusammengefasst.

Mit zunehmender Brenntemperatur steigen die Steifigkeiten E_{stat} und die Bruchspannungen σ_b konsistent an. Einzige Ausnahme bildet die Probenreihe 1086 L, welche aufgrund der ungeschliffenen Oberflächen weit gestreute Daten liefert, siehe Tab. 4.2. Die Daten der quergeschnittenen Probekörper liegen durchgehend unterhalb jenen der längsgeschnittenen und zeigen aufgrund ihrer Geometrie höhere Abweichungen.

Anm.: Die berechneten Steifigkeiten wurden vor der Versuchsauswertung anhand ausgewählter Referenzmaterialien wie Stahl- oder Aluminiumproben überprüft.

Tab. 4.2: Bruchspannung und statischer E-Modul

Probenreihe	σ_b [N/mm ²]	E_{stat} [N/mm ²]
946 L	14.69 (± 0.79)	16151 (± 454)
984 L	16.68 (± 0.95)	18250 (± 321)
1002 L	18.64 (± 1.19)	23517 (± 787)
1006 L	20.16 (± 0.66)	24167 (± 772)
1032.5 L	21.67 (± 1.12)	28108 (± 616)
1055 L	22.86 (± 0.88)	30618 (± 599)
1086 L*	21.99 (± 1.04)	29049 (± 2017)*
984 Q	13.48 (± 2.39)	16614 (± 755)
1002 Q	17.33 (± 3.21)	21422 (± 1058)
1006 Q	18.84 (± 2.30)	22031 (± 1105)
1032.5 Q	21.58 (± 4.12)	25648 (± 1730)

*ungeschliffene Probekörper

4.3.3 Zusammenhang zwischen Dichte und statischem E-Modul

Wie für die E-Module aus den Ultraschallversuchen (vgl. Abb. 3.3 auf Seite 33) sind auch für die E-Module aus den Biegeversuchen lineare Zusammenhänge zur Dichte gegeben. Es werden die Probekörper längs zur Extrusionsrichtung und jene quer zur Extrusionsrichtung getrennt voneinander betrachtet. Bei Beurteilung der in Querrichtung geschnittenen Probekörper muss jedoch beachtet werden, dass die Berechnung der E-Module auf Grundlage der Verhältnisse der Ultraschallversuche beruhen (siehe Kap. 4.2.2).

Abb. 4.9 zeigt für die längsgerichteten Probekörper eine sehr gute Approximation der Versuchsergebnisse bei einer linearen Korrelationsfunktion (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.9852$). Die Probekörper der Reihe 1086 L werden dabei nicht berücksichtigt, da sie aufgrund ihrer Präparation hohe Streuungen zeigen, wie bereits oben erläutert.

Weniger genau bildet eine lineare Korrelationsfunktion die Messdaten der quergerichteten Proben ab (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.9192$), was sich auch durch die komplexe Geometrie und damit höhere Streuung der E-Module erklären lässt.

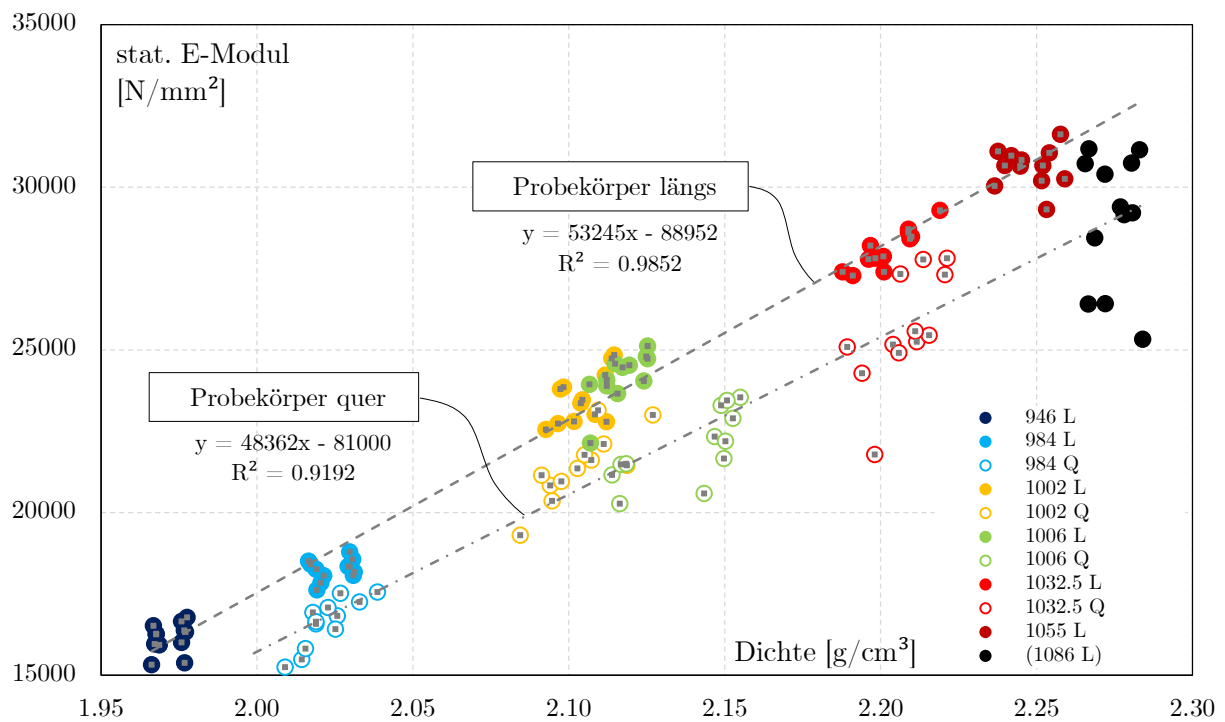


Abb. 4.9: Statischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Dichte

Kapitel 5

Biegeversuche an Dachziegeln

Zur Verifizierung der Ergebnisse der Versuchsreihen an den präparierten Probekörpern aus Kap. 4 und den Finite Elemente Simulationen aus Kap. 6 kommen auch für ganze Ziegel Biegeversuche zur Anwendung. Sie werden nicht weiter präpariert und ähnlich den gängigen Prüfmethoden nach *ÖNORM EN 1304* [37] und *ÖNORM EN 538* [38] im Werk der Fa. Wienerberger in Gleinstätten untersucht. Die Prüfung umfasst, wie bereits in Kap. 2.2.3 beschrieben, nachfolgende Dachziegel:

- 25 Taschenziegel des Werkbrandes bei 1006 °C
- 18 im Labor gebrannte Taschenziegel verschiedener Brenntemperaturen
- 25 Landdach Verschiebeziegel des Werkbrandes von 1008 °C–1022 °C

Neben den Versuchen zur Ermittlung der Biegefestigkeit und des E-Moduls wird, im Sinne einer umfangreichen Materialcharakterisierung, auch die Dichte und die Wasseraufnahmefähigkeit der Ziegel ermittelt. Die Daten sind in Anhang B ab Seite 115 zusammengestellt.

5.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen kommt ein Mehrzweck-Lastrahmen der Fa. *Toni Technik Baustoffprüf-systeme* für die Prüfung der Biegezugfestigkeit von Platten, Balken, Normalsteinen, Dachziegeln, etc. zur Verwendung. Er wird jährlich gemäß *ÖNORM EN ISO 7500-1* kalibriert und besitzt eine Genauigkeit der Klasse 1 [40]. Der Lastrahmen für die Biegeversuche samt der Erweiterung mit einem digitalen Wegaufnehmer ist in Abb. 5.1 abgebildet.

Der Abstand der Auflager für die Ziegel ist nach *EN 538* [38] mit $\frac{2}{3}$ der Länge der Ziegel zu wählen. Für die Versuchsdurchführung wurde somit der Achsabstand der Auflager einheitlich über alle Messreihen mit 270 mm festgelegt. Auch bei der Prüfung ganzer Ziegel verfügt der Prüfrahm über ein kippbares sowie ein festes Auflager (siehe Abb. 5.1a), das statische System gleicht somit jenem aus Kap. 4, Abb. 4.2b. Die zu prüfenden Ziegel werden in gleichem Abstand und an gleicher Stelle auf die Auflager positioniert. Für die Taschenziegel erfolgt die Position am rechten Auflager unmittelbar nach den Einhängenasen. Die Landdach-Verschiebeziegel werden mittig aufgelegt.

Weitere wesentliche Elemente des Versuchsaufbaus sind die zur Krafteinleitung notwendigen Aufsätze, Profilbeilagen aus Hartplastik, welche in der Mitte gelenkig am Lastrahmen befestigt sind. An ihnen befindet sich außerdem ein Gummistreifen zur gleichmäßigen Lastübertragung beziehungsweise zur Vermeidung von Spannungsspitzen durch die rauen Oberflächen der Ziegel. Bei Start des Versuches bewegt sich die Auflagerkonstruktion mittels einer Hydraulikpresse nach oben. Die Lastaufbringungsrate ab Kontakt zur Profilbeilage beträgt dabei 50 N/s.

Zur Erstellung von Last-Verschiebungsdiagrammen, welche der Berechnung des E-Moduls dienen, wird der Versuchsaufbau durch einen digitalen Wegaufnehmer, analog zu Kap. 4, erweitert.

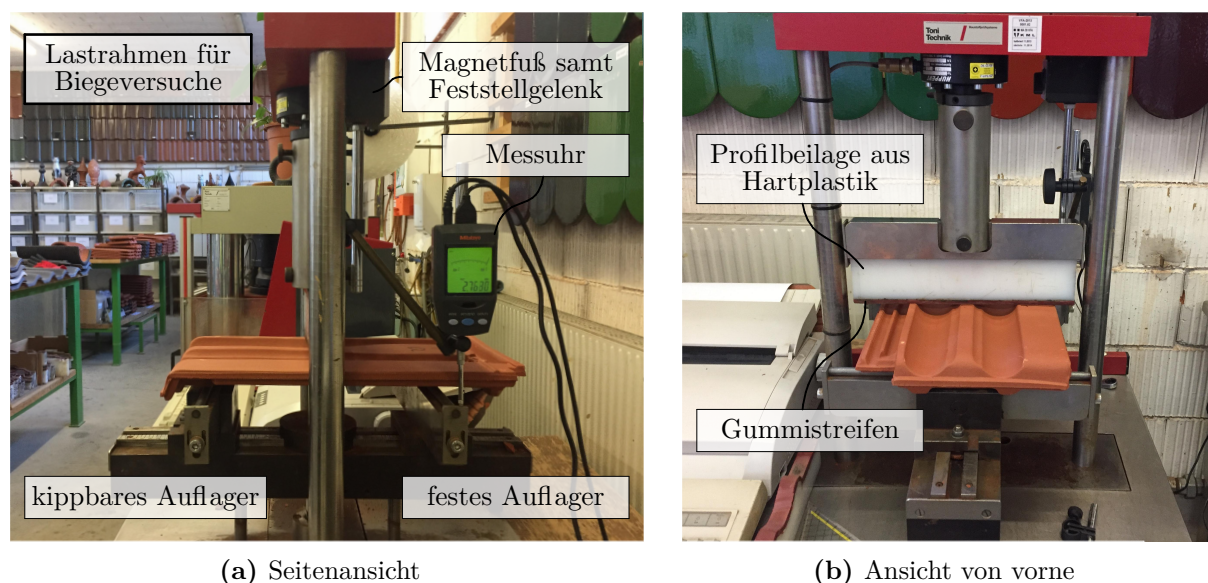
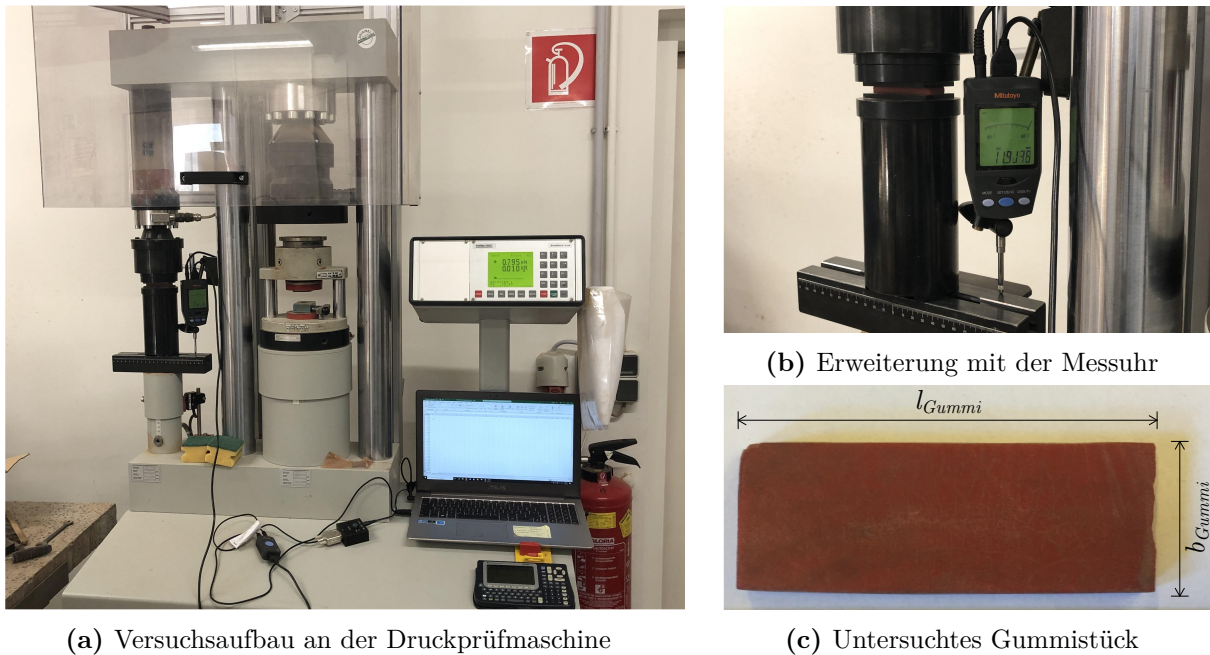


Abb. 5.1: Versuchsaufbau für die 3-Punkt-Biegeversuche der ganzen Ziegel

Dazu ist die Messuhr mittels einem Magnetfuß und einem Feststellgelenk an der Oberseite des Lastrahmens befestigt. Die Auflager werden nach oben gefahren und durch die Messuhr wird die Verschiebung des festen Auflagers in vertikaler Richtung gemessen, was der Durchbiegung in der Mitte des Ziegels entspricht. Durch die Aufzeichnung der Daten durch die Timerbox und dem USB-Input-Tool (vgl. Abb. 4.3b, S. 37) wird die Verschiebung im Sekundentakt in [mm/s] an den PC weitergeleitet. Am Prüfgerät wird zudem die Bruchlast mit einer Genauigkeit von 10 N angezeigt. Ausgehend von der Bruchlast und der Maximalverschiebung können durch die sekundenweise Aufzeichnung der Daten Last-Verschiebungsdiagramme ausgegeben werden.

5.2 Verfälschung des Verschiebungsweges durch die Gummistreifen

Der gemessene Verschiebungsweg des Biegeversuchs wird durch den Gummistreifen, welcher sich an der Unterseite der Beilagen befindet, verfälscht beziehungsweise vergrößert. Das Hartplastik der Beilage trägt wegen seiner großen Dehnsteifigkeit keinen Anteil zur Verschiebung bei. Die erhaltenen Daten müssen um den Anteil des Gummis auf die Verschiebung korrigiert werden. Gummi zeigt grundsätzlich ein nichtlinear elastisches Materialverhalten. Da die genaue Materialzusammensetzung des Gummis nicht bekannt ist und das Alter sowie die Abnutzung große Veränderungen in den Materialeigenschaften hervorrufen können, sind etwaige Kennwerte aus der Literatur für Steifigkeitsaussagen zum vorliegenden Problem nur bedingt brauchbar. Eine einfache Möglichkeit, um das tatsächliche Materialverhalten des Gummis bestmöglich abzubilden, besteht in der Prüfung durch eine Druckprüfmaschine, zu sehen in Abb. 5.2a. Die Durchführung findet im Labor in Hennersdorf an einer Prüfmaschine der Fa. *FORM+TEST Seidner & Co.* statt. Analog zu den vorangegangenen Vorgehensweisen wird auch hier die Druckprüfmaschine mit dem digitalen Wegaufnehmer, gemäß Abb. 5.2b, erweitert. Es wurde ein entsprechendes Materialstück entnommen, welches in etwa dem Alter des an den Beilagen aufgeklebten Gummis entspricht (siehe Abb. 5.2c). Seine Dimensionen betragen $L/B/H = 55,40/20,46/6,53$ mm. Mithilfe der erhaltenen Ergebnisse kann der Anteil des Gummis am Verschiebungsweg nach Kapitel 5.3 herausgerechnet werden.



(a) Versuchsaufbau an der Druckprüfmaschine

(b) Erweiterung mit der Messuhr

(c) Untersuchtes Gummistück

Abb. 5.2: Prüfung des Gummis mittels einer Druckprüfmaschine der Fa. *FORM+TEST Seidner & Co.*

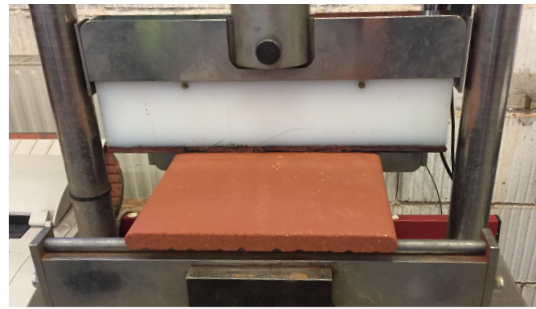
5.3 Versuche am Taschenziegel

In Abb. 5.3a ist die Durchführung der Prüfung eines Taschenziegels zu sehen. Neben der Ermittlung der Bruchlast und des Verschiebungsweges wird für jeden Taschenziegel die Breite in der Mitte b_{Mitte} , sowie die Höhe in der Mitte des Ziegels h_{Mitte} aufgenommen. Die 25 Taschenziegel des Werksbrandes unterscheiden sich in ihren Abmessungen nur sehr geringfügig voneinander. Für sie erfolgt die Berechnung des Trägheitsmoments und des Schwerpunktabstands an einem idealisierten Querschnitt gemäß Abb. 5.3b. Dafür wurden einmalig die genauen Geometrieabmessungen samt den darin enthaltenen Kerben eines der Reihe entnommenen Taschenziegels aufgenommen. Die Querschnittswerte werden dann mit der frei verfügbaren Software *INCA 2* ermittelt. Für die 18 im Labor gebrannten Taschenziegel wird die Geometrie mit einem Faktor entsprechend ihren tatsächlichen Abmessungen in y- und z-Richtung, bezogen auf b_{Mitte} und h_{Mitte} , angepasst. Sie zeigen aufgrund der unterschiedlichen Brenntemperaturen verschiedene Schwindmaße und somit deutlichere Differenzen in ihrer Querschnittsgeometrie.

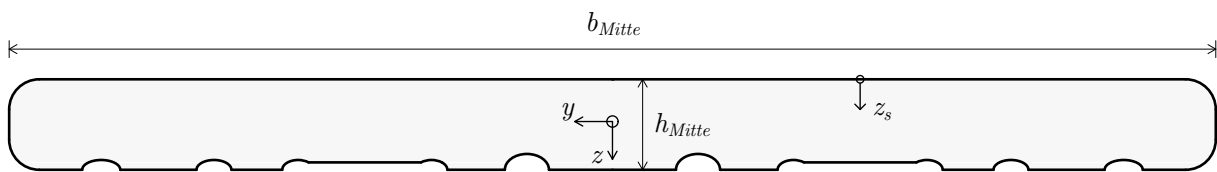
Die Taschen zeigen ebenso wie die präparierten Probekörper ein sprödes Materialverhalten. Die Bruchspannung beziehungsweise Biegezugfestigkeit σ_b ergibt sich analog zu Gleichung (4.8) mit der auftretenden Zugspannung an der Unterseite gemäß Abb. 5.3b mit:

$$\sigma_b = \frac{P \cdot L}{4 \cdot I} \cdot (h_{Mitte} - z_s) \quad (5.1)$$

Für die Berechnung des E-Moduls muss noch der Verschiebungsweg korrigiert werden. Die Korrektur wurde für die Taschenziegel dabei wie folgt vorgenommen: Die gemessenen Gesamtverschiebungen w_{Gesamt} bestehen aus einem Anteil der Stauchung des Gummis w_{Gummi} und



(a) Taschenziegel im Biegeversuch



(b) Idealisierter Querschnitt eines Taschenziegels

Abb. 5.3: Biegeprüfung des Taschenziegels sowie Idealisierung zur Berechnung der Querschnittswerte

einem Anteil der tatsächlichen Durchbiegung des Taschenziegels w_{Tasche} . Der gesuchte Anteil der Tasche errechnet sich dann zu:

$$w_{Tasche} = w_{Gesamt} - w_{Gummi} \quad (5.2)$$

In Abb. 5.4a sind dazu die interpolierten Linien der Ergebnisse aus dem Biegeversuch und der Druckprüfung zu sehen. Die farblich grün dargestellte Kraft-Verschiebungs-Linie zeigt die erhaltenen Daten - welche der Gesamtverschiebung zugrunde liegen - beispielhaft anhand des Taschenziegels Nr. 10. Die rote Linie zeigt die Ergebnisse aus der Druckprüfung (DP) des Gummistücks (Gu). Dazu wurde die tatsächliche an der Druckprüfmaschine erhaltene Last $F_{Gu,DP}$ entsprechend dem Verhältnis der Auflageflächen des Gummis gemäß Glg. (5.3) skaliert. Die Länge des Gummis aus der Druckprüfung beträgt 55,40 mm, die tatsächliche Auflagebreite beim Biegeversuch etwa 180 mm. Die Breite mit 20,46 mm ist bei beiden Versuchen dieselbe. Setzt man ein gleiches Materialverhalten des Gummis unabhängig seiner Länge für die Biegeversuche (BV) voraus, so erhält man eine Last $F_{Gu,sk}$, die der Prüfung an den Biegeversuchen zugeordnet werden kann:

$$F_{Gu,sk} = F_{Gu,DP} \cdot \frac{A_{Gu,BV}}{A_{Gu,DP}} \quad (5.3)$$

Die in Abb. 5.4a zu sehende blaue Linie zeigt dann den nach Glg. (5.2) und Glg. (5.3) korrigierten Last-Verschiebungsweg, welcher auch in Abb. 5.4b dargestellt ist. Sämtliche in Anhang B befindlichen Last-Verschiebungsdiagramme der Taschenziegel wurden anhand dieser Vorgehensweise ausgewertet. Die Diagramme zeigen einen meist linear elastischen Bereich bis zum Bruch der Ziegel. In Abb. 5.4b ist zudem ein Knick im Anfangsbereich der blau dargestellten Kraft-Verschiebungs-Linie zu erkennen. Er ist der unscharfen Messung bei Beginn der Lastauftragung, sowohl am Lastrahmen als auch an der Druckprüfmaschine, geschuldet. Er hat jedoch, aufgrund der Rückrechnung von der Bruchlast und des Verschiebungswegs, keine Auswirkungen auf die weiteren Berechnungen.

Der E-Modul ergibt sich analog zu Gleichung (4.16) aus Kap. 4.2.3. Die Differenzen ΔF

und Δw nehmen erneut Bezug auf das obere Drittel der, in diesem Fall korrigierten, Last-Verschiebungsdiagramme nach Abb. 5.4b:

$$E = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta w} \quad (5.4)$$

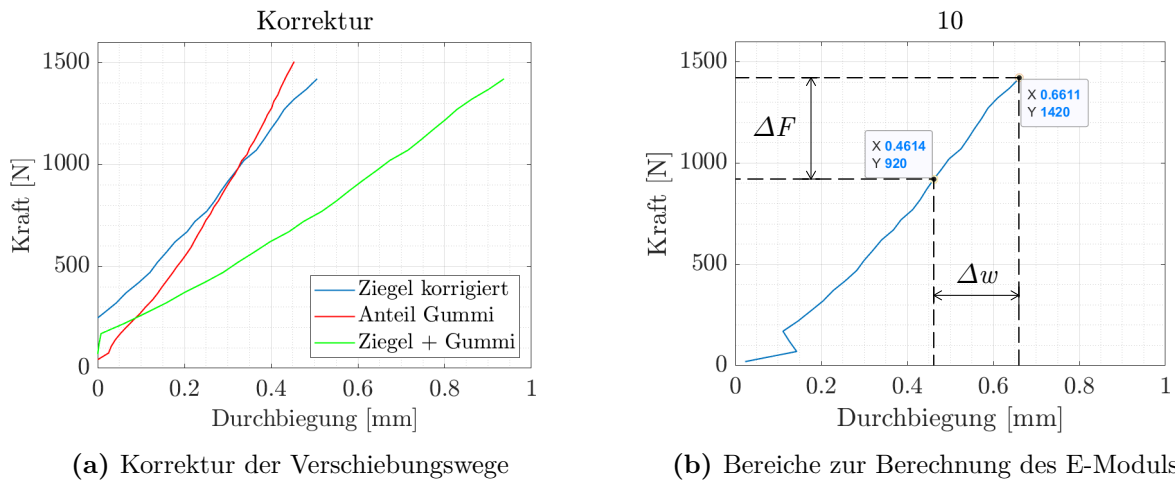


Abb. 5.4: Erstellung eines Last-Verschiebungsdiagramms beispielhaft anhand Tasche Nr. 10.

Die ermittelten Daten zu den Taschen der Werksreihe sind in Tab. 5.1 zusammengefasst. Sie enthält das arithmetische Mittel und die dazugehörige Standardabweichung aller 25 geprüften Taschen der Werksreihe. Hier fällt auf, dass die Bedingung zur Erfüllung der Mindestbruchlast nach *EN 1304* [37] (mit 600 N für Flachziegel) um mehr als das doppelte erfüllt ist. Sämtliche Daten der Taschenziegel sind in Anhang B auf Seite 116 zu finden. Die Daten der Taschen des Laborbrandes finden sich ab Seite 122.

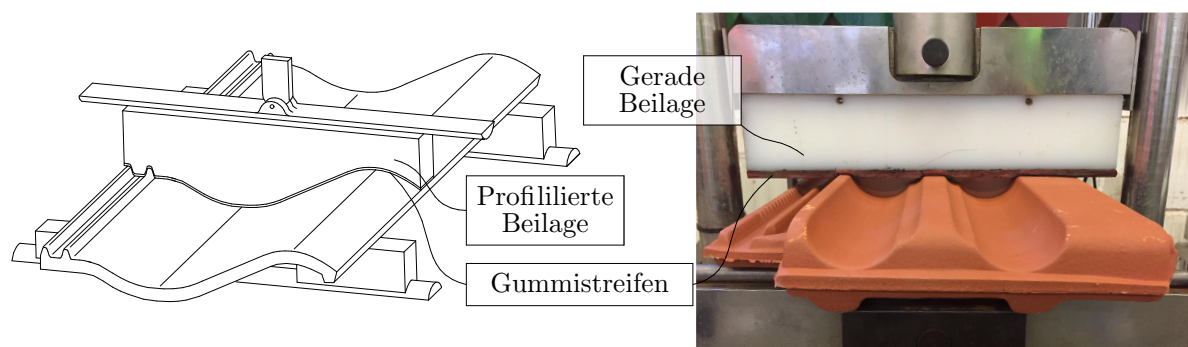
Tab. 5.1: Mittelwert und Standardabweichung der 25 Taschenziegel des Werkbrandes

Reihe	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	F_b [N]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Werk	1006	5.071 (±0.211)	2.126 (±0.011)	1418 (±68)	24962 (±1235)	17.15 (±0.83)

5.4 Versuche am Landdach Verschiebeziegel

Für die Versuche am Landdach Verschiebeziegel wird dasselbe Lasteinleitungsprofil wie bei der Prüfung der Taschenziegel verwendet (siehe Abb. 5.5b). Die gängige Prüfungsanordnung zur Ermittlung der Bruchlasten nach *EN 538* [38] sieht vor, eigens für die Ziegel angepasste profilierte Beilagen zu verwenden, zu sehen anhand eines Falzziegels in Abb. 5.5a. Da jedoch die im Labor in Gleinstätten verwendeten Lasteinleitungsprofile zu ungleichmäßigen Lasteinleitungen an unterschiedlichen Stellen der Ziegel führen, wird ein gerades Profil gewählt, um für jeden Ziegel eine einheitliche Lasteinleitung zu gewährleisten.

Im Gegensatz zum Taschenziegel macht es die komplexe Form des Landdach Verschiebeziegels schwer, die tatsächliche Durchbiegung des Ziegels zu ermitteln. Der Gummi zeigt bei gleicher

(a) Verwendung profilierter Beilagen nach *EN 538* [38]

(b) Verwendung eines geraden Profils

Abb. 5.5: Biegeprüfung der Landdach Verschiebeziegel mithilfe eines geraden Profils zur einheitlichen und reproduzierbaren Lasteinleitung.

Spannung bei unterschiedlich breiten Auflagerflächen unterschiedliche Verschiebungswege, was auf eine verhinderte Seitendehnung zurückzuführen ist. Daher wurde das Gummistück, welches in Abb. 5.2 dargestellt ist, nicht nur unter einer vollflächigen Auflage geprüft, sondern auch durch Unterlegen verschieden breiter, quaderförmiger Metallstücke. Es soll so die Situation der verschiedenen Auflageflächen aus Abb. 5.5b nachgebildet werden.

Abb. 5.6 zeigt das Spannungsdehnungsdiagramm des Gummistücks in Folge der Druckprüfung. Die rote Linie zeigt das Gummistück bei der Prüfung unter vollflächiger Auflage $l_{\text{Gummi}} = 55,40 \text{ mm}$. Diese Daten wurden auch für das Last-Verschiebungsdiagramm des Taschenziegels verwendet (vgl. Abb. 5.4). Die anderen Linien zeigen die Veränderungen der Dehnung bei unterschiedlich breiten, untergelegten Metallstücken. Je schmaler die Unterlage, desto größer wird die Dehnung bei gleichbleibender Spannung.

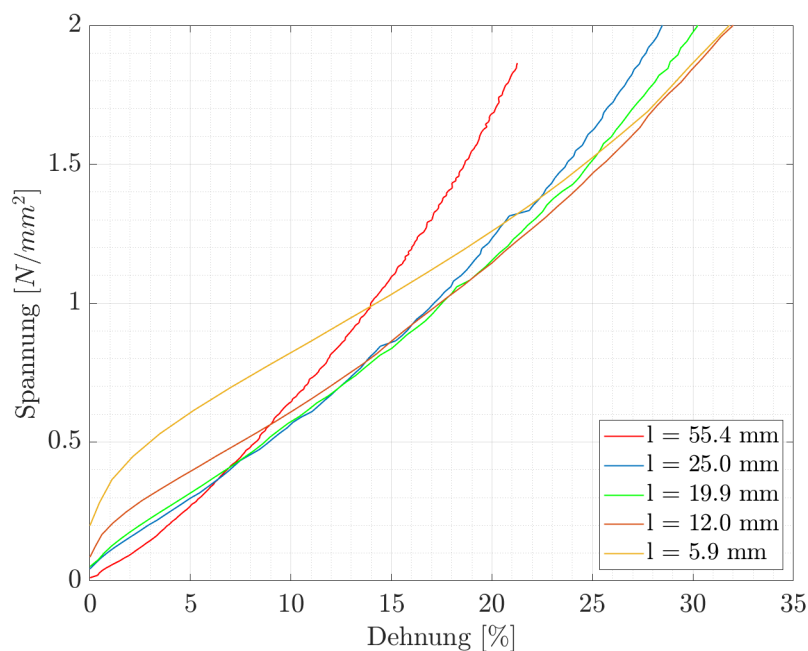


Abb. 5.6: Gummi in der Druckprüfung bei unterschiedlichen Auflagerlängen

Die so ermittelten Daten können zur Korrektur des Verschiebungsweges der Biegeversuche am Landdach Verschiebeziegel herangezogen werden. Mithilfe der unterschiedlichen Linien des Diagramms kann dann ein 3-Feder-Modell zur realistischen Abbildung der Lasteinleitung gebildet werden. Jeder der drei Auflageflächen nach Abb. 5.5b kann so eine eigene, dehnungsabhängige Federsteifigkeit zugewiesen werden.

Die durch die Versuchsdurchführungen an den Landdach-Verschiebeziegel erhaltenen Bruchlasten F_b erfüllen alle die Mindestlastanforderungen nach *EN 1304* [37] (1200 N). Die zugehörigen ermittelten Daten zu Bruchlasten, Brenntemperatur, Dichte und Wasserabsorption sind in Anhang B auf Seite 126 zusammengestellt. Arithmetisches Mittel und Standardabweichung werden durch je 5 Ziegel der 5 unterschiedlichen Entnahmestellen des Laborofens gebildet (siehe Tab. 5.2). Da die Differenzen der durch die Bullersringe ermittelten Temperaturen sehr gering sind, können auch keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Brenntemperatur festgestellt werden.

Tab. 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Landdach Verschiebeziegel

Reihe	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	F_b [N]
1 a-e	1022	5.340 (±0.426)	2.111 (±0.019)	2726 (±151)
2 a-e	1015	5.297 (±0.105)	2.110 (±0.004)	2632 (±143)
3 a-e	1008	5.096 (±0.163)	2.117 (±0.006)	2790 (±121)
4 a-e	1011.5	5.034 (±0.239)	2.115 (±0.011)	2602 (±176)
5 a-e	1015	5.166 (±0.502)	2.107 (±0.019)	2704 (±182)
				2691 (±158)

Kapitel 6

FE-Simulationen

Die Ermittlung von Bruchspannungen der Landdach-Verschiebeziegel ist aus den Versuchen aufgrund der komplexen Geometrie nicht realistisch darstellbar. Mithilfe von Finite Elemente Simulationen können die Spannungsspitzen an den Ziegeln wirklichkeitsnah dargestellt werden. Um einen Vergleich zwischen den Versuchen und den Simulationen herstellen zu können, wird in einem ersten Schritt (Kap. 6.1) die Bruchspannung im FE-Modell an den Taschen ermittelt. Dabei wird die mittlere Bruchlast der Biegeversuche eingesetzt, um die ermittelten Spannungen im Modell verifizieren zu können. Nach Überprüfung der Methode sollen dann FE-Simulationen am Landdach Verschiebeziegel (Kap. 6.2) weitere Ergebnisse zu Bruchspannungen an komplexen Geometrien liefern.

Die numerische Lösung der Finite Elemente Modelle erfolgt mithilfe der kommerziellen Software *Abaqus/CAE 2018* von *Dassault Systèmes*. Programmabhängige Befehle und Vorgehensweisen sind in der *Abaqus 2016 Online Documentation* [1] zu finden.

6.1 FE-Simulationen an der Wiener Tasche

6.1.1 Geometrie

Für die verschiedenen Arten und Formen der Dachziegel der Fa. Wienerberger existieren CAD-Modelle, welche ihrer ungetrockneten und ungebrannten Form entsprechen. Die Trocknung und das Brennen des Ziegels führt dabei zu einer Schwindung von etwa 10 % (und fällt auch in den Raumrichtungen leicht unterschiedlich aus). Da auch die Anzahl und Lage der Einkerbungen an der Unterseite des Scherbens von der realen Form abweichen, erfolgt die numerische Simulation des Taschenziegels anhand der Geometrie einer gebrannten, der Werksreihe entnommenen Tasche. An ihr werden Naturmaße entnommen, welche repräsentativ für alle im Werk gebrannten Taschenziegel stehen. Unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen und den somit einhergehenden Rechenzeitoptimierungen wird nur die Hälfte der Tasche, gespiegelt entlang jener Ebene, die durch die Extrusionsrichtung und die Dickenrichtung aufgespannt wird, modelliert. Weiters wurde die genaue Lage und Tiefe der Kerben, sowie die Einhängenase und das Befestigungsloch aufgenommen und nachgebildet. Die erstellte Geometrie ist in Abb. 6.1 dargestellt. Die Hauptabmessungen der nachmodellierten Tasche betragen:

- $L/B/H = 400/188(94)/14$ mm.

6.1.2 Materialeigenschaften und Randbedingungen

Für Ziegelkeramiken liegt im Allgemeinen linear elastisches Materialverhalten vor [45, S. 390], was auch die Messergebnisse der Hauptversuche bestätigen (vgl. Kap. 4 sowie die Last-Verschiebungsdiagramme aus Anhang A). Da der Biegeversuch hauptsächlich Spannungen in x-Richtung, d.h.

in Extrusionsrichtung hervorruft, ist die Eingabe eines isotropen, linear elastischen Materialmodells, welches anhand der erhobenen Daten in x-Richtung bestimmt wird, für die Simulationen ausreichend. Das spröde Bruchverhalten der Taschen macht keine zusätzliche Definition einer Bruchbedingung notwendig.

Die Wahl der elastischen Materialparameter erfolgt anhand der ermittelten Daten aus den Ultraschall- sowie Biegeversuchen der Probekörperreihen nach Kap. 3 und Kap. 4. Für den statischen E-Modul wird der Mittelwert der Probereihe 1006 L herangezogen. Dies entspricht den Daten jener längsgeschnittenen Probekörper, welche aus den Taschenziegeln des Werksbrandes hergestellt wurden (vgl. Tab. 4.2 auf Seite 44). Für die Querdehnungszahl wird der Mittelwert der 1006 L-Reihe aus den Ultraschallversuchen gewählt (vgl. Tab. 3.1 auf Seite 32).

Tab. 6.1: Elastische Materialparameter für die Simulation an der Wiener Tasche

Probenreihe	stat. E-Modul E_{stat} [N/mm ²]	Querdehnungszahl ν [-]
1006 L	24167 (± 772)	0.189 (± 0.014)

In Abb. 6.1 sind die Randbedingungen am FE-Modell der Tasche dargestellt. Der Auflagerabstand des Biegeversuchs beträgt mit $\frac{2}{3}$ der Länge der Tasche 267 mm. Das linke Auflager befindet sich unmittelbar hinter der Einhängenase, siehe Abb. 6.1b. Am linken und rechten Auflager sind die Verschiebungen in z-Richtung gesperrt ($u_z = 0$). Die Sperre der Verschiebung in x-Richtung ($u_x = 0$) erfolgt im Modell in der Mitte zwischen beiden Auflagern im Bereich der Lasteinleitung. Weiters verhindert die Symmetriebedingung entlang der Schnittfläche die Verschiebung in y-Richtung ($u_y = 0$), sowie die Verdrehungen um die x- und z-Achse ($\phi_x = \phi_z = 0$). Die Randbedingungen entsprechen somit der Auflagersituation der verifizierenden Versuchsdurchführung nach Kapitel 5.

Die Eingabe der Belastung erfolgt als Einzellast und ist im Programm mit einer Auflagefläche von 20×90 mm gekoppelt. Abb. 6.1a zeigt die in gelb dargestellte Einzellast, welche gleichmäßig auf die Fläche wirkt. Nach Durchführung der verifizierenden Versuche aus Kap. 5 kann die tatsächliche Bruchlast eingegeben werden, um die sich später ergebenden Verschiebungen und Spannungen zu vergleichen. Sie wird im Folgenden den Daten der Tab. 5.1 auf Seite 50 entnommen und halbiert, da sie im Modell nur auf den halben Ziegel wirkt.

Tab. 6.2: Eingabe der halben Belastung aus Tab. 5.1 als Einzellast

Bruchlast F_b [N]	1418 (± 68)
$\frac{1}{2}$ Bruchlast $F_b/2$ [N]	709

6.1.3 Netzgenerierung und Elementstypen

Das FE-Netz besteht aus regelmäßig angeordneten Quaderelementen mit quadratischer Ansatzfunktion ($C3D20$). Im Bereich rund um das Nagelloch werden aufgrund der komplexeren Geometrie kompatible Tetraederelemente mit quadratischer Ansatzfunktion ($C3D10$) angeordnet. Die dreidimensionalen Elemente wurden mit einer charakteristischen Elementsgröße von 3 mm gewählt. Insgesamt besteht das Modell aus:

- 34 388 $C3D20$ - bzw. $C3D10$ -Elementen und
- 147 262 Knoten.

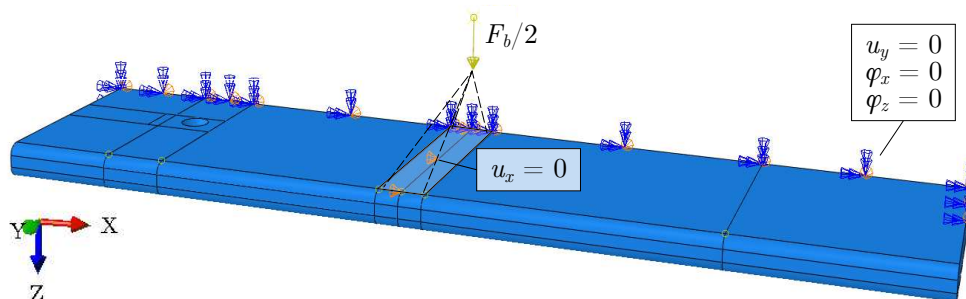
Die Struktur und Feinheit des FE-Netzes ist zusammen mit den Ergebnissen der Berechnung in Abb. 6.2 und Abb. 6.3 dargestellt.

6.1.4 Ergebnisse der Simulationen an der Wiener Tasche

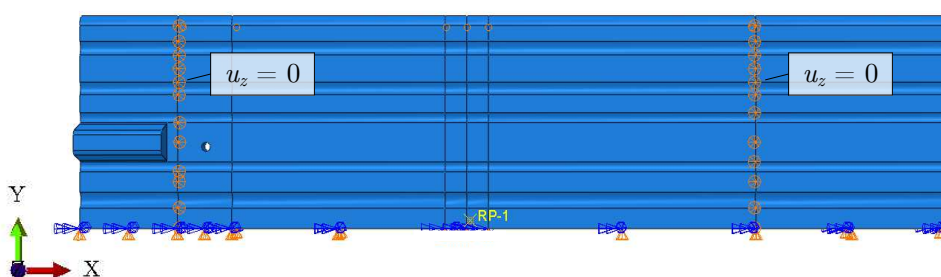
Die Finite Elemente Simulationen liefern, wie nachfolgend in Abb. 6.2 und Abb. 6.3 dargestellt, folgende Ergebnisse:

- maximale Normalspannung in x-Richtung: $\sigma_{xx,max} = 18,42 \text{ N/mm}^2$
- maximale Verschiebung in z-Richtung: $u_{z,max} = 0,55 \text{ mm}$

Die maximale Normalspannung $\sigma_{xx,max}$ kann dabei direkt als Bruchspannung beziehungsweise maximale Biegezugspannung interpretiert werden. Sie tritt nahe der Mitte an der Unterseite des Scherbens auf. Die an der Oberseite in Abb. 6.2a blau dargestellten hohen Druckspannungen entstehen im Modell aufgrund der idealen, scharfkantigen Lasteinleitung. Diese lokal begrenzten Singularitäten* an den scharfen Kanten der Simulation werden daher nicht weiter berücksichtigt. Maßgebend ist die maximale Zugspannung an der Unterseite der Tasche $\sigma_{xx,max}$. Die maximale Durchbiegung $u_{z,max}$ tritt mittig im Bereich der Lasteinleitung auf, wie Abb. 6.3 zeigt.



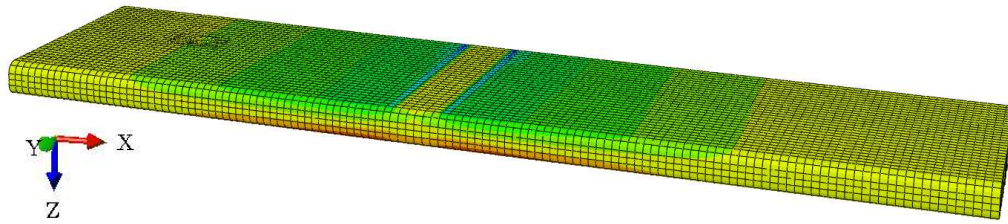
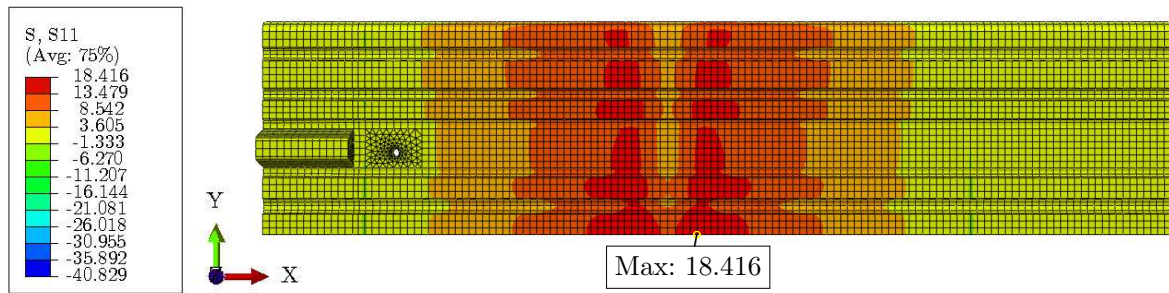
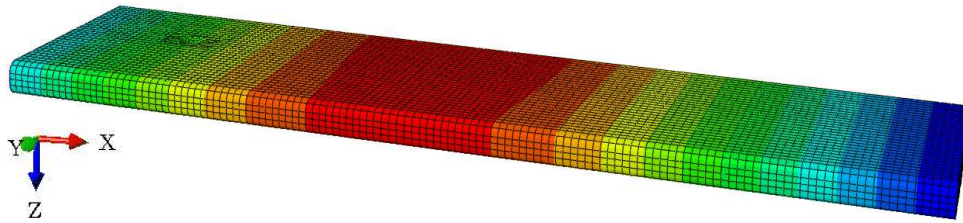
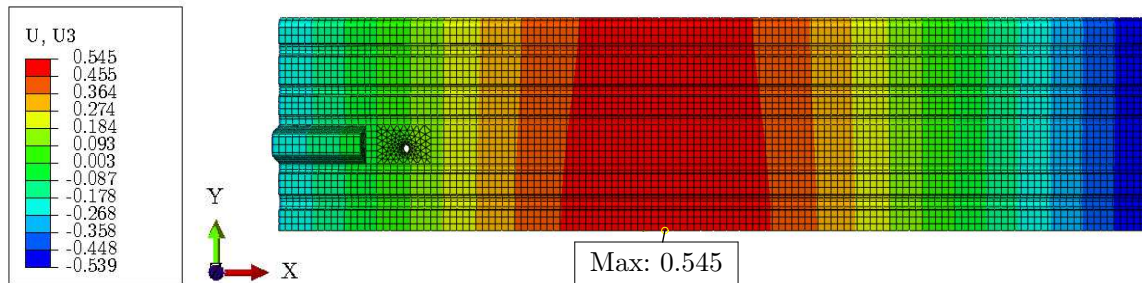
(a) Axonometrische Ansicht.



(b) Ansicht von unten.

Abb. 6.1: Geometrie und Randbedingungen am halben Taschenziegel

*Singularitäten sind Bereiche im FE-Netz, bei denen bei weiterer Verfeinerung des Netzes die Spannung zunimmt beziehungsweise nicht konvergiert (innenliegende Kanten ohne Radius, Lasteinleitungsstellen, etc.).

(a) Normalspannung σ_{xx} - Axonometrische Ansicht.(b) Normalspannung σ_{xx} - Ansicht von unten.**Abb. 6.2:** Spannungen aufgrund der Vertikalbelastung durch den 3-Punkt-Biegeversuch an der Wiener Tasche(a) Verschiebung u_z . Axonometrische Ansicht.(b) Verschiebung u_z . Ansicht von unten.**Abb. 6.3:** Verschiebungen aufgrund der Vertikalbelastung durch den 3-Punkt-Biegeversuch an der Wiener Tasche

6.2 FE-Simulation am Landdach Verschiebeziegel

6.2.1 Geometrie

Für die Simulationen am Landdach Verschiebeziegel wird eine CAD-Vorlage der Fa. Wienerberger angewandt. Sie entspricht dem ungetrockneten, ungebrannten Grünling des Ziegels. Die komplexe Geometrie des Modells des Landdach Verschiebeziegels gleicht im Wesentlichen jener der tatsächlichen, gebrannten Ziegel, wobei auch hier minimale geometrische Abweichungen bestehen. Um ein möglichst wirklichkeitsnahes Abbild der gebrannten Form zu erhalten, wird die Schwindung (welche durch Trocknung und Brennen entsteht) im Modell mithilfe von Randbedingungen (in Abschnitt 6.2.2) berücksichtigt, da ein Skalieren des vorliegenden 3D-Kontinuums in *Abaqus/CAE* nicht möglich ist. Die Geometrie ist in Abb. 6.4 illustriert.

Die Hauptabmessungen der ungetrockneten, ungebrannten Form (ohne Einhängenasen und Querfalz[†]) betragen:

- $L/B/H = 456/276/41$ mm.

6.2.2 Materialeigenschaften und Randbedingungen

Eine erste Analyse des Landdach Verschiebeziegels erfolgt mit denselben elastischen Materialparametern, welche auch an der Wiener Tasche zum Einsatz kamen (siehe Tab. 6.1 auf S. 54). Der Ziegel wird somit durch isotropes, linear elastisches Materialverhalten charakterisiert. Dies lässt einen direkten Vergleich der Ergebnisse mit jenen am Modell der Wiener Tasche zu.

Zusätzlich erfolgt die Definition eines fiktiven Wärmeausdehnungskoeffizienten, mit dessen Hilfe, gemeinsam mit einer Temperaturabnahme (siehe Tab. 6.3), eine gleichmäßige Verkleinerung der Geometrie erzielt wird. Sie entspricht einer allseitigen Volumenverringerung in einem Ausmaß von 10 %, was in etwa der durch den Trocknungs- und Brennvorgang hervorgerufenen Schwindung gleichkommt. Die Eingabe der Materialparameter und der Belastung aus Tab. 6.3 führt (aufgrund einer eigens für diesen Berechnungsschritt separaten statisch bestimmten Lagerung) zu rein geometrischen Veränderungen, nennenswerte Zwänge im Material entstehen nicht.

Tab. 6.3: Eingabe von Materialparametern und Belastung zur Volumenverringerung des Modells

Schwindung [%]	Ausdehnungskoeffizient α_t [K ⁻¹]	Temperaturänderung ΔT [K]
10	0.1	-1

Die Position der Auflager in der FE-Simulation entspricht jenen der Biegeversuche (vgl. Abb. 5.1a, S. 47 der Versuche mit Abb. 6.4b im Modell). Dabei beträgt der Auflagerabstand mit $\frac{2}{3}$ der Länge des ungetrockneten, ungebrannten Landdach Verschiebeziegels 300 mm. Die vor der Biegebeanspruchung herbeigeführte Volumenverringerung verkleinert ihn dann auf die beabsichtigte Länge von 270 mm. Für die Simulation des Biegeversuchs wurden an beiden Auflagern die Verschiebung in z-Richtung gesperrt ($u_z = 0$) und an je einem Punkt in y-Richtung ($u_y = 0$) gehalten. Die Sperre der Verschiebung in x-Richtung ($u_x = 0$) erfolgt entlang des linken Auflagers.

Für die Modellierung werden erneut die Bruchlasten der Versuche angesetzt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Der Mittelwert der Bruchlasten aus den Biegeversuchen der

[†]Der Querfalz ist eine Ausbildung, die das Zusammenfügen von zwei Dach- oder Formziegeln in aufeinander folgenden horizontalen Reihen ermöglicht [37]. Er ist am Landdach Verschiebeziegel in Abb. 6.4 am rechten Rand zu erkennen.

Landdach Verschiebeziegel (vgl. Tab. 5.2, S. 52) wird im Programm als Einzellast in z-Richtung eingegeben und mit den in Abb. 6.4a zu erkennenden hervorgehobenen Flächen gekoppelt, sowie gleichmäßig auf diese verteilt (im Gegensatz zu einer in den Versuchen sehr komplexen Lasteinleitung). Die Auflagebreite der Lasteinleitung beträgt 22 mm respektive 20 mm nach Volumenverringering des 3D-Körpers.

Tab. 6.4: Eingabe des Mittelwerts der Bruchlasten aus Tab. 5.2 als Einzellast

Bruchlast F_b [N]	2691 (± 158)
---------------------	--------------------

6.2.3 Netzgenerierung und Elementstypen

Das FE-Netz des Modells besteht aus regelmäßig angeordneten Tetraederelementen mit quadratischer Ansatzfunktion ($C3D10$). Die dreidimensionalen Elemente weisen eine charakteristische Elementgröße von 7 mm auf, welche nach Anpassung an die komplexen geometrischen Gegebenheiten leicht variieren können. Die Struktur des FE-Netzes ist in Abb. 6.5 dargestellt. Das Modell besteht in Summe aus:

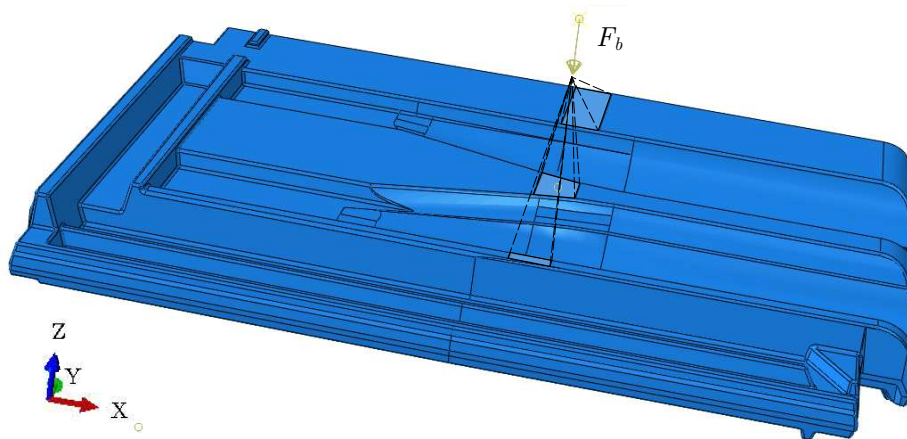
- 138 792 $C3D10$ -Elementen und
- 220 954 Knoten.

6.2.4 Ergebnisse der Simulationen am Landdach Verschiebeziegel

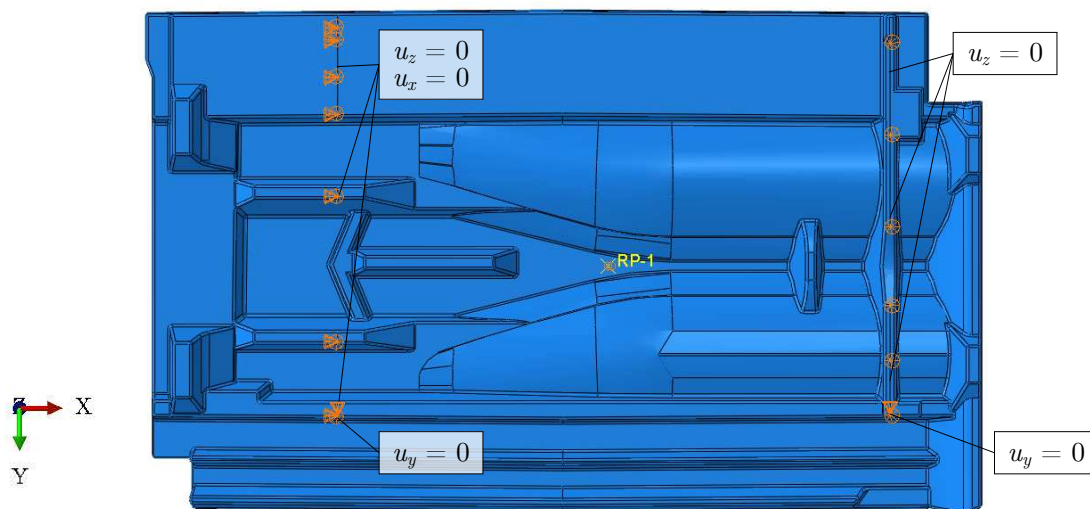
Die Finite Elemente Simulationen am Landdach Verschiebeziegel liefern, wie nachfolgend in Abb. 6.5 dargestellt, folgendes Ergebnis:

- maximale Normalspannung: $\sigma_{max} = \sigma_{xx,max} = 14,14 \text{ N/mm}^2$

Die im Modell entstehende maximale Normalspannung σ_{max} im schmalen Steg an der Unterseite des Ziegels entspricht der maximalen Normalspannung in x-Richtung $\sigma_{xx,max}$ und somit der maximalen Biegezugspannung beziehungsweise Bruchspannung. Eine (nicht maßgebende) minimale Normalspannung $\sigma_{xx,min} = -18,18 \text{ N/mm}^2$ tritt im schmalsten Auflagebereich der Lasteinleitung auf. Weiters sind lokal begrenzte Singularitäten im Bereich der Auflager zu erkennen.

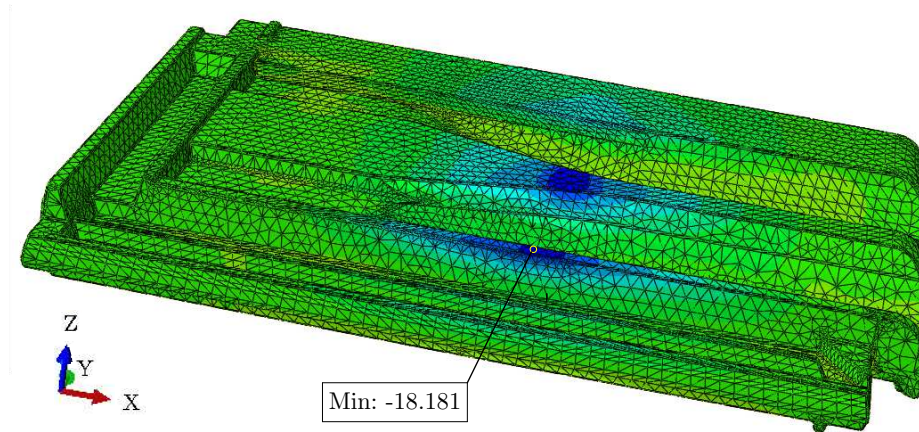


(a) Axonometrische Ansicht.

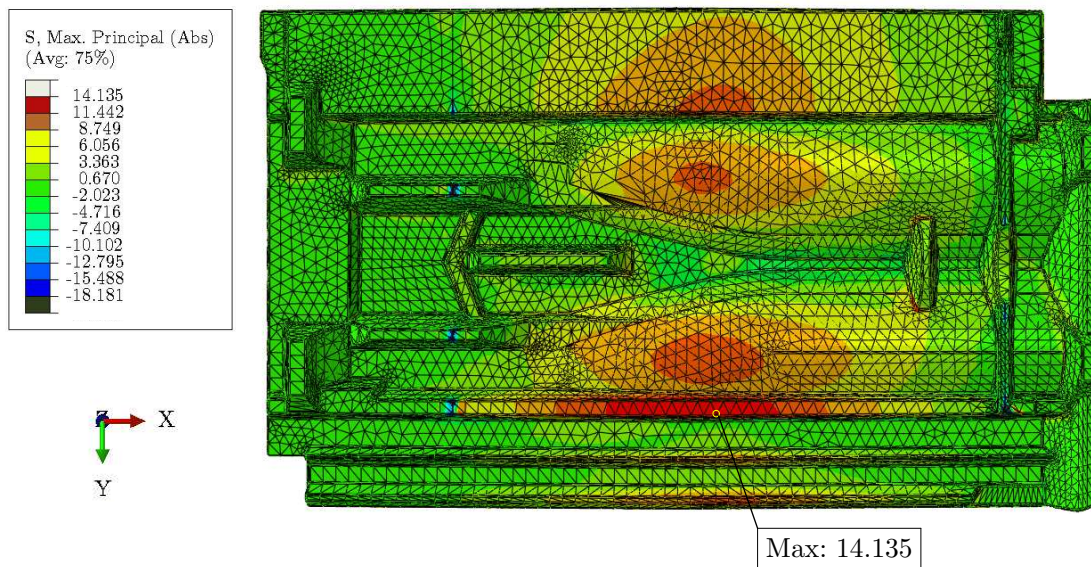


(b) Ansicht von unten.

Abb. 6.4: Geometrie und Randbedingungen am Landdach Verschiebeziegel



(a) Minimale Hauptnormalspannungen - Axonometrische Ansicht.

(b) Maximale Hauptnormalspannungen (Max. $\hat{=}$ Bruchspannung) - Ansicht von unten.**Abb. 6.5:** Spannungen aufgrund der Vertikalbelastung durch den 3-Punkt-Biegeversuch am Landdach Verschiebeziegel

Kapitel 7

Ergebnisse & Interpretation

7.1 Vergleich der E-Module aus den Ultraschall- sowie Biegeversuchen

Die Ermittlung der Steifigkeiten aus statischen und dynamischen Versuchen bieten verschiedene Vor- und Nachteile. Der Biegezugversuch und die direkte Ableitbarkeit des E-Moduls aus den Last-Verschiebungslinien stellt eine realistische Abbildung des Materialverhaltens und somit einen hohen ingenieurmäßigen Nutzen dar. Die Durchführung von Biegeversuchen und die damit verbundene Herstellung sowie Zerstörung von Probekörpern ist jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden. Zwar ist die Probekörpervorbereitung für Ultraschallmessungen nicht minder aufwändig, allerdings bietet diese durch die schnelle und zerstörungsfreie (und damit beliebig oft wiederholbare) Durchführung zahlreiche Vorteile. Zudem können bei entsprechendem Messprogramm alle Einträge des Steifigkeitstensors bestimmt werden. Die Ultraschallversuche reagieren jedoch sensitiv auf Einflüsse der Probengeometrie, sowie auf Poren und Einschlüsse im untersuchten Medium [28][30].

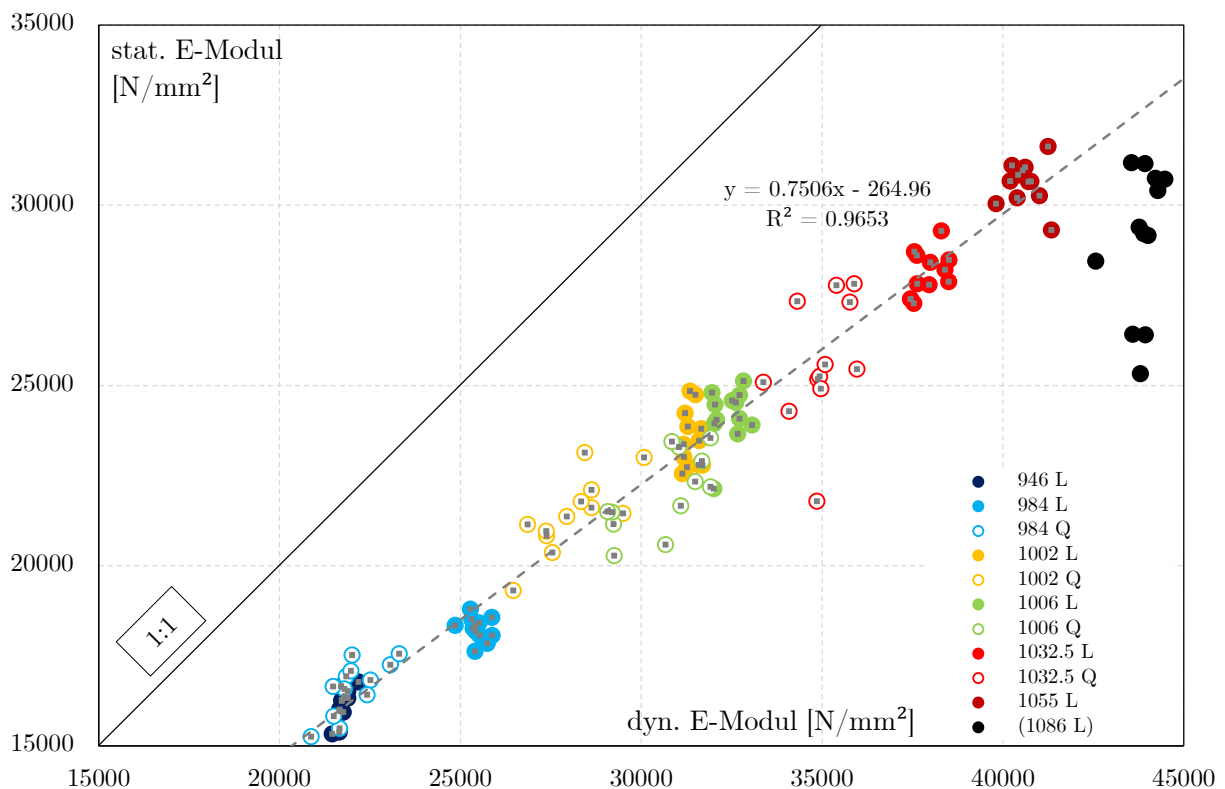
Für homogene Werkstoffe ohne ausgeprägt viskoelastisches Materialverhalten sollen beide Vorgehensweisen - gemäß den theoretischen, physikalischen Grundlagen - zu gleichen Ergebnissen führen. Tone geringer Brenntemperatur weisen in guter Näherung ein solches Materialverhalten auf. Die im Zuge der Hauptversuche untersuchten Probekörper (höher gebrannter Tone) zeigen jedoch, bezugnehmend auf die zwei verschiedenen Untersuchungsmethoden, deutliche Abweichungen in den Ergebnissen der E-Module E_{stat} und E_{dyn} . Wie in Tab. 7.1 zusammengefasst, liegen die Daten sämtlicher Reihen für die Ultraschallversuche (Kap. 3) zwischen 31,2%–39,6% über jenen der statischen Biegeversuche (Kap. 4). Davon ausgenommen sind erneut die Proben der Reihe *1086 L*, was wahrscheinlich auf die hohe Rauigkeit der Probekörperoberflächen aufgrund der unvollständigen Probekörpervorbereitung zurückzuführen ist.

Abb. 7.1 verdeutlicht die Unterschiede in den Messergebnissen. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.9653$ sind jedoch auch (für den Bereich zwischen *946 L* - *1055 L*) deutliche lineare Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Untersuchungsergebnissen erkennbar. Die Daten der Reihe *1086 L* wurden für die Berechnung der Korrelationsfunktion nicht herangezogen. Die einheitliche und durchgängige Konsistenz der Daten lässt jedenfalls, unter Beachtung der gegebenen Versuchsanordnung, auf eine Korrelationsfunktion zwischen dynamischem und statischem E-Modul schließen.

Tab. 7.1: Gegenüberstellung der E-Module aus den statischen und dynamischen Versuchen

Probenreihe	E_{stat} [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	E_{dyn}/E_{stat} [%]
946 L	16151 (±454)	21762 (±175)	134.7
984 L	18250 (±321)	25469 (±281)	139.6
1002 L	23517 (±787)	31390 (±209)	133.5
1006 L	24167 (±772)	32439 (±389)	134.2
1032.5 L	28108 (±616)	37911 (±423)	134.9
1055 L	30618 (±599)	40612 (±442)	132.6
1086 L*	29049* (±2017)	43839 (±482)	150.9*
984 Q	16614 (±755)	22039 (±691)	132.7
1002 Q	21422 (±1058)	28100 (±1053)	131.2
1006 Q	22031 (±1105)	30621 (±1124)	139.0
1032.5 Q	25648 (±1730)	34962 (±765)	136.3

* ungeschliffene Proben

**Abb. 7.1:** Vergleich des statischen und des dynamischen E-Moduls

7.1.1 Potentielle Fehlerquellen

Im Allgemeinen ist bekannt, dass dynamische Messmethoden leicht erhöhte Werte im Vergleich zu quasistatischen Messmethoden liefern, da letztere im Wesentlichen isotherm und erstere adiabatisch* sind [13][30]. Dies kann aber nur einen sehr geringen Anteil der gemessenen Unterschiede erklären.

Obwohl bei Durchführung und Auswertung der Ultraschallversuche auf die Einhaltung der sogenannten Skalentrennungsbedingung nach [28] geachtet wurde, können vereinzelte Heterogenitäten (Quarzkörner) diese Bedingung stören. Streuungen der Ultraschallwellen, Reflexionen und Refraktionen an Einschlussgrenzen, sowie Abdämpfungen zufolge Reibung innerhalb des Materials selbst reduzieren die Amplituden der Wellen und haben so einen Einfluss auf die Wellengeschwindigkeit [28]. Genauso können die Probengeometrie und die Messfrequenz einen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Die starke Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Biegeversuche und der Ultraschallversuche legt vielmehr die Vermutung nahe, dass andere/weitere Faktoren die Messergebnisse beeinflussen. So sind beispielsweise Vergleiche von statischen und dynamischen elastischen Materialparametern an Gesteinen und Erklärungen zu deren Differenzen schon seit langem Gegenstand von Untersuchungen [21][51]. Dabei sind im Allgemeinen die dynamisch bestimmten E-Module signifikant größer als die statisch bestimmten E-Module.

Die Unterschiede zwischen E_{stat} und E_{dyn} werden dabei weithin Mikrorissen und Poren zugeschrieben [3][14][50], wobei die Ergebnisse je nach Gesteinsart stark variieren. Die Mikrorisse beeinflussen die statische Verformung stärker, während die dynamischen Messungen weniger sensibel auf sie reagieren. Insbesondere der direkte Vergleich von gleichwertigen Gesteinsproben mit und ohne Mikrorissen durch King [26] und Olsen [36] verdeutlicht deren Einfluss.

Mikrorisse in Keramiken können sich durch Trocknung, Feuerung oder Kühlung des Materials bilden [35]. Die vorliegenden Daten deuten darauf hin, dass die hohen Brenntemperaturen der Dachziegel einen Eigenspannungszustand hervorrufen, welcher die Bildung von Rissen innerhalb der Scherben begünstigt. Ein feines Netzwerk an Mikrorissen, vermutlich hervorgerufen durch die hohen Brenntemperaturen, stellt jedenfalls eine naheliegende Erklärung für die Unterschiede in den hier ermittelten Steifigkeiten dar.

*Ein adiabatischer Prozess ist ein thermodynamischer Prozess, bei dem ein System von einem Zustand in einen anderen überführt wird, ohne Wärme mit seiner Umgebung auszutauschen [29]. Die Druckänderungen durch die Ultraschallwellen gehen so schnell vor sich, dass die Ab- und Zufuhr von Wärme in Wechselwirkung mit der Umgebung vernachlässigt werden kann.

7.2 Vergleich der Biegeversuche und der FE-Simulationen an der Wiener Tasche

Die Versuche an den Probekörpern sowie jene an den ganzen Ziegeln zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse betreffend der in den Biegeversuchen ermittelten, statischen E-Module E_{stat} , wie der Vergleich in Tab. 7.2 verdeutlicht. Sie weichen bei beiden Versuchen kaum voneinander ab. Im Gegensatz dazu können bei den Bruchspannungen σ_b deutlichere Unterschiede festgestellt werden. Die Bruchspannungen sind für die Probekörper der Versuche am Ziegelscherben um etwa 17 % höher, als jene der ganzen Ziegel der Werksreihe. Bei Betrachtung der im Labor gebrannten Taschen zeigen sich ähnliche Abweichungen (vgl. Anhang B.2, Tab. B.2 mit den Reihen der Hauptversuche).

Auch die FE-Simulationen weisen gut übereinstimmende Ergebnisse aus. Mithilfe der ermittelten Steifigkeiten der Hauptversuche, sowie mit Eingabe der mittleren Belastung aus den Großversuchen, ergeben sich in ihrer Größe vergleichbare maximale Biegezugspannungen σ_b . Zudem machen die FE-Simulationen sowie die idealisierten Querschnitte der Berechnungen deutlich, dass bereits wenige Zehntel Millimeter Änderung in der Höhe des Querschnitts große Änderungen des Trägheitsmoments hervorrufen - und somit ein Einfluss auf die Ergebnisse nicht zu vernachlässigen ist.

Tab. 7.2: Gegenüberstellung des statischen E-Moduls E_{stat} und der Bruchspannungen σ_b aus verschiedenen Untersuchungsmethoden

	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Hauptversuche - Werksreihe 1006 L	24167 (± 772)	20.16 (± 0.66)
Großversuche - Werksreihe	24962 (± 1235)	17.15 (± 0.83)
FE-Simulation	24167	18.42

Ein Vergleich der Ergebnisse der Versuche an den Ziegelscherben und den Dachziegeln mit den Simulationen mittels Finter Elemente Methode erlaubt Rückschlüsse auf mögliche strukturabhängige Einflussgrößen. Der sehr geringe Unterschied zwischen den FE Simulationen und den Versuchen am Dachziegel lässt sich zurückführen auf geometrische Imperfektionen der gebrannten Ziegel, welche im FE-Modell nicht vollständig erfasst werden. Auch zeigen die unpräparierten Taschen der Großversuche eine leicht konvexe Wölbung an ihrer Oberseite, quer zur Extrusionsrichtung. Diese führt nicht nur zu lokalen Spannungsspitzen durch eine nicht gleichmäßige Lasteinleitung, sondern lässt zudem auf Eigenspannungen zufolge des Brennprozesses schließen. Zudem werden im FE-Modell auftretende Spannungskonzentrationen aufgrund der inhomogenen Steifigkeitsverteilung im Dachziegel nicht berücksichtigt, da der Ziegel selbst als homogener Werkstoff modelliert wird. Der Unterschied zwischen den Versuchen an den Ziegelscherben und den FE-Simulationen lässt sich wiederum auf einen von der Strukturgröße abhängigen Faktor - auch „*Size Effect*“ genannt [6] - zurückführen.

Der *Size Effect* wird in der Theorie - kontrovers diskutiert - auf zwei grundlegende unterschiedliche Ansätze zurückgeführt. Zum einen auf energetisch-statistische Verfahren [5][7], zum anderen basierend auf Ansätzen von fraktalen[†] Skalierungsmodellen [11][12].

Traditionell wird der *Size Effect* mit der *statistischen Weibull[‡]-Theorie zufälliger Festigkeiten*

[†]Fraktale sind geometrische Objekte mit einfachen Mustern, die sich bei vermindernder Größe wiederholen [2].

[‡]Ernst Hjalmar Waloddi Weibull (1887-1979) war ein schwedischer Ingenieur und Mathematiker, dessen bekannteste Forschungsarbeit sich mit der nach ihm benannten Weibull-Verteilung [48] befasst.

erklärt, sodass die Struktur versagt, sobald ein makroskopischer Riss in einem kleinen (dem schwächsten) Materialelement auftritt („weakest link concept“). Gemäß den oben genannten Überlegungen kann ebenjener Ansatz zu den niedrigeren Bruchspannungen an den Großversuchen führen. Auf der Weibull-Theorie aufbauend gibt es in der Literatur energetisch-deterministische Erklärungen zum *Size Effect* (*Bazants Size Effect Law* [4] - eine nicht-lokale Verallgemeinerung der Weibull-Theorie), sowie indirekte Größeneinflüsseffekte, wie den sogenannten *Boundary Layer Effect*. Er ist auf die Veränderung der Materialzusammensetzung an der Oberfläche der Probekörper zurückzuführen - ebenejener Fläche, welche in dieser Arbeit nur an den präparierten Probekörpern abgeschliffen wurde.

7.3 Vergleich der FE-Simulationen am Landdach Verschiebeziegel und der Wiener Tasche

Für die Finite Elemente Simulationen an der Wiener Tasche und am Landdach Verschiebeziegel wurden dieselben Materialparameter (E_{stat} und ν aus den Versuchen der Probekörperreihe 1006 L) herangezogen, was einen direkten Vergleich der in den Modellen ermittelten Bruchspannungen zulässt. Die Wiener Tasche - eine vergleichsweise simple Ziegelgeometrie - weist durch die verschiedenen Untersuchungsmethoden nahe beieinander liegende Ergebnisse auf, wie im vorangegangenen Kapitel erläutert. Die Eingabe der Bruchlasten aus den Biegezugversuchen der ganzen Ziegeln verdeutlicht jedoch, dass eine komplexe Form wie der Landdach Verschiebeziegel wesentlich geringere Spannungen aufnehmen kann, siehe Tab. 7.3.

Tab. 7.3: Bruchspannungen σ_b der FE-Simulationen im Vergleich

FE-Simulationen an	Bruchspannung σ_b [N/mm ²]
Wiener Tasche	18.42
Landdach Verschiebeziegel	14.14

Die im Modell ermittelte, erheblich geringere Bruchspannung am Landdach Verschiebeziegel lässt sich auf vier bestimmende Faktoren zurückführen:

1. Modellierung der Lasteinleitung
2. Veränderte Anisotropie im Pressdachziegel
3. Inhomogene Bereiche und Lufteinschlüsse
4. Eigenspannungen durch eine komplexe, inhomogene Temperaturverteilung

Die Lasteinleitung wird in der Finite Elemente Simulation - im Gegensatz zur komplexen Einleitung der Biegezugversuche - als gleichmäßige Belastung simuliert. Die in den Versuchen eingesetzte Profilbeilage, ihre gelenkige Lagerung sowie der an ihr befestigte Gummistreifen (vgl. 5.5b, S. 51) dürften jedoch eine komplexere und unregelmäßige Lasteinleitung in den Ziegel hervorrufen, was Auswirkungen auf die Spannungsverteilungen haben kann.

Eine wesentliche Rolle spielt die Formgebung durch die Revolverpresse. Während sich für Strangdachziegel die Anisotropie im Allgemeinen deutlich zwischen in sowie quer zur Extrusionsrichtung unterscheiden lässt, ist für Pressdachziegel eine solche Differenzierung nicht mehr möglich. Die Tonminerale richten sich durch den Pressvorgang entsprechend der Formstücke sowie quer zum ausgeübten Druck aus, was wesentlich größere Unterschiede in den Festigkeitsverteilungen [25]

im Ziegel bedeutet. Zudem kann der Pressvorgang starke Inhomogenitäten, wie den in Kap. 2.6, S. 29 gezeigtem Lufteinschluss, bewirken.

Weiters werden die aufgrund der komplexen Geometrie lokal verschiedenen Materialstärken einer komplexeren, inhomogenen Temperaturverteilung ausgesetzt, was weitere Eigenspannungen im Material hervorrufen kann.

Insbesondere die letzten drei genannten Punkte legen den Schluss nahe, dass aufgrund dieser Faktoren für komplexe Ziegelgeometrien im Allgemeinen wesentlich geringere Festigkeiten erwartbar sind.

Kapitel 8

Diskussion

Die Messergebnisse umfangreicher Untersuchungen an einfachen Ziegelgeometrien zeigen klare und deutliche Zusammenhänge zwischen den ermittelten Kenngrößen. Die Wahl von Probekörpern unterschiedlicher Brenntemperaturen hebt die Abhängigkeiten zwischen Temperatur, Wasseraufnahme, Dichte und Steifigkeiten anschaulich hervor. So können bei Ziegeln gleichen Ausgangsmaterials durch alleinige Untersuchung der Dichte Rückschlüsse auf die makroskopische Steifigkeit gezogen werden.

Um in weiterer Folge Simulationen der Dachziegel mittels Finite-Elemente-Methoden durchführen zu können, wurden umfangreiche Versuche zur Charakterisierung des orts- und richtungsabhängigen Materialverhaltens durchgeführt. Die Ultraschallmessungen an Ziegelscherben, welche in Längs- und Querrichtung aus Dachziegeln herausgeschnitten wurden, zeigen ein orthotropes Materialverhalten. So beträgt die Steifigkeit in Querrichtung nur 90 % der Steifigkeit in Längsrichtung, was durch eine Ausrichtung der Tonminerale in Extrusionsrichtung zu erklären ist [8][47]. Höher gebrannte Tone tendieren zwar zu einem quasi-isotropen Materialverhalten, was durch Tonmineralneubildungen und in Schmelze gehende Mineralien hervorgerufen wird, die Unterschiede in der Steifigkeit bleiben allerdings messbar und sind bei einer Modellierung entsprechend zu berücksichtigen.

Zudem konnte durch Dichtebestimmungen eine Verteilung derselben über den Querschnitt ermittelt werden. Da die Dichte, wie in ersten Messungen gezeigt, mit der Steifigkeit korreliert, ist der Steifigkeitstensor nicht nur orientierungs- sondern auch ortsabhängig. Aufgrund des Abschleifens der Probekörper und durch die Lage im Ziegel konnten etwaige Inhomogenitäten der (abgeschliffenen) Oberflächen und an den Rändern der Taschen jedoch nicht vollständig abgebildet werden.

Obwohl die Messungen der Biegezugfestigkeit im Allgemeinen sehr gute und aussagekräftige Ergebnisse liefern, zeigen im Speziellen die ermittelten Daten der Biegeversuche quergeschnittener Proben weit höhere Streuungen als jene der längsgeschnittenen. Die querverlaufenden Kerben haben einen starken Einfluss auf das Bruch- und Verformungsverhalten, was bei der Ermittlung der Bruchspannung aus der Bruchlast entsprechend berücksichtigt werden muss. Die quer ausgerichteten Kerben im Querschnitt bedingen zudem eine höhere Unsicherheit bei der Bestimmung der Biegezugfestigkeit, und weisen daher höhere Standardabweichungen auf.

Mit den in Versuchen bestimmten Korrelationsfunktionen für Brenntemperatur, Dichte, Wasserabsorption und Biegezugfestigkeit können für diese Tonmischung weitere Optimierungen vorgenommen werden. Die Anforderungen an den Ziegel hinsichtlich Beständigkeit und Festigkeit dienen dann als Ausgangswerte für Optimierungen der Ziegelgeometrie und der Brenntemperatur. So sind Materialersparnisse aufseiten der Geometrie des Dachziegels, in Kombination mit einer geringeren Brenntemperatur, möglich. Beides reduziert den notwendigen Bedarf an Primärenergie-trägern im Brennprozess und führt dabei zu geringeren Emissionen, bei gleichbleibender Qualität

des Endprodukts.

Die Ermittlung der maximalen Biegezugspannungen an den Taschenziegeln (jener Spannung, die zum Bruch führt) erlaubt einen Vergleich mit den berechneten Spannungen der Finite Elemente Simulationen an den Ziegeln komplexer Formen. Die Bruchspannungen werden durch die Untersuchungen an den präparierten Probekörpern im Vergleich zu den ganzen Taschen etwas überschätzt, was sich vermutlich auf eine oder mehrere unterschiedliche Formulierungen des *Size Effects* zurückführen lässt. Damit ist eine Möglichkeit gegeben, auch komplexe Dachziegelgeometrien mittels Finite Elemente Modellen zu untersuchen, und daraus Biegezugfestigkeiten für die untersuchte Geometrie zu erhalten.

Mittels Eingabe der ermittelten Materialparameter der Taschen (Steifigkeit in Extrusionsrichtung sowie Querdehnungszahl) können erste Ergebnisse zu Spannungs- und Verformungsverhalten an anderen Ziegelgeometrien visualisiert werden. Die damit mögliche Lokalisation von Spannungsspitzen stellt eine Grundlage für zukünftige Geometrieoptimierungen komplexer Dachziegelformen dar. Eine genaue Modellierung der Lasteinleitung (wie die in dieser Arbeit untersuchten Gummiauflagen am Landdach Verschiebeziegel) ist für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode und Biegezugprüfungen an Dachziegeln unerlässlich, wobei die Komplexität der Modellierung hier mit der Komplexität der Dachziegelgeometrie korreliert.

Gepresste Dachziegelformen zeigen herstellungsbedingt eine Tendenz zu stark ausgeprägten Heterogenitäten, wie die Computertomographie-Messungen aus Kap. 2.6 erkennen lassen. Mithilfe der Scans können solche sichtbar gemacht werden. Neben deutlich zu erkennenden Mängeln, wie Hohlräume bedingt durch Luftporen, kann eine Analyse des Porenraums [9][22] der Ziegel lokale Änderungen der Dichteverteilung zum Vorschein bringen. Für eine saubere Darstellung der Scans ist dazu noch eine Korrektur der Bildfehler (Artefakte), wie durch [19] und [43] beschrieben, notwendig.

Das dreidimensionale, bildgebende Verfahren der Computertomographie-Scans bildet ein hochwertiges Instrument zur Überprüfung und Qualitätssicherung optimierter Ziegelgeometrien - vor dem Start einer möglichen Serienproduktion. Zusammen mit den weiteren Messungen, welche die Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Dichte beschreiben, sowie den erläuterten Finite Elemente Modellen steht damit eine umfassende Charakterisierung des Dachziegels zur Verfügung, welche in zukünftigen Optimierungsprozessen genutzt werden kann.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ablaufdiagramm der Arbeit	11
1.2	Extrusionsprozess und daraus entstehende Ausrichtung der Tonminerale	12
2.1	Untersuchte Rohstoffe für die Ziegelherstellung aus der Grube aus [16]	13
2.2	Untersuchte Dachziegelarten aus [49]	14
2.3	Biberschwanzziegel samt Markierungen an der Unterseite zur Probekörperunterteilung im Zuge der Vorversuche	15
2.4	Probenquerschnitte im Vergleich: ganz geschliffene, angeschliffene sowie ungeschliffene Probekörper	16
2.5	Untersuchte Taschenziegel der Hauptversuche: Ein Vergleich der ungebrannten und gebrannten Tasche zeigt ein deutliches Schwinden in Querrichtung.	18
2.6	(a) Kammerofen und (b) Bullersring zur Bestimmung der Brenntemperatur im Ziegel	19
2.7	Probekörperbezeichnung	20
2.8	Schnittführung pro Tasche: je 4 Probekörper längs beziehungsweise quer zur Extrusionsrichtung geschnitten	20
2.9	Herausgetrennte Probekörper samt Definition der Abmessungen und des Koordinatensystems: x = Extrusionsrichtung, y = Querrichtung, z = Dickenrichtung	21
2.10	Alle 132 untersuchten Probekörper samt ihrer Reihenbezeichnung. An den Proben kann man den deutlich differenzierten Farbverlauf aufgrund der unterschiedlichen Brenntemperaturen erkennen.	22
2.11	Ablauf zur Bestimmung der Dichte und der Wasserabsorption	23
2.12	„Unterwasserwägung“ im Labor zur Volumenbestimmung	24
2.13	Dichteverteilung im Ziegel aufgrund der Anordnung der Probekörper	25
2.14	Korrelationen von Wasserabsorption und Brenntemperaturen zur Dichte	27
2.15	Unterseite eines Landdach Verschiebeziegels samt Markierungen für die zu untersuchenden Probekörper für die μ CT	28
2.16	μ CT-Bilder anhand des Probekörpers <i>CT-LD01</i>	29
3.1	Aufbau und Elemente der Ultraschallversuche	31
3.2	Signalverlauf am Oszilloskop am Beispiel der Probe <i>E04-L04</i>	31
3.3	Dynamischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Dichte	33
3.4	Zusammenhänge der Querdehnungszahlen in Abhängigkeit der Dichte	34
4.1	Wesentliche Elemente des Versuchsaufbaus für die 3-Punkt-Biegeversuche	35
4.2	Detail zur Lasteinleitung am Biegefestigkeitsprüfer sowie statisches System zur Berechnung der Steifigkeiten und Bruchspannungen	36
4.3	Messeinrichtungen zur Aufnahme des Verschiebungsweges <i>w</i> beim 3-Punkt-Biegeversuch	37
4.4	Last-Verschiebungsdiagramm am Beispiel des Probekörpers <i>Z01-L01</i>	38
4.5	Querschnittsgeometrien der Probekörper an der Bruchstelle und deren Bezeichnungen. Oben: in Längsrichtung des Ziegelscherbens geschnittene Probekörper. Unten: in Querrichtung des Ziegelscherbens geschnittene Probekörper.	38

4.6	Seitenansicht quergeschnittener Probekörper: Ermittlung der effektiven Höhe h_{eff}	42
4.7	FE-Modell des Probekörpers <i>C01-Q01</i> zur Bestimmung des E-Moduls. Dargestellt ist die Durchbiegung des Probekörpers.	42
4.8	Zerstörte Probekörper nach den 3-Punkt-Biegeversuchen	43
4.9	Statischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Dichte	45
5.1	Versuchsaufbau für die 3-Punkt-Biegeversuche der ganzen Ziegel	47
5.2	Prüfung des Gummis mittels einer Druckprüfmaschine der Fa. <i>FORM+TEST Seidner & Co.</i>	48
5.3	Biegeprüfung des Taschenziegels sowie Idealisierung zur Berechnung der Querschnittswerte	49
5.4	Erstellung eines Last-Verschiebungsdiagramms beispielhaft anhand Tasche Nr. 10.	50
5.5	Biegeprüfung der Landdach Verschiebeziegel mithilfe eines geraden Profils zur einheitlichen und reproduzierbaren Lasteinleitung.	51
5.6	Gummi in der Druckprüfung bei unterschiedlichen Auflagelängen	51
6.1	Geometrie und Randbedingungen am halben Taschenziegel	55
6.2	Spannungen aufgrund der Vertikalbelastung durch den 3-Punkt-Biegeversuch an der Wiener Tasche	56
6.3	Verschiebungen aufgrund der Vertikalbelastung durch den 3-Punkt-Biegeversuch an der Wiener Tasche	56
6.4	Geometrie und Randbedingungen am Landdach Verschiebeziegel	59
6.5	Spannungen aufgrund der Vertikalbelastung durch den 3-Punkt-Biegeversuch am Landdach Verschiebeziegel	60
7.1	Vergleich des statischen und des dynamischen E-Moduls	62

Tabellenverzeichnis

2.1	Überblick des Probenumfangs der untersuchten Scherben	14
2.2	Unterscheidung nach der Art der Probenpräparation	16
2.3	Erste Ergebnisse der Vorversuche zur Entscheidung der Art der Probenpräparation.	17
2.4	Dichte ρ und Wasseraufnahme WA_{24h} der untersuchten Ziegel	17
2.5	Übersicht der untersuchten Probekörpern in den Hauptversuchen	21
2.6	Wasseraufnahme und Dichte für die unterschiedlichen Probenreihen	25
2.7	Wasseraufnahme und Dichte bei getrennter Betrachtung der längsgeschnittenen Proben in Rand- und Mittenbereiche	25
3.1	Querdehnungszahl und dynamischer E-Modul	32
4.1	Verhältnis der dynamischen E-Module aus den Ultraschallmessungen	42
4.2	Bruchspannung und statischer E-Modul	44
5.1	Mittelwert und Standardabweichung der 25 Taschenziegel des Werkbrands	50
5.2	Mittelwerte und Standardabweichungen der Landdach Verschiebeziegel	52
6.1	Elastische Materialparameter für die Simulation an der Wiener Tasche	54
6.2	Eingabe der halben Belastung aus Tab. 5.1 als Einzellast	54
6.3	Eingabe von Materialparametern und Belastung zur Volumenverringierung des Modells	57
6.4	Eingabe des Mittelwerts der Bruchlasten aus Tab. 5.2 als Einzellast	58
7.1	Gegenüberstellung der E-Module aus den statischen und dynamischen Versuchen	62
7.2	Gegenüberstellung des statischen E-Moduls E_{stat} und der Bruchspannungen σ_b aus verschiedenen Untersuchungsmethoden	64
7.3	Bruchspannungen σ_b der FE-Simulationen im Vergleich	65

Literatur

- [1] *Abaqus 2016 Online Documentation*. Dassault Systèmes Simulia Corporation. 2015. URL: <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html> (Zugriff am 01.04.2020).
- [2] M. Allaby. *A Dictionary of Geology and Earth Sciences*. 5 edition. Oxford: Oxford University Press, 2020. ISBN: 9780198839033.
- [3] M. R. Asef und M. Farrokhrouz. „A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus“. In: *Journal of Petroleum Science and Engineering* 157 (2017), S. 359–363. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.06.055.
- [4] Z. P. Bažant. „Probability distribution of energetic-statistical size effect in quasibrittle fracture“. In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 19 (2004), S. 307–319. DOI: 10.1016/j.probengmech.2003.09.003.
- [5] Z. P. Bažant. *Scaling of Structural Strength*. 2. Aufl. Elsevier, 2005. ISBN: 978-0-7506-6849-1. DOI: 10.1016/B978-0-7506-6849-1.X5000-7.
- [6] Z. P. Bažant. „Size effect on structural strength: a review“. In: *Archive of Applied Mechanics* 69 (9-10 1999), S. 703–725. DOI: 10.1007/s004190050252.
- [7] Z. P. Bažant und A. Yavari. „Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic-statistical?“ In: *Engineering Fracture Mechanics* 72 (2005), S. 1–31. DOI: 10.1016/S0013-7944(04)00078-5.
- [8] J. Bourret, N. Tessier-Doyen, R. Guinebretiere, E. Joussein und D. S. Smith. „Anisotropy of thermal conductivity and elastic properties of extruded clay-based materials: Evolution with thermal treatment“. In: *Applied Clay Science* 116-117 (2015), S. 150–157. DOI: 10.1016/j.clay.2015.08.006.
- [9] T. Buchner, T. Kiefer, L. Zelaya-Lainez, W. Gaggel, T. Konegger und J. Füssl. „A multitechnique, quantitative characterization of the pore space of five different fired clay materials used in European brick industry“. unpublished, Preprint submitted to Applied Clay Science. Juni 2020.
- [10] T. M. Buzug. *Einführung in die Computertomographie: Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2004. ISBN: 978-3-642-18593-9.
- [11] A. Carpinteri. „Scaling laws and renormalization groups for strength and toughness of disordered materials“. In: *International Journal of Solids and Structures* 31 (3 1994), S. 291–302. DOI: 10.1016/0020-7683(94)90107-4.
- [12] A. Carpinteri, B. Chiaia, P. Cornetti und S. Puzzi. „Comments on ‚Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic-statistical?‘ by Bažant and Yavari [Engng Fract Mech 2005;72:1-31]“. In: *Engineering Fracture Mechanics* 74 (17 2007), S. 2892–2896. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2007.02.006.
- [13] R. Danzer, T. Lube, R. Morrell und P. Supancic. „Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties“. In: Hrsg. von S. Somiya. Second Edition. Braunschweig/Wiesbaden: Elsevier, 2013. Kap. Chapter 9.1: Mechanical Properties of Ceramics, S. 609–632. ISBN: 978-0-12-385469-8. DOI: 10.1016/C2010-0-66261-4.

- [14] E. A. Eissa und A. Kazi. „Relation between static and dynamic Young’s moduli of rocks“. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 25 (6) (1988), S. 479–482. DOI: 10.1016/0148-9062(88)90987-4.
- [15] A. Erker. „The thermal conductivity of the brick ceramic body (part 2) [Die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens (Teil 2)]“. In: *Ziegelindustrie International/Brick and Tile Industry International* 11 (2002), S. 32–37.
- [16] G. Früh. *Dachziegelrohstoffe Gleinstätten: Bericht und Daten*. interner technischer Bericht. Hennersdorf: Wienerberger AG, Nov. 2016.
- [17] J. García-Ten, M. J. Orts, A. Saburit und G. Silva. „Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: Influence of bulk density and firing temperature“. In: *Ceramics International* 36 (6) (2010), S. 1951–1959. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.05.012.
- [18] F. Händle. *Extrusion in Ceramics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-27102-4. DOI: 10.1007/978-3-540-27102-4.
- [19] K. Hasan, F. Sadi und S. Y. Lee. „Removal of ring artifacts in micro-CT imaging using iterative morphological filters“. In: *Signal, Image and Video Processing* 6 (2010), 41–53 (2012). DOI: 10.1007/s11760-010-0170-z.
- [20] A. Hein, N. S. Müller, P. M. Day und V. Kilikoglou. „Thermal conductivity of archaeological ceramics: The effect of inclusions, porosity and firing temperature“. In: *Thermochimica Acta* 480 (1-2) (2008), S. 35–42. DOI: 10.1016/j.tca.2008.09.012.
- [21] J. M. Ide. „Comparison of statically and dynamically determined Young’s modulus of rocks“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Bd. 22 (2). National Academy of Sciences, 1936, S. 81–92. DOI: 10.2307/86389.
- [22] H. Kariem, C. Hellmich, T. Kiefer, A. Jäger und J. Füssl. „Micro-CT-based identification of double porosity in fired clay ceramics“. In: *Journal of Materials Science* 53 (2018), S. 9411–9428. DOI: 10.1007/s10853-018-2281-9.
- [23] D. Kenfaui, D. Chateigner, M. Gomina und J. G. Noudem. „Anisotropy of the Mechanical and Thermoelectric Properties of Hot-Pressed Single-Layer and Multilayer Thick Ca₃Co₄O₉ Ceramics“. In: *Applied Ceramic Technology* 8 (1) (2011), S. 214–226. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02431.x.
- [24] T. Kiefer, J. Füssl, H. Kariem, J. Konnerth, W. Gaggl und C. Hellmich. „A multi-scale material model for the estimation of the transversely isotropic thermal conductivity tensor of fired clay bricks“. In: *Journal of the European Ceramic Society* 40 (15) (2020), S. 6200–6217. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.018.
- [25] T. Kiefer, H. Kariem, M. Lukacevic und J. Füssl. „The compressive strength of vertically perforated clay block masonry predicted by means of a unit-cell type numerical simulation tool taking discrete cracking into account“. In: *Construction and Building Materials* 150 (30) (2017), S. 24–34. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.201.
- [26] M. S. King. „Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield“. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 20 (5) (1993), S. 237–241. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90004-9.
- [27] M. Kochsiek, Hrsg. *Handbuch des Wägens*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig: Vieweg+Teubner, 1989. ISBN: 978-3-322-90574-1. DOI: 10.1007/978-3-322-90573-4.

- [28] C. Kohlhauser. „Elasticity tensor determination by means of ultrasonic pulse transmission: Application ranges in terms of specimen geometry and microstructure, off-diagonal tensor components, as well as different engineering and biomedical materials“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2009.
- [29] J. Law und R. Rennie. *A Dictionary of Physics*. 7 revised edition. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN: 978-0198714743.
- [30] J. D. Lord und R. Morrell. *Measurement Good Practice Guide No. 98: Elastic Modulus Measurement*. Teddington, UK: National Physikal Laboratory, 2006.
- [31] E. Macherauch. *Praktikum in Werkstoffkunde*. 7., durchgesehene Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1987. ISBN: 978-3-528-63306-6. DOI: 10.1007/978-3-322-86116-0.
- [32] *Mantec Bullers Rings Brochure*. Mantec Technical Ceramics Ltd. 2018. URL: <https://mantecrefractories.com/wp-content/uploads/2018/04/Bullers-Rings-Brochure.pdf> (Zugriff am 03.04.2020).
- [33] *Mantec Produktprospekt für Großkeramik*. Mantec Technical Ceramics Ltd. 2018. URL: https://mantecrefractories.com/wp-content/uploads/2018/08/Mantec-Heavy-Clay_WEB_DE_June-2018.pdf (Zugriff am 13.07.2020).
- [34] *Mitutoyo Datenblatt: Digital Messuhr ID-H 543-561D*. Mitutoyo Deutschland GmbH. 2020. URL: https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de_DE/mitutoyo/catalogue/mitutoyoData/PR/543-561D/datasheet.xhtml (Zugriff am 03.04.2020).
- [35] S. Nishinoiri und E. M. „Development of in-situ monitoring system for sintering of ceramics using Laser AE Technique“. In: *Journal of Acoustic Emission* 20 (5) (1993), S. 237–241. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90004-9.
- [36] C. Olsen, H. F. Christensen und I. L. Fabricius. „Static and dynamic Young’s moduli of chalk from the North Sea“. In: *Geophysicists* 73 (2) (2008), E41–E50. DOI: 10.1190/1.2821819.
- [37] *ÖNORM EN 1304: 2013-07-15: Dach- und Formziegel - Begriffe und Produktspezifikationen*. Wien: Austrian Standards, Juli 2013.
- [38] *ÖNORM EN 538: 1995-03-01: Tondachziegel für überlappende Verlegung - Prüfung der Biegetragfähigkeit*. Wien: Austrian Standards, März 1995.
- [39] *ÖNORM EN 772-3: 1999-01-01: Bestimmung des Nettovolumens und des prozentualen Lochanteils von Mauerziegeln mittels hydrostatischer Wägung (Unterwasserwägung)*. Wien: Austrian Standards, Jan. 1999.
- [40] *ÖNORM EN ISO 7500-1: 2018 06 15: Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung (ISO 7500-1:2017)*. Wien: Austrian Standards, Juni 2017.
- [41] M. J. Orts, A. Escardino, J. L. Amorós und F. Negre. „Microstructural changes during the firing of stoneware floor tiles“. In: *Applied Clay Science* 8 (2-3) (1993), S. 193–205. DOI: 10.1016/0169-1317(93)90037-2.
- [42] A. Pech, H. Gangoly, P. Holzer und P. Maydl. *Ziegel im Hochbau*. Hrsg. von A. Pech. Zweite, erweiterte Auflage. Basel: Birkhäuser, 2018. ISBN: 978-3-0356-1615-6. DOI: 10.1515/9783035616163.
- [43] D. Prell, Y. Kyriakou und W. A. Kalender. „Comparison of ring artifact correction methods for flat-detector CT“. In: *Physics in Medicine and Biology* 54 (2009), S. 3881–3895. DOI: 10.1088/0031-9155/54/12/018.

- [44] M. Romagnoli, M. Lassinantti Gualtieri, A. F. Gualtieri, R. Šliteris, K. Rymantas und G. Tari. „Anisotropy of green stoneware evaluated by ultrasound measurements in combination with texture analyses“. In: *Journal of the European Ceramic Society* 33 (13-14) (2013), S. 2785–2792. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.05.007.
- [45] H. Salmang und H. Scholze. *Keramik*. Hrsg. von R. Telle. 7. vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-63273-3. DOI: 10.1007/978-3-540-49469-0.
- [46] A. Varshneya und J. C. Mauro. *Fundamentals of Inorganic Glasses*. 3rd edition. Alfred, NY, USA: Elsevier, 2019. ISBN: 9780128162255.
- [47] A. Viani, R. Ševčík, M.-S. Appavou und A. Radulescu. „Evolution of fine microstructure during firing of extruded clays: A small angle neutron scattering study“. In: *Applied Clay Science* 166 (2018), S. 1–8. DOI: 10.1016/j.clay.2018.09.002.
- [48] W. Weibull. „A statistical distribution function of wide applicability“. In: *Journal of Applied Mechanics* 18 (1951), S. 293–297.
- [49] *Wienerberger Produktkatalog: Dachziegel*. Wienerberger AG. 2020. URL: <https://www.wienerberger.at/produkte/dach/dachziegel> (Zugriff am 03.04.2020).
- [50] D. P. Yale und W. H. Jamieson Jr. „Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma Fields, Kansas“. In: SPE Mid-Continent Gas Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1994, S. 209–219. DOI: 10.2118/27939-MS.
- [51] W. A. Zisman. „Comparison of the Statically and Seismologically Determined Elastic Constants of Rocks“. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Bd. 19 (7). National Academy of Sciences, 1933, S. 680–686. DOI: 10.2307/86139.
- [52] M. Zwick. „Auswirkung des Sintergefüges von keramischen Mischleitern auf Sauerstoffpermeationsrate und Biegebruchspannung“. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 2011.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anhang A

Messergebnisse der Hauptversuche

A.1 Zusammenstellung der Messergebnisse der Hauptversuche

Eine Probekörperreihe besteht aus je 12 Probekörper. Die gesammelten Daten aus der Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit, der hydrostatischen Wägung, den Ultraschallversuchen sowie den 3-Punkt-Biegeversuchen sind in Tab. A.1 bis Tab. A.4 aufgelistet.

In den Tabellen werden folgende Abkürzungen verwendet:

T	°C	Brenntemperatur
WA _{24h}	%	Wasserabsorption nach 24 h Wasserlagerung
ρ	g/cm ³	Nettorohdichte bzw. Trockenrohddichte
E_{stat}	N/mm ²	statischer E-Modul
σ_b	N/mm ²	Bruchspannung im Biegezugversuch
E_{dyn}	N/mm ²	dynamischer E-Modul
ν	–	Querdehnungszahl bzw. Poissonzahl

Das arithmetische Mittel \bar{x} und die Standardabweichung s_x der Tabellenwerte in Kapitel 2- 4 (Tab. 2.6, Tab. 2.7, Tab. 3.1, Tab. 4.2) berechnen sich aus den Messreihen $x_{i=1,2,\dots,n}$ mit $n = 12$ (bzw. $n = 6$) mit nachfolgenden Grundgleichungen der Statistik:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A.1})$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A.2})$$

Tab. A.1: gesammelte Daten aller 132 geprüften Probekörper (1/4)

Reihe	Probe	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ν [-]	
946L	D02-L01	946	10.577	1.976	16010	14.50	21664	0.192	
	D02-L02	946	10.650	1.966	15329	14.34	21458	0.169	
	D02-L03	946	10.566	1.967	15964	14.88	21690	0.176	
	D02-L04	946	10.392	1.978	16779	14.12	22183	0.196	
	D03-L01	946	10.521	1.977	16379	16.15	21799	0.199	
	D03-L02	946	10.585	1.967	16521	14.93	21894	0.169	
	D03-L03	946	10.584	1.968	16253	13.76	21717	0.177	
	D03-L04	946	10.412	1.977	15382	16.20	21657	0.203	
	D04-L01	946	10.535	1.977	16330	14.37	21891	0.195	
	D04-L02	946	10.533	1.968	16274	14.15	21726	0.175	
	D04-L03	946	10.534	1.969	15936	15.04	21761	0.175	
	D04-L04	946	10.471	1.976	16659	13.94	21707	0.207	
	984L	C03-L01	985	8.633	2.031	18178	17.59	25435	0.210
		C03-L02	985	8.715	2.019	18259	15.08	25359	0.172
		C03-L03	985	8.699	2.019	17627	16.95	25407	0.185
		C03-L04	985	8.652	2.030	18339	17.51	25411	0.206
C04-L01		984	8.633	2.031	18068	15.60	25540	0.207	
C04-L02		984	8.592	2.021	17844	15.58	25744	0.176	
C04-L03		984	8.643	2.021	18065	17.84	25884	0.181	
C04-L04		984	8.490	2.031	18569	17.24	25872	0.198	
H01-L01		984	8.699	2.029	18345	17.41	24859	0.207	
H01-L02		984	8.758	2.017	18511	16.21	25314	0.172	
H01-L03		984	8.690	2.017	18409	15.90	25517	0.170	
H01-L04		984	8.676	2.030	18792	17.31	25283	0.203	
984Q		C01-Q01	984	8.867	2.018	16931	18.15	21850	0.064
		C01-Q02	984	8.539	2.026	16825	11.92	22515	0.076
		C01-Q03	984	8.308	2.033	17252	12.53	23067	0.076
		C01-Q04	984	8.015	2.039	17553	13.59	23313	0.079
	H03-Q01	984	9.138	2.009	15252	10.71	20875	0.053	
	H03-Q02	984	8.913	2.014	15487	10.90	21661	0.075	
	H03-Q03	984	8.720	2.019	16580	12.43	21801	0.064	
	H03-Q04	984	8.478	2.025	16417	15.92	22424	0.069	
	H04-Q01	983	8.979	2.016	15821	13.78	21502	0.059	
	H04-Q02	983	8.833	2.019	16648	12.54	21483	0.057	
	H04-Q03	983	8.717	2.023	17080	12.16	21972	0.067	
	H04-Q04	983	8.524	2.027	17522	17.16	22010	0.061	

Tab. A.2: gesammelte Daten aller 132 geprüften Probekörper (2/4)

Reihe	Probe	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ν [-]	
1002L	B02-L01	1001	6.381	2.104	23366	19.71	31174	0.205	
	B02-L02	1001	6.585	2.093	22552	19.33	31140	0.182	
	B02-L03	1001	6.463	2.096	22733	20.38	31268	0.194	
	B02-L04	1001	6.218	2.114	24739	17.17	31504	0.213	
	B04-L01	1003	6.300	2.108	23021	20.22	31181	0.202	
	B04-L02	1003	6.429	2.098	23858	18.23	31293	0.179	
	B04-L03	1003	6.425	2.097	23803	17.46	31662	0.181	
	B04-L04	1003	6.273	2.112	24230	18.33	31214	0.216	
	F01-L01	1002	6.114	2.112	22793	19.27	31696	0.195	
	F01-L02	1002	6.324	2.102	22803	19.11	31596	0.181	
	F01-L03	1002	6.279	2.104	23466	16.85	31603	0.188	
	F01-L04	1002	6.175	2.115	24844	17.73	31348	0.213	
	1002Q	B01-Q01	1004	6.582	2.095	20360	14.00	27550	0.088
		B01-Q02	1004	6.200	2.107	21613	14.50	28628	0.088
		B01-Q03	1004	5.890	2.119	21449	20.05	29500	0.091
		B01-Q04	1004	5.780	2.127	23003	14.97	30083	0.089
F03-Q01		1002	6.843	2.084	19310	13.35	26464	0.092	
F03-Q02		1002	6.574	2.094	20835	19.44	27387	0.086	
F03-Q03		1002	6.371	2.103	21362	19.39	27943	0.092	
F03-Q04		1002	6.109	2.111	22107	14.10	28631	0.090	
F04-Q01		1000	6.702	2.091	21147	15.10	26864	0.090	
F04-Q02		1000	6.442	2.098	20956	21.24	27378	0.094	
F04-Q03		1000	6.365	2.105	21779	20.80	28338	0.092	
F04-Q04		1000	6.189	2.109	23140	21.05	28439	0.094	
1006L		Z01-L01	1006	6.143	2.125	24802	20.52	31956	0.205
		Z01-L02	1006	6.099	2.115	24579	20.97	32519	0.178
		Z01-L03	1006	6.098	2.116	23659	19.80	32670	0.179
		Z01-L04	1006	6.169	2.124	24049	20.02	32088	0.213
	Z02-L01	1006	6.236	2.119	24534	20.42	32619	0.187	
	Z02-L02	1006	6.233	2.107	22137	18.62	32012	0.182	
	Z02-L03	1006	6.249	2.107	23945	20.09	32024	0.174	
	Z02-L04	1006	6.228	2.117	24468	19.94	32045	0.208	
	Z03-L01	1006	6.045	2.125	24733	20.82	32723	0.196	
	Z03-L02	1006	6.065	2.112	24080	19.53	32718	0.181	
	Z03-L03	1006	6.046	2.112	23898	20.56	33066	0.168	
	Z03-L04	1006	6.005	2.125	25125	20.76	32830	0.194	

Tab. A.3: gesammelte Daten aller 132 geprüften Probekörper (3/4)

Reihe	Probe	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ν [-]	
1006Q	Z04-Q01	1006	6.206	2.114	21154	18.27	29239	0.084	
	Z04-Q02	1006	6.159	2.116	20276	21.11	29256	0.083	
	Z04-Q03	1006	6.125	2.117	21485	16.07	29193	0.078	
	Z04-Q04	1006	6.065	2.118	21505	20.33	29079	0.087	
	Z05-Q01	1006	5.398	2.147	22334	21.54	31494	0.103	
	Z05-Q02	1006	5.368	2.150	22190	16.70	31919	0.098	
	Z05-Q03	1006	5.292	2.153	22902	16.39	31682	0.100	
	Z05-Q04	1006	5.220	2.155	23545	17.38	31916	0.096	
	Z06-Q01	1006	5.444	2.143	20584	16.52	30676	0.089	
	Z06-Q02	1006	5.416	2.149	23294	22.91	31044	0.082	
	Z06-Q03	1006	5.380	2.151	23446	19.77	30853	0.066	
	Z06-Q04	1006	5.334	2.150	21658	19.15	31096	0.089	
	1032.5L	A02-L01	1032	4.231	2.210	28483	20.79	38515	0.203
		A02-L02	1032	4.311	2.197	28213	21.91	38398	0.185
		A02-L03	1032	4.217	2.201	27881	23.28	38502	0.171
		A02-L04	1032	4.051	2.219	29289	20.16	38302	0.207
E02-L01		1031	4.400	2.201	27399	22.45	37442	0.201	
E02-L02		1031	4.496	2.188	27401	20.17	37458	0.181	
E02-L03		1031	4.402	2.191	27283	21.35	37539	0.188	
E02-L04		1031	4.244	2.209	28609	22.33	37624	0.205	
E04-L01		1032	4.250	2.209	28414	21.92	37997	0.198	
E04-L02		1032	4.331	2.196	27793	20.57	37959	0.176	
E04-L03		1032	4.287	2.198	27822	21.61	37630	0.185	
E04-L04		1032	4.263	2.209	28709	23.53	37559	0.208	
1032.5Q		A04-Q01	1033	4.126	2.204	25171	24.67	34888	0.124
		A04-Q02	1033	4.024	2.212	25251	25.00	34933	0.113
		A04-Q03	1033	3.956	2.216	25453	26.99	35964	0.111
		A04-Q04	1033	3.842	2.221	27823	17.06	35893	0.110
	E01-Q01	1034	4.403	2.194	24283	23.53	34091	0.117	
	E01-Q02	1034	4.110	2.206	27336	18.40	34315	0.101	
	E01-Q03	1034	3.910	2.214	27777	24.01	35401	0.119	
	E01-Q04	1034	3.809	2.221	27314	24.07	35770	0.099	
	E03-Q01	1033	4.494	2.189	25093	15.48	33378	0.104	
	E03-Q02	1033	4.353	2.198	21787	17.35	34861	0.118	
	E03-Q03	1033	4.173	2.206	24909	25.37	34972	0.111	
	E03-Q04	1033	4.008	2.211	25579	17.12	35084	0.118	

Tab. A.4: gesammelte Daten aller 132 geprüften Probekörper (4/4)

Reihe	Probe	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ν [-]	
1055L	I01-L01	1056	3.158	2.259	30261	23.86	41014	0.206	
	I01-L02	1056	3.374	2.245	30653	22.99	40712	0.190	
	I01-L03	1056	3.373	2.245	30839	22.88	40420	0.197	
	I01-L04	1056	3.209	2.258	31629	23.27	41247	0.206	
	I03-L01	1056	3.292	2.252	30666	23.86	40779	0.203	
	I03-L02	1056	3.547	2.238	31102	22.37	40250	0.187	
	I03-L03	1056	3.520	2.237	30042	20.74	39816	0.199	
	I03-L04	1056	3.314	2.252	30207	23.00	40398	0.207	
	I04-L01	1052	3.326	2.253	29316	22.90	41340	0.195	
	I04-L02	1052	3.497	2.240	30673	23.85	40201	0.195	
	I04-L03	1052	3.415	2.242	30973	22.18	40549	0.201	
	I04-L04	1052	3.236	2.254	31056	22.50	40620	0.208	
	1086L	G02-L01	1087	2.436	2.277	29395	23.20	43774	0.203
		G02-L02	1087	2.560	2.266	30724	21.35	44477	0.179
		G02-L03	1087	2.541	2.267	26409	21.74	43939	0.189
		G02-L04	1087	2.381	2.278	29159	22.61	44019	0.205
G03-L01		1087	2.378	2.280	30749	22.89	44222	0.201	
G03-L02		1087	2.534	2.267	31183	19.70	43560	0.195	
G03-L03		1087	2.521	2.269	28446	21.14	42572	0.211	
G03-L04		1087	2.354	2.281	29214	23.42	43896	0.194	
G04-L01		1083	2.344	2.284	25327	21.91	43800	0.202	
G04-L02		1083	2.507	2.272	26424	21.97	43591	0.197	
G04-L03		1083	2.480	2.272	30408	22.61	44286	0.185	
G04-L04		1083	2.328	2.283	31156	21.41	43930	0.195	

A.2 Last-Verschiebungsdiagramme der 3-Punkt-Biegeversuche

Nachfolgend sind sämtliche Last-Verschiebungsdiagramme der Hauptversuche dargestellt. Aus Ihnen werden die statischen E-Module gemäß Kapitel 4 ermittelt.

Labor 946°C - in Längsrichtung (1/3)

Tab. A.5: Auswertung Tasche D02

Probenname	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
D02-L01	16010.06	14.50
D02-L02	15329.40	14.34
D02-L03	15964.38	14.88
D02-L04	16778.79	14.11

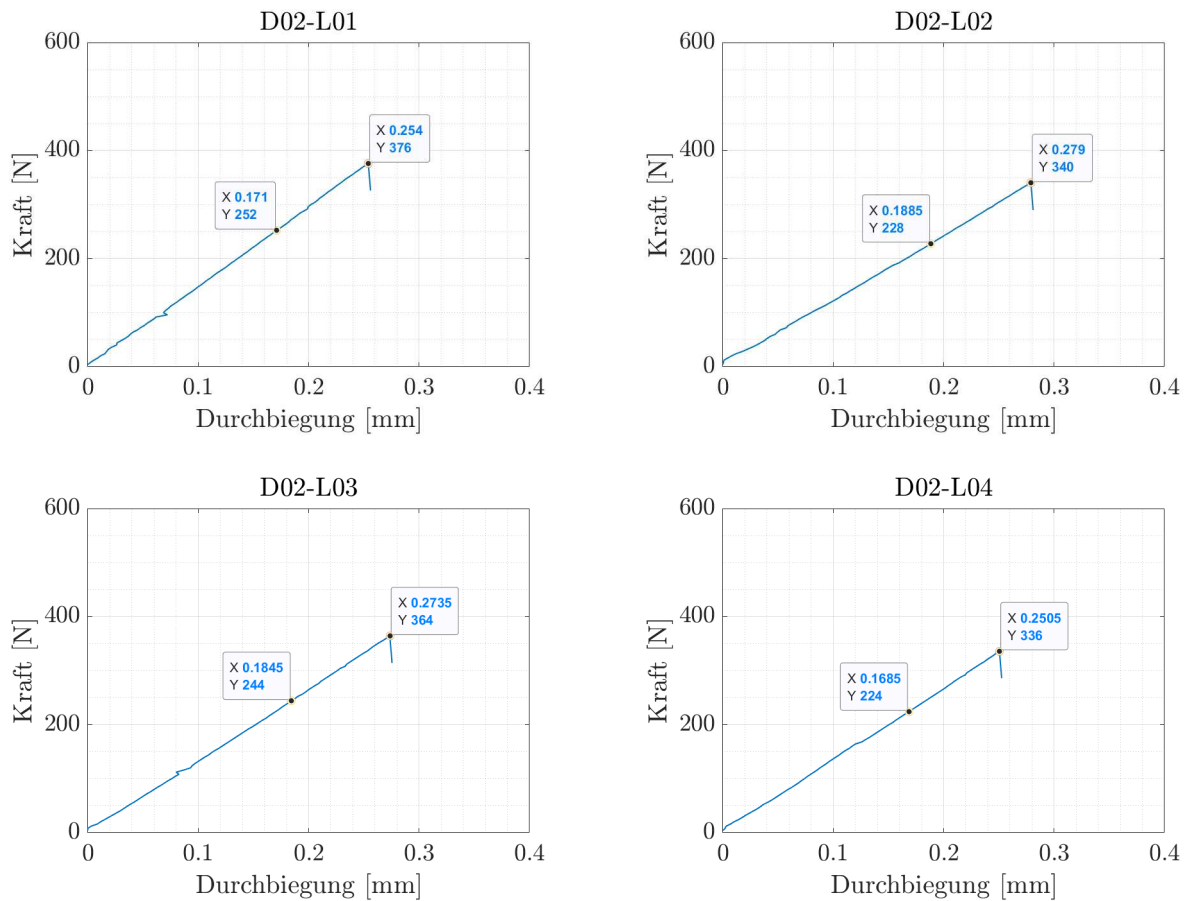


Abb. A.1: Probekörper des Taschenziegels D02 (Laborreihe 946°C, Längsrichtung)

Labor 946°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.6: Auswertung Tasche D03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
D03-L01	16379.46	16.15
D03-L02	16520.52	14.92
D03-L03	16252.91	13.76
D03-L04	15381.81	16.20

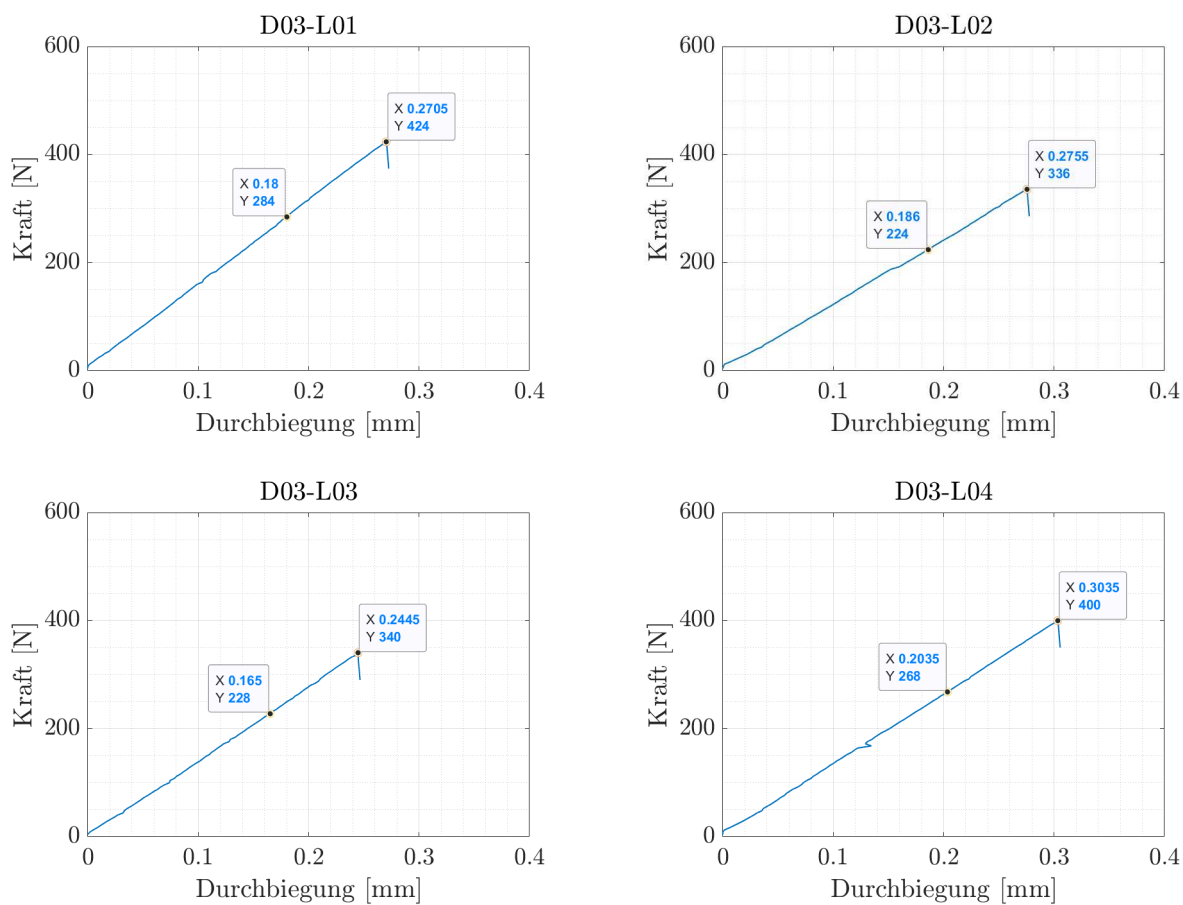


Abb. A.2: Probekörper des Taschenziegels D03 (Laborreihe 946°C, Längsrichtung)

Labor 946°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.7: Auswertung Tasche D04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
D04-L01	16329.59	14.37
D04-L02	16273.91	14.15
D04-L03	15936.04	15.04
D04-L04	16658.69	13.94

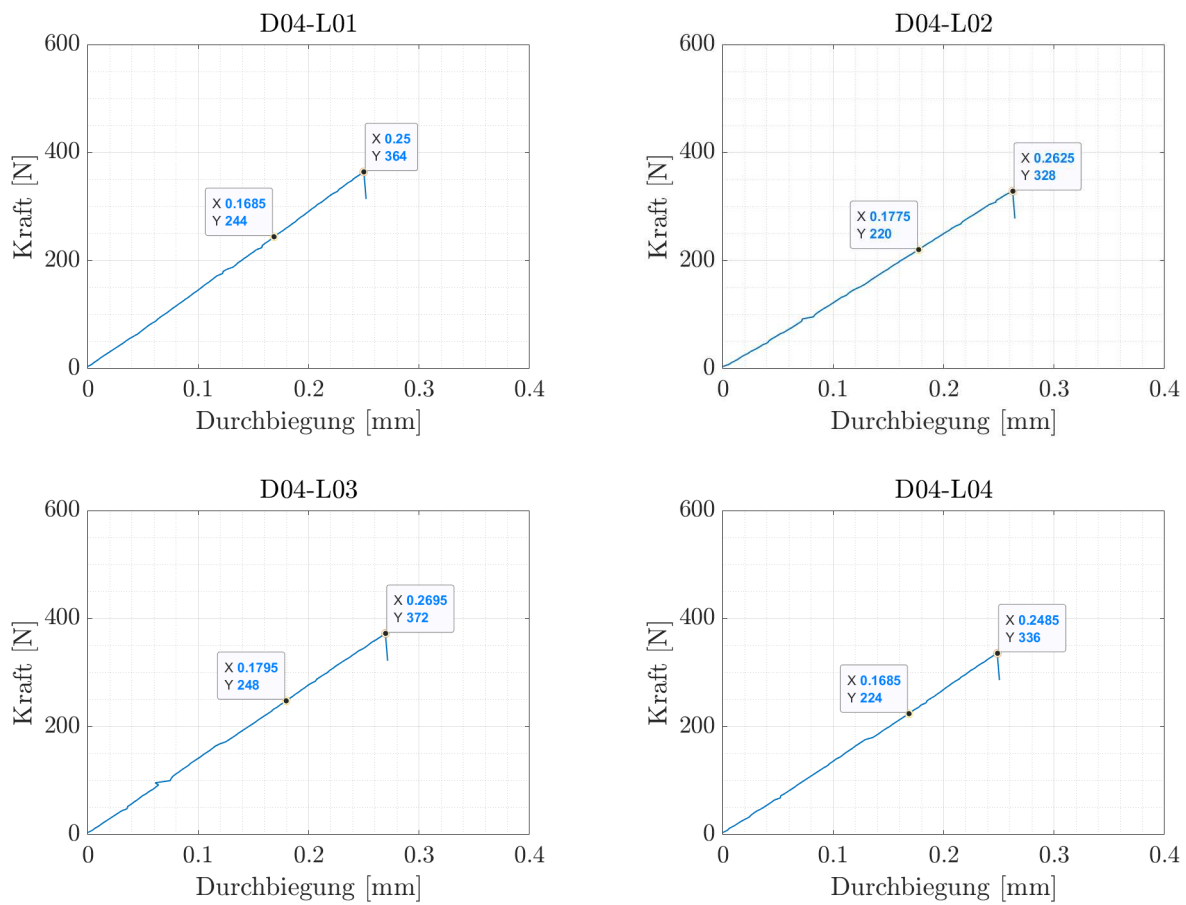


Abb. A.3: Probekörper des Taschenziegels D04 (Laborreihe 946°C, Längsrichtung)

Labor 984°C - in Längsrichtung (1/3)

Tab. A.8: Auswertung Tasche C03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
C03-L01	18177.74	17.59
C03-L02	18259.41	15.08
C03-L03	17626.52	16.95
C03-L04	18339.42	17.51

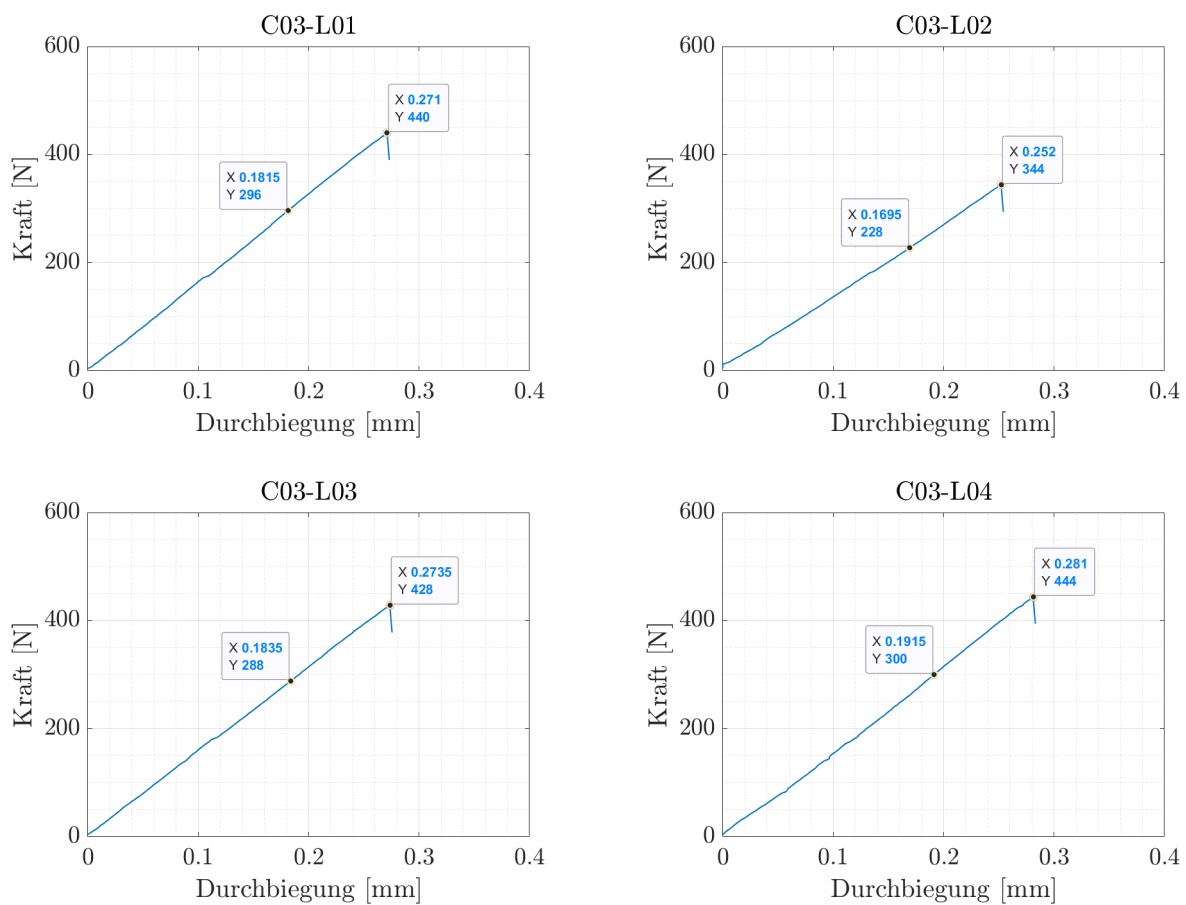


Abb. A.4: Probekörper des Taschenziegels C03 (Laborreihe 984°C, Längsrichtung)

Labor 984°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.9: Auswertung Tasche C04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
C04-L01	18067.78	15.60
C04-L02	17843.51	15.58
C04-L03	18065.36	17.84
C04-L04	18568.82	17.24

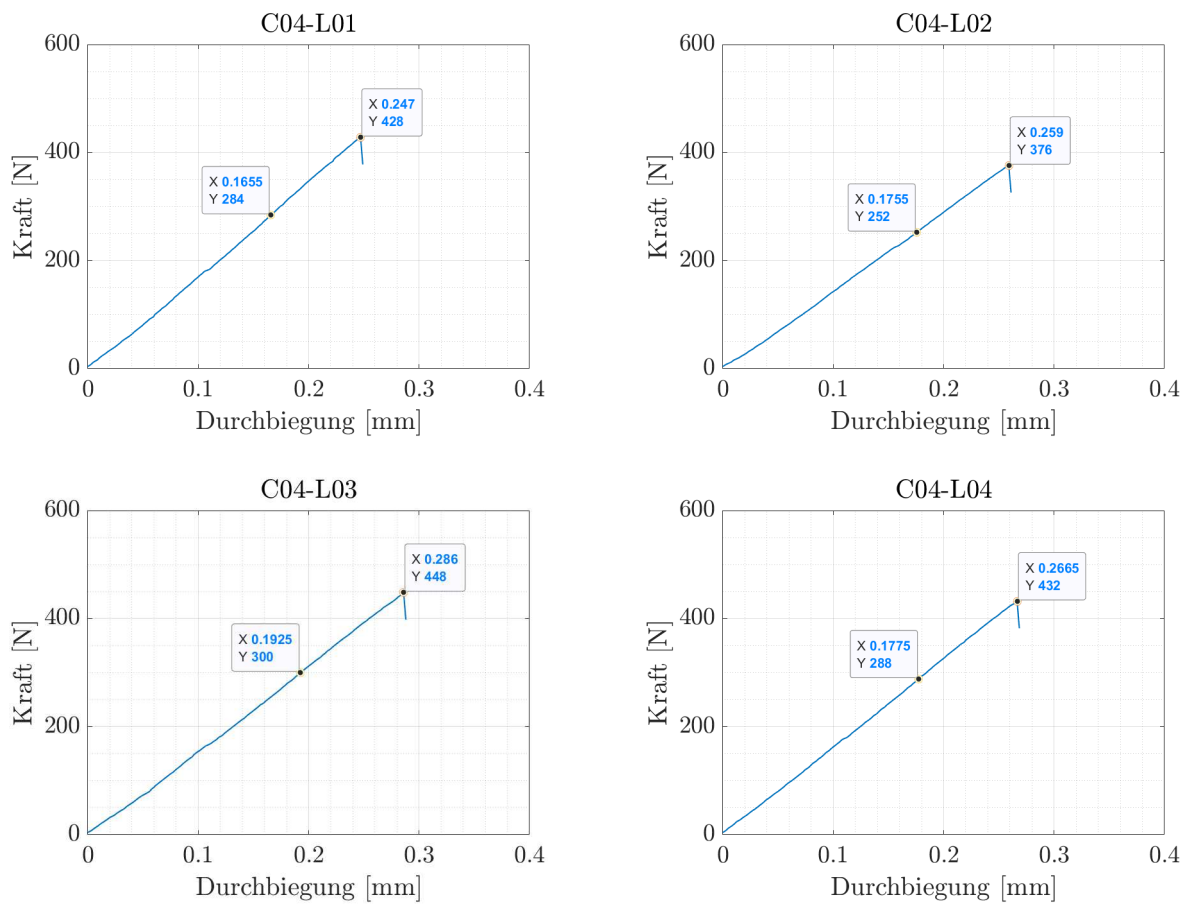


Abb. A.5: Probekörper des Taschenziegels C04 (Laborreihe 984°C, Längsrichtung)

Labor 984°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.10: Auswertung Tasche H01

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
H01-L01	18344.64	17.40
H01-L02	18511.47	16.21
H01-L03	18408.60	15.89
H01-L04	18792.24	17.30

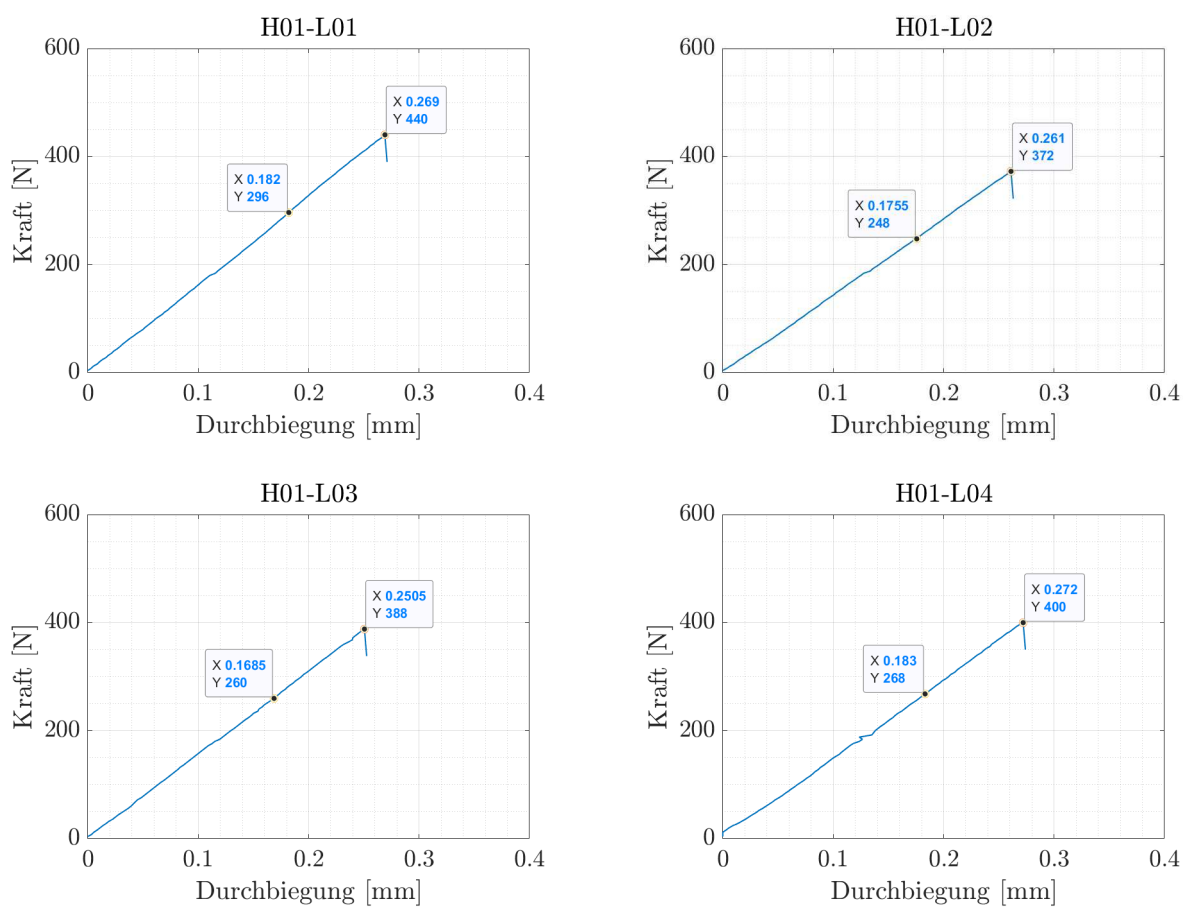


Abb. A.6: Probekörper des Taschenziegels H01 (Laborreihe 984°C, Längsrichtung)

Labor 984°C - in Querrichtung (1/3)

Tab. A.11: Auswertung Tasche C01

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
C01-Q01*	16930.86	18.14*
C01-Q02	16824.52	11.92
C01-Q03	17251.63	12.52
C01-Q04	17552.85	13.59

*Bruch in Kerbe

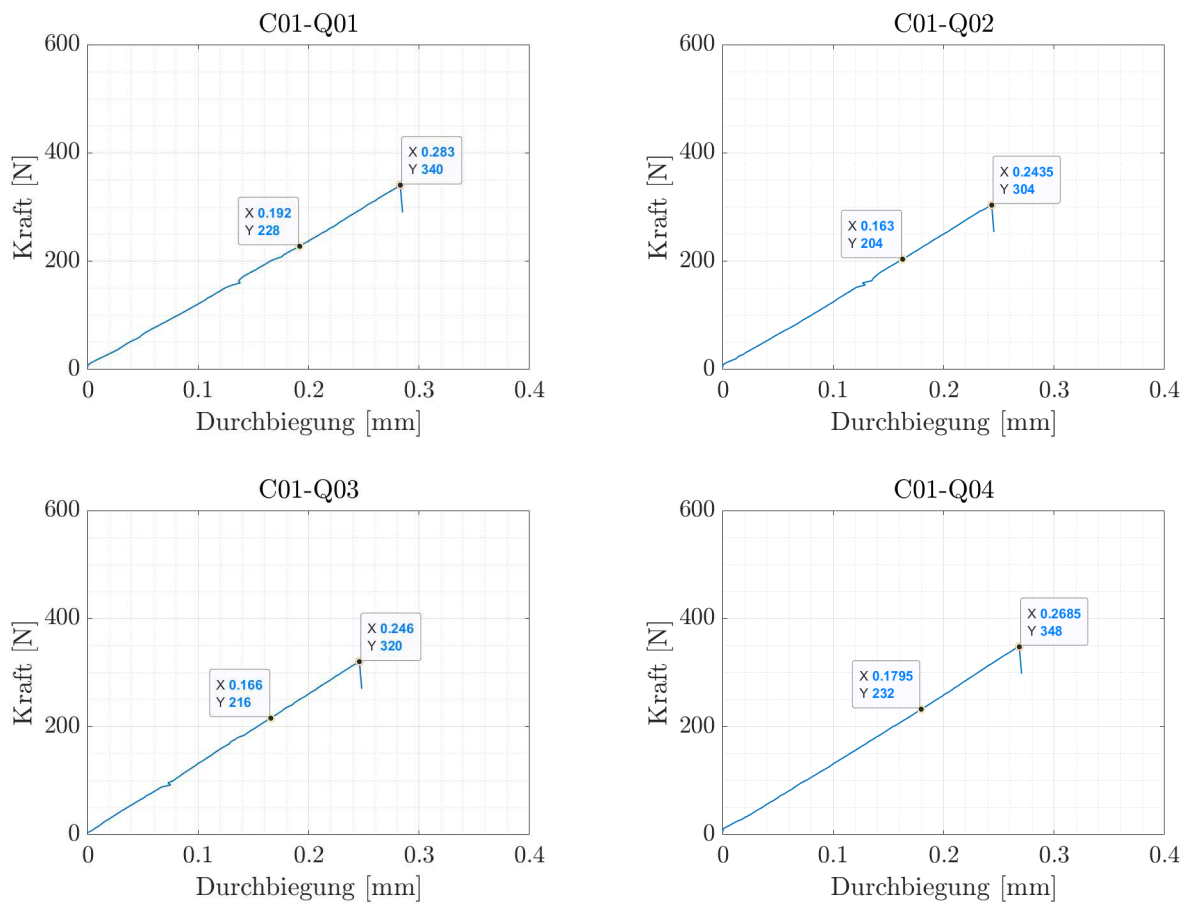


Abb. A.7: Probekörper des Taschenziegels C01 (Laborreihe 984°C, Querrichtung)

Labor 984°C - in Querrichtung (2/3)

Tab. A.12: Auswertung Tasche H03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
H03-Q01	15252.40	10.70
H03-Q02	15486.59	10.89
H03-Q03	16580.29	12.43
H03-Q04*	16416.99	15.91*

*Bruch in Kerbe

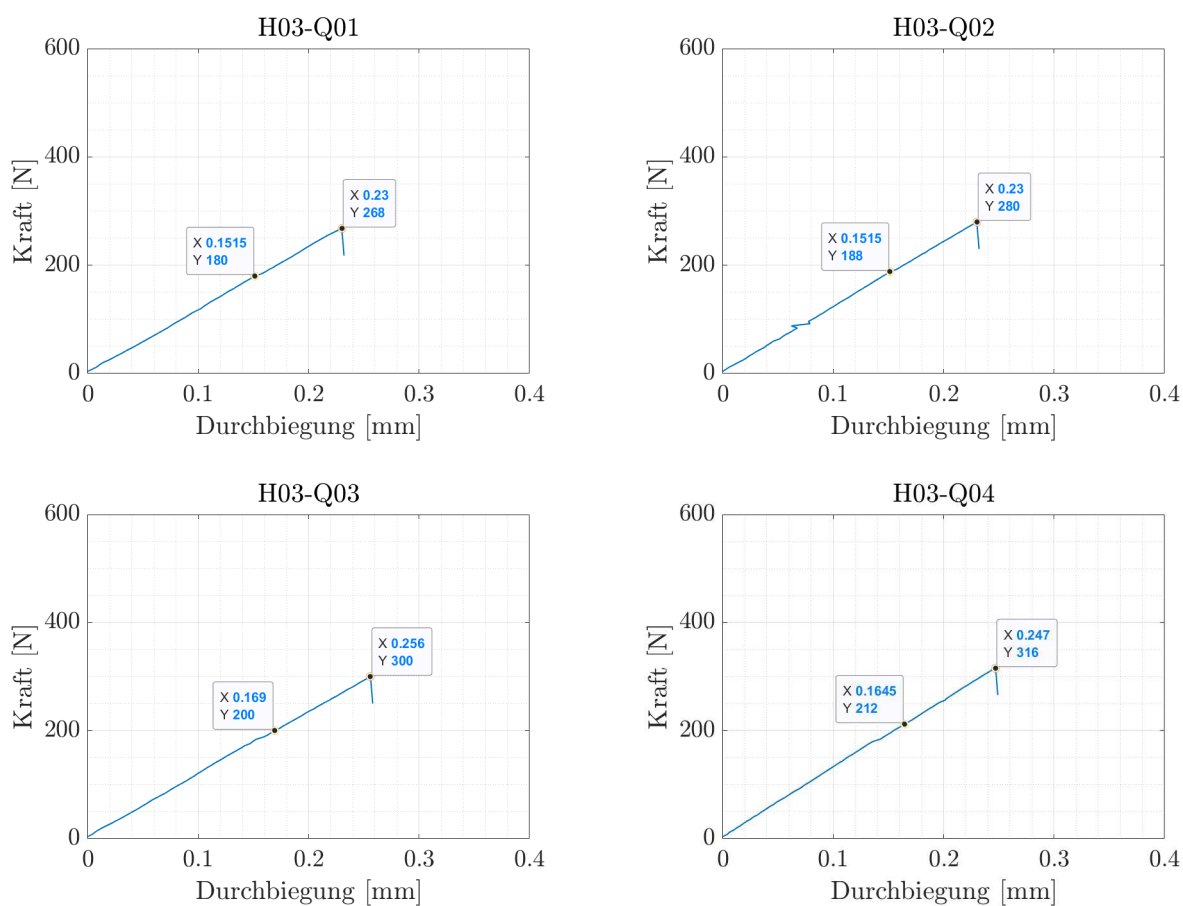


Abb. A.8: Probekörper des Taschensiegels H03 (Laborreihe 984°C, Querrichtung)

Labor 984°C - in Querrichtung (3/3)

Tab. A.13: Auswertung Tasche H04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
H04-Q01*	15821.46	13.78*
H04-Q02	16647.51	12.54
H04-Q03	17079.67	12.15
H04-Q04*	17522.40	17.16*

*Bruch in Kerbe

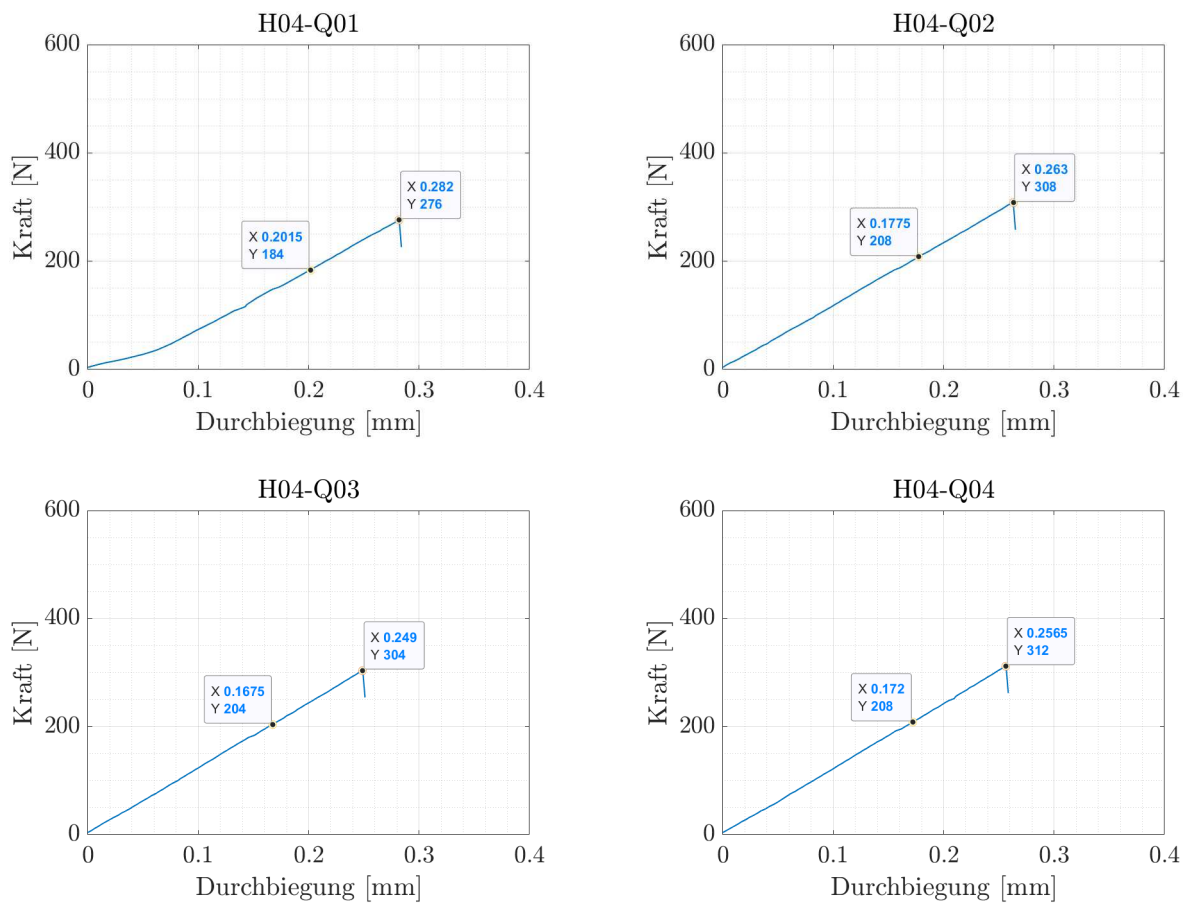


Abb. A.9: Probekörper des Taschensiegels H04 (Laborreihe 984°C, Querrichtung)

Labor 1002°C - in Längsrichtung (1/3)

Tab. A.14: Auswertung Tasche B02

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
B02-L01	23366.34	19.71
B02-L02	22551.77	19.32
B02-L03	22733.03	20.37
B02-L04	24738.85	17.16

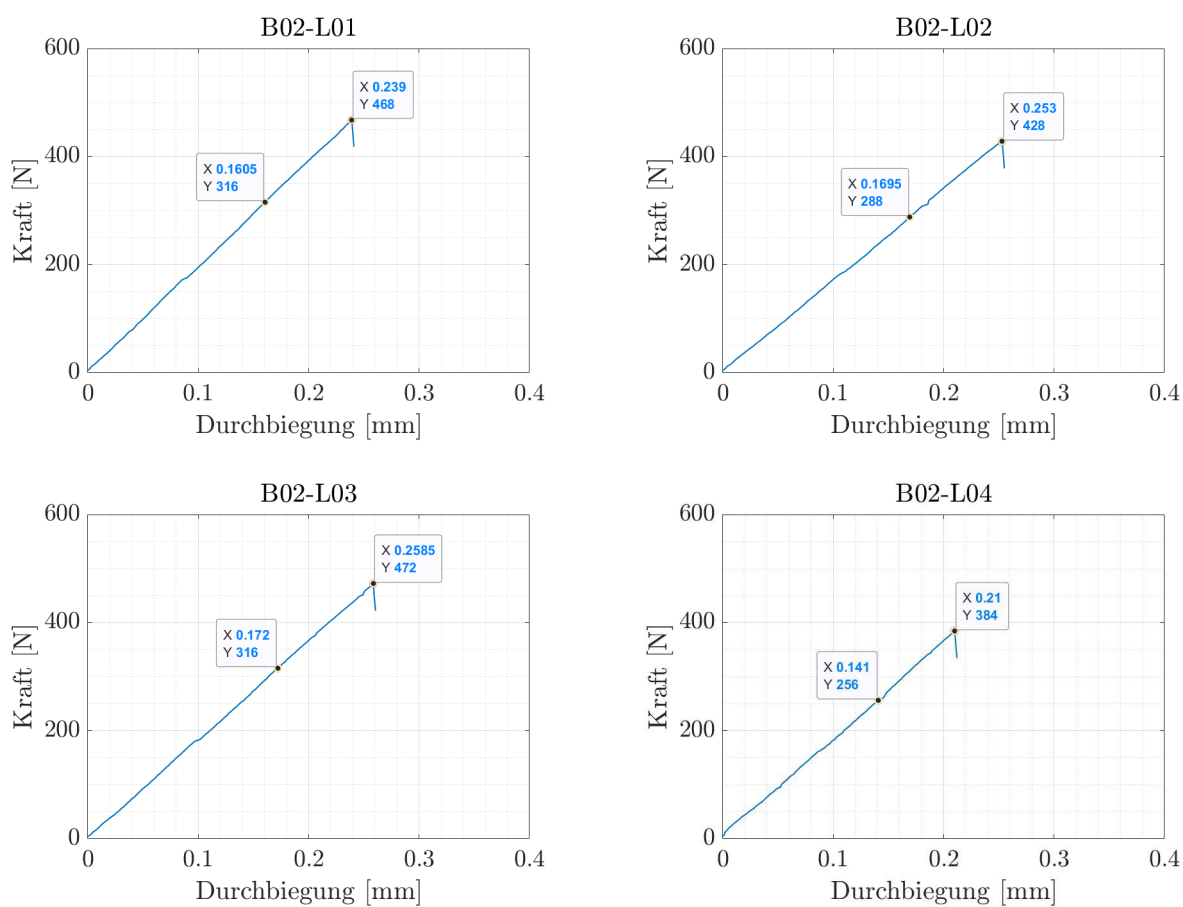


Abb. A.10: Probekörper des Taschensiegels B02 (Laborreihe 1002°C, Längsrichtung)

Labor 1002°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.15: Auswertung Tasche B04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
B04-L01	23020.58	20.21
B04-L02	23857.60	18.22
B04-L03	23802.65	17.46
B04-L04	24230.14	18.33

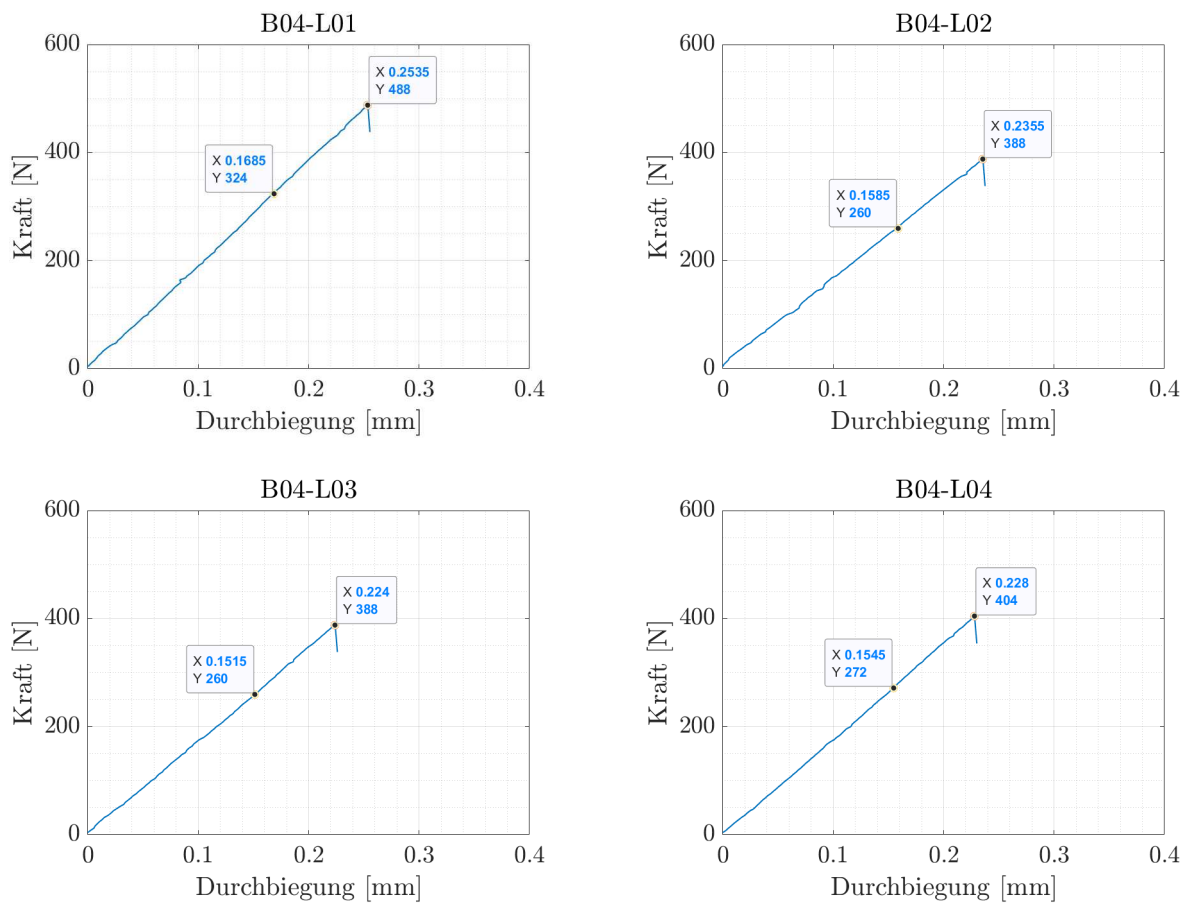


Abb. A.11: Probekörper des Taschenziegels B04 (Laborreihe 1002°C, Längsrichtung)

Labor 1002°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.16: Auswertung Tasche F01

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
F01-L01	22793.33	19.26
F01-L02	22802.90	19.11
F01-L03	23466.12	16.84
F01-L04	24844.40	17.72

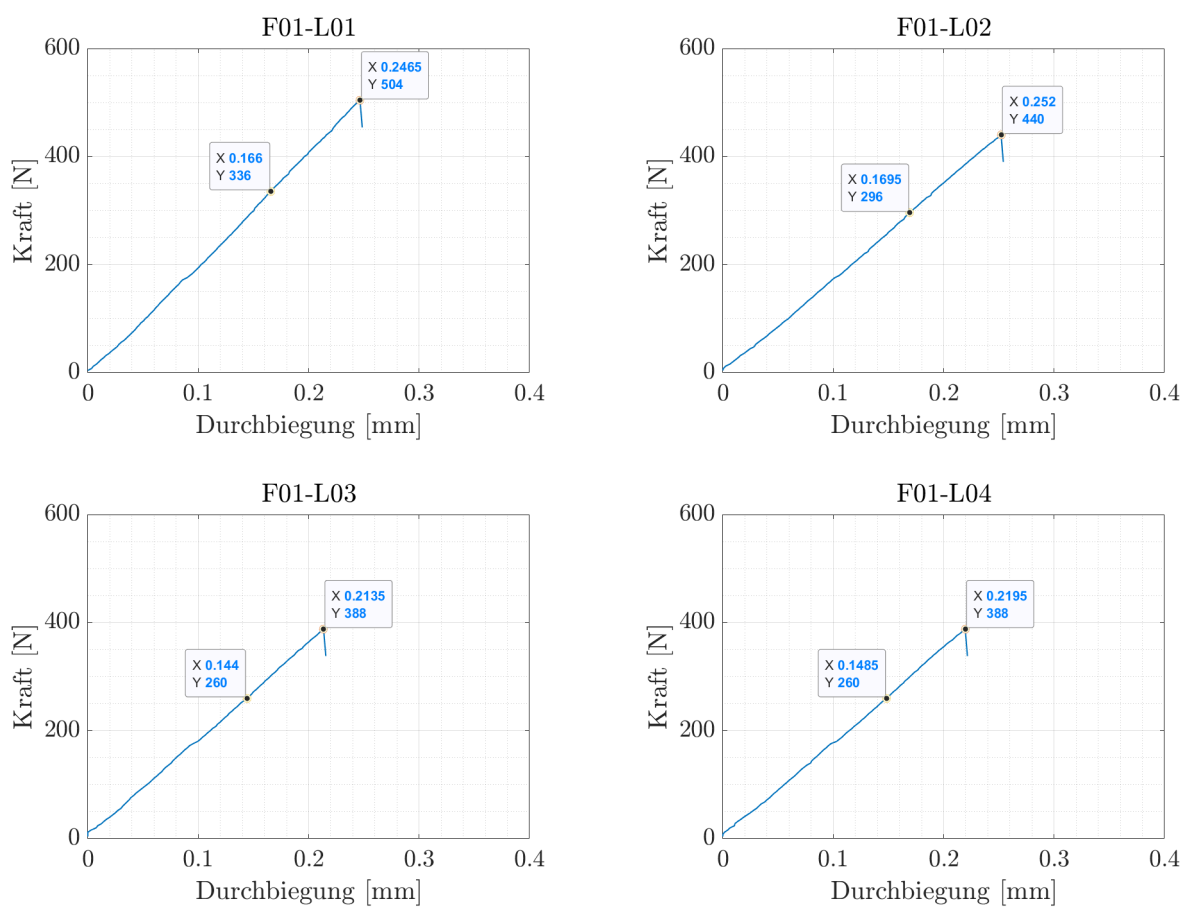


Abb. A.12: Probekörper des Taschensiegels F01 (Laborreihe 1002°C, Längsrichtung)

Labor 1002°C - in Querrichtung (1/3)

Tab. A.17: Auswertung Tasche B01

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
B01-Q01	20359.96	14.00
B01-Q02	21613.36	14.50
B01-Q03*	21449.26	20.05*
B01-Q04	23002.64	14.96

*Bruch in Kerbe

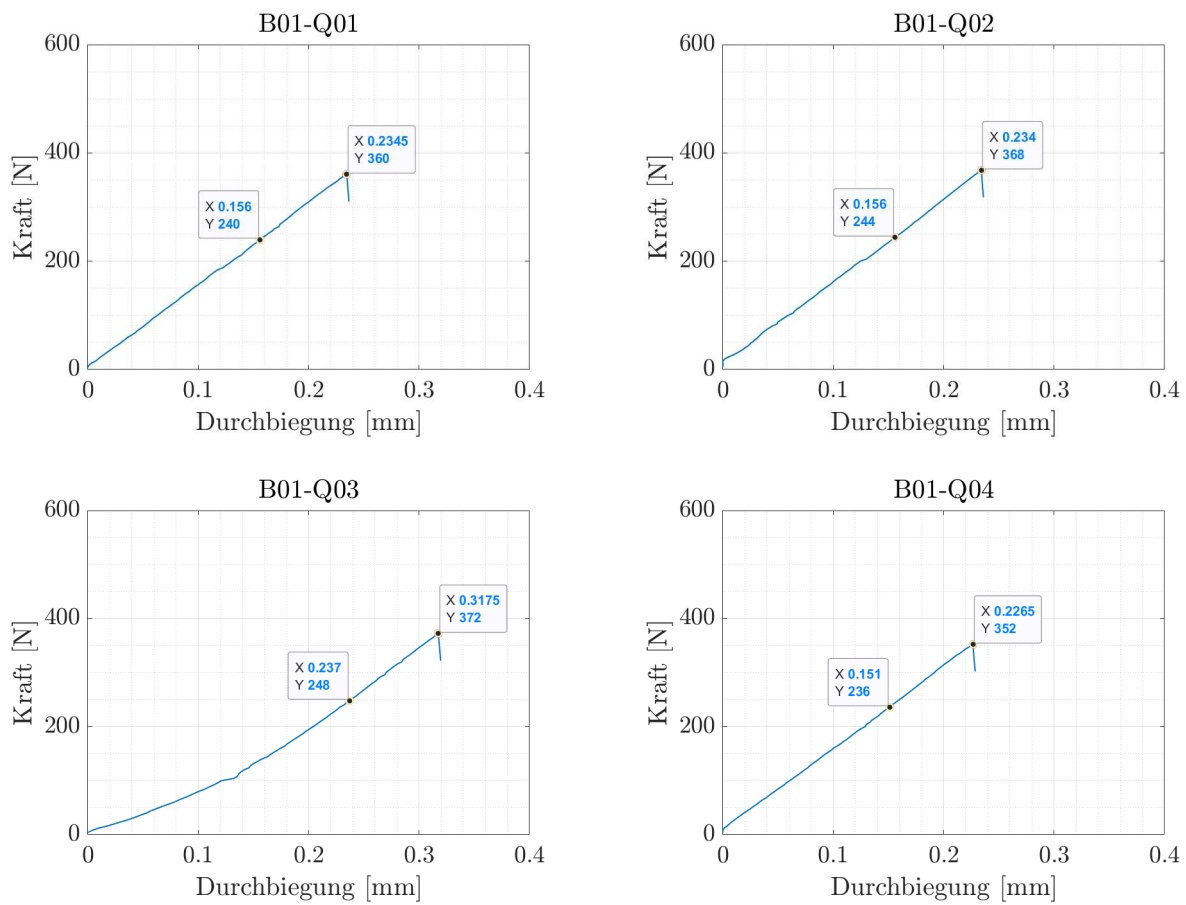


Abb. A.13: Probekörper des Taschenziegels B01 (Laborreihe 1002°C, Querrichtung)

Labor 1002°C - in Querrichtung (2/3)

Tab. A.18: Auswertung Tasche F03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
F03-Q01	19310.10	13.34
F03-Q02*	20834.81	19.44*
F03-Q03*	21361.65	19.39*
F03-Q04	22107.20	14.10

*Bruch in Kerbe

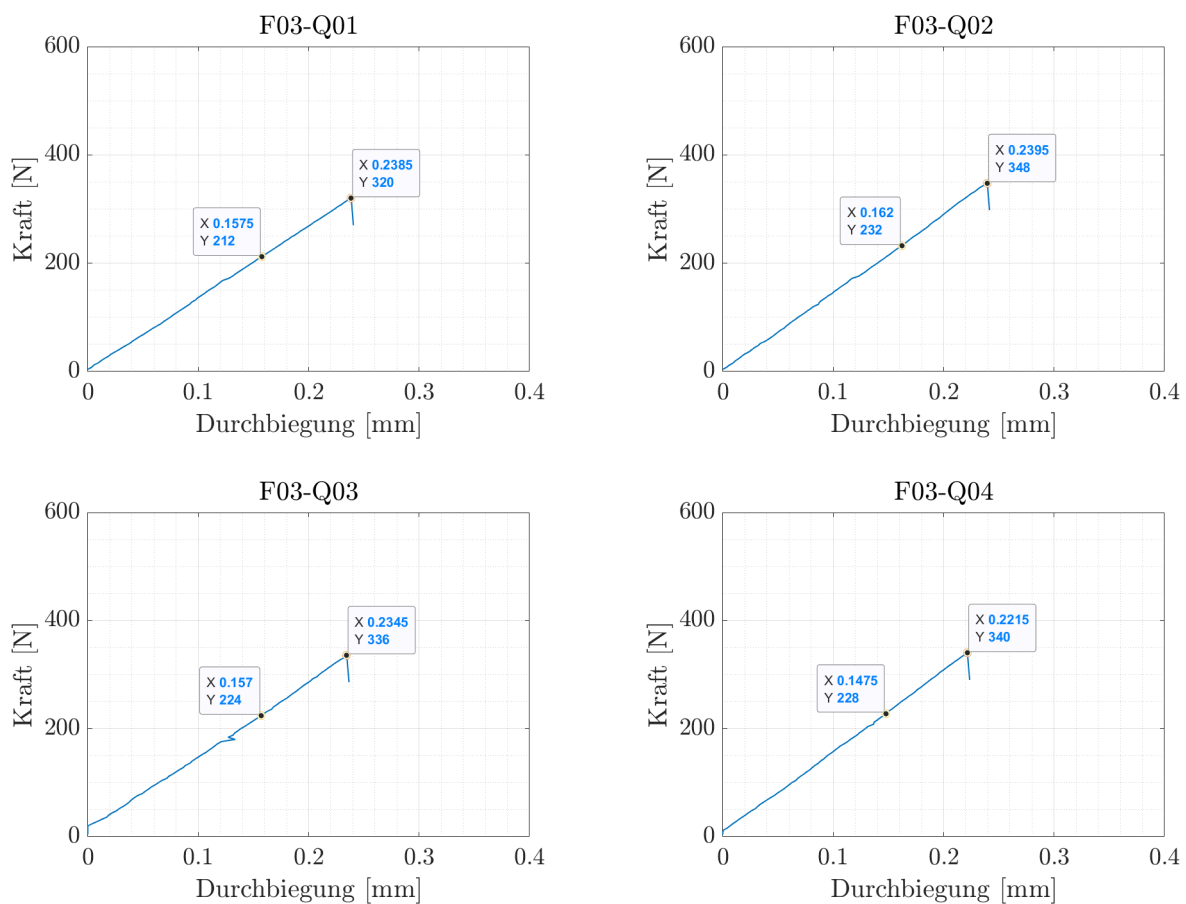


Abb. A.14: Probekörper des Taschenziegels F03 (Laborreihe 1002°C, Querrichtung)

Labor 1002°C - in Querrichtung (3/3)

Tab. A.19: Auswertung Tasche F04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
F04-Q01	21146.66	15.10
F04-Q02*	20956.05	21.24*
F04-Q03*	21778.54	20.79*
F04-Q04*	23140.05	21.05*

*Bruch in Kerbe

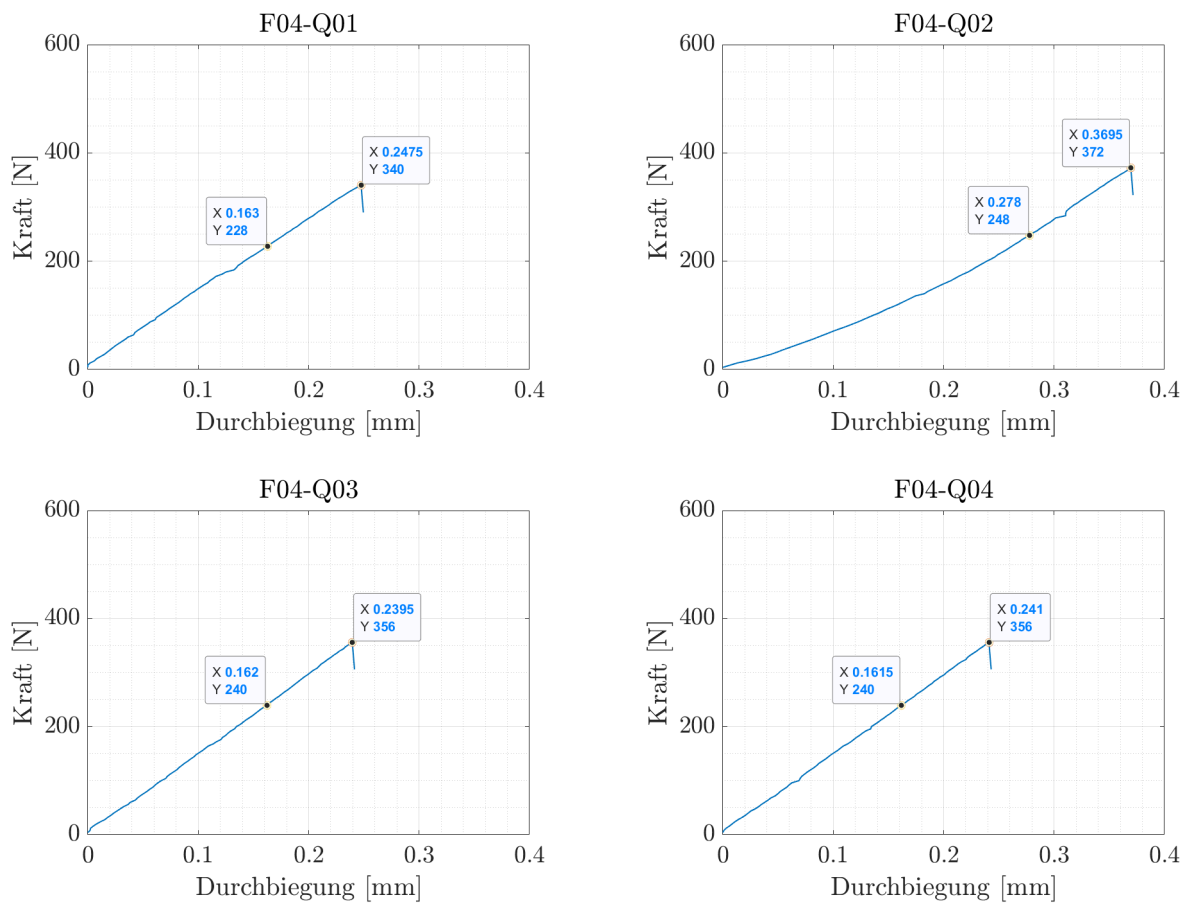


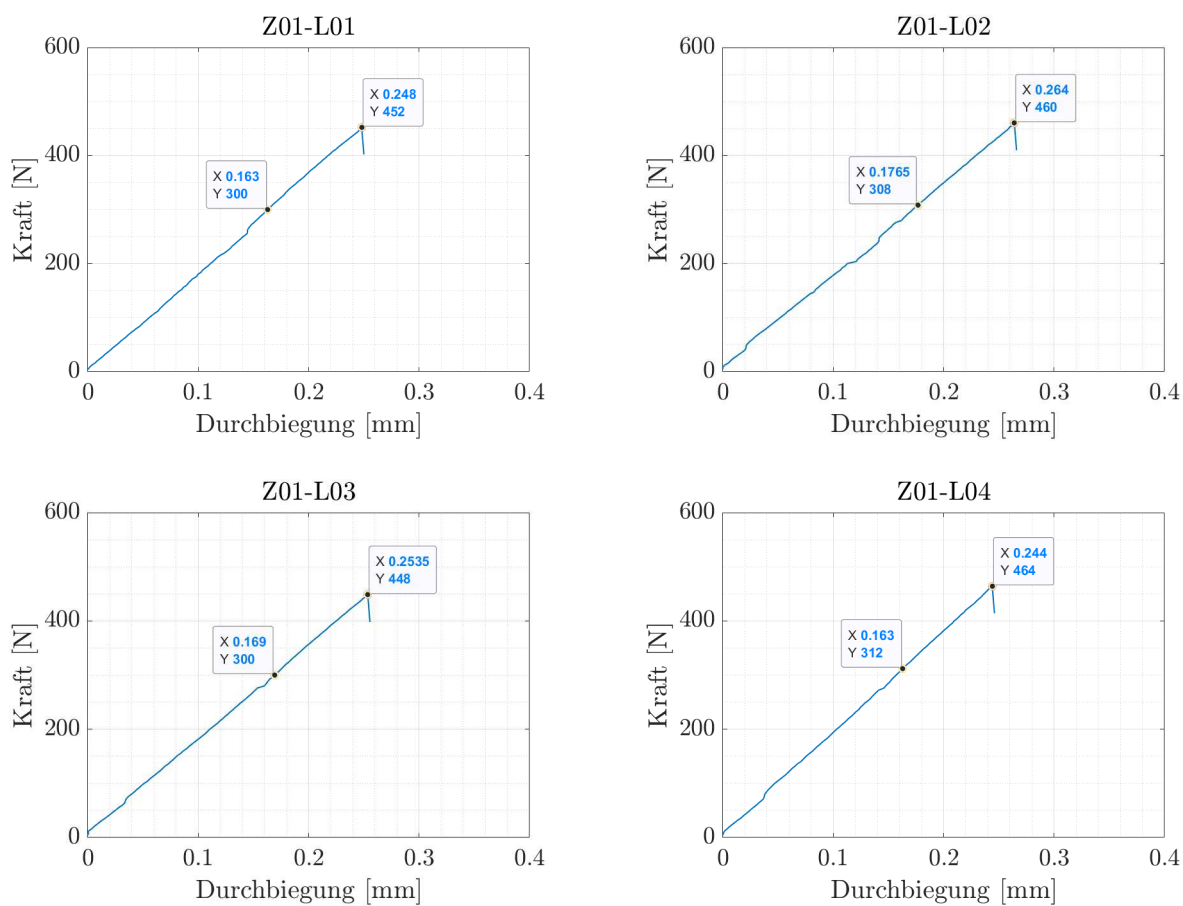
Abb. A.15: Probekörper des Taschenziegels F04 (Laborreihe 1002°C, Querrichtung)

Werksbrand 1006°C - in Längsrichtung (1/3)

Ziegelproben werksseitig Gleinstätten

Tab. A.20: Auswertung Tasche Z01

Probenname	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Z01-L01	24802.09	20.51
Z01-L02	24578.71	20.96
Z01-L03	23659.37	19.79
Z01-L04	24049.44	20.01

**Abb. A.16:** Probekörper des Taschenziegels Z01 (Werksreihe 1006°C, Längsrichtung)

Werksbrand 1006°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.21: Auswertung Tasche Z02

Probenname	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Z02-L01	24534.19	20.41
Z02-L02	22137.33	18.61
Z02-L03	23945.01	20.08
Z02-L04	24467.79	19.93

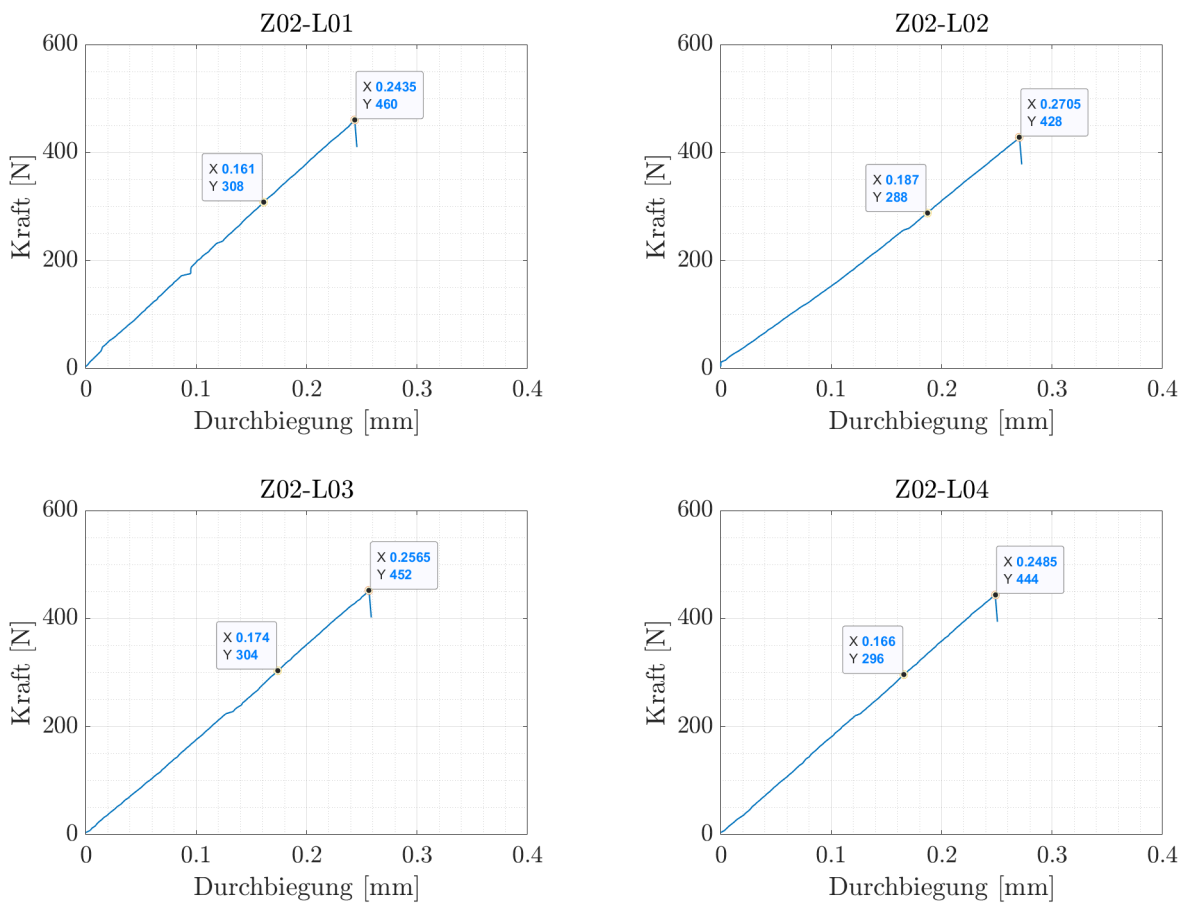


Abb. A.17: Probekörper des Taschenziegels Z02 (Werksreihe 1006°C, Längsrichtung)

Werksbrand 1006°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.22: Auswertung Tasche Z03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Z03-L01	24733.08	20.82
Z03-L02	24079.97	19.53
Z03-L03	23898.05	20.55
Z03-L04	25124.89	20.76

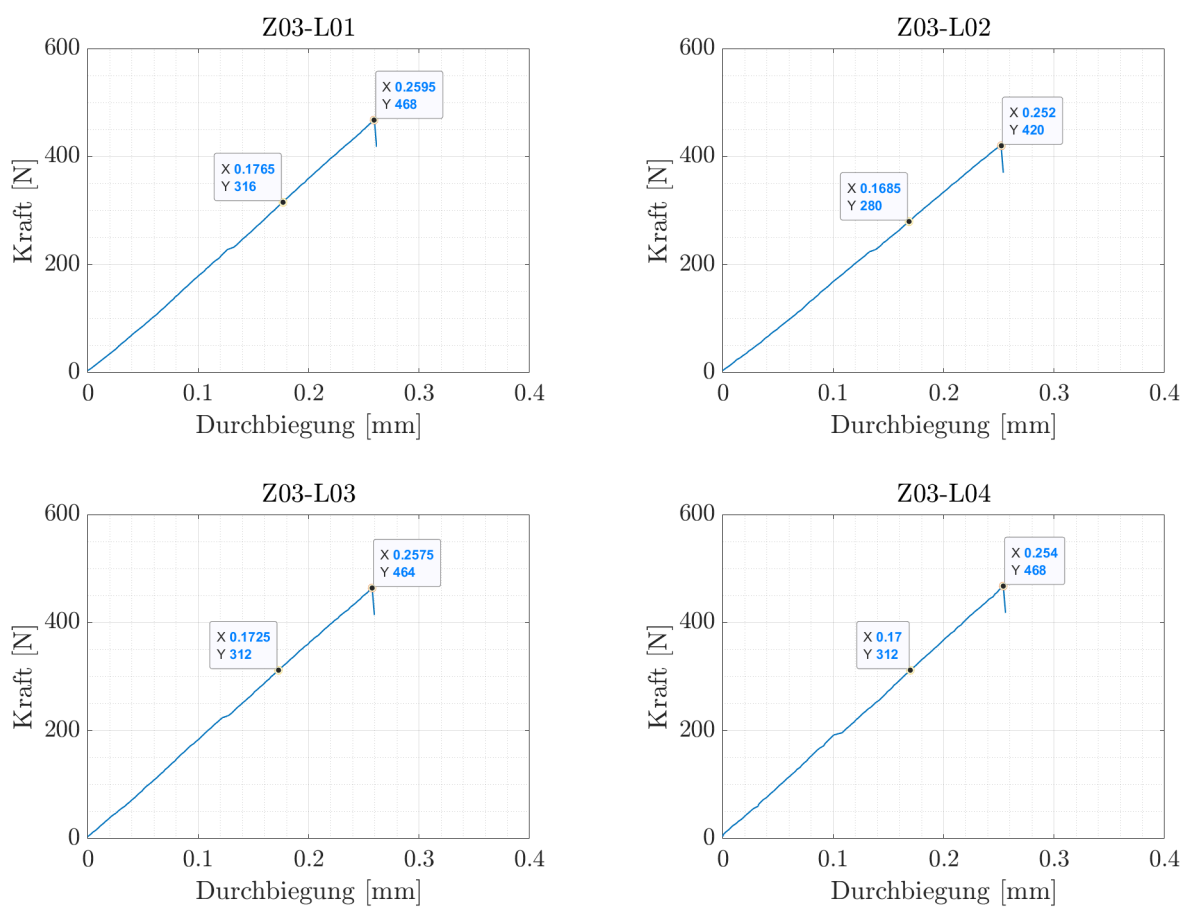


Abb. A.18: Probekörper des Taschenziegels Z03 (Werksreihe 1006°C, Längsrichtung)

Werksbrand 1006°C - in Querrichtung (1/3)

Tab. A.23: Auswertung Tasche Z04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Z04-Q01*	21154.44	18.26*
Z04-Q02*	20276.12	21.10*
Z04-Q03	21485.41	16.06
Z04-Q04*	21504.68	20.32*

*Bruch in Kerbe

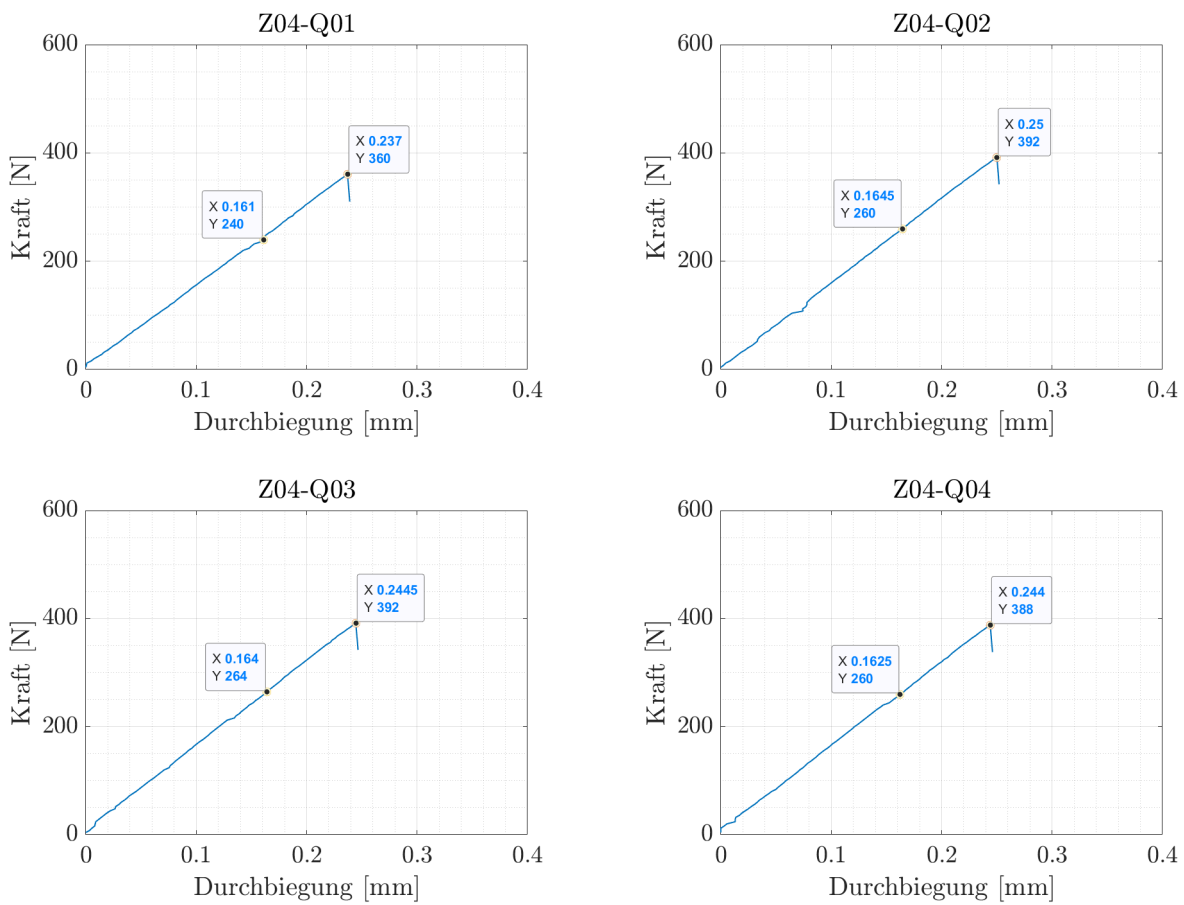


Abb. A.19: Probekörper des Taschenziegels Z04 (Werksreihe 1006°C, Querrichtung)

Werksbrand 1006°C - in Querrichtung (2/3)

Tab. A.24: Auswertung Tasche Z05

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Z05-Q01*	22334.18	21.53*
Z05-Q02	22189.54	16.69
Z05-Q03	22901.73	16.39
Z05-Q04*	23545.44	17.38*

*Bruch in Kerbe

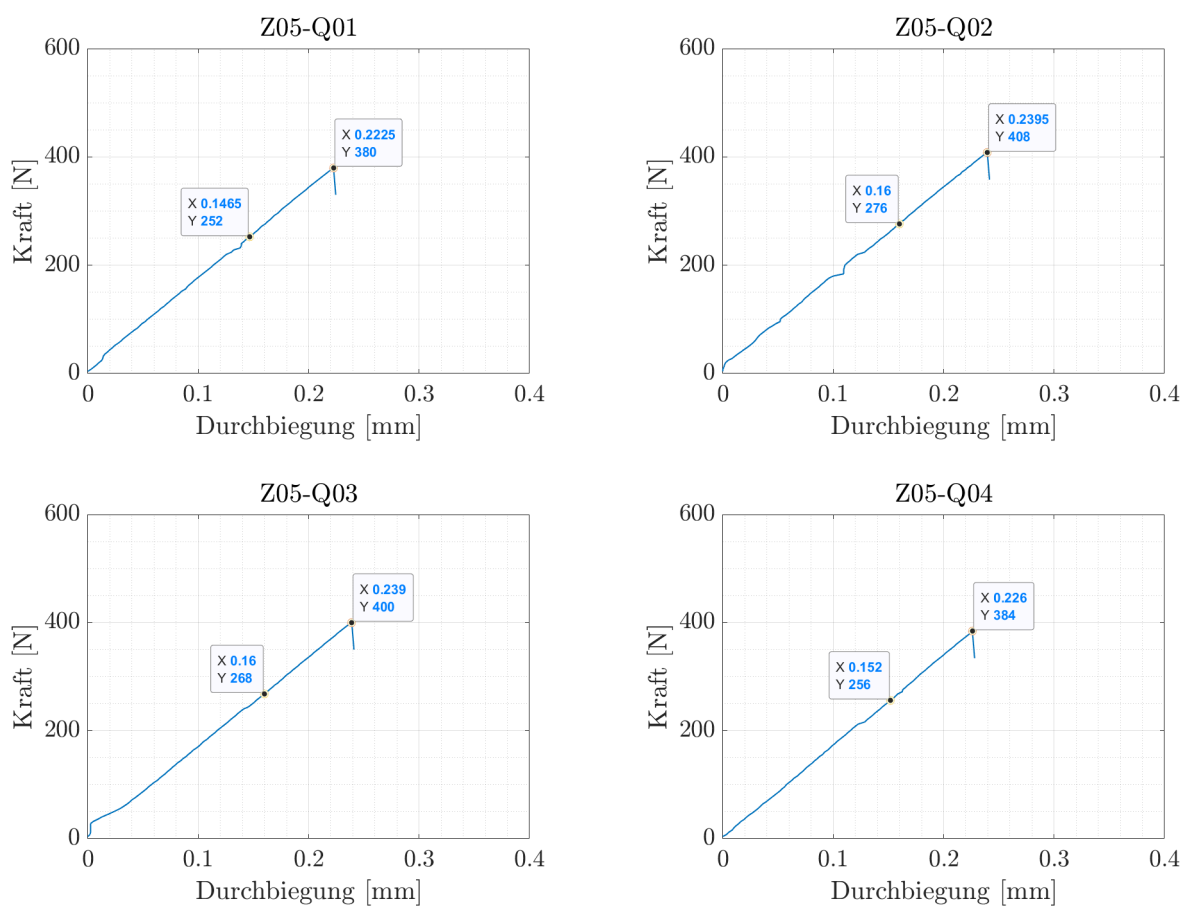


Abb. A.20: Probekörper des Taschenziegels Z05 (Werksreihe 1006°C, Querrichtung)

Werksbrand 1006°C - in Querrichtung (3/3)

Tab. A.25: Auswertung Tasche Z06

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
Z06-Q01	20584.31	16.52
Z06-Q02*	23294.22	22.90*
Z06-Q03*	23445.63	19.77*
Z06-Q04*	21658.07	19.14*

*Bruch in Kerbe

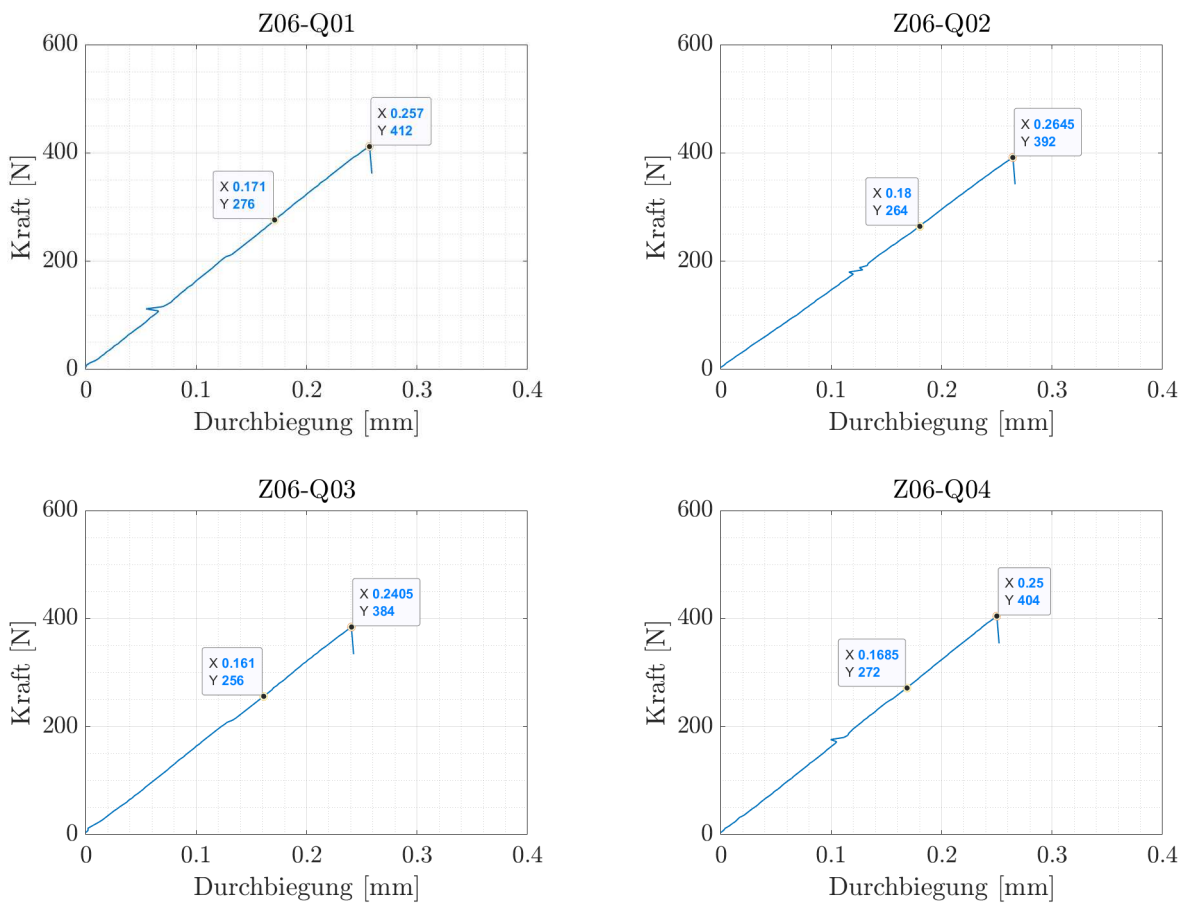


Abb. A.21: Probekörper des Taschenziegels Z06 (Werksreihe 1006°C, Querrichtung)

Labor 1032.5°C - in Längsrichtung (1/3)

Tab. A.26: Auswertung Tasche A02

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
A02-L01	28483.27	20.79
A02-L02	28212.59	21.91
A02-L03	27880.62	23.28
A02-L04	29288.94	20.15

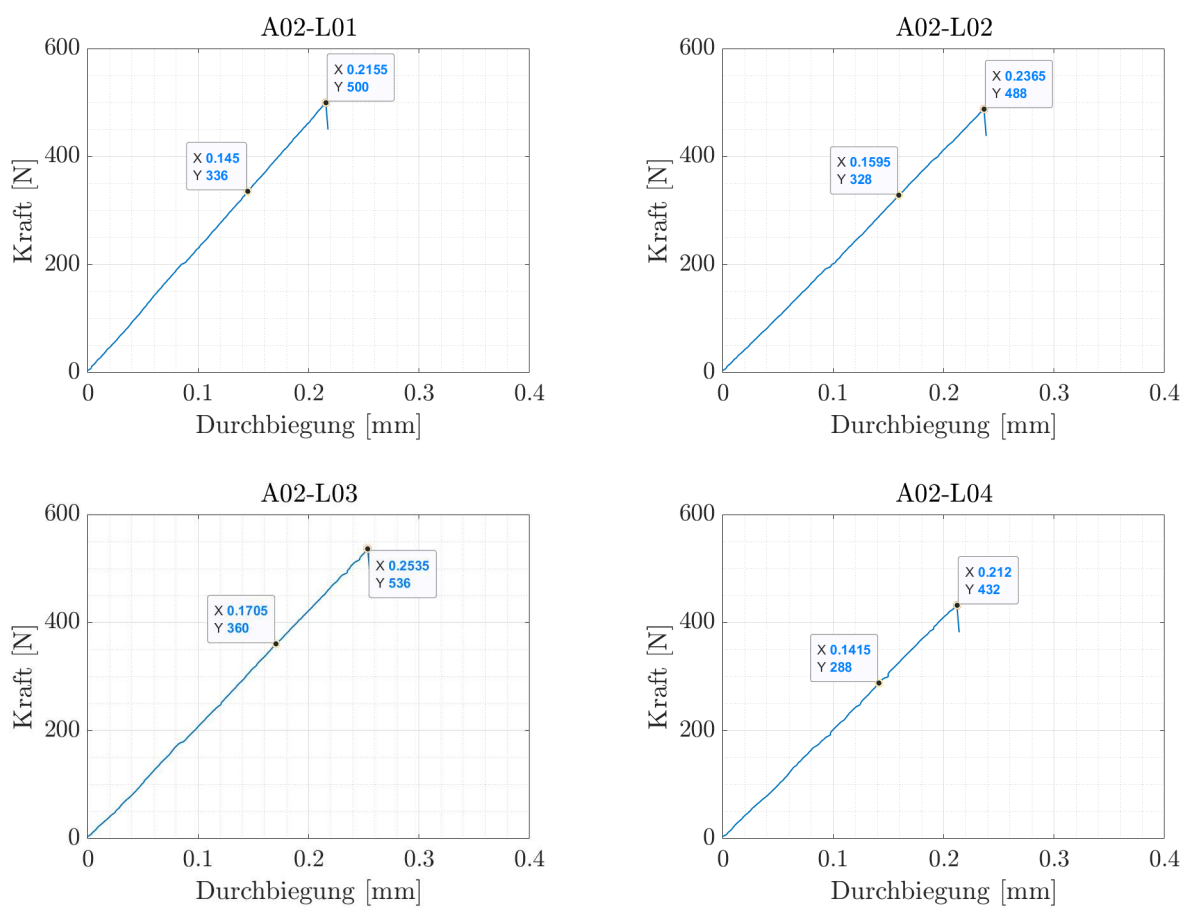


Abb. A.22: Probekörper des Taschenziegels A02 (Laborreihe 1032.5°C, Längsrichtung)

Labor 1032.5°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.27: Auswertung Tasche E02

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
E02-L01	27399.14	22.45
E02-L02	27400.90	20.17
E02-L03	27282.89	21.35
E02-L04	28608.79	22.33

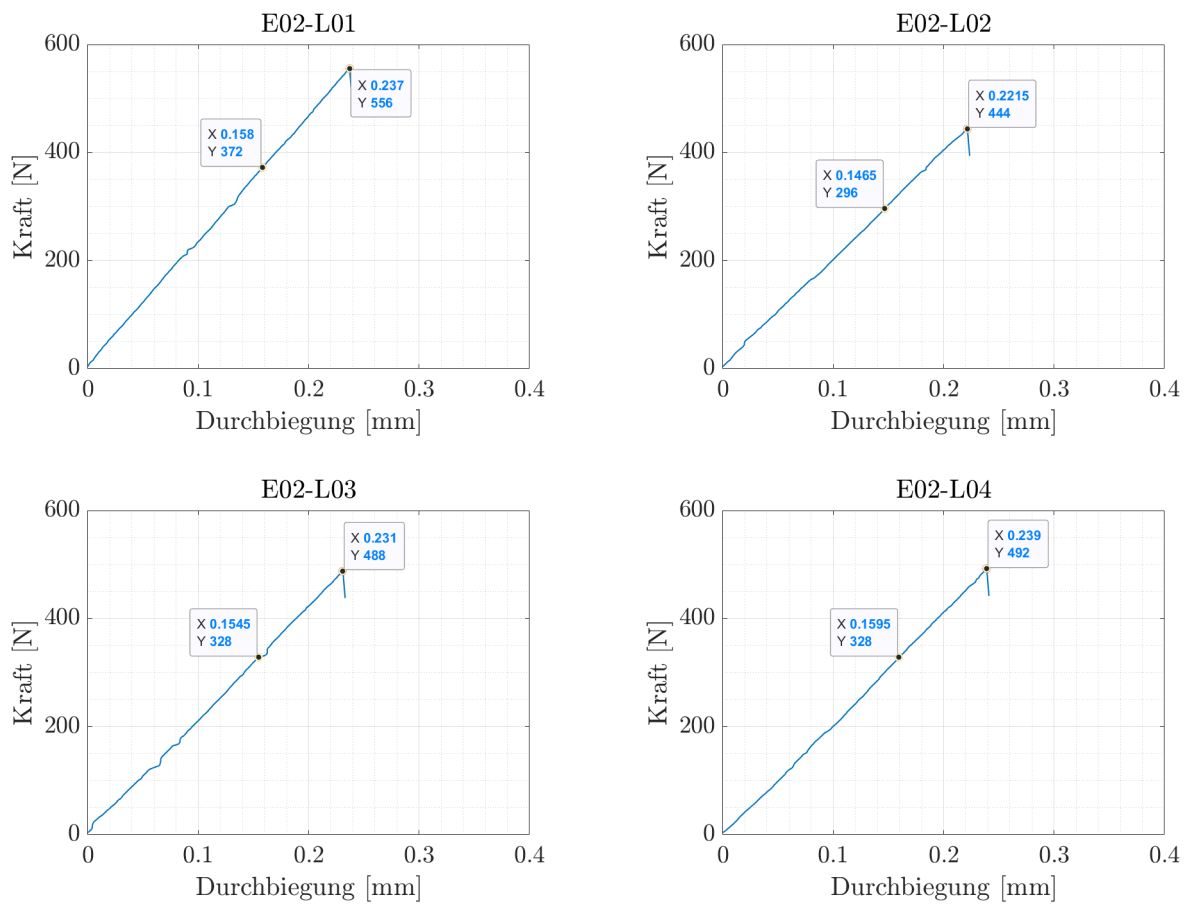


Abb. A.23: Probekörper des Taschenziegels E02 (Laborreihe 1032.5°C, Längsrichtung)

Labor 1032.5°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.28: Auswertung Tasche E04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
E04-L01	28414.10	21.91
E04-L02	27793.16	20.56
E04-L03	27821.67	21.60
E04-L04	28709.07	23.53

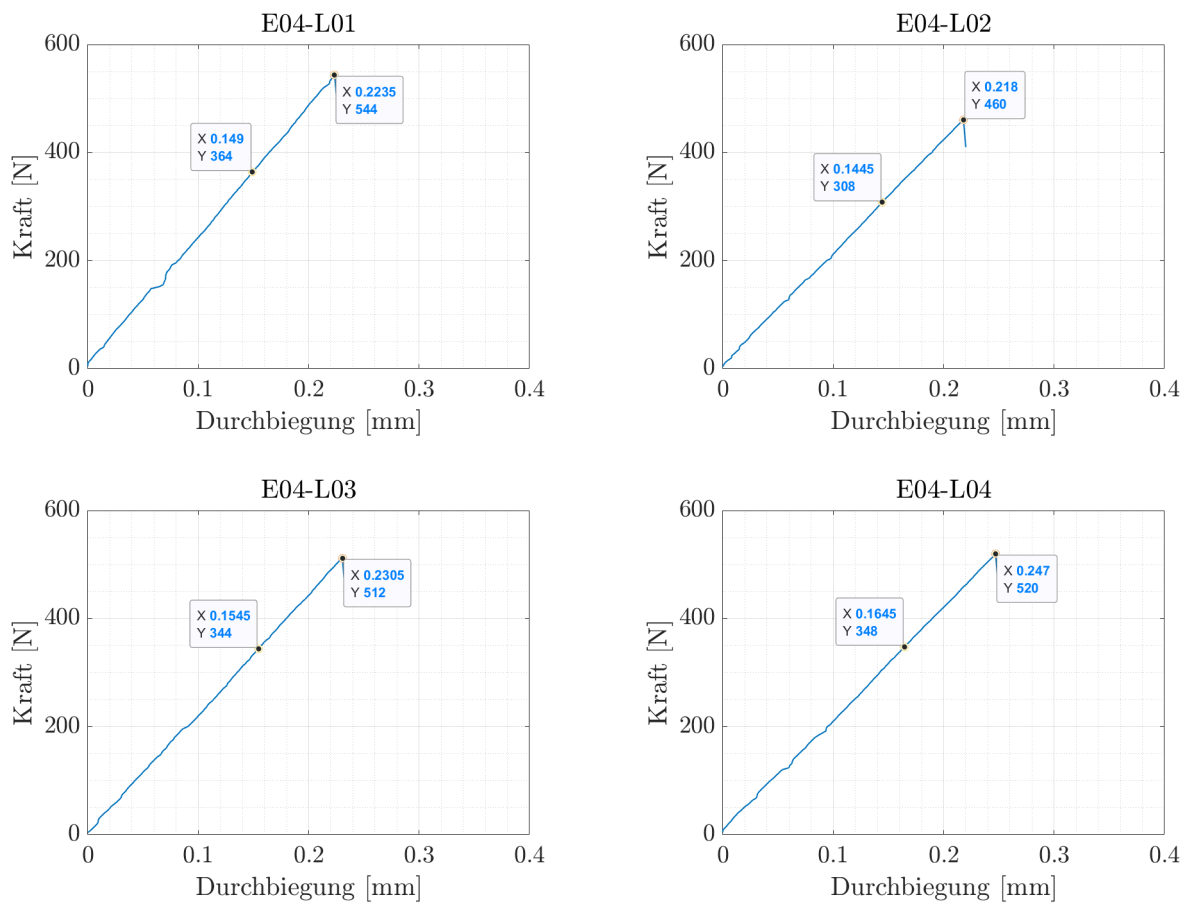


Abb. A.24: Probekörper des Taschenziegels E04 (Laborreihe 1032.5°C, Längsrichtung)

Labor 1032.5°C - in Querrichtung (1/3)

Tab. A.29: Auswertung Tasche A04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
A04-Q01*	25171.37	24.66*
A04-Q02*	25250.91	24.99*
A04-Q03*	25452.98	26.98*
A04-Q04	27822.58	17.05

*Bruch in Kerbe

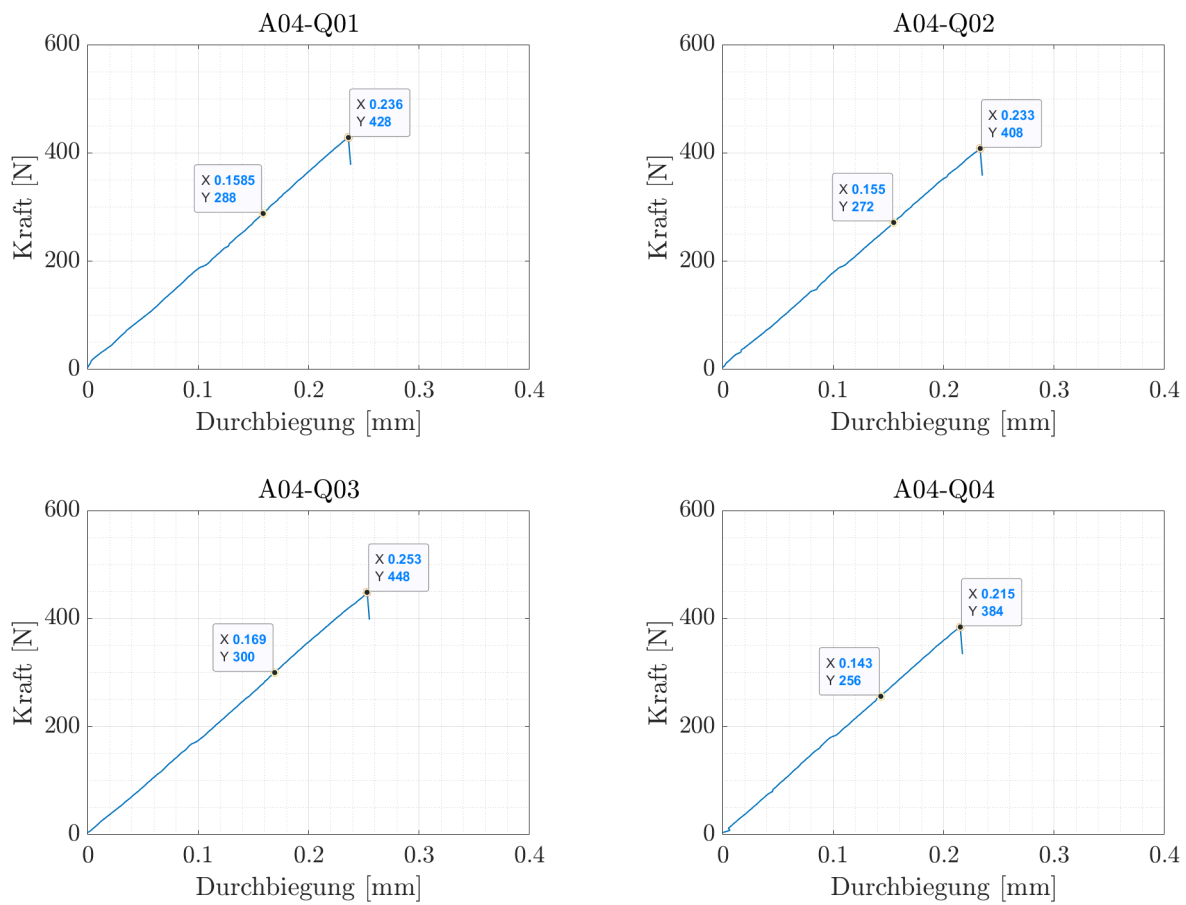


Abb. A.25: Probekörper des Taschenziegels A04 (Laborreihe 1032.5°C, Querrichtung)

Labor 1032.5°C - in Querrichtung (2/3)

Tab. A.30: Auswertung Tasche E01

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
E01-Q01*	24283.41	23.53*
E01-Q02	27335.88	18.40
E01-Q03*	27776.59	24.01*
E01-Q04*	27314.03	24.07*

*Bruch in Kerbe

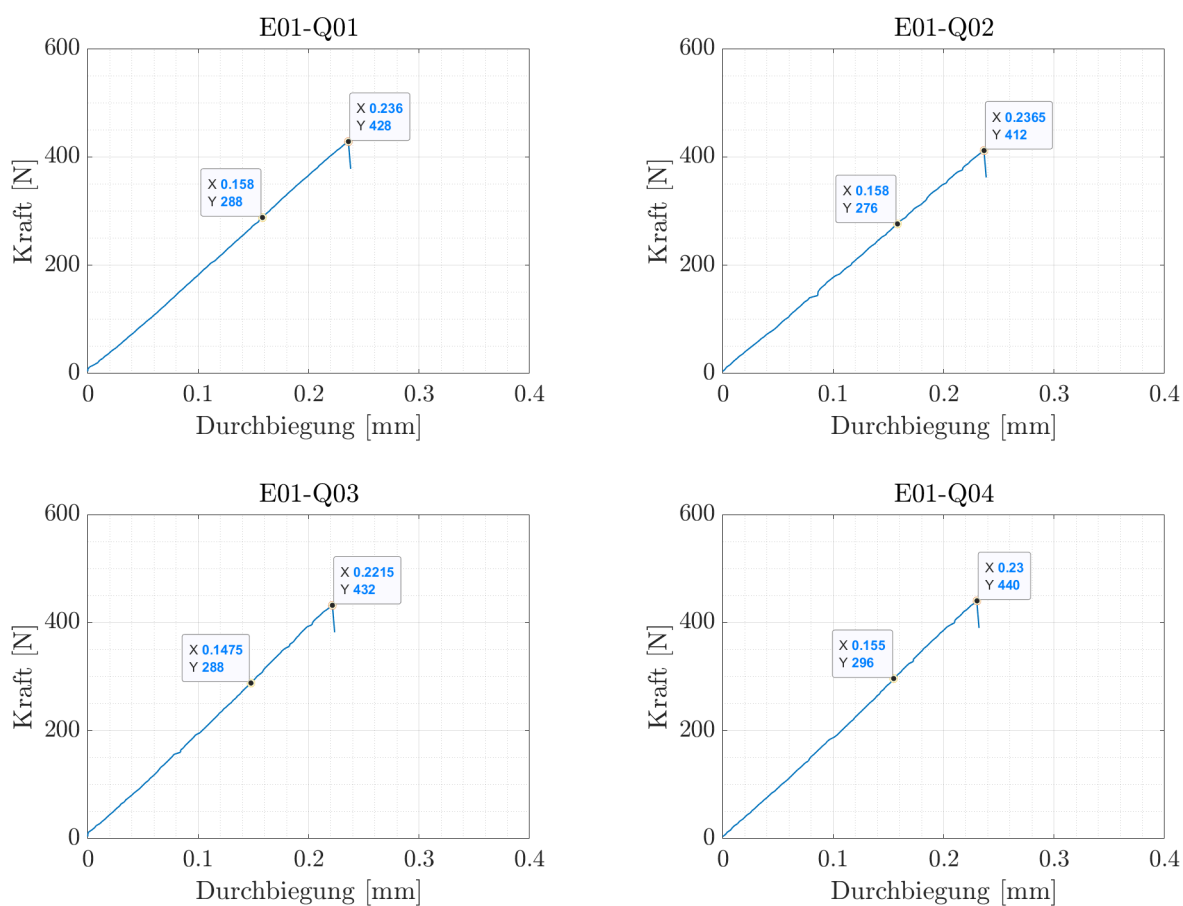


Abb. A.26: Probekörper des Taschenziegels E01 (Laborreihe 1032.5°C, Querrichtung)

Labor 1032.5°C - in Querrichtung (3/3)

Tab. A.31: Auswertung Tasche E03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
E03-Q01	25092.97	15.47
E03-Q02*	21786.51	17.35*
E03-Q03*	24908.82	25.36*
E03-Q04	25578.66	17.12

*Bruch in Kerbe

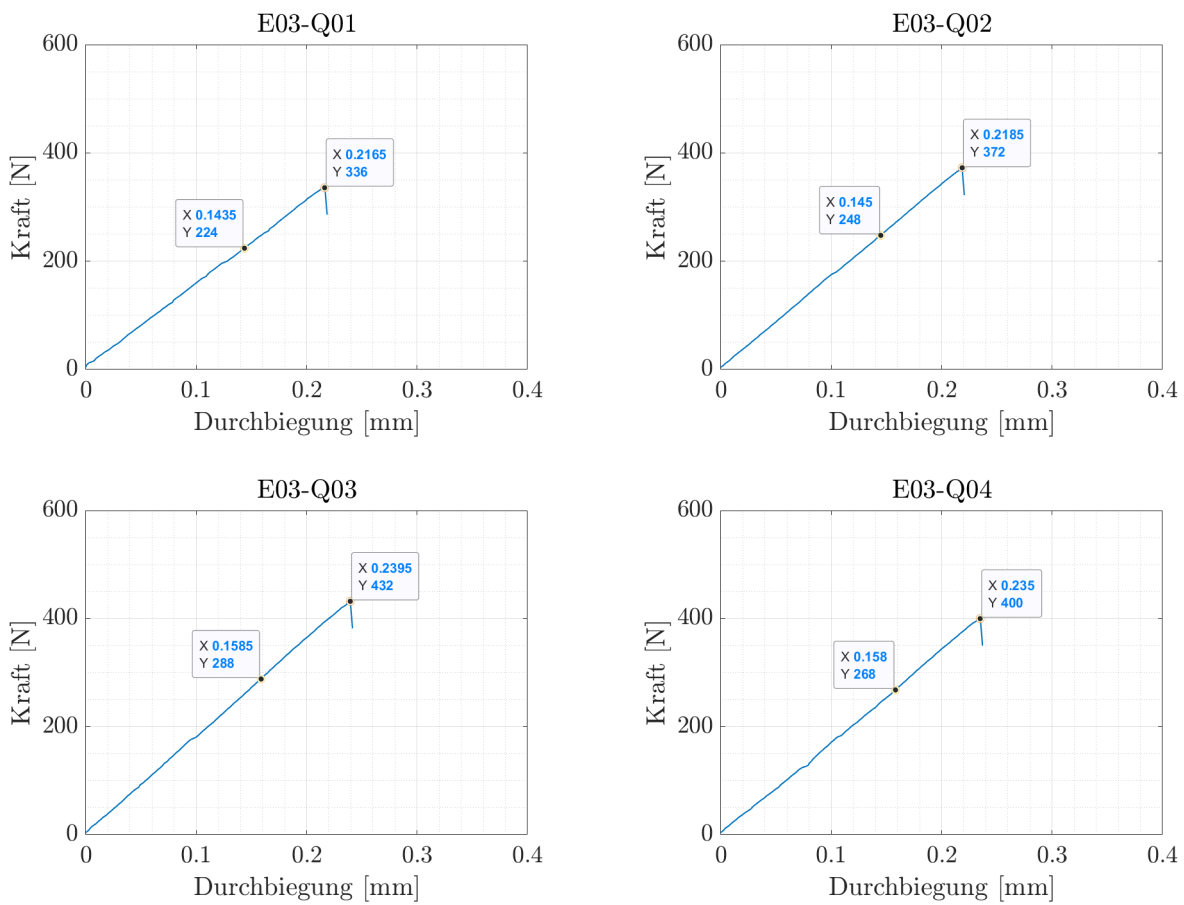


Abb. A.27: Probekörper des Taschenziegels E03 (Laborreihe 1032.5°C, Querrichtung)

Labor 1055°C - in Längsrichtung (1/3)

Tab. A.32: Auswertung Tasche I01

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
I01-L01	30261.49	23.85
I01-L02	30653.16	22.99
I01-L03	30838.85	22.88
I01-L04	31628.52	23.27

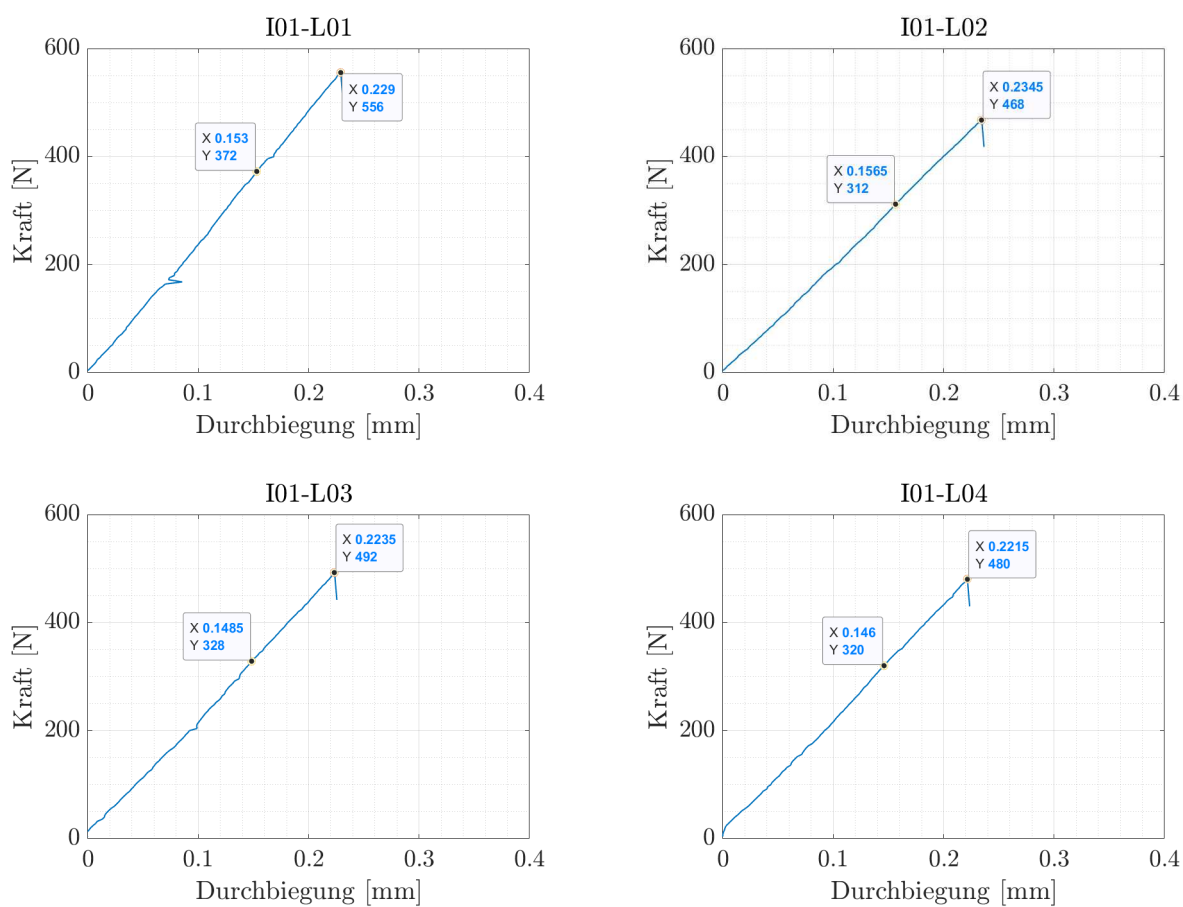


Abb. A.28: Probekörper des Taschensiegels I01 (Laborreihe 1055°C, Längsrichtung)

Labor 1055°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.33: Auswertung Tasche I03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
I03-L01	30665.79	23.86
I03-L02	31102.44	22.37
I03-L03	30042.32	20.74
I03-L04	30206.56	23.00

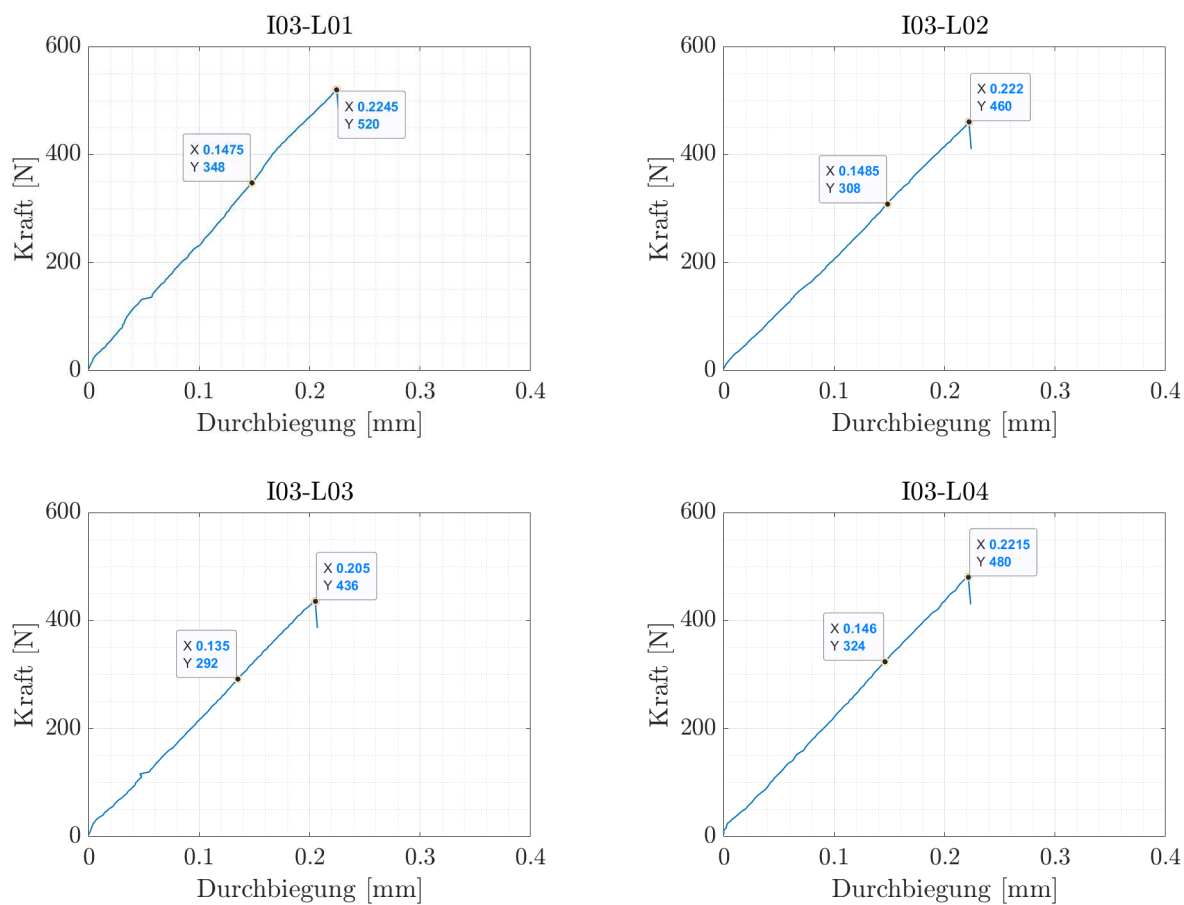


Abb. A.29: Probekörper des Taschensiegels I03 (Laborreihe 1055°C, Längsrichtung)

Labor 1055°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.34: Auswertung Tasche I04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
I04-L01	29315.94	22.90
I04-L02	30673.09	23.84
I04-L03	30973.20	22.18
I04-L04	31056.04	22.50

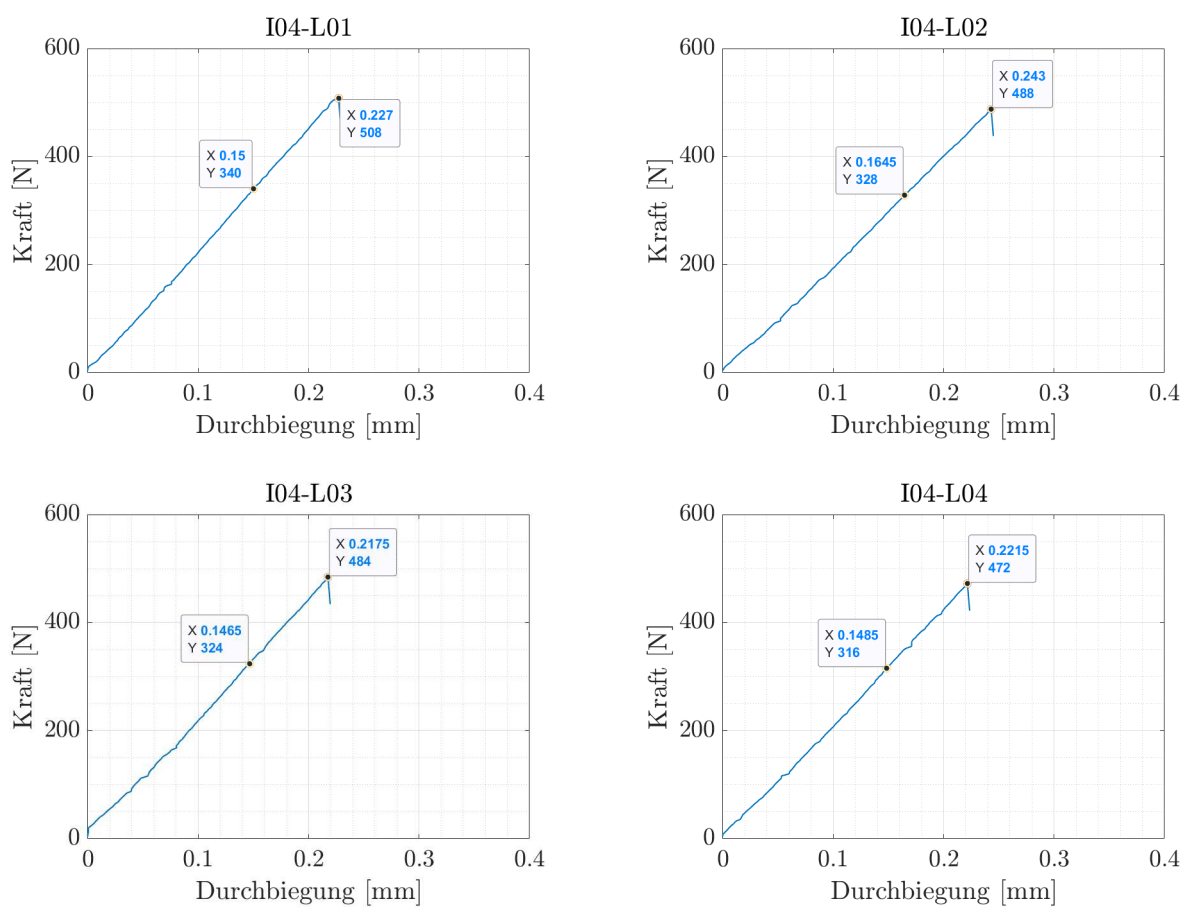


Abb. A.30: Probekörper des Taschensiegels I04 (Laborreihe 1055°C, Längsrichtung)

Labor 1086°C - in Längsrichtung (1/3)

Tab. A.35: Auswertung Tasche G02

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
G02-L01*	29394.80	23.20
G02-L02*	30723.81	21.34
G02-L03*	26409.09	21.74
G02-L04*	29158.68	22.61

*ungeschliffene Proben

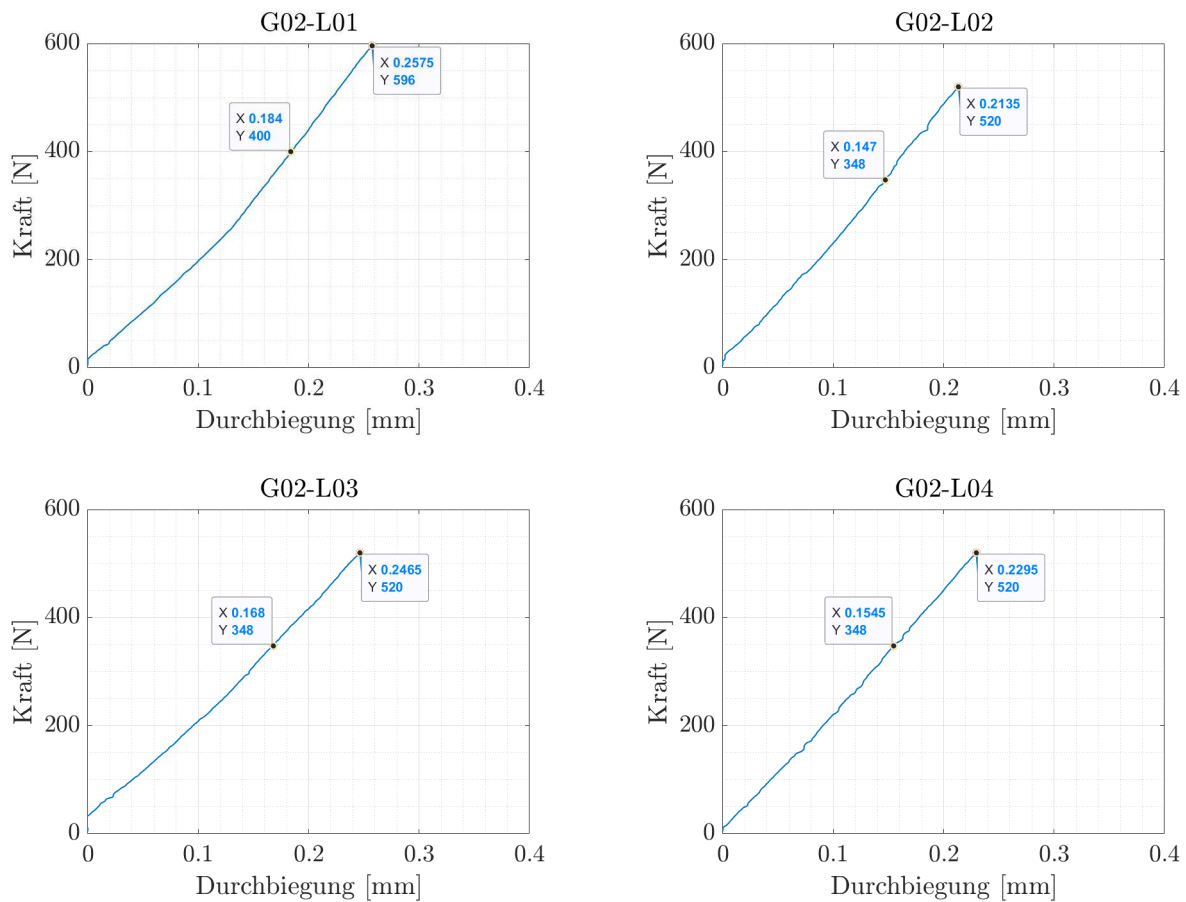


Abb. A.31: Probekörper des Taschenziegels I01 (Laborreihe 1086°C, Längsrichtung)

Labor 1086°C - in Längsrichtung (2/3)

Tab. A.36: Auswertung Tasche G03

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
G03-L01*	30748.54	22.88
G03-L02*	31182.69	19.70
G03-L03*	28445.84	21.13
G03-L04*	29213.53	23.42

*ungeschliffene Proben

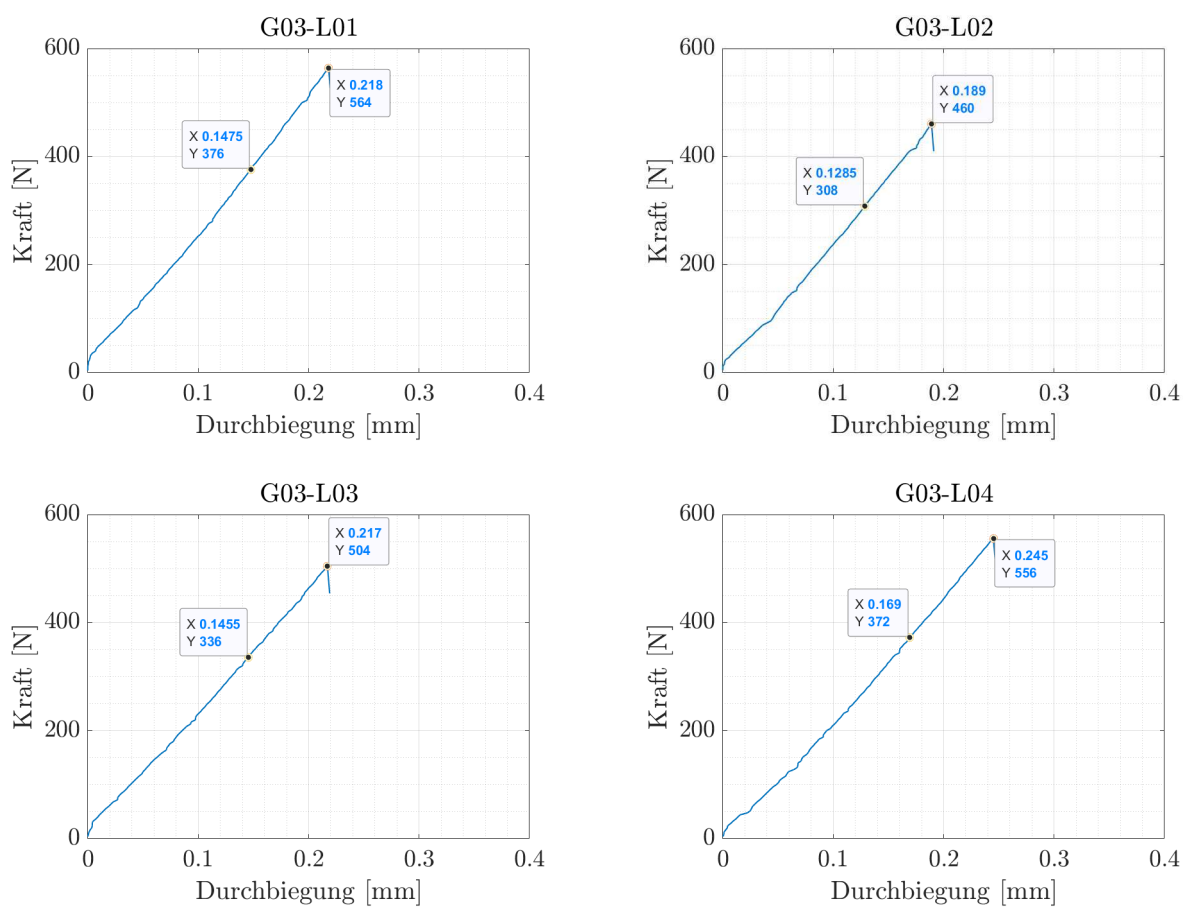


Abb. A.32: Probekörper des Taschenziegels G03 (Laborreihe 1086°C, Längsrichtung)

Labor 1086°C - in Längsrichtung (3/3)

Tab. A.37: Auswertung Tasche G04

Probename	E [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
G04-L01*	25327.32	21.90
G04-L02*	26424.08	21.97
G04-L03*	30408.06	22.60
G04-L04*	31156.27	21.40

*ungeschliffene Proben

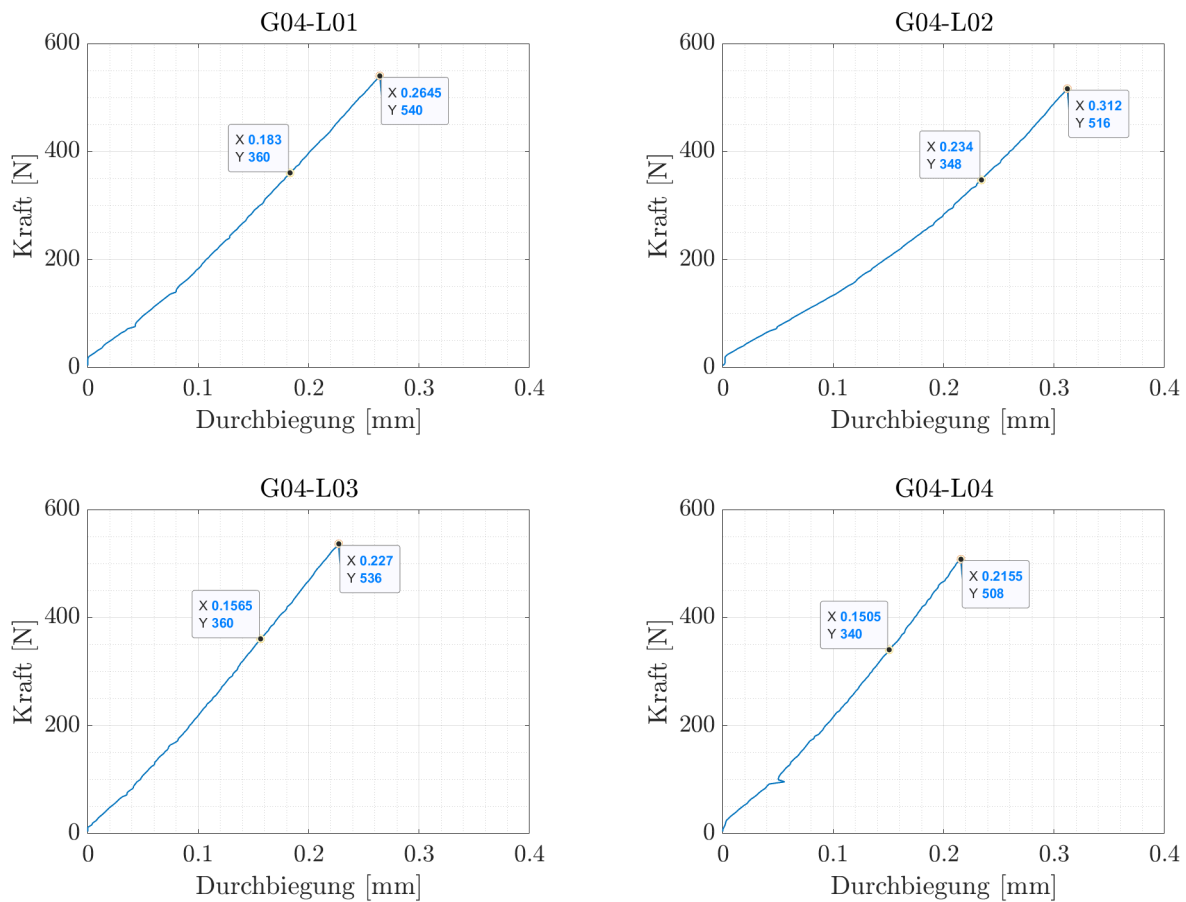


Abb. A.33: Probekörper des Taschenziegels G04 (Laborreihe 1086°C, Längsrichtung)

Anhang B

Messergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche an ganzen Ziegeln

B.1 Messergebnisse der Taschenziegel des Werkbrandes

In Tab. B.1 sind sämtliche Messergebnisse für die Taschenziegel des Werkbrandes zusammengefasst. Neben den ermittelten Daten aus den Biegezugversuchen sind Werte der Wasserabsorption sowie der hydrostatischen Wägung angeführt.

Dabei werden folgende Abkürzungen verwendet:

WA_{24h}	%	Wasserabsorption nach 24 h Wasserlagerung
ρ	g/cm^3	Nettorohdichte bzw. Trockenrohndichte
F_b	N	Bruchlast im Biegezugversuch
E_{stat}	N/mm^2	statischer E-Modul
σ_b	N/mm^2	Bruchspannung im Biegezugversuch

Tab. B.1: gesammelte Daten der Taschen 1-25

Tasche Nr.	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	F_b [N]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
1	5.211	2.145	1360	26041.40	16.45
2	5.201	2.128	1420	24105.03	17.17
3	5.253	2.117	1530	25166.56	18.50
4	4.924	2.123	1390	27430.61	16.81
5	4.846	2.135	1300	25176.62	15.72
6	5.306	2.113	1330	23671.29	16.08
7	4.908	2.130	1530	24600.41	18.50
8	5.111	2.126	1500	23114.94	18.14
9	5.206	2.113	1370	24202.78	16.57
10	5.313	2.114	1420	24889.59	17.17
11	5.176	2.121	1460	26598.92	17.66
12	4.962	2.122	1450	24581.90	17.54
13	5.253	2.113	1390	23930.91	16.81
14	5.340	2.116	1370	24622.39	16.57
15	4.971	2.130	1410	24360.98	17.05
16	4.967	2.128	1490	24261.99	18.02
17	5.231	2.118	1350	24487.62	16.33
18	5.306	2.113	1500	23950.26	18.14
19	5.343	2.111	1320	25726.84	15.96
20	4.780	2.145	1460	28182.43	17.66
21	4.934	2.140	1410	26789.99	17.05
22	4.789	2.137	1530	25518.93	18.50
23	4.879	2.137	1440	23950.19	17.41
24	4.976	2.131	1370	24683.53	16.57
25	4.586	2.139	1360	24014.41	16.45

B.1.1 Last-Verschiebungsdiagramme der Taschenziegel des Werkbrandes

Aus den nachfolgend zu sehenden Last-Verschiebungsdiagrammen wird der E-Modul gemäß Kap. 5.3 berechnet. Die Diagramme sind bereits um den Anteil des Verschiebungsweges des Gummis korrigiert.

Taschenziegel des Werkbrandes bei 1006°C (1/5)

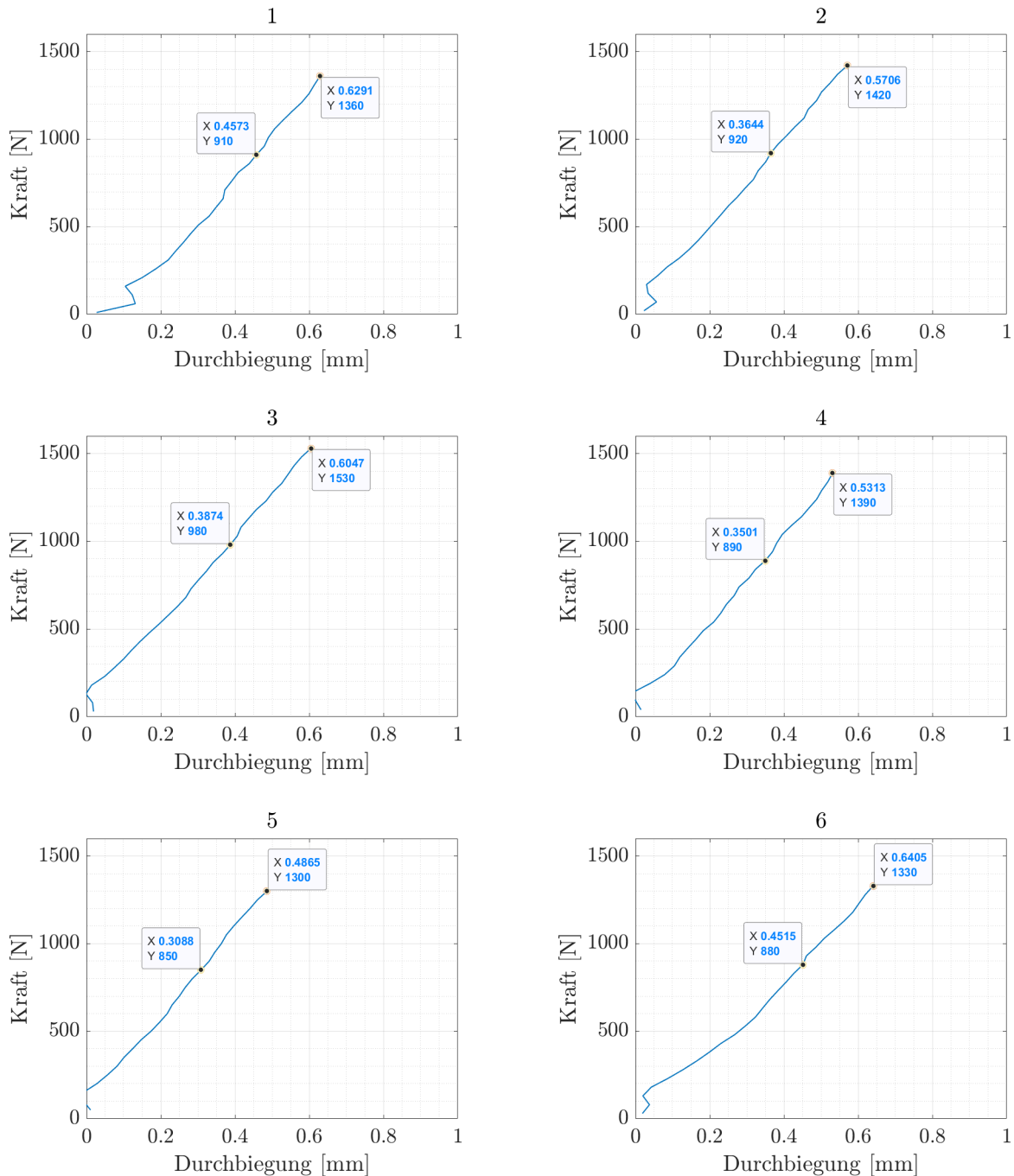


Abb. B.1: Taschenziegel Werksbrand 1 - 6

Taschenziegel des Werkbrandes bei 1006°C (2/5)

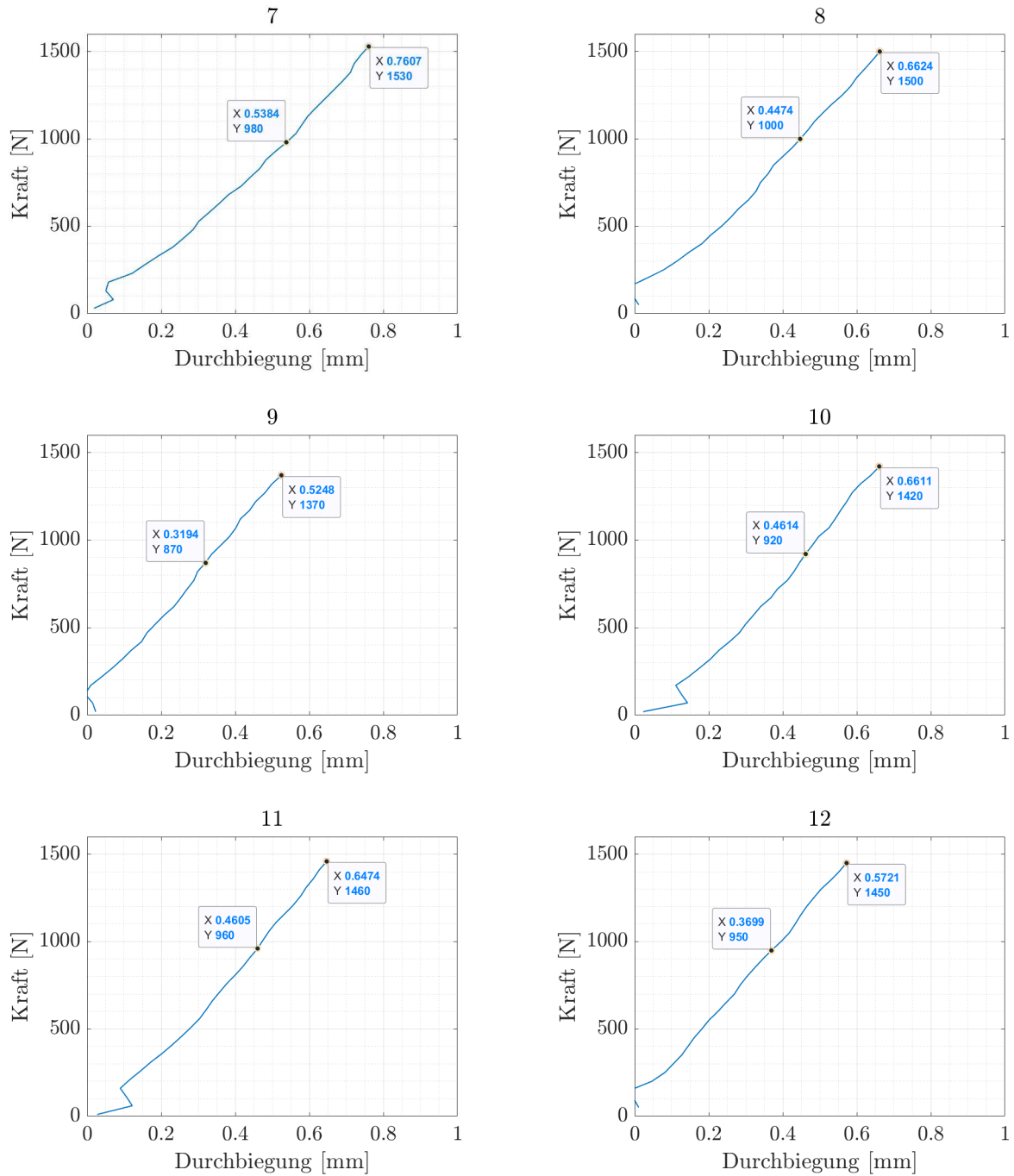


Abb. B.2: Taschenziegel Werksbrand 7 - 12

Taschenziegel des Werkbrandes bei 1006°C (3/5)

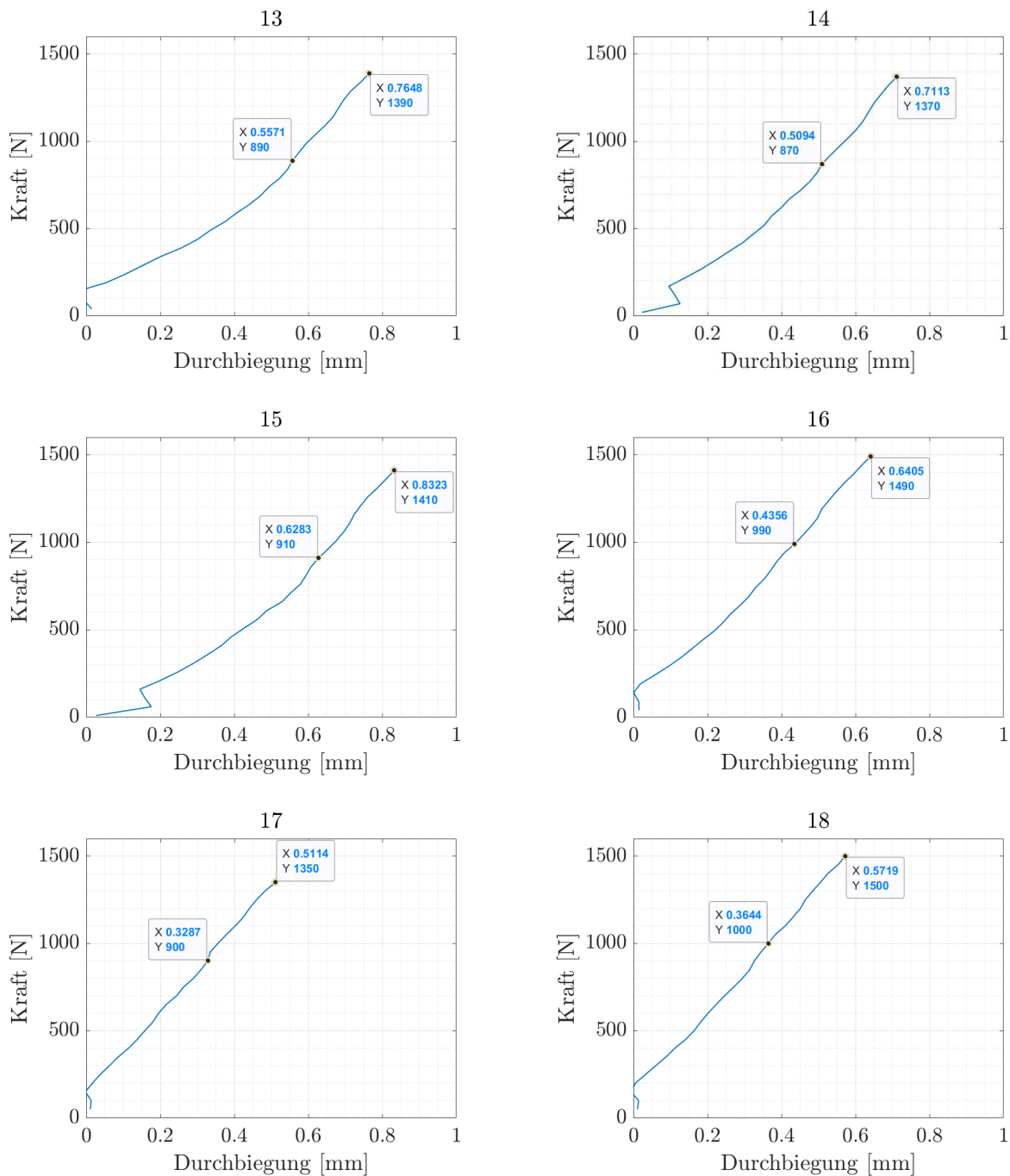


Abb. B.3: Taschenziegel Werksbrand 13 - 18

Taschenziegel des Werkbrandes bei 1006°C (4/5)

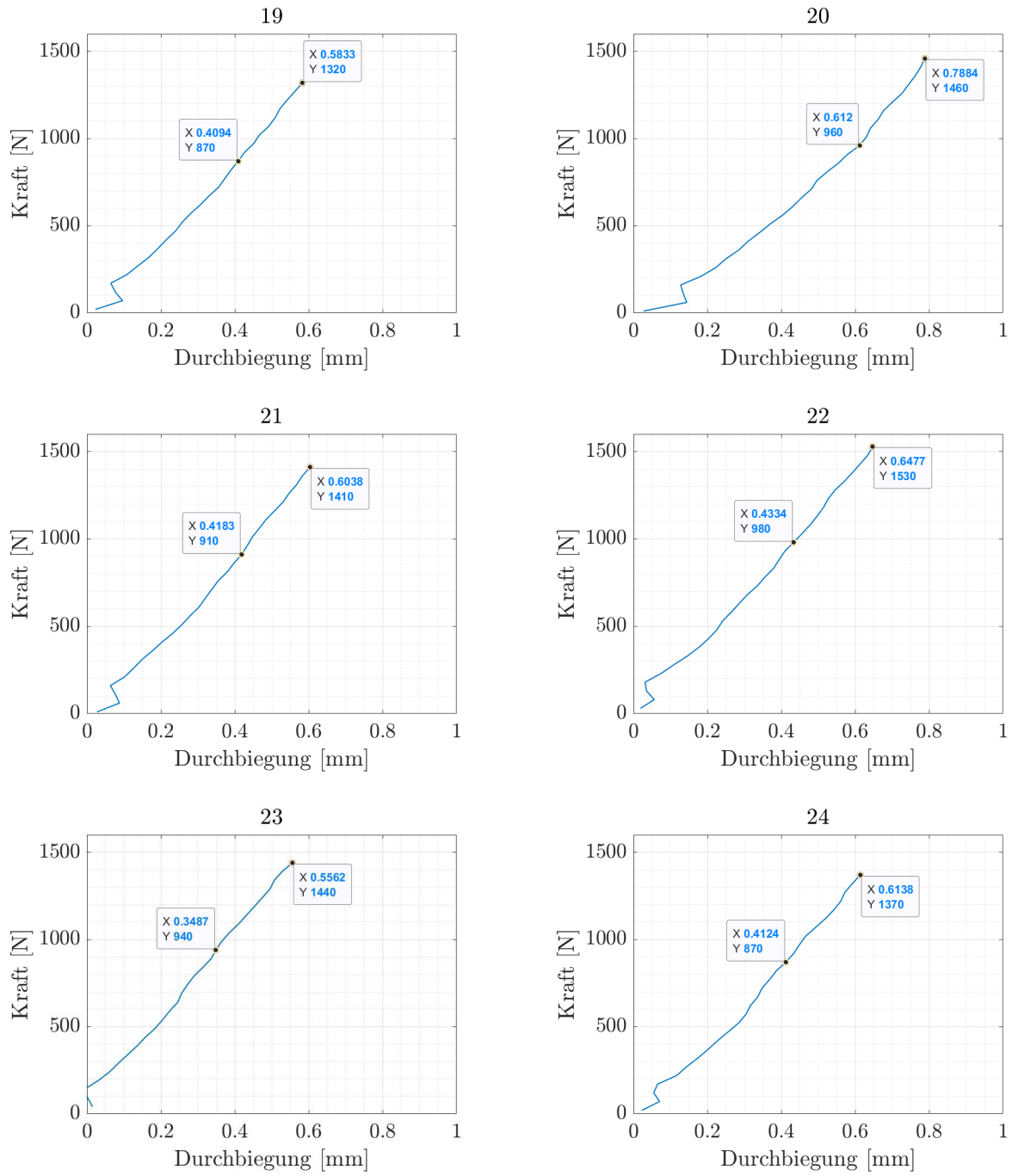


Abb. B.4: Taschenziegel Werksbrand 19 - 24

Taschenziegel des Werkbrandes bei 1006°C (5/5)

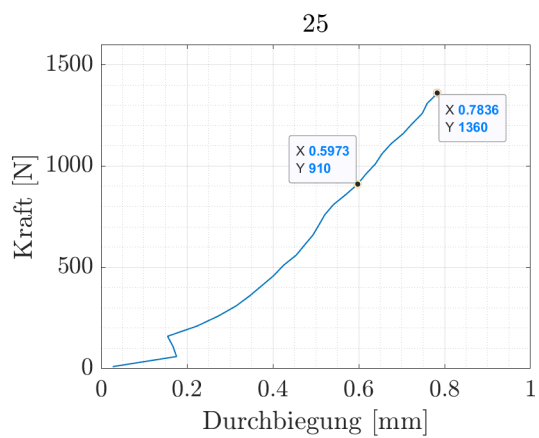


Abb. B.5: Taschenziegel Werksbrand 25

B.2 Messergebnisse der Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur

Die Bezeichnung der im Labor gebrannten Taschen erfolgt im nachfolgenden anhand der zugewiesenen Ziegelbezeichnung samt ihrer tatsächlichen Brenntemperatur, welche durch die auf ihnen platzierten Bullersringe ermittelt wurde.

Folgende Abkürzungen werden in Tab. B.2 verwendet:

T	°C	Brenntemperatur
WA _{24h}	%	Wasserabsorption nach 24 h Wasserlagerung
ρ	g/cm ³	Nettorohddichte bzw. Trockenrohddichte
F_b	N	Bruchlast im Biegezugversuch
E_{stat}	N/mm ²	statischer E-Modul
σ_b	N/mm ²	Bruchspannung im Biegezugversuch

Tab. B.2: gesammelte Daten der im Labor gebrannten Taschen

Tasche Nr.	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	F_b [N]	E_{stat} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
D5-946	946	9.792	1.961	1130	14123.47	12.54
D1-949	949	9.315	1.975	1150	15854.47	12.76
H5-977	977	8.211	2.003	1260	16682.20	14.27
C5-978	978	8.393	2.006	1320	18232.61	14.95
H2-981	981	8.020	2.010	1340	18462.49	15.18
C2-982	982	7.890	2.019	1200	17910.00	13.59
F5-991	991	6.267	2.071	1370	20896.66	16.12
B5-994	994	6.339	2.077	1310	22203.43	15.42
F2-999	999	5.844	2.090	1410	20972.90	16.59
B3-1005	1005	5.769	2.099	1520	15808.23	17.89
E5-1017	1017	4.022	2.178	1460	23891.87	18.03
A5-1022	1022	3.779	2.179	1320	24092.00	16.30
A3-1038	1038	3.335	2.204	1600	25277.90	20.19
A1-1039	1039	3.399	2.208	1500	25466.95	18.93
I5-1038	1038	2.906	2.224	1420	29027.20	17.92
I2-1050	1050	2.773	2.235	1540	33011.42	19.54
G5-1070	1070	2.237	2.263	1610	31387.29	20.43
G1-1095	1095	2.123	2.271	1540	30585.29	19.54

B.2.1 Last-Verschiebungsdiagramme der Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur

Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur (1/3)

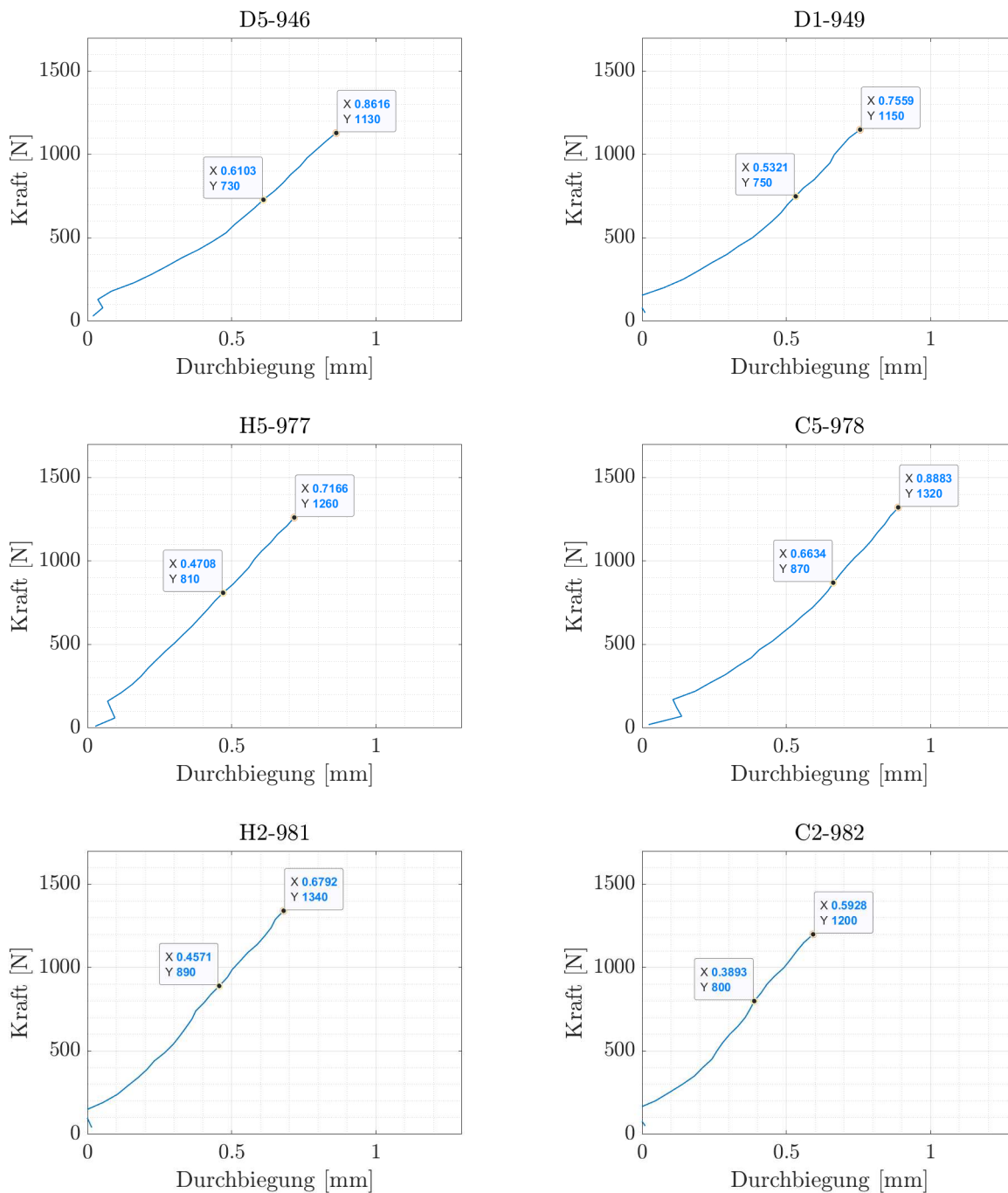


Abb. B.6: Taschenziegel des Laborbrandes

Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur (2/3)

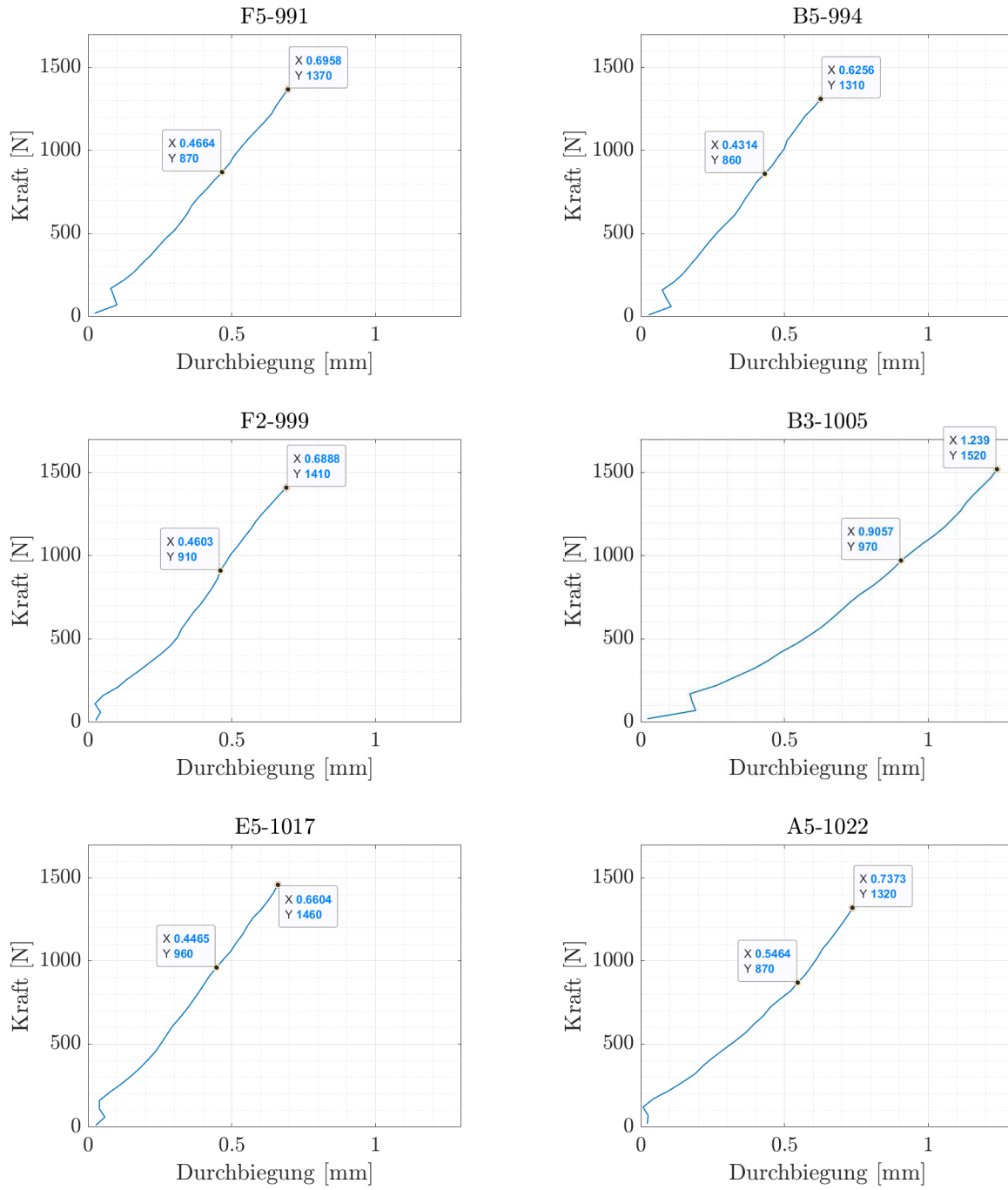


Abb. B.7: Taschenziegel des Laborbrandes

Taschenziegel unterschiedlicher Brenntemperatur (3/3)

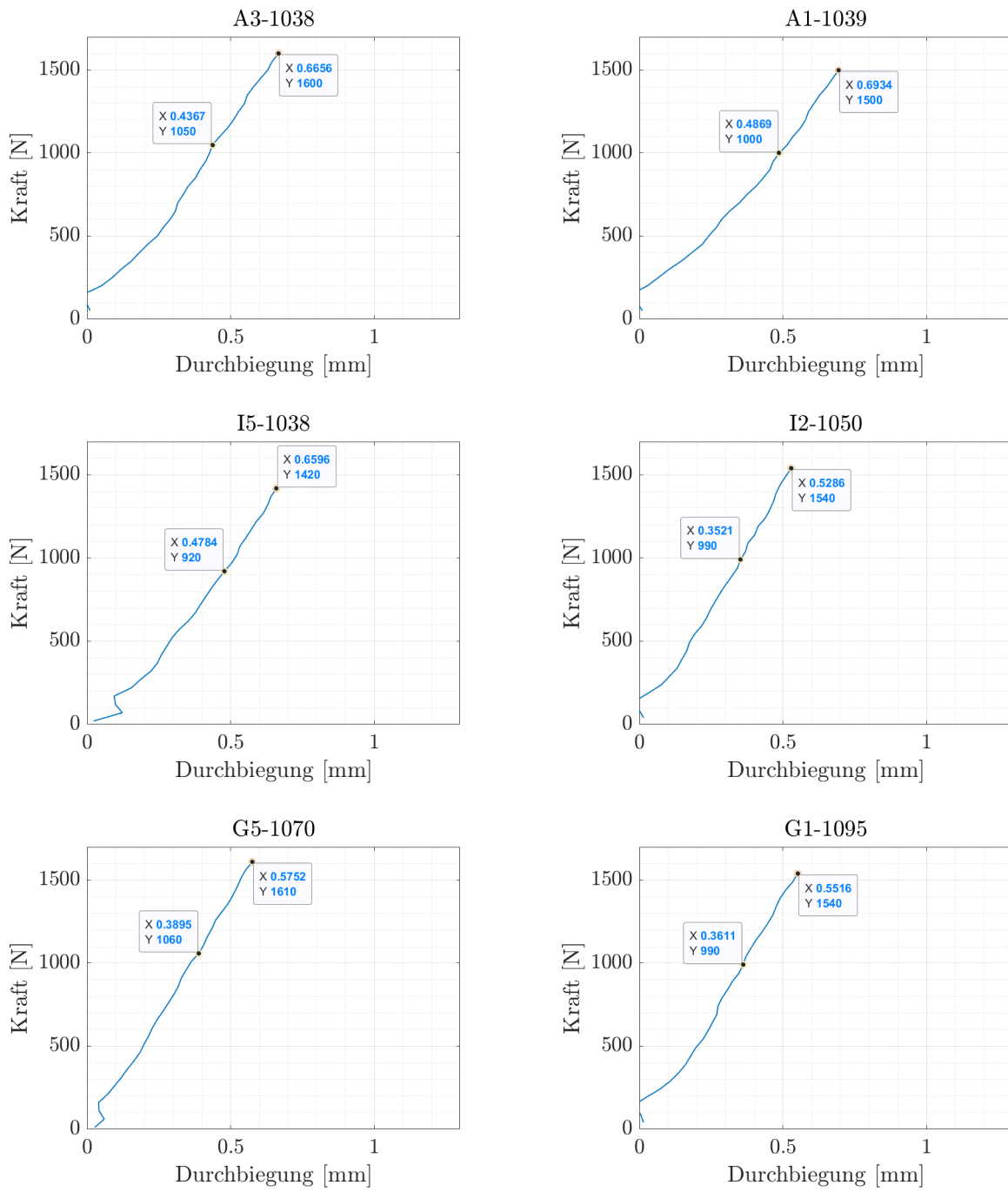


Abb. B.8: Taschenziegel des Laborbrandes

B.3 Messergebnisse der Landdach Verschiebeziegel

In Tab. B.2 sind die gesammelten Daten zu den Landdach Verschiebeziegel enthalten. Dabei werden folgende Abkürzungen verwendet:

T	°C	Brenntemperatur
WA _{24h}	%	Wasserabsorption nach 24 h Wasserlagerung
ρ	g/cm ³	Nettorohdichte bzw. Trockenrohichte
F_b	N	Bruchlast im Biegezugversuch

Tab. B.3: gesammelte Daten der Landdach Verschiebeziegel

Tasche Nr.	T [°C]	WA _{24h} [%]	ρ [g/cm ³]	F_b [N]
1a	1022	4.74	2.135	2650
1b	1022	5.81	2.089	2690
1c	1022	5.08	2.125	2560
1d	1022	5.56	2.103	2770
1e	1022	5.51	2.102	2960
2a	1015	5.34	2.109	2700
2b	1015	5.21	2.112	2450
2c	1015	5.45	2.103	2610
2d	1015	5.28	2.109	2570
2e	1015	5.19	2.114	2830
3a	1008	5.26	2.111	2730
3b	1008	5.13	2.118	2930
3c	1008	5.04	2.116	2910
3d	1008	5.21	2.114	2670
3e	1008	4.85	2.128	2710
4a	1011.5	4.79	2.130	2430
4b	1011.5	5.36	2.102	2630
4c	1011.5	5.20	2.108	2540
4d	1011.5	4.92	2.123	2520
4e	1011.5	4.90	2.114	2890
5a	1015	4.87	2.119	2950
5b	1015	5.79	2.085	2630
5c	1015	4.92	2.118	2540
5d	1015	5.61	2.087	2560
5e	1015	4.64	2.124	2840